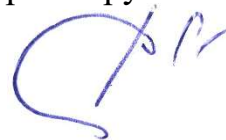


На правах рукописи



Дмитриева Оксана Сергеевна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АППАРАТОВ ВИХРЕВОГО ТИПА ДЛЯ
ПРОВЕДЕНИЯ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ
ДИСПЕРСНЫХ СРЕД**

2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Казань – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

Научный консультант: доктор технических наук, профессор,
Николаев Андрей Николаевич

**Официальные
оппоненты:** **Колобов Михаил Юрьевич,**
доктор технических наук, доцент, федеральное
государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Ивановский
государственный химико-технологический
университет», профессор кафедры технологических
машин и оборудования;

Сидягин Андрей Ананьевич,
доктор технических наук, доцент, Дзержинский
политехнический институт (филиал) федерального
государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Нижегородский
государственный технический университет им.
Р.Е. Алексеева», профессор кафедры технологического
оборудования и транспортных систем;

Тукмаков Алексей Львович,
доктор физико-математических наук, старший
научный сотрудник, федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Казанский национальный
исследовательский технический университет им. А.Н.
Туполева-КАИ», профессор кафедры теплотехники и
энергетического машиностроения.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Волгоградский государственный технический
университет», г. Волгоград.

Защита диссертации состоится 26 сентября 2025 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.312.05, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, зал заседаний Ученого совета А-330).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» и на сайте <https://www.kstu.ru/servlet/contentblob?id=550924>.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, д.т.н., доцент



Мухаметзянова Асия
Габдулмазитовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В связи с текущими серьезными проблемами в области энерго- и ресурсосбережения, охраны окружающей среды методы интенсификации в промышленности привлекли значительное внимание как в научном сообществе, так и в промышленном секторе. Интенсификация процессов действительно необходима для повышения производительности, эффективности производственных процессов и качества готовой продукции. В последние годы появляется все большее количество публикаций, содержащих результаты и описания научных исследований, направленных на совершенствование технологических процессов с использованием различных методов, как активных, так и пассивных. Активный метод требует применения внешних воздействий, таких как электрическое поле, акустическая вибрация или механическая вибрация поверхности, чтобы вызвать сбой и изменить структуру потока. Как правило, громоздкость и дороговизна таких методов ограничивает их применение. Пассивный метод, требующий особой геометрии поверхности, создает значительный вторичный поток и не требует дополнительного подвода энергии извне. Второй метод широко используется для создания в оборудовании закрученных (вихревых) течений газа и жидкости. Многочисленное разнообразие практического приложения закрученных потоков для интенсификации процессов, в том числе гидромеханических, объясняет интерес к ним широкого круга исследователей. Однако особенности поведения вихревых течений являются причиной усложнения их аналитического описания и проведения экспериментальных исследований.

При проектировании оборудования необходима точная оценка наилучшего компромисса между увеличением эффективности процесса и снижением сопротивления потоку. Решение указанных задач делает актуальной проблему разработки более эффективных вихревых аппаратов для интенсификации процессов разделения среды и классификации дисперсных частиц на промышленных предприятиях. При этом, необходимо учитывать, что дисперсные среды в потоках настолько сильно различаются по размеру, плотности, форме, липкости, эрозионной способности и другим характеристикам, что ни один тип аппарата не подходит для обработки всего спектра дисперсной фазы.

В большинстве процессов разделения многофазных потоков среди широкого класса вихревых аппаратов используются конструкции с одиночными вихрями и турбулентными потоками. Проведение всестороннего анализа рассматриваемых конструкций, несмотря на все преимущества, показало, что устройства с одиночным вихрем не всегда обеспечивают необходимую эффективность сепарации или классификации частиц из-за неравномерного распределения фаз в поперечном сечении аппаратов и снижения крутки потока по высоте аппарата. При этом в большинстве случаев увеличение крутки влечет за собой значительное увеличение затрат на преодоление гидравлического сопротивления. Кроме того, повышению эффективности сепарации частиц препятствует различие времени нахождения в аппарате частиц различных размеров.

В связи с этим, перспективным и актуальным направлением является теоретическое и экспериментальное исследование гидродинамики и сепарации многофазных сред в технологическом оборудовании, в котором реализуются мультивихревые течения.

Минивихри (множественные вихри малого масштаба) занимают промежуточное положение между одиночными вихрями и развитой турбулентностью. Они позволяют создавать множество локальных зон с высокой интенсивностью вращения, что способствует более эффективной сепарации и классификации частиц. Мультивихревые устройства могут быть более компактными и легкими по сравнению с традиционными устройствами. Сонаправленность вихрей в мультивихревых устройствах принципиально меняет структуру потока, создавая согласованное силовое поле вместо хаотичных локальных возмущений, формируется самоподдерживающаяся вихревая структура, где каждый последующий вихрь усиливает эффект предыдущего. Практическим следствием становится улучшение гидродинамических характеристик потока, повышение эффективности процесса сепарации частиц и очистки газов, снижение гидравлического сопротивления. Компактная конструкция с малым расстоянием от центра потока до стенки позволяет сократить время осаждения на 40-60%. За счет формирования множества вихрей малого радиуса увеличивается угловая скорость частиц. То, что центробежная сила растет квадратично с увеличением угловой скорости, позволяет добиться высокой степени сепарации без увеличения входной скорости потока.

Работа выполнена в рамках нескольких грантов Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – МК-4522.2018.8 по теме «Разработка перспективной технологии сепарации мелкодисперсных твердых или жидких частиц из газового потока» (2018-2019 гг.), МК-616.2020.8 по теме «Разработка теоретических основ и аппаратного оформления разделения эмульсий с близкими значениями плотностей в прямоугольных сепараторах» (2020-2021 гг.), МК-2710.2021.4 по теме «Экспериментально-теоретическое исследование процессов улавливания и классификации твердых дисперсных частиц в центробежно-вихревых аппаратах» (2021-2022 гг.), гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан «Научно-технологическое развитие Республики Татарстан» (соглашение от 16.12.2024 г. № 113/2024-ПД).

Степень научной разработанности проблемы. Проблеме исследований вихревых течений и устройств посвящены работы зарубежных и отечественных ученых: Тейлор Г.И., Бенар Г.К., Гупта А., Лилли Д., Сайред Н., Жуковский Н.Е., Ранк Ж.Дж., Страус В., Дубинский М.Г., Шваб А.В., Терехов В.И., Гольдштик М.А., Гуляев А.И., Меркулов А.П., Жаворонков Н.М., Николаев Н.А., Николаев А.Н., Щукин В.К., Халатов А.А., Дмитриев А.В., Смутьский И.И. и др. Несмотря на значительное количество имеющихся к настоящему времени работ, содержащих практические решения обозначенной проблемы, рассмотрение процессов переноса импульса, массы, тепла в таких сложных системах сопряжено со многими трудностями и требуют дальнейшего анализа.

Объектом исследования являются гидромеханические процессы разделения потоков и классификации частиц в аппаратах мультивихревого типа.

Предметом исследования являются закономерности переноса импульса и массы в аппаратах мультивихревого типа, эффективность процессов, реализованных в этих аппаратах, в зависимости от характеристик дисперсной системы, конструктивных

размеров аппарата и режимных параметров работы.

Цель работы и основные задачи исследования. Целью работы является разработка методологии совершенствования технологического оборудования, в котором реализуются мультивихревые течения, на основе экспериментальных исследований и численного моделирования гидродинамики и сепарации многофазных сред.

Для достижения этой цели были определены следующие задачи:

1. На основе анализа недостатков существующих аппаратов вихревого типа разработка новых подходов к реализации процессов и их конструктивному оформлению, заключающихся в создании течений с множественными вихрями малого масштаба.
2. Экспериментальное исследование гидравлического сопротивления разработанного мультивихревого классификатора частиц на созданной экспериментальной установке.
3. Теоретическое исследование поля скоростей и эффективности разделения частиц в мультивихревом классификаторе частиц.
4. Экспериментальное исследование перепада давления и эффективности процесса при сепарации частиц из газового и жидкого потоков в оборудовании, оснащённом модифицированными вставками различной геометрии.
5. Численное моделирование потоков в устройствах с модифицированными вставками для анализа течения сплошной фазы и траекторий дисперсных частиц с целью выявления зависимости эффективности сепарации от геометрических параметров оборудования и режимных параметров процесса.
6. Исследование и анализ гидравлического сопротивления разработанных блочных мультивихревых сепараторов при различных вариантах геометрического исполнения устройств и технологических режимов их работы для очистки газов от аэрозолей и липких частиц.
7. Теоретическое и экспериментальное исследование эффективности процесса очистки газов от аэрозолей и липких частиц в блочных мультивихревых сепараторах.
8. Создание инженерных методик расчета мультивихревых аппаратов для сепарации многофазных сред и очистки газов с использованием микровихрей.
9. Использование методов машинного обучения (Orange Data Mining) и написание кода на Python для анализа и обработки экспериментальных и численных данных, а также для оценки недостающих данных, связанных с процессами классификации и очистки.
10. Разработка реальных промышленных процессов классификации частиц, сепарации двухфазных потоков с использованием аппаратов мультивихревого типа.
11. Разработка и патентование конструкций мультивихревых аппаратов, их технико-экономическое обоснование и рекомендаций по внедрению разработанных устройств на промышленных предприятиях.

Научная новизна работы:

1. Впервые предложено использование микровихрей в мультивихревых устройствах для очистки газов, классификации дисперсных систем по размерам частиц и разделения эмульсий, что открывает новые возможности для более эффективной работы устройств с минимальными потерями энергии.
2. Проведено экспериментальное и численное исследование гидродинамики с множественными вихрями малого масштаба в оборудовании для классификации частиц,

сепарации двухфазных потоков и очистки газов от аэрозолей и липких частиц. Получены результаты по перепаду давления, полям скоростей и эффективности процесса в перечисленных видах оборудования.

3. В результате экспериментальных и теоретических исследований получены зависимости для определения эффективности процессов очистки, классификации и сепарации потоков при различных конструктивных вариантах оборудования и значениях режимных параметров процессов.

4. Для процессов сепарации и классификации частиц, очистки газов от аэрозолей и липких частиц впервые получены экспериментальным путем зависимости гидравлического сопротивления потоков при реализации перечисленных процессов, в зависимости от режимных и геометрических параметров.

5. Впервые создан алгоритм расчета, основанный на использовании программы Orange Data Mining, с включением машинного обучения для оценки недостающих данных по эффективности работы мультивихревого устройства и оптимизации гидродинамических характеристик устройств является инновационным подходом в сфере гидромеханических процессов.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Создана методология комплексной оценки гидродинамических процессов в мультивихревых устройствах с различными конструктивными вставками и дальнейшего совершенствования протекающих в них гидромеханических процессов.

2. В результате выполненного комплекса экспериментальных и теоретических исследований получены эмпирические зависимости гидравлического сопротивления и эффективности работы устройств мультивихревого типа.

3. Разработаны инженерные методики расчета разработанных аппаратов мультивихревого типа.

4. Разработаны и запатентованы конструкции аппаратов с закрученными потоками для интенсификации гидромеханических процессов классификации, сепарации, разделения гетерогенных систем и др., обладающие низким гидравлическим сопротивлением, высокой эффективностью работы. Даны рекомендации по выбору конструктивных характеристик разработанных аппаратов для сред с различной дисперсной средой.

5. Получены качественные и количественные результаты технико-экономической эффективности работы разработанных аппаратов мультивихревого типа.

6. Разработанные конструкции мультивихревого типа приняты к внедрению на предприятиях и в организациях ООО «Скатз», ООО «Каматек», АО «ВНИИУС».

7. Даны рекомендации по утилизации уловленных блочными мультивихревыми сепараторами частиц в качестве компонентов композитных изделий.

Методология и методы исследований. Решение поставленных задач осуществлялось на основе исследований гидродинамики двухфазных потоков в разработанных аппаратах вихревого типа, методом CFD-анализа, экспериментальных испытаний разработанных устройств. Адекватность результатов математического моделирования подтверждалась сравнением с экспериментальными данными, полученными на разработанных стендовых установках. Применение машинного обучения (Orange Data Mining) для обработки и оценки недостающих данных, а также

использование Python для разработки алгоритмов и анализа данных.

Достоверность и обоснованность научных результатов и выводов обосновывается применением фундаментальных физических закономерностей, программного обеспечения, доказавшего высокую эффективность и точность, высокой воспроизводимостью полученных экспериментальных данных в сериях однотипных опытов, корректной статистической обработкой, использованием поверенного аналитического оборудования. Результаты работы согласуются с опубликованными данными о характеристиках работы аппаратов вихревого типа.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методология совершенствования процессов разделения дисперсных сред и их аппаратного оформления, включающая подходы к созданию процессов и проектированию аппаратов мультивихревого типа.
2. Разработанные методики расчета и моделирования процессов, происходящих в мультивихревых аппаратах.
3. Экспериментальные и численные результаты, полученные в ходе исследований мультивихревых конструкций, верификация которых подтвердила их достоверность и практическую ценность для промышленного применения.
4. Инженерные методики расчета мультивихревых аппаратов.
5. Алгоритм расчета параметров работы мультивихревого классификатора с использованием машинного обучения в среде Orange Data Mining и алгоритм обработки данных численного эксперимента в Python, обеспечивающие обработку экспериментальных и численных результатов и оценку недостающих данных.
6. Разработанные и запатентованные конструкции мультивихревых аппаратов.
7. Усовершенствованные процессы с использованием мультивихревых аппаратов, обеспечивающие низкое гидравлическое сопротивление и высокую эффективность.

Апробация работы. Основные положения и отдельные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 70-летию Победы в Великой Отечественной войне и 85-летию Казанского национального исследовательского технологического университета «Тенденции развития химии, нефтехимии и нефтепереработки» (Казань, 2015 г.); Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (Казань, 2017, 2020 гг.); 72-я Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ – 2018» (Москва, 2018 г.); XV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, 2018 г.); Всероссийской студенческой научно-технической конференции «Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология» (Казань, 2018, 2022 гг.); Научной конференция с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (Санкт-Петербург, 2018 г.); IX Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2018» (МНТК «ИМТОМ–2018») (Казань, 2018 г.); 25-ой Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, 2019 г.); Всероссийской конференции молодых ученых, аспирантов и студентов с международным участием «Пищевые технологии и биотехнологии» (Казань, 2019, 2021, 2023 гг.); XX Международной научно-практической конференции им. проф. Л. П. Кулёва

студентов и молодых ученых «Химия и химическая технология в XXI веке» (ХХТ-2019) (Томск, 2019 г.); 16-ой Всероссийской (восьмой международной) научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2021» (Иваново, 2021 г.) и др.

Публикация работы. По материалам диссертации опубликовано 87 печатных работ, в том числе 22 статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК при Минобрнауки России, 30 статей в изданиях, индексируемых в международной базе данных цитирования Scopus и Web of Science, 15 объектов интеллектуальной собственности.

Личный вклад автора состоит в постановке цели и задач исследований, разработке конструкций устройств, инженерных методик расчета, в проведении экспериментальных и численных исследований характеристик работы разработанных устройств, выполнении расчетов эффективности процессов и выборе рациональных режимов, анализе и обработке результатов, обобщении результатов, формулировании выводов, создании модели для прогнозирования параметров работы мультивихревого классификатора с применением методов машинного обучения, получении прогностических параметров эффективности работы мультивихревого классификатора, разработке и внедрению научно-технических решений по модернизации процессов на промышленных предприятиях, создании схем промышленного применения разработанных устройств, а также разработке способа утилизации уловленных частиц блочным сепаратором, расчете технико-экономических показателей работы разработанных аппаратов вихревого типа, написании статей, оформление результатов интеллектуальной деятельности.

Соответствие диссертации научной специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий и охватывает следующие направления исследований: п. 3. Способы, приемы, методология исследования гидродинамики движения жидкости, газов, перемещение сыпучих материалов в технологических аппаратах и схемах; п. 9. Методы и способы интенсификации химико-технологических процессов, в том числе с помощью физико-химических воздействий на перерабатываемые материалы; 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.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 7 глав, заключения, списка литературы из 309 наименований и 6 приложений. Работа изложена на 442 страницах машинописного текста, содержит 226 иллюстраций и 12 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования. Показана научная и практическая значимость полученных результатов. Обозначены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проанализированы преимущества использования вихревых течений в процессах химической технологии и результаты предшествующих исследований

гидродинамики в закрученных одно- и многофазных потоках жидкостей и газов. Выполнен обзор конструкций вихревых аппаратов. На основе анализа достоинств и недостатков аппаратов вихревого типа были сформулированы основные подходы к реализации гидромеханических процессов и их конструктивному исполнению. Использование мультивихревых течений в процессах сепарации многофазных сред и очистки газов обеспечивает несколько преимуществ по сравнению с традиционными подходами, основанными на применении одиночных вихрей или турбулентных потоков. Основные аспекты, которые делают разработанный подход актуальным и перспективным заключаются в повышении эффективности сепарации, снижении гидравлического сопротивления, улучшении массогабаритных характеристик, создании упорядоченной структуры.

Во второй главе представлен анализ основных подходов к моделированию закрученных одно- и многофазных течений, в которых присутствуют частицы или капли, в том числе при небольших концентрациях. В рамках проведенного обзора рассмотрены методы моделирования однофазных и многофазных течений, многофазных дисперсных течений при малых концентрациях дисперсной фазы. Обсуждаются модели турбулентности и историческое развитие подходов к моделированию, а также описывается движение частиц в потоке и внутри вихря. Рассматриваются математические модели, позволяющие учитывать взаимопроникающее движение фаз и их динамику. Отмечены возможности использования программного обеспечения Ansys Fluent для численного моделирования закрученных потоков с целью установления закономерностей турбулентного течения среды, выявления зависимости эффективности сепарации от геометрических параметров аппарата и режимных параметров процесса.

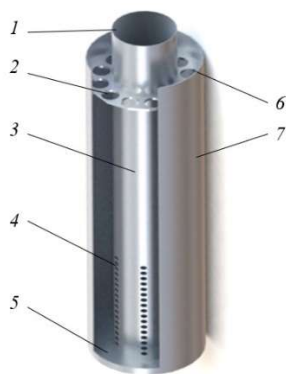


Рисунок 1 – Вид в разрезе мультивихревого сепаратора:
1, 6 – входной и выходной патрубки; 2 – разделительная перегородка; 3 – центральная труба; 4 – отверстия;
5 – днище; 7 – корпус

В третьей главе рассмотрен процесс сепарации частиц в разработанных мультивихревых классификаторе и сепараторе, описаны варианты исполнения аппаратов, представлены результаты экспериментальных и численных исследований процесса классификации и сепарации дисперсных частиц. Газовый поток, содержащий частицы материала, входит в мультивихревой сепаратор (рис. 1) через патрубок 1, после чего движется внутри трубы 3. Высота сепаратора составляет 400 мм, диаметр внешней трубы 88 мм, а внутренней – 50 мм. Внутренняя труба имеет круглые отверстия (по 17 штук в каждом ряду) диаметром 5 мм. В верхней перегородке также имеется 12 круглых отверстий с диаметром 14 мм. При движении газа по трубе 3 большая его часть вытекает из отверстий 4.

Причем, при повороте запыленного газового потока наиболее крупные частицы под действием сил инерции продолжают движение вниз, ударяются о стенку и попадают в нижнюю часть сепаратора. При прохождении газа с мелкими частицами через отверстия 4 образуется устойчивая вихревая структура потока в межтрубном пространстве устройства. Причем струйки газа делятся на две части, которые в равных долях устремляются в противоположные относительно друг друга стороны. Каждый

образовавшийся вихрь имеет контакт с соседними вихрями, в которых векторы скорости сонаправлены, что позволяет вихрям поддерживать друг друга.

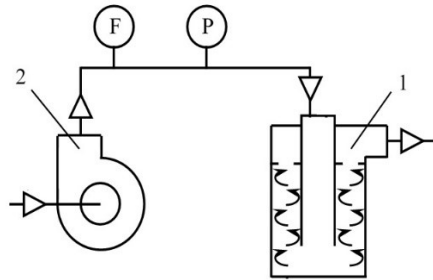


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки:
1 – сепаратор; 2 – вентилятор;
F, P – места установки датчиков

Проведенные исследования гидрогазодинамики (рис. 2) подтверждают образование в межтрубном пространстве множества устойчивых вихрей малого радиуса, внутри которых центробежные силы достигают значительной величины и позволяют эффективно проводить сепарацию мелкодисперсных частиц из потока. При этом потери давления в сепараторе составляют не более 1000 Па при входной скорости газового потока в диапазоне 7,3–22,2 м/с. Моделирование процесса движения рабочих сред

проведено в программном комплексе Ansys Fluent. При проведении расчетов использована модель турбулентности $k-\omega$ SST. Применялся комбинированный метод Эйлера-Лагранжа, при котором сплошная фаза моделируется как непрерывная среда и описывается уравнением Навье-Стокса (модель Эйлера), а дисперсная фаза – как отдельные частицы и их движение рассчитывается на основе второго закона Ньютона с учетом всех сил, действующих на частицы (модель Лагранжа). Влияние дисперсной фазы минимально на поведение сплошной фазы в виду малой концентрации (меньше 1% по массе). Во входном сечении патрубка ввода газа задавалось значение скорости, на стенках – условие отражения частиц, а на дне сепаратора – условие прилипания. Давление в выходном патрубке считалось атмосферным. Необходимо отметить, что изменение высоты внешнего цилиндра сепаратора влияет на длину пути, проходимым воздушным потоком в рабочей зоне аппарата. С увеличением высоты внешнего цилиндра устройства от 0,01 до 0,08 м и неизменном значении скорости потока во входном патрубке 0,5 м/с наблюдается незначительное снижение перепада давления воздушного потока. Конструкция сепаратора позволяет работать с жидкими средами, поэтому были проведены исследования по определению гидравлического сопротивления устройства с различными рабочими средами при температуре окружающей среды 23°C. Перепад давления в сепараторе зависит от скорости потока рабочей среды во входном патрубке устройства и описывается эмпирической зависимостью $\Delta p = 4,12W^{1,7}$.

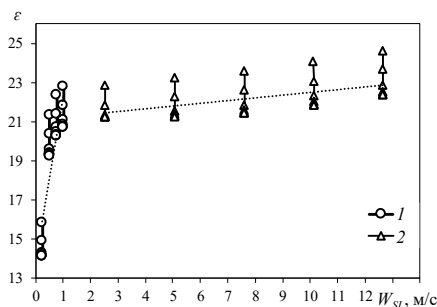


Рисунок 3 – Коэффициент гидравлического сопротивления при скорости рабочей среды в отверстиях для: 1 – воды; 2 – воздуха

На рисунке 3 представлено влияние скорости среды на коэффициент гидравлического сопротивления. При небольшом изменении скорости воды коэффициент сопротивления стремительно возрастает. Этот факт указывает, что в устройстве поступающий поток жидкости имеет ламинарный режим течения. Увеличение скорости рабочей среды приводит к переходу от ламинарного к турбулентному движению потока. В свою очередь задаваемая скорость потока значительно влияет на коэффициент гидравлического сопротивления. Так, при движении

воды со скоростью 0,5; 1; 1,5 и 2 м/с значение коэффициента сопротивления составляет 15,83; 21,35; 22,37 и 22,79 соответственно. Представлены результаты проведенных

численных исследований влияния конструктивных параметров сепаратора на процесс образования мультивихрей, определяющих эффективное разделение фаз жидкость-жидкость и изменение гидравлического сопротивления. Перепад давления в устройстве изменялся в диапазоне от 0,00018 до 1,68 МПа.

Увеличение коэффициента гидравлического сопротивления обуславливает большое количество потерь, возникающих вследствие движения жидкости в центральной трубе, прохождения через отверстия в ее нижней части и прямой поворот общего движения потока среды в межтрубное пространство, где происходит весьма интенсивный процесс взаимодействия сред. Таким образом, размеры отверстий, или же прорезей для упрощения изготовления, определяют пропускную способность сепаратора и сказываются на перепаде давления (рис. 4).

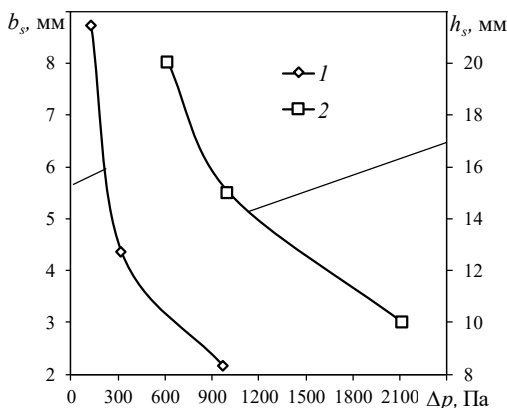


Рисунок 4 – Изменение перепада давления при скорости потока 7,5 м/с в мультивихревом сепараторе при разном исполнении прямоугольных прорезей:
1 – $h_s = 30$ мм, 2 – $b_s = 4,36$ мм

вихрей в исследуемом диапазоне размеров устройства. Рекомендуемая высота отверстий h_s соответствует величине более 15 мм и ширина более 4,5 мм (рис. 4). Таким образом, размеры щелевых отверстий (прорезей) во внутренней трубе сепаратора, через которые поступает среда в межтрубное пространство влияют на гидродинамические условия внутри аппарата и на образование вихрей, изменяя скорость и траекторию движения фаз.

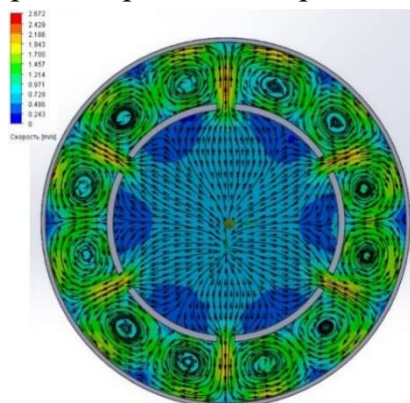


Рисунок 5 – Профили скоростей газа в поперечном сечении сепаратора при ширине прорезей $b_s = 4$ мм и расстоянии от основания сепаратора до поперечного сечения 30 мм

Давление с увеличением высоты внешней стенки устройства в 2,5 и 4 раза составило 1,68; 0,68; 0,42; 0,26; 0,18; 0,14; 0,1; 0,08 и 0,06 МПа при ширине щелей 1,86; 2,79; 3,71; 4,63; 5,55; 6,47; 7,38; 8,29 и 9,19 мм соответственно. Также было выяснено, что при скорости рабочей среды на выходе из устройства 0,25; 0,81; 1,37; 1,94 м/с давление не изменяется и имеет приблизительно равные значения с незначительной погрешностью. В ходе моделирования выявлено, что при ширине прорезей $b_s = 5,5$ мм создаются устойчивые вихри. Кроме этого, высота сепарационной зоны, т. е. области над прорезями, не влияет на структуру

Необходимый радиус отверстий для отвода фаз из сепаратора определяется для легкой фазы выражением $r(0) = \left(R^4 - \frac{4c_x g H R^2}{W_{SL}^2} \right)^{1/4}$, для тяжелой – $r(H) = \left(\left(R^4 - \frac{4c_x g H R^2}{W_{SL}^2} \right)^{0,5} + \frac{2gR^2H}{W_{SL}^2} \right)^{0,5}$, где R – радиус

выделенного цилиндра в межтрубном пространстве высотой H , м; W_{SL} – тангенциальная скорость на краю цилиндра, м/с; c_x – массовая доля легкой фазы в эмульсии.

Доказано, что стабилизированная структура вихрей в межтрубном пространстве образуется только при определенных значениях технологических и конструктивных параметров, которые также коррелируются между собой (рис. 5). С увеличением высоты прорезей

наблюдается более стабильная вихревая структура с высокой интенсивностью крутки по всей высоте контактной зоны межтрубного пространства сепаратора, что приводит к увеличению эффективности сепарации. Причем это характерно для частиц небольших диаметров вне зависимости от их начального местоположения. При достижении частицами относительной высоты $h_i/H \geq 0,68$ происходит резкое снижение эффективности, где h_i – текущее расположение частиц по высоте межтрубного пространства, м. Профили концентрации частиц в сепараторе имеют симметричное распределение относительно центральной оси трубы, а более высокая концентрация частиц наблюдается вблизи стенки межтрубного пространства.

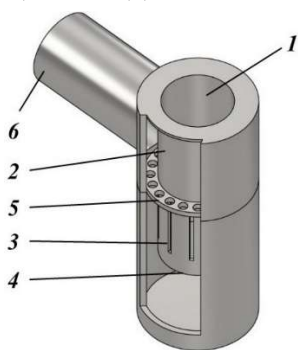


Рисунок 6 – Мультивихревой классификатор (в разрезе): 1 – входное отверстие; 2 – внутренняя труба; 3 – прямоугольные прорези; 4 – отверстие в нижней части внутренней трубы; 5 – пластина с круглыми отверстиями; 6 – выходной патрубок

Для классификации мелкодисперсного сыпучего материала с граничным размером 30–40 мкм разработана конструкция мультивихревого классификатора (рис. 6). Запыленный газовый поток попадает в устройство через входной патрубок 1, после чего движется вниз по трубе 2 до прорезей 3. Далее направление движения газового потока резко изменяется на 180° , при этом часть частиц выпадает из структуры потока и попадает в бункер через отверстие 4. Радиус трубы 2 постепенно уменьшается к выходному отверстию 4. Величина центробежных сил, действующих на поток, увеличивается, а также перераспределяется количество запыленного газового потока, проходящего через прямоугольные прорези 3 и выходное отверстие 4. При соударении о коническую поверхность корпуса частицы крупной фракции

отскакивает вниз, что увеличивает чистоту осаждаемой фракции. При выходе газового потока из каждого прямоугольного отверстия 3 он образует два вихря одинаковых пропорций,двигающихся в противоположные стороны. Достигая внутренней стенки цилиндрического корпуса, вихри газа движутся в верхнюю часть устройства к пластине 5, при этом возникают центробежные силы, отбрасывающие частицы сыпучего материала из структурированного потока к поверхностям устройства. Отсепарированные частицы падают в бункер. Газовый поток, очищенный от частиц размером до 30 мкм, выходит из классификатора через патрубок 6. Численные исследования эффективности фракционирования частиц силикагеля и влияния геометрии устройства на потери давления выполнялись в программном комплексе Ansys Fluent. Отдельные результаты исследований представлены на рисунках 7–8.

При разделении мелкодисперсного сыпучего материала можно влиять на граничный размер частиц, как в большую, так и меньшую сторону, изменив конструктивные размеры мультивихревого классификатора, а именно ширину межтрубного пространства, высоту и ширину прямоугольной прорези, исполнение нижней части внутренней трубы и разделительной пластины. Проанализированы различные конструктивные исполнения внутренней трубы классификатора на эффективность фракционирования частиц силикагеля $E = (n_{out}/n_{in}) \cdot 100\%$, где n_{out} – количество частиц, уловленных; n_{in} – количество частиц во входящем потоке. Результаты численного моделирования показали, что крупность граничного зерна увеличивается с уменьшением скорости газовой смеси на входе в

аппарат. Эффективность аппарата изменяется от 76 до 81 % ($90 < a < 100$ мкм, где a – диаметр частиц силикагеля, мкм, $W = 4$ м/с), от 80 до 87% ($70 < a < 100$ мкм, $W = 8$ м/с), от 79 до 91% ($60 < a < 100$ мкм, $W = 12$ м/с), от 82 до 92% ($55 < a < 100$ мкм, $W = 16$ м/с) (рис. 7).

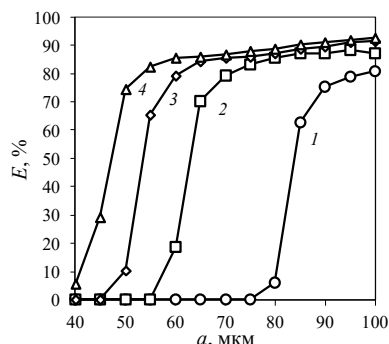


Рисунок 7 – Эффективность фракционирования мультивихревым классификатором без изогнутых кольцевых пластин от их диаметра при скорости газозвеси на входе в аппарат W , м/с: 1 – 4; 2 – 8; 3 – 12; 4 – 16

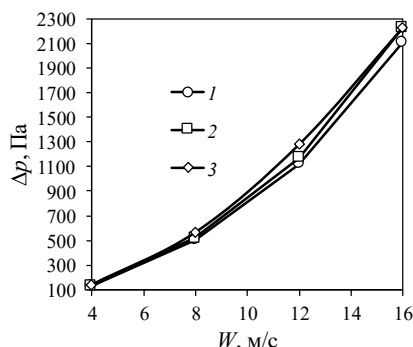


Рисунок 8 – Потери давления в мультивихревом классификаторе от скорости газа на входе: 1 – без разделительной перегородки; 2 – с двумя изогнутыми разделительными перегородками; 3 – с тремя изогнутыми разделительными перегородками)

Для сепаратора без изогнутых кольцевых пластин при входной скорости газозвеси равной 4 м/с крупность граничного зерна составляет 75 мкм, при увеличении скорости до 16 м/с крупность граничного зерна соответствует 35 мкм. Наличие изогнутых кольцевых пластин в классификаторе практически не влияет на его аэродинамическое сопротивление. При входной

скорости газозвеси в аппарат от 4 до 16 м/с потери давления в классификаторе составляют от 128 до 2111 Па для модели без изогнутых кольцевых пластин (рис. 8). Проведены исследования по оценке эффективности работы классификатора от размера уловленных частиц при разном масштабе конструкции аппарата, изучено влияние скорости потока и размера частиц на процесс его работы.

В четвертой главе рассмотрен процесс сепарации частиц в разработанных сепараторах с модифицированными вставками разной геометрии, представлены экспериментальные и численные исследования процесса сепарации частиц из потоков газа и жидкости. Сепаратор с вставками в виде I-профиля может использоваться для удаления из газа дисперсной фазы (в том числе липкой) высокой концентрации. Вставки устанавливаются в сепараторе поперечно набегающему потоку (рис. 9).

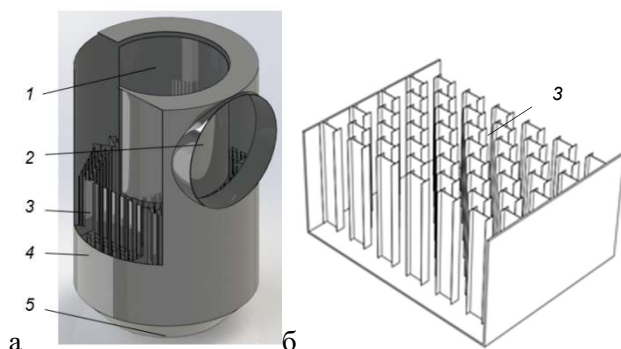


Рисунок 9 – Сепарационное устройство (а) с секциями двутавровых элементов (вид с разрезом): 1 – входной патрубок, 2 – выходной патрубок, 3 – секция двутавровых вставок (б), 4 – цилиндрический корпус, 5 – выходной патрубок для пылевого бункера

Принцип работы основан на действии центробежной силы на частицы. Многофазный газовый поток входит в устройство через патрубок 1 по всей его площади, затем движется к патрубку 2, огибая на своем пути двутавровые вставки 3. Возникающая при обтекании центробежная сила отталкивает частицы к двутавровым вставкам, тем самым, заставляя частицы выпасть из структурированного потока.

Среды с большим содержанием абразивных частиц разделяются сепаратором с вставками в виде С-профиля (рис. 10), которые менее подвержены истиранию,

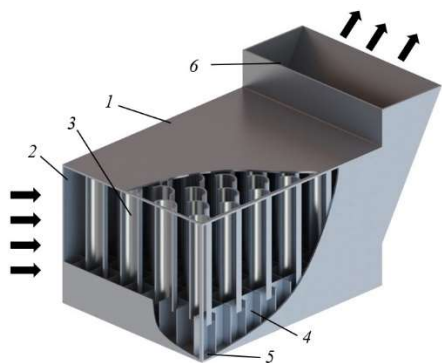


Рисунок 10 – Сепаратор с вставками С-профиля: 1 – корпус, 2 – вход, 3 – дуги; 4 – решетка, 5 – бункер, 6 – выход

вставками П-профиля (рис. 11), при этом сложная форма модифицированных вставок

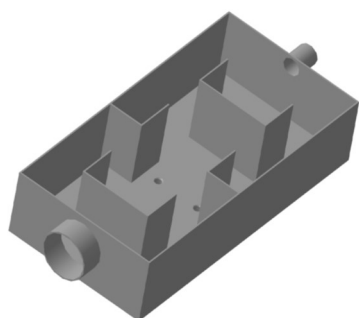


Рисунок 11 – Сепаратор с вставками П-профиля (показан без верхней крышки)

и составляет 963, 928 и 1065 Па соответственно для I-, С- и П-образных вставок. П-профиль вставок не имеет загибов как дуги С-профиля, из-за чего несущая способность снижается. Сепаратор с П-профилем вставок (рис. 11) можно использовать для разделения эмульсий на разные фракции за счет возникающей центробежной силы между вставками П-профиля.

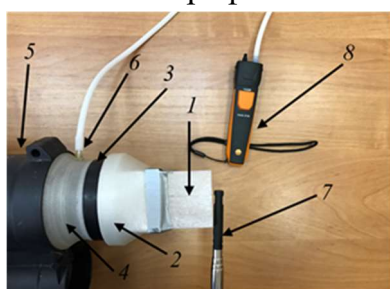


Рисунок 12 – Экспериментальная установка: 1 – сепаратор; 2 – переходник от сепаратора к фильтру; 3 – фильтр; 4 – переходник от фильтра к воздуходувке; 5 – воздуходувка; 6 – патрубок для подключения дифманометра; 7 – анемометр; 8 – дифманометр

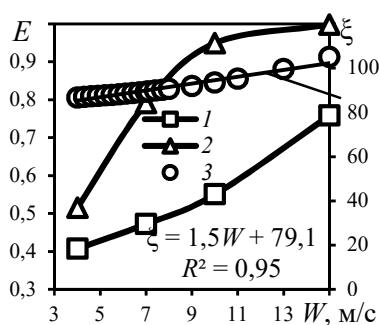


Рисунок 13 – Эффективность сепарации и коэффициент гидравлического сопротивления от скорости для устройства с двутавровыми элементами при диаметре капель a , мкм: 1 – 2; 2 – 3; 3 – численные расчеты

Исследование аэродинамики потока с дисперсной фазой в сепараторе с I-вставками проведено на установке (рис. 12). Получена зависимость коэффициента гидравлического сопротивления сепаратора с двутавровыми элементами от скорости газового потока $\xi = 1,5W + 79,1$. Среднее значение коэффициента

гидравлического сопротивления в исследуемом диапазоне скоростей потока от 4 до 15 м/с равно 90,58 (рис. 13). Потери давления в установке с фильтром в ходе эксперимента составили в среднем 1930 Па, без фильтра – в среднем 71 Па. В ходе моделирования течения потоков в Ansys Fluent использовалась к-ε модель турбулентности. Расчетная

сетка состояла из 1358046 ячеек. В качестве граничных условий задавалась входная скорость газа и атмосферное давление на выходе из сепаратора, принималось допущение, что малая концентрация частиц исключает взаимодействие между ними, поэтому не учитывается их влияние на движение несущей среды (рис. 14, 15). В ходе анализа результатов численных исследований выявлена зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от безразмерного параметра $k = b/h_1$, где b , h_1 – длина двутаврового элемента и его выступа, м: $\xi = 63,2 \cdot k^2 - 30,9 \cdot k + 8$.

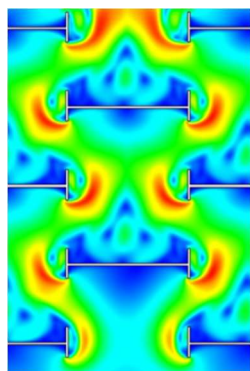


Рисунок 14 – Структура газа в сепараторе с вставками I-профиля

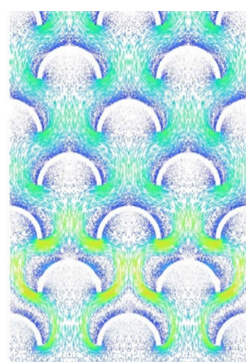


Рисунок 15 – Демонстрация наличия застойных зон

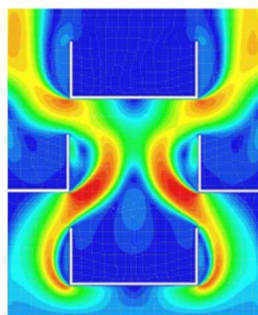


Рисунок 16 – Окрашенное поле контуров полной скорости при движении эмульсии

Изучение структуры потока в сепараторе с вставками позволяет определять условия его работы и выбирать эффективные методы конструирования. Выявлено образование стабильных циркуляционных зон в сепараторе на всем диапазоне исследуемых скоростей потока на входе в устройство для сред вода и

воздух. Для более эффективной сепарации при заданной начальной скорости потока оцениваются условия обеспечения практически симметричных, равномерных и устойчивых циркуляционных зон (рис. 16). Для обеспечения стабильности структуры вихрей в случае разделения эмульсий сепараторами с вставками I-профиля, критическим значением высоты борта двутавровых элементов является $h/b \leq 0,5$, для сепарации частиц из газов критическим значением высоты борта двутавровых элементов является $h/b \approx 0,5$. Наличие нескольких рядов вставок повышает эффективность сепарации за счет лучшей структурированности потока. Для обеспечения равнопроточности устройства, а значит и минимального гидравлического сопротивления, последующий ряд двутавровых вставок должен быть расположен от предыдущего на расстоянии 52-60% от их ширины.

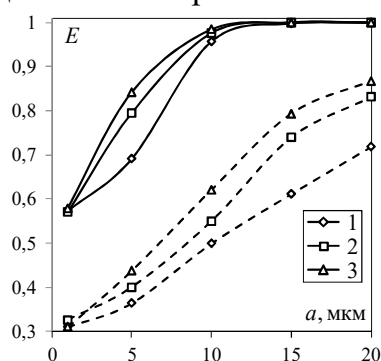


Рисунок 17 – Зависимость эффективности осаждения от диаметра частиц при различных среднерасходных скоростях газа W_{cp} , м/с: 1 – 3,0; 2 – 5,0; 3 – 7,0; сплошная линия – 4 ряда вставок, штриховая линия – 2 ряда

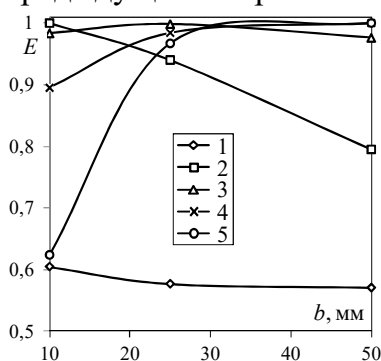


Рисунок 18 – Зависимость эффективности осаждения от ширины двутавров при различных диаметрах дисперсных частиц a , мкм: 1 – 1; 2 – 5; 3 – 10; 4 – 15; 5 – 20; $W_{cp} = 5$ м/с; количество рядов вставок $n = 4$

Моделирование процесса сепарации с I-вставками в Ansys Fluent позволило проанализировать влияние числа Стокса, входных параметров потока (скорость, диаметр и плотность частиц), конструктивного исполнения сепаратора для достижения наилучших результатов работы устройства по очистке газового потока от частиц пыли. На рисунках 17–18 представлены некоторые результаты этих исследований. Так, например, при количестве рядов равном 4 и среднерасходной

исследований. Так, например, при количестве рядов равном 4 и среднерасходной

скорости газа 5 м/с эффективность осаждения частиц диаметром 10 мкм достигает 100%. Исследования влияния ширины вставок на эффективность осаждения показывают, что при улавливании частиц небольшого диаметра (до 7–8 мкм) увеличение геометрических размеров вставок приводит к снижению эффективности. Рост эффективности сепарации происходит с увеличением среднерасходной скорости газового потока и количества рядов вставок. Сравнение сепаратора с вставками I-профиля с циклоном ЦН-11 по эффективности улавливания частиц диаметром 1–9 мкм показало, что наличие мультивихрей возле вставок позволяет достичь большего значения эффективности сепарации относительно циклонов. Результаты исследования показали, что сепаратор с дугообразными элементами целесообразно использовать при относительно низких входных скоростях газопылевого потока 0,5–2 м/с, позволяющих получить высокую эффективность сепарации частиц ($E \geq 71,5\%$) основной фракции размером от 25 до 100 мкм из газа при умеренном перепаде давления до 380 Па (рис. 19, 20).

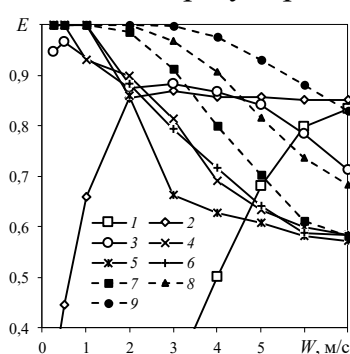


Рисунок 19 – Эффективность очистки сепаратором с 12-ю рядами дуг высотой 250 мм при входной скорости потока и диаметре a , мкм: 1 – 10; 2 – 20; 3 – 30; 4 – 40; 5 – 50; 6 – 70; 7 – 90; 8 – 130; 9 – 170

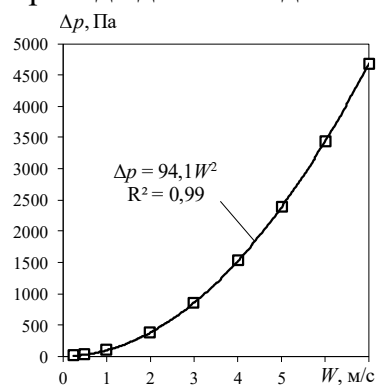


Рисунок 20 – Потери давления в сепараторе с 12-ю рядами поперечных дуг высотой 250 мм при скорости газа на входе

Коэффициент гидравлического сопротивления определяется как $\xi = 0,0154 Re \cdot 10^{-3} + 3,8722$, эффективность очистки газового потока от дисперсных частиц сепаратором с вставками С-профиля оценивается по выражению $E = 1 - 0,4598 e^{-1,21 Stk}$.

Численные исследования сепаратора с вставками П-профиля на системе трансформаторное масло – вода продемонстрировали

взаимосвязь между конструктивными размерами сепаратора, вставок внутри него и режимными параметрами процесса (рис. 21, 22).

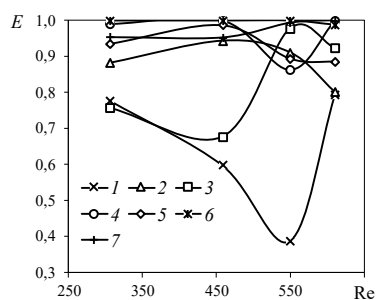


Рисунок 21 – Зависимость эффективности разделения эмульсии внутри сепаратора от числа Re при высоте устройства, мм: 1 – 10; 2 – 15; 3 – 20; 4 – 30; 5 – 40; 6 – 50; 7 – 70

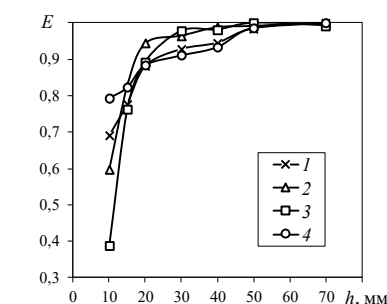


Рисунок 22 – Зависимость эффективности разделения эмульсии внутри сепаратора от расстояния между рядами вставок при входной скорости потока, м/с: 1 – 1; 2 – 1,5; 3 – 1,8; 4 – 2

Следует отметить, что в процессе исследования удаления влаги из трансформаторного масла (плотность 883 кг/м³, коэффициент динамической вязкости 0,0198 Па·с) в сепараторе с вставками П-профиля также рассматривалось движение водомасляной эмульсии во внутреннюю часть П-образных вставок, но численные расчеты

показали, что эффективность разделения эмульсии при таком варианте на 10–20% ниже, чем при движении потока с тыльной стороны вставок. При таком движении также

увеличивается гидравлическое сопротивление устройства в связи с действием обратных течений внутри П-образных элементов. На эффективность разделения водомасляной эмульсии влияет расстояние между рядами П-образных элементов, с увеличением которого наблюдается рост эффективности разделения эмульсии (рис. 22).

Экспериментальные исследования по оценке эффективности сепарации частиц устройством с вставками С-профиля проведены на установке (рис. 23). С помощью вентилятора 3 воздух из окружающей среды подавался в нижнюю часть корпуса 1. Частицы катализатора при этом подавались с помощью дозирующего устройства 5. В общем случае частицы в экспериментальной установке делились на две фракции: одна из которых находилась в псевдооживленном состоянии, другая – уносилась из установки. Для улавливания уносимой части предназначен сепаратор с дугами 2. Отработанный газовый поток выбрасывался в окружающую среду, пройдя стадию окончательной очистки от твердых частиц фильтром тонкой очистки 4. Эффективность улавливания частиц оценивалась по формуле $E = (c_H - c_K) / c_H$, где c_H , c_K – концентрации частиц в газовом потоке на входе и выходе из установки, г/м³.

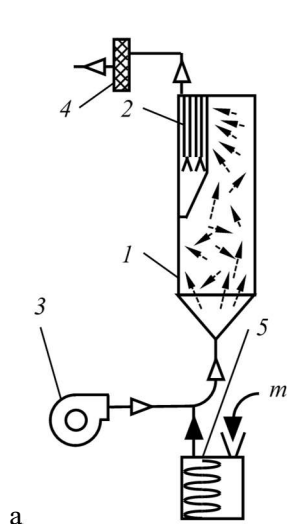


Рисунок 23 – Экспериментальная установка: а) принципиальная схема, б) фотография: 1 – корпус; 2 – сепаратор; 3 – вентилятор; 4 – фильтр тонкой очистки; 5 – дозатор

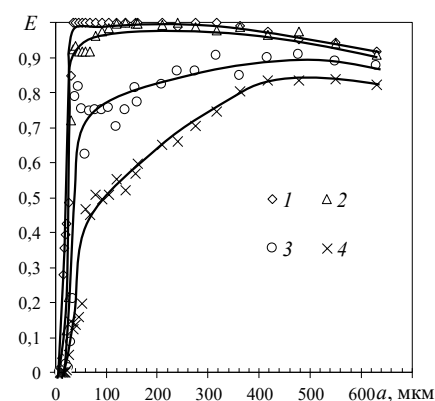


Рисунок 24 – Изменение эффективности от диаметра частиц при скорости газа на входе в сепаратор с дугами, м/с: 1 – 0,5; 2 – 1; 3 – 2; 4 – 3

Эффективность устройства (рис. 24) может достигать значения близкого к 100% при скорости потока до 1 м/с для частиц диаметром до 500 мкм.

Пятая глава посвящена экспериментальным и численным исследованиям процесса очистки газа от аэрозолей и липких частиц в разработанном блочном мультивихревом сепараторе, а также содержит полученные результаты сравнения двух модификаций конструкции сепаратора с выполненной задней крышкой с отверстиями и без нее, рекомендации по условиям применения данного сепаратора (рис. 25).

Улавливание липких частиц при большой их концентрации в потоке целесообразно осуществлять в блочном сепараторе без крышки. Принцип действия устройства (рис. 25) заключается в образовании множества относительно маленьких устойчивых вихрей в каналах между блоками (рис. 26), которые формируются при выходе запыленного газа из круглых отверстий 3 и 4 или прямоугольных прорезей 5. При вращении вихрей возникают значительные центробежные силы, позволяющие с большей эффективностью отделять мелкодисперсные частицы размером менее 10 мкм из газа по направлению к поверхностям стенок. При контакте со стенками частицы прилипают. Очищенный от частиц газовый поток выходит через каналы 6 или отверстия 7 в зависимости от

изготовления конструкции сепаратора. Проведение исследований по определению гидравлического сопротивления блочного сепаратора осуществлялось на экспериментальной установке (рис. 27) дифференциальным манометром testo 510i, погрешность составляет ± 5 Па при измерении давления в диапазоне от 0 до 100 Па ± 2 Па при измерении давления в диапазоне от 100 до 15000 Па.

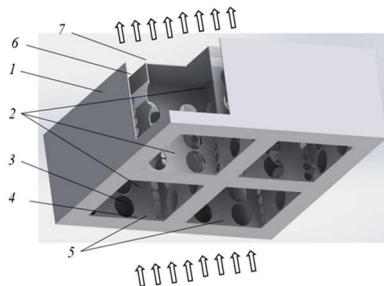


Рисунок 25 – Блочный сепаратор (вид с разрезом): 1 – корпус; 2 – блоки; 3 – отверстия для выхода газа; 4 – боковые отверстия для выхода газа; 5 – вход в устройство; 6 – сепарационная зона; 7 – крышка съемная

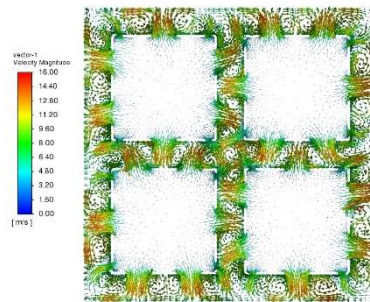


Рисунок 26 – Поле векторов скорости течения потока воздуха в сепарационном канале блочного мультивихревого сепаратора

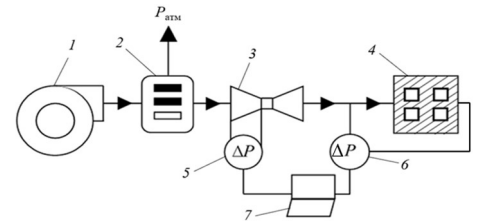


Рисунок 27 – Принципиальная схема экспериментальной установки для исследования работы блочного мультивихревого сепаратора: 1 – воздуходувка; 2 – ресивер; 3 – труба Вентури; 4 – сепаратор; 5, 6 – дифференциальные манометры; 7 – вычислительный блок

В ходе проведения исследований каждое из восьми отверстий ресивера поэтапно открывалось для снижения расхода воздуха в установке и получения более обширной экспериментальной выборки данных. Труба Вентури соответствовала ГОСТ 8.586.4-2005, наибольшее относительное отклонение расчетного значения расхода от заданного не превысило (по модулю) $\pm 8\%$.

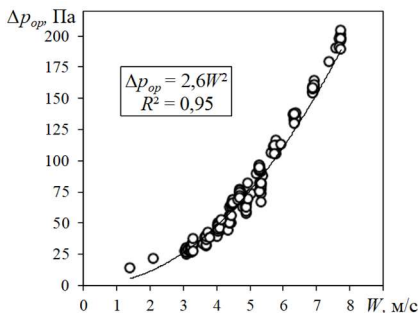


Рисунок 28 – Зависимость потери давления Δp_{op} в блочном сепараторе с открытыми сепарационными каналами от скорости воздуха W на входе в устройство

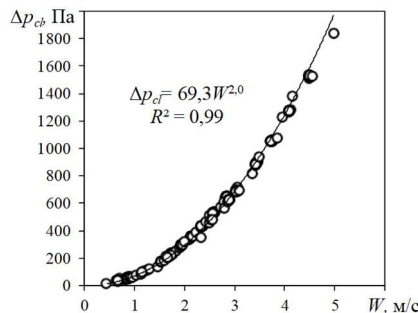


Рисунок 29 – Зависимость потери давления Δp_{cl} в блочном сепараторе с установленной задней крышкой от скорости воздуха на входе в устройство

Выражение для определения скорости воздуха на входе в блочный мультивихревой сепаратор

$$W = \frac{\pi d_1^2}{4} \frac{1}{b^2} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \left[(F_1/F_2)^2 - 1 \right]}}$$

где d_1 – диаметр широкой части трубы Вентури, м; b – размер стороны квадратного сечения экспериментальной

установки в локальном месте, где установлен патрубок для измерения статического давления перед сепаратором, м; p_1, p_2 – статическое давление в широкой и узкой части трубы Вентури, Па; ρ – плотность воздуха, кг/м³; F_1 и F_2 – площадь широкой и узкой части трубы Вентури, м².

Для дальнейшего сопоставления с экспериментальными данными проводилось численное моделирование с использованием различных моделей турбулентности, причем наименьшая неопределенность между численными и физическими результатами была получена при модели турбулентности k- ω SST, которая составила не более 10,2%. В некоторых локальных областях при выходе струй воздуха из круглых отверстий, проделанных в стенках блока сепаратора, образующиеся вихри разрушаются, создавая хаотичный поток на определенной высоте сепарационных каналов. Данное явление носит

нестабильный характер, т.к. одной скорости могут соответствовать несколько значений потери давления в блочном мультивихревом сепараторе.

Установка крышки с проделанными в ней отверстиями для выхода воздуха способствует формированию устойчивой вихревой структуры в сепарационных каналах блочного сепаратора. В ходе исследований установлено, что гидравлическое сопротивление блочного сепаратора с открытыми сепарационными каналами Δp_{op} составляет 14 до 204 Па при скорости воздуха на входе в устройство от 1,4 до 7,7 м/с (рис. 28), с установленной задней крышкой, в которой проделаны отверстия для выхода потока воздуха Δp_{cl} составляет от 42 до 1833 Па при скорости воздуха на входе в устройство от 0,8 до 4,9 м/с (рис. 29). Использование крышки на блочном сепараторе ведет к увеличению его гидравлического сопротивления, однако, создание строго расположенных выходных отверстий в задней крышке в местах образования мультивихрей позволяет предотвращать разрушение вихревой структуры потока, образованной в сепарационных каналах, что сказывается на увеличении эффективности сепарации (рис. 30).

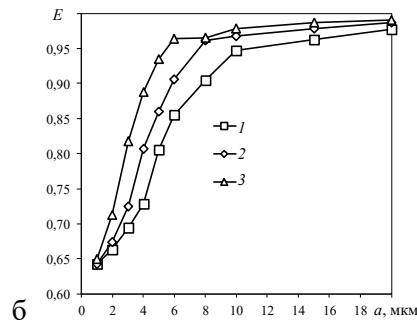
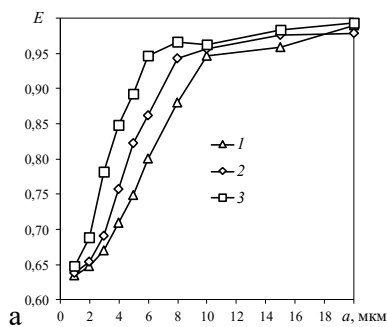


Рисунок 30 – Эффективность улавливания частиц разного диаметра при использовании задней крышки на блочном сепараторе с диаметром отверстий: а – 9 мм, б – 7 мм, W_{bx} , м/с: 1 – 3; 2 – 5; 3 – 10

Для крышки с отверстиями 7 мм средние значения эффективности улавливания частиц диаметром 2–5 мкм составляют 72,3% при входной скорости 3 м/с, 76,6% при 5 м/с и 83,8% при 10 м/с соответственно. Для крышки с отверстиями 9 мм средние значения эффективности улавливания частиц диаметром 2–5 мкм составляют 69,4% при входной скорости 3 м/с, 73,1% при 5 м/с и 80,3% при 10 м/с соответственно (рис. 30).

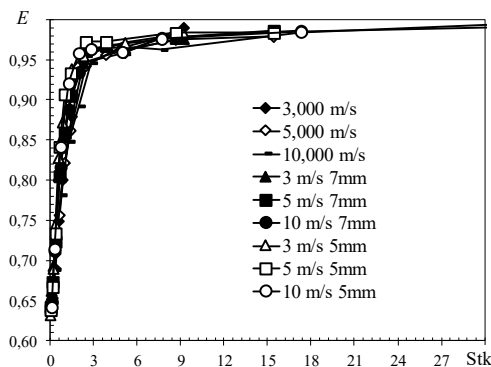


Рисунок 31 – Зависимость эффективности улавливания частиц блочным сепаратором с задней крышкой с отверстиями разного диаметра от числа Стокса и входной скорости потока

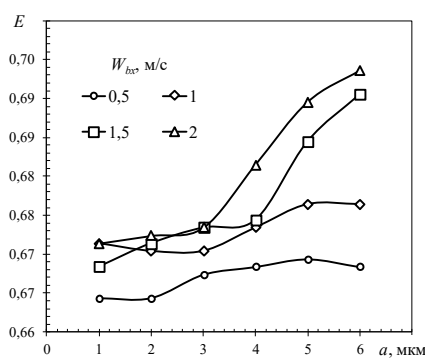


Рисунок 32 – Изменение эффективности улавливания частиц от диаметра частиц при размере $d_v = 20$ мм, скорость воздуха W_{bx} , м/с: 1 – 0,5, 2 – 1, 3 – 1,5, 4 – 2

Сепаратор имел следующие размеры: диаметр отверстий 8 и 20 мм в стенках блока, высота, ширина и длина труб квадратного сечения составляют 80 мм, расстояние между сепарационными блоками 20 мм.

Эффективность улавливания растет с увеличением модифицированного числа Стокса, приближаясь к постоянному значению (рис. 31). Модифицированное число Стокса определялось как $Stk = \rho_a a^2 W_{bx} / (\mu d_v)$, где $\rho_a = 2862$ кг/м³ – плотность частиц; a – диаметр

частиц, м; W_{bx} – скорость газа в отверстиях, м/с; μ – коэффициент динамической вязкости газа, Па·с; d_v – расстояние между сепарационными блоками, м.

При малых скоростях воздушного потока 0,5–2 м/с эффективность улавливания частиц от 1 до 6 мкм в диаметре изменяется от 66 до 69% (рис. 32). Уменьшение геометрических размеров сепаратора приводит к росту эффективности, это связано с более коротким путем достижения стенок устройства дисперсными частицами. Результаты также свидетельствуют, что ширина сепарационных элементов не влияет на предельное значение массы слоя частиц.

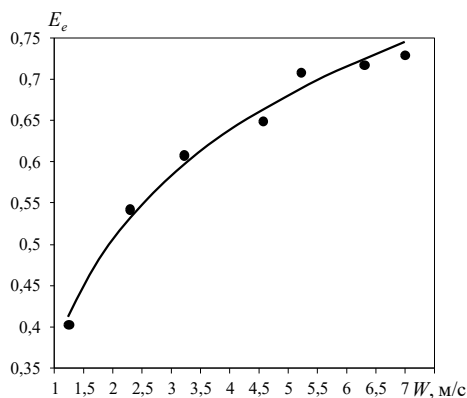


Рисунок 33 – Зависимость эффективности улавливания частиц диаметром 5 мкм, определяемой по результатам эксперимента, от скорости потока на входе в блочный мультिवихревой сепаратор

При верификации численного моделирования с экспериментом была выбрана модель турбулентности k - ω SST. Неопределенность между результатами, полученными с помощью моделей турбулентности k - ω SST и физического эксперимента (рис. 33), составила не более 10,2%. Дисперсные частицы оказывают большое влияние на кинетическую энергию и характер течения потока. Определение соотношения между кинетической энергией взвешенных частиц и энергией их взаимодействия с газом производилось по числу Стокса. Получена зависимость для определения эффективности сепарации частиц $E = 0,74 - 0,077 \exp(-0,69 \text{Stk})$.

В шестой главе представлены инженерные методики расчета разработанных в рамках диссертации конструкций аппаратов мультिवихревого типа с учетом предполагаемых условий эксплуатации, для удобства алгоритмы расчетов представлены в виде блок-схем.

Методика расчета мультिवихревого классификатора позволяет оценить конструктивные размеры сепарационной зоны устройства для подбора условий работы с наибольшей эффективностью с помощью программы Orange Data Mining. Анализ результатов показал, что наиболее эффективными моделями машинного обучения и регрессии для прогнозирования параметров мультिवихревого классификатора являются нейронные сети (коэффициент детерминации $R^2 = 0,988$), метод опорных векторов SVM ($R^2 = 0,977$) и градиентный бустинг ($R^2 = 0,977$). Модели Tree, PLS и Stochastic Gradient Descent являются менее эффективными с величиной $R^2 < 0,891$. Нейронные сети Neural Network способны выявлять сложные зависимости в данных и могут быть более устойчивыми к изменениям диаметра частиц. Используется 25 нейронов с выпрямленной линейной функцией активации ReLU, решателем L-BFGS-B с максимальным количеством итераций 200, включенным воспроизводимым обучением.

Разработанный алгоритм позволяет использовать полученные результаты анализа и обработки данных для прогнозирования эффективности фракционирования в зависимости от заданных условий работы аппарата на стадии его проектирования. С увеличением скорости потока до 25 м/с и диаметра частиц (от 70 мкм), различия между классами могут становиться менее выраженными, что усложняет задачу классификации. Это может быть связано с тем, что более крупные частицы могут иметь схожие аэродинамические свойства, что затрудняет их разделение из-за турбулизации потока. В

работе было выявлено наличие параболических пиков при входной скорости потока 2, 4, 8 и 12 м/с. Максимум фракционной эффективности составил 41,8% при диаметре частиц 30 мкм, 29,8% при 25 мкм, 32,9% при 15 мкм и 14,7% при 10 мкм соответственно. Наличие таких пиков обусловлено отскоком частиц и их переходом из одного вихря в другой, поскольку в межтрубную зону мультивихревого классификатора попадают потоки сбoku через прорезы и снизу через конический патрубок с отверстием для выгрузки материала (рис. 6). При скорости 16 м/с пик не был зафиксирован, при этом в области диаметров частиц размером 70–80 мкм такой максимум появлялся (рис. 34 а). Эффективность группы из трех последовательно соединенных классификаторов рассчитывалась по формуле $E_3 = 1 - (1 - E)^3$, где E – эффективность одного аппарата.

Применение трех последовательно соединенных аппаратов позволяет получать узкие гранулометрические фракции с граничным зерном менее 40 мкм с существенно более высокой эффективностью относительно работы одного аппарата. Так, при входной скорости газового потока равной 2, 4, 8 и 12 м/с пиковая эффективность мультивихревого классификатора составила 80,2% при 30 мкм, 65,4% при 25 мкм, 69,7% при 15 мкм и 37,9% при 10 мкм соответственно. При скорости 16 м/с пиковая эффективность в диапазоне частиц менее 40 мкм зафиксирована не была аналогично применению одного аппарата в технологической линии. Однако, при размере частиц более 40 мкм эффективность классификатора составляет более 93,1% при скорости газа 16 м/с (рис. 34б).

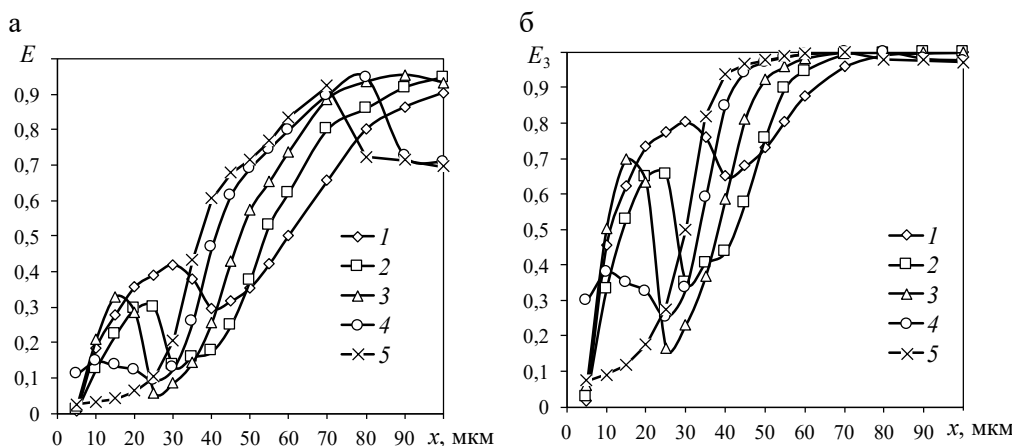


Рисунок 34 – Данные для анализа эффективности фракционирования а) одного аппарата, б) 3х последовательно соединенных аппаратов для частиц разного диаметра при скорости подачи, м/с: 1 – 2; 2 – 4; 3 – 8; 4 – 12; 5 – 16

Для анализа и обработки результатов численного эксперимента (рис. 34) используется код, написанный на языке программирования Python, с помощью которого вычисляются параметры аппроксимирующей функции с использованием метода наименьших квадратов и функции `curve_fit` из библиотеки `Scipy`. В результате подобраны следующие функции обработки данных, позволяющие рассчитать эффективность:

$$(1) \quad E = \frac{1}{1 + \exp^{-a(x-b)}} + c \cdot \exp^{-d(x-e)^2} \cdot \sin(f(x-e)) \quad \text{модифицированная сигмоидальная}$$

функция с осцилляцией, (2) $E = 1 - \exp^{-a \cdot x} + b \cdot \exp^{-c(x-d)^2}$ комбинация экспоненциальных

функций, (3) $E = \frac{x}{x+a} + b \cdot \exp^{-c(x-d)^2} \cdot \sin(e(x-d))$ рациональная функция с осцилляцией,

$$(4) \quad E = \exp^{-a \cdot \exp^{-bx}} + c \cdot \exp^{-d(x-e)^2} \cdot \sin(f(x-e)) \quad \text{функция Гомперца с осцилляцией,}$$

где a, b, c, d, e, f – это коэффициенты, характеризующие распределение функции.

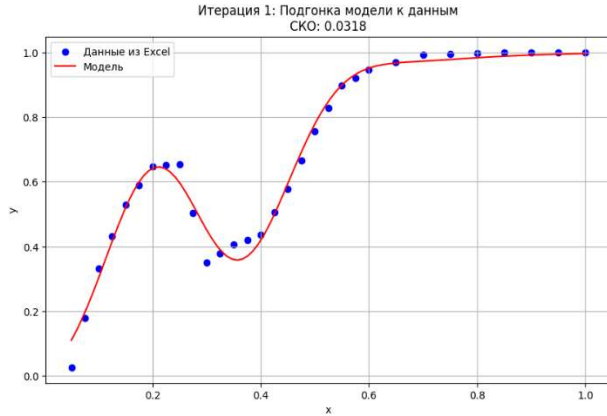


Рисунок 35 – Анализ результатов проверки данных CFD и предлагаемой функции по эффективности фракционирования частиц разного диаметра при скорости подачи материала 4 м/с (функция Гомперца с осцилляцией)

Результаты показывают, что аппроксимация функцией Гомперца с осцилляцией демонстрирует меньшее значение среднеквадратичного отклонения (СКО), на 10-15% по сравнению с функциями (2) и (3) и в 3 раза меньше по сравнению с функцией (1) в диапазоне скоростей 12-16 м/с. Подобранные параметры модели с функцией Гомперца с осцилляцией при скорости 4 м/с (для одного аппарата): $a = 10,2469$, $b = 5,2199$, $c = 0,2834$, $d = 5,2282$, $e = 0,0547$, $f = 11,4393$, СКО = 0,0223; для трех аппаратов – $a = 4,6460$, $b = 6,9830$, $c = -0,4848$, $d = 24,0521$, $e = 0,2789$, $f = 11,2899$, СКО = 0,0318 (рис. 35).

Разработана инженерная методика расчета сепаратора с вставками I-профиля, которая позволяет оценить эффективность работы устройства при различных конструктивных исполнениях двутаврового элемента с учетом обеспечения его минимального прогиба в точке крепления. Разработано математическое описание процесса очистки газового потока от мелкодисперсных частиц при разном количестве рядов вставок сепаратора и элементов в каждом ряду. При соотношении параметров ширины боковой грани двутавра к его ширине $b_1/b < 0,23$ эффективность сепарации не зависит от среднерасходной скорости газа. Эффективность сепарации равна 1 в диапазоне $0,15 < b_1/b < 0,23$. При значениях $b_1/b < 0,15$ эффективность сепарации возрастает практически по линейной зависимости.

Методика расчета блочного мультивихревого сепаратора позволяет определить высоту сепарационной зоны $z = \frac{9}{16} \frac{\mu_G}{\rho_a W_{bx}} \left(\frac{bA}{a} \right)^2$, эффективность устройства и оценить время его эффективной работы. При условии, что высота сепарационной зоны постоянна было получено уравнение, позволяющее рассчитать эффективность сепарации $E = \frac{8}{3} \frac{a}{Ab} \sqrt{\frac{z \rho_a W_{bx}}{\mu_G}} \left(1 - \frac{2}{3} \frac{a}{Ab} \sqrt{\frac{z \rho_a W_{bx}}{\mu_G}} \right)$, где A – соотношение площадей входа в сепаратор и площади круглых отверстий в стенках блока шириной b , м².

В седьмой главе представлены результаты систематизации разработанных аппаратов мультивихревого типа по некоторым характеристикам дисперсионной среды, встречающейся в химико-технологических процессах в соответствии со схемой их подбора с учетом особенностей проводимого процесса и наибольшей эффективности использования его конструкции. С учетом геометрических особенностей и преимуществ разработанных и запатентованных мультивихревых аппаратов разработаны реальные промышленные процессы классификации частиц и сепарации двухфазных потоков, в том числе установки фракционирования сыпучего материала для предприятия ООО «Скатз», установки очистки отходящих промышленных газов из реактора для каталитического дегидрирования углеводородов, очистки воздуха окрасочно-сушильной камеры для

предприятия ООО «Каматек», а также установки разделения водонефтяной эмульсии, что подтверждает их практическую применимость.

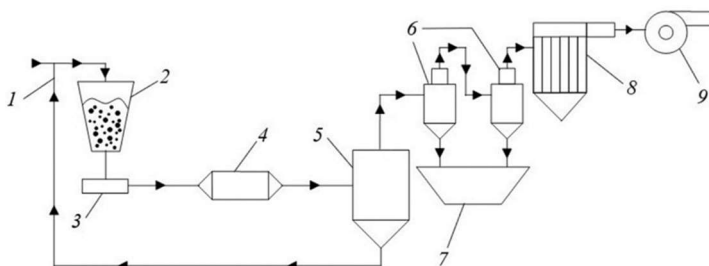


Рисунок 36 – Принципиальная схема фракционирования сыпучего материала: 1 – пневмотранспортная линия; 2 – расходный бункер; 3 – питатель; 4 – мельница ударно-вихревого типа; 5 – мультिवихревой классификатор; 6 – последовательно соединенные циклоны; 7 – бункер для готового продукта; 8 – рукавный фильтр; 9 – центробежный вентилятор

эффективность мультिवихревого классификатора достигает значений 10, 50 и 90% для эквивалентного диаметра сферы равного 3,70, 14,75 и 53,44 мкм.

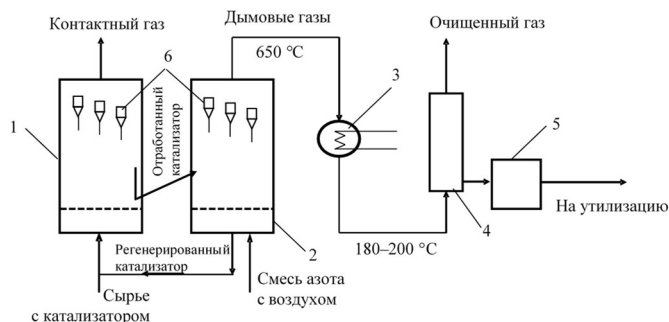


Рисунок 37 – Упрощенная схема очистки газов установки регенерации катализатора с использованием сепаратора с модифицированными вставками: 1 – реактор; 2 – регенератор; 3 – котел-утилизатор; 4 – сепаратор с модифицированными вставками; 5 – бункер, 6 – циклоны

рациональное размещение сепараторов в реакторе. Получены формулы для расчета расположения аппаратов в реакторе в зависимости от его размера. Разработана методика определения конструктивных параметров в зависимости от требуемой скорости потока на входе.

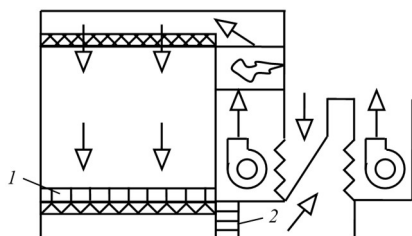


Рисунок 38 – Схема модернизированной установки системы очистки воздуха окрасочно-сушильной камеры, размещение блочного мультिवихревого сепаратора в камере: 1 – перед напольными фильтрами; 2 – перед потолочными фильтрами тонкой очистки

(рис. 38). Дисперсионный и химический анализы частиц показали, что основная доля

Предложена схема фракционирования сыпучего материала (рис. 36), которая позволяет решить проблему, заключающуюся в том, что по существующей ранее схеме, активный сепаратор после мельницы не обеспечивал качественное отделение крупных частиц из потока, и их остаточная концентрация составляла 3-5%. Результаты испытаний показали, что фракционная

Принципиальная схема процесса непрерывного дегидрирования углеводородов на пылевидном катализаторе (рис. 37) предусматривает использование сепаратора с модифицированными вставками для предотвращения уноса пылевидного катализатора и очистки отходящих газов. Разработана инженерная методика, связывающая конструктивные параметры вставок в одном сепараторе. Определено

На основе результатов исследований была создана промышленная модель сепаратора, которая внедрена на предприятие ООО «Каматек». Устройство показало высокую эффективность работы. Установлено, что при налипании частиц на стенку сепарационной зоны частицы агломерируются, образуя комки, падающие на дно устройства. Установка блочного сепаратора предусмотрена перед напольными фильтрами по всей площади или перед потолочными фильтрами тонкой очистки

частиц имеет размер порядка 10 мкм. Кроме того, установлена возможность использования уловленных частиц в качестве частичной замены наполнителя (от 0 до 20 массовых частей) при производстве композитных изделий. Исследования образцов на растяжение и изгиб показали, что параметры существенно не ухудшаются, соответствуют или близки к нормальным значениям. Исследования образцов на адгезию также свидетельствуют о возможности применения уловленных частиц в качестве частичной замены наполнителя. Решение подтверждается протоколами испытаний совместно с предприятиями ООО «Татнефть-Пресскомпозит» и ООО «Каматек».

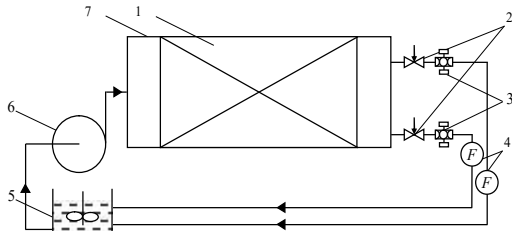


Рисунок 39 – Схема установки:

- 1 – исследуемая вставка;
- 2 – регулировочные клапаны;
- 3 – пробоотборники; 4 – расходомеры;
- 5 – емкость повторного смешения;
- 6 – насос; 7 – аппарат

Разработанная модернизированная схема установки разделения эмульсии с близкими значениями плотностей представлена на рисунке 39. Определены наиболее эффективные диапазоны работы аппарата при использовании различных вставок, которые были определены в ходе экспериментов. По мере роста скорости движения водонефтяной эмульсии в аппарате повышается эффективность ее разделения на составляющие компоненты.

Представлено технико-экономическое обоснование каждого предложенного проекта и даны рекомендации по внедрению устройств мультивихревого типа на промышленных предприятиях, что открывает новые возможности для повышения эффективности производственных процессов и снижения гидравлического сопротивления. Расчеты показывают, что проекты являются финансово выгодными с учетом всех затрат и доходов. Суммарный экономический эффект составляет более 60 млн. руб. в год. Расчетный срок окупаемости проектов не превысил двух лет, что является приемлемым значением для подобных проектов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В рамках поставленной цели и сформулированных задач в диссертационной работе получены следующие основные научные и практические выводы и результаты:

1. В результате проведенного анализа недостатков существующих вихревых аппаратов разработана методология совершенствования гидромеханических процессов разделения дисперсных сред на основе аппаратов мультивихревого типа и создания конструктивных решений для их реализации. Эти решения обеспечивают более эффективное разделение частиц за счет создания множественных вихрей малого масштаба. Сонаправленные вихри создают более интенсивное вращение потока, что усиливает центробежную силу, действующую на частицы. При этом частицы быстрее оседают на стенках устройства, что повышает общую эффективность сепарации без увеличения входной скорости. Сонаправленные вихри стабилизируют поток, уменьшая неравномерность движения частиц, при этом приводят к сокращениям потерь энергии, что в свою очередь приводит к более предсказуемому и контролируемому процессу сепарации.

2. На созданной экспериментальной установке исследована зависимость гидравлического сопротивления мультивихревого классификатора частиц от скорости

потока при фиксированной геометрии классификатора и различном количестве открытых входных каналов. Полученные результаты подтвердили снижение сопротивления по сравнению с традиционными конструкциями аппаратов, что способствует уменьшению энергозатрат. Потери давления в классификаторе составляют не более 1000 Па при входной скорости газового потока в диапазоне 7,3–22,2 м/с.

3. Проведено теоретическое исследование поля скоростей и эффективности разделения частиц в мультивихревом классификаторе. Результаты показали улучшение равномерности распределения скоростей и повышение эффективности сепарации. Наиболее стабилизированная структура вихревого течения наблюдалась при входной скорости газового потока и ширины щели 10 м/с и 12 мм соответственно.

Показано, что эффективность мультивихревого классификатора-сепаратора, работающего в режиме сепарации, может достигать значения 98%. Стабильная вихревая структура в межтрубном пространстве мультивихревого классификатора-сепаратора обеспечивается при увеличении ширины прямоугольного отверстия до значений не более 4,5 мм, и при скорости потока 7,5 м/с могут быть достигнуты высокие значения эффективности сепарации, при этом наиболее предпочтительным является исполнение отверстий высотой от 10 до 15 мм. Использование предложенного мультивихревого классификатора-сепаратора позволяет улавливать частицы эквивалентного диаметра сферы равного 53 мкм в среднем с фракционной эффективностью 90%.

4. Исследованы перепад давления и эффективность процесса сепарации частиц из газовых и жидких потоков с использованием оборудования с модифицированными вставками. Установлено, что геометрия вставок существенно влияет на эффективность процесса. При сепарации мелкодисперсных частиц размером 1–10 мкм и плотностью 1000 кг/м³ из газового потока эффективность в среднем равна 84, 80 и 78% для вставок I-, C- и П-профиля соответственно при скорости потока 8 м/с.

Получено уравнение для сепаратора с I-профилями, отображающее зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от скорости потока $\xi = 1,5W + 79,1$. Уравнение для сепаратора с I-профилями, отображающее зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от безразмерного параметра $k = b/h_1 = 0,25$ $\xi = 63,2 \cdot k^2 - 30,9 \cdot k + 8$. Уравнение для сепаратора с C-профилями, отображающее зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса $\xi = 0,0154 \cdot Re \cdot 10^{-3} + 3,8722$.

В ходе обработки результатов эксперимента получена зависимость эффективности от скорости воздуха на входе сепаратора с C-профилями $E = 0,65 - 0,05w_{inst}$.

При разделении эмульсий увеличение концентрации сырой нефти в смеси, приводит к росту плотности водонефтяной эмульсии от 848 до 996 кг/м³ и снижает эффективность ее разделения от 98,8 до 93,4% в сепараторе с П-профилями, причем при температуре исходной смеси 30°C минимальная эффективность разделения водонефтяной эмульсии составила 96,4%.

5. В результате численного моделирования потоков в устройствах с модифицированными вставками выявлены зависимости эффективности сепарации от геометрических параметров оборудования и режимных параметров процесса.

Эффективность использования модифицированных вставок в виде элементов I-профиля в среднем выше эффективности использования П- и C-образного профиля на 10-

15%. Для обеспечения стабильности структуры вихрей в случае разделения эмульсий сепараторами с вставками I-профиля, критическим значением высоты борта двутавровых элементов является $h/b \leq 0,5$, для сепарации частиц из газов критическим значением высоты борта двутавровых элементов является $h/b \approx 0,5$. Эффективность разделения водомасляной эмульсии является высокой для сепаратора с П-профилями, в среднем равняясь 99,9% при числах Рейнольдса в диапазоне 306–611, которые соответствуют входным скоростям потока 1–2 м/с, для сепаратора высотой 50 мм.

Эффективность сепарационного устройства с вставками С-профиля составляет в среднем 86,2, 86,9, 88,3, 88,4, 88,2, 88,4% при высоте верхней части сепарационной решетки h_1 равной 10, 20, 30, 40, 50 и 60 мм соответственно. С ростом показателя нижней части сепарационной решетки h_2 , входящей в бункер сепаратора с вставками С-профиля, вероятность уноса частиц из области между концом дуг и дном устройства уменьшалась, предпочтительным соотношением является $h_1/h_2 = 3/7$.

6. Исследовано гидравлическое сопротивление блочных мультивихревых сепараторов при различных геометрических исполнениях и режимах работы. Получено, что гидравлическое сопротивление блочного мультивихревого сепаратора с открытыми сепарационными каналами Δp_{op} составляет 14 до 204 Па при скорости воздуха на входе в устройство от 1,4 до 7,7 м/с и подчиняется зависимости $\Delta p_{op} = 2,6W^2$. При компоновке блочного сепаратора крышкой гидравлическое сопротивление составляет от 42 до 1833 Па при скорости воздуха на входе в устройство от 0,8 до 4,9 м/с и подчиняется зависимости $\Delta p_{cl} = 69,3W^2$. Определены оптимальные параметры для очистки газов от аэрозолей и липких частиц.

7. Теоретически и экспериментально подтверждена высокая эффективность процесса очистки газов от аэрозолей и липких частиц в блочных мультивихревых сепараторах. Получена эффективность процесса очистки от числа Стокса $E = 0,74 - 0,077 \exp(-0,69Stk)$.

8. Разработаны инженерные методики расчета мультивихревых аппаратов для сепарации многофазных сред и очистки газов, что позволяет оптимизировать их конструкцию и эксплуатацию, для удобства алгоритмы расчетов представлены в виде блок-схем. Методика расчета мультивихревого классификатора-сепаратора позволяет оценить конструктивные размеры сепарационной зоны устройства для подбора условий работы с наибольшей эффективностью с помощью программы Orange Data Mining. Методика расчета сепаратора с вставками I-профиля позволяет оценить эффективность работы устройства при различных конструктивных исполнениях двутаврового элемента с учетом обеспечения его минимального прогиба в точке крепления. Методика расчета блочного мультивихревого сепаратора позволяет определить высоту сепарационной зоны, эффективность устройства и оценить время его эффективной работы.

9. Применена модель машинного обучения Neural Network и написан код на Python для анализа и обработки данных. Более низкие скорости потока приводят к более крупным размерам фракций, т.к. эффективная центробежная сила, действующая на частицу, снижается, что снижает четкость классификации и является нежелательным процессом. Это позволило оценить недостающие данные и улучшить понимание процессов классификации и очистки. С помощью разработанного программного кода в Python подобрана методом наименьших квадратов функция аппроксимации и

коэффициенты к ней $E = \exp^{-a \cdot \exp^{-bx}} + c \cdot \exp^{-d(x-e)^2} \cdot \sin(f(x-e))$, наиболее адекватно описывающая зависимость фракционной эффективности мультивихревого классификатора-сепаратора от размера частиц и скорости их подачи.

10. Разработаны реальные промышленные процессы классификации частиц и сепарации двухфазных потоков с использованием мультивихревых аппаратов, в том числе установки фракционирования сыпучего материала для предприятия ООО «Скатз», установки очистки отходящих промышленных газов из реактора для каталитического дегидрирования углеводородов, очистки воздуха окрасочно-сушильной камеры для предприятия ООО «Каматек», установки разделения водонефтяной эмульсии, что подтверждает их практическую применимость.

Проанализирована возможность утилизации уловленных блочными мультивихревыми сепараторами частиц в качестве компонентов композитных изделий. Испытания окрашенных образцов на растяжение, изгиб и адгезию не показали существенного ухудшения показателей, что свидетельствует о возможности применения уловленных частиц в качестве частичной замены наполнителя.

11. Разработаны и запатентованы конструкции мультивихревых аппаратов. Проведено технико-экономическое обоснование и даны рекомендации по их внедрению на промышленных предприятиях, что открывает новые возможности для повышения эффективности производственных процессов. Эти расчеты показывают, что проекты являются финансово выгодными с учетом всех затрат и доходов. Предложенные конструкции приняты к внедрению на предприятиях ООО «Скатз», ООО «Каматек», в организации АО «ВНИИУС».

Разработанные технические решения и разработки позволят выполнять расчеты гидромеханических процессов при проектировании нового оборудования. В результате снижаются сроки и затраты при разработке усовершенствованных процессов в технологическом оборудовании вихревого типа химической и нефтехимической отрасли. Также важной решенной научно-технической проблемой является внедрение импортозамещенного оборудования с использованием разработанных аппаратов на различных предприятиях нашей страны (см. приложения к диссертации).

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы исследования диссертационной работы. Обобщение математических моделей явлений переноса в одно- и двухфазных средах для разработанных аппаратов мультивихревого типа с целью применения результатов при проектировании или модернизации смесительных аппаратов, где требуется турбулизация потоков, повышение производительности и эффективности процессов. Разработка новых перспективных инновационных технологий и их аппаратного оформления, имеющих важное значение для повышения энергоэффективности и ресурсосбережения промышленных установок в химической, нефтехимической и смежных областях промышленности.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

В изданиях из перечня ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации:

1. Дмитриев, А. В. Улавливание частиц из дымовых газов прямоугольными сепараторами / А. В. Дмитриев, В. Э. Зинуров, О. С. Дмитриева, В. Л. Нгуен // Вестник технологического университета. – 2017. – Т. 20. – № 15. – С. 78-80.

2. Соловьева, О. В. Разделение нефтяных эмульсий в прямоугольных сепараторах / О. В. Соловьева, А. В. Дмитриев, **О. С. Дмитриева**, Д. С. Винь // Вестник технологического университета. – 2017. – Т. 20. – № 21. – С. 45-47.
3. Дмитриев, А. В. Исследование структуры потока в прямоугольных сепараторах / А. В. Дмитриев, **О. С. Дмитриева**, Д. С. Винь, М. В. Фомин // Вестник технологического университета. – 2017. – Т. 20. – № 23. – С. 17-19.
4. Дмитриев, А. В. Влияние конструктивного оформления элементов прямоугольного сепаратора на эффективность очистки газа от твердых частиц / А. В. Дмитриев, В. Э. Зинуров, **О. С. Дмитриева**, А. А. Галиев // Вестник технологического университета. – 2018. – Т. 21. – № 9. – С. 58-61.
5. Дмитриев, А. В. Оценка эффективности прямоугольных сепараторов для улавливания частиц из потоков газа / А. В. Дмитриев, **О. С. Дмитриева**, Э. И. Салахова, В. Л. Нгуен // Вестник технологического университета. – 2018. – Т. 21. – № 11. – С. 59-62.
6. Дмитриев, А. В. Эффективность входной ступени прямоугольных сепараторов / А. В. Дмитриев, В. Э. Зинуров, **О. С. Дмитриева**, А. И. Поляков // Вестник технологического университета. – 2018. – Т. 21. – № 11. – С. 66-69.
7. Дмитриев, А. В. Экспериментальные исследования очистки загрязненных газовых потоков от мелкодисперсных частиц в прямоугольном сепараторе / А. В. Дмитриев, В. Э. Зинуров, **О. С. Дмитриева**, Ю. О. Семенова // Вестник технологического университета. – 2018. – Т. 21. – № 12. – С. 109-112.
8. Зинуров, В. Э. Исследование очистки газового потока от различных фракций пылевидных частиц сепаратором трапецевидной формы / В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, **О. С. Дмитриева**, М. О. Уткин // Вестник технологического университета. – 2019. – Т. 22. – № 10. – С. 68-71.
9. Дмитриев, А. В. Исследование влияния конструктивных и физических параметров на структуру движения газового потока в прямоугольном сепараторе / А. В. Дмитриев, В. Э. Зинуров, **О. С. Дмитриева**, В. В. Харьков // Вестник технологического университета. – 2020. – Т. 23. – № 3. – С. 85-88.
10. Зинуров, В. Э. Исследование процесса деэмульсации водонефтяной эмульсии в отстойнике с гофрированными пластинами / В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, **О. С. Дмитриева**, В. В. Харьков, А. Р. Галимова // Вестник технологического университета. – 2020. – Т. 23. – № 7. – С. 61-64.
11. Дмитриев, А. В. Анализ динамики жидкости и газа в сепараторе с кольцевым пространством / А. В. Дмитриев, А. Р. Галимова, Г. Х. Гумерова, **О. С. Дмитриева** // Вестник технологического университета. – 2021. – Т. 24. – № 4. – С. 80-84.
12. Харьков, В. В. Исследование влияния конструктивных параметров сепаратора вертикального типа на процесс образования устойчивых вихрей / В. В. Харьков, А. В. Дмитриев, А. Р. Галимова, **О. С. Дмитриева** // Вестник технологического университета. – 2021. – Т. 24. – № 7. – С. 64-67.
13. Биккулов, Р. Я. Применение сепарационных элементов квадратной формы в покрасочных камерах / Р. Я. Биккулов, А. В. Дмитриев, **О. С. Дмитриева**, Г. Р. Бадретдинова // Вестник технологического университета. – 2021. – Т. 24. – № 11. – С. 39-42.
14. Биккулов, Р. Я. Оценка времени работы сепарационного устройства с элементами квадратной формы при очистке запыленного потока покрасочной камеры / Р. Я. Биккулов, **О. С. Дмитриева**, А. В. Дмитриев, Г. Р. Бадретдинова, Д. Н. Латыпов // Вестник технологического университета. – 2022. – Т. 25. – № 1. – С. 32-35.
15. Зинуров, В. Э. Промышленные испытания фракционирования сыпучего материала в мультивихревом классификаторе-сепараторе / В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, **О. С. Дмитриева**, К. С. Моисеева // Вестник технологического университета. – 2022. – Т. 25. – № 4. – С. 58-63.
16. Зинуров, В. Э. Газодинамика проточной части классификатора с соосно расположенными трубами / В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, И. И. Насырова, **О. С. Дмитриева** // Вестник технологического университета. – 2022. – Т. 25. – № 4. – С. 71-76.
17. Биккулов, Р. Я. Оценка эффективной работы мультивихревого сепаратора в окрасочной камере / Р. Я. Биккулов, А. В. Дмитриев, А. Н. Николаев, **О. С. Дмитриева**, И. Е. Полтев // Вестник технологического университета. – 2022. – Т. 25. – № 7. – С. 116-119.
18. Зинуров, В. Э. Экспериментальное определение гидравлического сопротивления мультивихревого сепаратора / В. Э. Зинуров, Р. Я. Биккулов, **О. С. Дмитриева**, И. Н. Мадышев, А. А. Абдуллина // Ползуновский вестник. – 2023. – № 1. – С. 191-199.
19. Салахова, Э. И. Численное моделирование улавливания мелкодисперсных частиц катализатора сепарационным устройством с дугообразными элементами / Э. И. Салахова, В. Э. Зинуров, А. А. Абдуллина, **О. С. Дмитриева**, И. Н. Мадышев, В. В. Титенков // Ползуновский вестник. – 2024. – № 1. – С. 161-168.
20. Николаев, А. Н. Определение дисперсного состава капель во вращающемся капельном слое вихревого сепарационного устройства / А. Н. Николаев, **О. С. Дмитриева**, В. В. Харьков // Вестник технологического университета. – 2024. – Т. 27. – № 6. – С. 90-93.

21. **Дмитриева, О. С.** Особенности применения вихревых аппаратов различных конструкций в промышленности / О. С. Дмитриева, А. В. Дмитриев, А. Н. Николаев, Г. Р. Бадретдинова // Вестник технологического университета. – 2024. – Т. 27. – № 10. – С. 79-84.
22. **Дмитриева, О. С.** Прогнозирование параметров работы мультивихревого классификатора с использованием машинного обучения в среде Orange Data Mining / О. С. Дмитриева, Г. Р. Бадретдинова, А. В. Дмитриев // Вестник технологического университета. – 2024. – Т. 27. – № 12. – С. 141-146.

В изданиях, включенных в международную базу цитирования Scopus и Web of Science:

23. Dmitriev, A. V. Influence of elements thickness of separation devices on the finely dispersed particles collection efficiency / A. V. Dmitriev, V. E. Zinurov, **O. S. Dmitrieva** // MATEC Web of Conf. – 2018. – V. 224. – P. 02073.
24. Dmitriev, A. V. Intensification of gas flow purification from finely dispersed particles by means of rectangular separator / A. V. Dmitriev, V. E. Zinurov, **O. S. Dmitrieva** // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – V. 451. – P. 012211.
25. Popkova, O. S. Estimation of Rectangular Separator Efficiency / O. S. Popkova, W. L. Nguyen, **O. S. Dmitrieva**, I. N. Madyshev, A. N. Nikolaev // Journal of Physics: Conf. Series. – 2019. – V. 1210. – P. 012114.
26. Dmitriev, A. V. Separator for Separation of Finely Dispersed Droplets from Gas Flows Generated by Industrial Enterprises / A. V. Dmitriev, **O. S. Dmitrieva**, S. V. Dang, V. L. Nguen // Chem. Petrol. Eng. – 2019. – V. 55. – № 3-4. – P. 329-335.
27. Dmitriev, A. V. Collecting of finely dispersed particles by means of a separator with the arc-shaped elements / A. V. Dmitriev, V. E. Zinurov, **O. S. Dmitrieva** // E3S Web of Conf. – 2019. – V. 126. – P. 00007.
28. **Dmitrieva, O. S.** Evaluation of the efficiency of rectangular separators to collect the particles from the gas flows / O. S. Dmitrieva, V. L. Nguen, N. D. Yakimov, E. G. Sheshukov // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – V. 337. – P. 012057.
29. Madyshev, I. N. Determination of Settling Efficiency of Solid Finely Dispersed Particles Within Devices with Rectangular Separators / I. N. Madyshev, **O. S. Dmitrieva**, A. V. Dmitriev // Proceedings of the 5th International Conf. on Industrial Eng. ICIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Eng. – 2020. – P. I. – P. 79-84.
30. Zinurov, V. The experimental study of increasing the efficiency of emulsion separation / V. Zinurov, I. Sharipov, **O. Dmitrieva**, I. Madyshev // E3S Web of Conf. – 2020. – V. 157. – P. 06001.
31. Zinurov, V. E. Collecting finely-dispersed particles from the gas flow in a centrifugal separator with coaxially arranged pipes / V. E. Zinurov, **O. S. Dmitrieva**, O. S. Popkova // MATEC Web of Conf. – 2020. – V. 315. – P. 03003.
32. Zinurov, V. E. Classification of bulk material from the gas flow in a device with coaxially arranged pipes / V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev, M. A. Ruzanova, **O. S. Dmitrieva** // E3S Web of Conf. – 2020. – V. 193. – P. 01056.
33. Zinurov, V. E. Efficiency of different separation elements for removal of fine particles from gas / V. E. Zinurov, N. Z. Dubkova, O. S. Popkova, **O. S. Dmitrieva** // Journal of Physics: Conf. Series. – 2021. – V. 1745. – P. 012090.
34. **Dmitrieva, O. S.** Separation of water-oil emulsions in device with enlarged throughflow capacity / O. S. Dmitrieva, I. I. Sharipov, V. E. Zinurov // Advances in raw material industries for sustainable development goals (1st ed.). – 2021. – P. 296-302.
35. Vinh, D. Separation of Oil-Water Emulsion in Laboratory Setup with U-Shaped Elements / D. Vinh, V. Zinurov, **O. Dmitrieva**, V. Kharkov // MATEC Web of Conf. – 2021. – V. 346. – P. 03077.
36. Bikkulov, R. Cleaning Air Streams from Fine Particles in Paint Booths / R. Bikkulov, **O. Dmitrieva**, A. Dmitriev, G. Badretdinova // Ecology and Industry of Russia. – 2021. – V. 25. – № 12. – P. 10–14.
37. Zinurov, V. E. Effect of Design Parameters of Classifier with Coaxial Pipes on Efficiency of Fractionation of Finely Divided Bulk Material / V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev, I. N. Madyshev, **O. S. Dmitrieva** // Chem. Petrol. Eng. – 2021. – V. 57. – P. 531–537.
38. Zinurov, V. E. Analysis of various mathematical models of turbulence when calculating the gas dynamics in a classifier with coaxially arranged pipes / V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev, G. R. Badretdinova, A. R. Galimova, **O. S. Dmitrieva** // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – V. 1089. – P. 012002.
39. Dmitriev, A. V. Analysis of Multivortex Separator Operation in Spray Booth / A. V. Dmitriev, R. Y. Bikkulov, V. V. Kharkov, **O. S. Dmitrieva** // 4th International Youth Conf. on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering. – 2022. – P. 1-4.
40. Madyshev, I. N. Energy saving in distillation by combining vortex contact device and thermal effects / I. N. Madyshev, V. V. Kharkov, **O. S. Dmitrieva**, V. E. Zinurov // Thermal Science and Engineering Progress. – 2022. – V. 34. – P. 101431.

41. Madyshev, I. N. Determining Hydraulic Resistance and Volumetric Heat and Mass Transfer Coefficients during Cooling of Circulating Water in a Multistage Vortex Chamber / I. N. Madyshev, **O. S. Dmitrieva**, V. V. Kharkov, A. O. Mayasova // Thermal Engineering. – 2022. – V. 69. – №. 12. – P. 963–970.
42. Zinurov, V. E. Improved dusty gas cleaning in open-cast automobile transport / V. E. Zinurov, V. V. Kharkov, I. N. Madyshev, **O. S. Dmitrieva**, N. Z. Dubkova // Journal of Physics: Conf. Series. – 2022. – V. 2388. – P. 012141.
43. Zinurov, V. E. Calculation of Efficiency of Catching Fine Particles by a Separation Device with Square Channels / V. E. Zinurov, R. Ya. Bikkulov, A. V. Dmitriev, **O. S. Dmitrieva** // Chem. Petrol. Eng. – 2022. – V. 58. – № 7-8. – P. 550-556.
44. Zinurov, V. E. Effect of the Design of a Multi-Vortex Classifier–Separator on the Separation Efficiency of Powder Based on Silica Gel / V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev, **O. S. Dmitrieva** // Chem. Petrol. Eng. – 2023. – V. 58. – № 9-10. – P. 757-765.
45. Zinurov, V. E. Separating Device for Capturing Fine Particles Formed During Operation of Fluidized Bed Reactors / V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev, A. A. Abdullina, E. I. Salakhova, **O. S. Dmitrieva** // Chem. Petrol. Eng. – 2023. – V. 59. – № 3-4. – P. 288-295.
46. Salakhova, E. I. Gas Cleaning with Dust Collection Device with Arc-Shaped Elements / E. I. Salakhova, V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev, **O. S. Dmitrieva**, A. A. Abdullina // Ecology and Industry of Russia. – 2024. – V. 28. – № 2. – P. 12-18.
47. Zinurov, V. E. The Influence of the Design of a Static Multi-Vortex Classifier on the Efficiency Fractionation of Silica Gel Particles / V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev, **O. S. Dmitrieva**, A. M. Muginov // Theor. Found. Chem. Eng. – 2024. – V. 58. – P. 645-650.
48. Salakhova, E. I. Influence of a Separation Grid on the Efficiency of Particulate Matter Capture in a Device with Arc-Shaped Elements / E. I. Salakhova, V. E. Zinurov, **O. S. Dmitrieva**, A. V. Dmitriev, A. A. Abdullina // Theor. Found. Chem. Eng. – 2024. – V. 58. – P. 617-621.
49. Salakhova, E. I. Determination of the Critical Particle Entrainment Diameter in a Fluidized Bed Reactor / E. I. Salakhova, A. V. Dmitriev, V. E. Zinurov, **O. S. Dmitrieva**, R. I. Gilmudinova // Theor. Found. Chem. Eng. – 2024. – V. 58. – P. 622-626.
50. Bikkulov, R. Y. Evaluation of the Efficiency of a Multivortex Separator for Capturing Fine Particles from Gas Flows in The Air Preparation System in Paint Booths / R. Y. Bikkulov, V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev, **O. S. Dmitrieva**, T. M. Takhaviev // Theor. Found. Chem. Eng. – 2024. – V. 58. – P. 544-548.
51. **Dmitrieva, O. S.** Droplet Size Distribution of the Liquid Phase in a Vortex Separation Device / **O. S. Dmitrieva**, V. V. Kharkov, A. N. Nikolaev // Theor. Found. Chem. Eng. – 2024. – V. 58. – № 5. – P. 1755-1759.
52. Kharkov, V. V. Droplet Dynamics in the Rotating Layer of a Separator with a Tangent Swirler / V. V. Kharkov, **O. S. Dmitrieva**, A. N. Nikolaev // Theor. Found. Chem. Eng. – 2024. – V. 58. – № 5. – P. 1766-1770.

Объекты интеллектуальной собственности:

53. Пат. 171615 Российская Федерация, МПК B01D 45/06, МПК B01D 45/08. Устройство для тонкой пылегазоочистки / Дмитриев А.В., Дмитриева О.С., Мадышев И.Н., Николаев А.Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГЭУ». – № 2017100315; заявл. 09.01.2017; опубл. 07.06.2017, Бюл. № 16.
54. Пат. 179836 Российская Федерация, МПК B01D 47/06. Устройство для мокрой очистки газов / Дмитриев А.В., Дмитриева О.С., Мадышев И.Н., Сагдеев А.А., Николаев А.Н., Гатин Р.С.; заявитель и патентообладатель Дмитриев А.В. – № 2018107304; заявл. 27.02.2018; опубл. 25.05.2018, Бюл. № 15.
55. Пат. 193334 Российская Федерация, МПК B01D 45/08. Устройство для очистки газов от средне- и мелкодисперсных частиц / Соловьева О.В., Соловьев С.А., Дмитриев А.В., Дмитриева О.С., Мадышев И.Н.; заявитель и патентообладатель Соловьева О.В., Соловьев С.А. – 2019105447; заявл. 26.02.2019; опубл. 24.10.2019, Бюл. № 30.
56. Пат. 201604 Российская Федерация, МПК B01D 45/04, B04C 5/103. Пылеуловитель-классификатор с соосно расположенными трубами / Дмитриев А.В., Дмитриева О.С., Мадышев И.Н., Биккулов Р.Я., Зинуров В.Э.; заявитель и патентообладатель Дмитриев А.В., Биккулов Р.Я. – 2020128520; заявл. 26.08.2020; опубл. 23.12.2020, Бюл. № 36.
57. Пат. 201605 Российская Федерация, МПК B01D 45/04, B04C 5/103. Устройство для улавливания мелкодисперсных частиц / Дмитриев А.В., Дмитриева О.С., Мадышев И.Н., Зинуров В.Э., Биккулов Р.Я.; заявитель и патентообладатель Дмитриев А.В., Биккулов Р.Я. – 2020117363; заявл. 14.05.2020; опубл. 23.12.2020, Бюл. № 36.
58. Пат. 205875 Российская Федерация, МПК B01D 17/02, B01D 17/038, B04B 1/04, B04C 5/00. Вихревое устройство для разделения эмульсий / Дмитриев А. В., Дмитриева О. С., Харьков В. В., Зинуров В. Э., Мадышев И. Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КНИТУ» – № 2021117825; заявл. 18.06.2021; опубл. 11.08.2021, Бюл. № 23.

59. Пат. 206160 Российская Федерация, МПК В01Д 17/04. Устройство для разделения эмульсий с дополнительной деэмульсацией потока / Зинулов В. Э., Дмитриев А. В., **Дмитриева О. С.**, Мадышев И. Н., Николаев А. Н., Маясова А. О.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГЭУ». – № 2021116760; заявл. 09.06.2021; опубл. 25.08.2021, Бюл. № 24.
60. Пат. 207306 Российская Федерация, МПК В01Д 45/12, В01Д 45/04, В04С 5/103. Пылеуловитель-классификатор с коническим корпусом / Зинулов В. Э., Бадретдинова Г. Р., Дмитриев А. В., **Дмитриева О. С.**, Мадышев И. Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГЭУ». – № 2021114850; заявл. 25.05.2021; опубл. 21.10.2021, Бюл. № 30.
61. Пат. 208304 Российская Федерация, МПК В04С 5/103. Мультивихревой сепаратор для очистки газов / Мадышев И. Н., Дмитриев А. В., **Дмитриева О. С.**, Харьков В. В., Зинулов В. Э.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КНИТУ». – № 2021120725; заявл. 14.07.2021; опубл. 13.12.2021, Бюл. № 35.
62. Пат. 211784 Российская Федерация, МПК В01Д 45/12, В01Д 45/04, В04С 5/103. Воздушный центробежный классификатор с сепарационной решеткой / Зинулов В. Э., Дмитриев А. В., **Дмитриева О. С.**, Мадышев И. Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГЭУ». – № 2022113309; заявл. 18.05.2022; опубл. 22.06.2022, Бюл. № 18.
63. Пат. 213481 Российская Федерация, МПК В01Д 45/12, В04С 5/103. Мультивихревое устройство с сепарационной спиралью / Зинулов В. Э., Дмитриев А. В., **Дмитриева О. С.**, Моисеева К. С.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГЭУ». – № 2022113306; заявл. 18.05.2022; опубл. 13.09.2022, Бюл. № 26.
64. Пат. 2791822 Российская Федерация, МПК В01Д 3/30. Вихревое контактное устройство / Харьков В. В., **Дмитриева О. С.**, Мадышев И. Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КНИТУ». – № 2023100179; заявл. 10.01.2023; опубл. 13.03.2023, Бюл. № 8.
65. Пат. 2797870 Российская Федерация, МПК В01Д 3/30. Контактное устройство вихревого типа / Харьков В. В., **Дмитриева О. С.**, Мадышев И. Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КНИТУ». – № 2023100181; заявл. 10.01.2023; опубл. 09.06.2023, Бюл. № 16.
66. Пат. 219177 Российская Федерация, МПК В01Д 45/12. Мультивихревое устройство с сепарационными наклонными пластинами / Зинулов В. Э., Дмитриев А. В., **Дмитриева О. С.**, Мугинов А. М., Насырова И. И., Бадретдинова Г. Р.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГЭУ». – № 2023110828; заявл. 26.04.2023; опубл. 03.07.2023, Бюл. № 19.
67. Пат. 219550 Российская Федерация, МПК В01Д 45/08. Устройство для очистки газа от твердых взвешенных частиц / Салахова Э. И., Зинулов В. Э., Дмитриев А. В., **Дмитриева О. С.**, Абдуллина А. А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «КГЭУ». – № 2023114446; заявл. 01.06.2023; опубл. 24.07.2023, Бюл. № 21.

Публикации в других изданиях и материалах конференций:

68. **Дмитриева, О. С.** Обеспечение экологической безопасности при очистке газовых выбросов в вихревых аппаратах с пневмогидравлическими распылителями / О. С. Дмитриева, К. В. Дмитриева, А. В. Дмитриев // Всерос. науч.-практ. конф. «Тенденции развития химии, нефтехимии и нефтепереработки» (22 мая 2015 г., Нижнекамск) : в 2-х т. Т. 1. – Нижнекамск : НХТИ, 2015. – С. 194-196.
69. Нгуен, В. Л. Улавливание твердых частиц из газов в промышленной энергетике / В. Л. Нгуен, С. В. Донг, **О. С. Дмитриева**, А. В. Дмитриев // XII Межд. молодежная науч. конф. «Тинчуринские чтения» (26-28 апреля 2017 г., Казань) : материалы докладов конф. в 3 т. Т. 2. – Казань : КГЭУ, 2017. – С. 344-346.
70. Мадышев, И. Н. Определение эффективности осаждения твердых дисперсных частиц в аппаратах с прямоугольными сепараторами / И. Н. Мадышев, **О. С. Дмитриева**, А. В. Дмитриев // XV Межд. конф. студ., аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (24-27 апреля 2018 г., Томск) : сб. научных трудов. В 7-ми томах. – Томск : НИ ТГУ, 2018. – Т. 2. – С. 195-197.
71. Сафина, Д. И. Эффективность улавливания твердых дисперсных частиц из газового потока в прямоугольных сепараторах / Д. И. Сафина, И. Н. Мадышев, **О. С. Дмитриева** // Пятая Всерос. студ. науч.-техн. конф. «Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология» (23-25 мая 2018 г., Казань) : сб. трудов. – Казань : Бутлеровское наследие, 2018. – С. 186-189.
72. Дмитриев, А. В. Улавливание мелкодисперсных твердых частиц из газовых потоков в прямоугольных сепараторах / А. В. Дмитриев, В. Э. Зинулов, **О. С. Дмитриева**, В. Л. Нгуен // Вестник ИРГТУ. – 2018. – Т. 22. – № 3 (134). – С. 138-144.
73. Дмитриев, А. В. Эффективность прямоугольного сепаратора в зависимости от оформления элементов внутри аппарата / А. В. Дмитриев, В. Э. Зинулов, **О. С. Дмитриева**, В. Л. Нгуен // Вестник КГЭУ. – 2018. – Т. 10. – № 1 (37). – С. 74-81.
74. Зинулов, В. Э. Разработка аппарата для очистки дымовых газов от мелкодисперсных частиц / В. Э. Зинулов, Ю. О. Семенова, **О. С. Дмитриева** // Науч. конф. с межд. участием «Неделя науки СПбПУ» (19-24 ноября 2018 г., Санкт-Петербург) : материалы конф. Ч. 1. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2018. – С. 72-74.

- 75.Дмитриев, А. В. Моделирование процесса разделения водонефтяной эмульсии в прямоугольном сепараторе / А. В. Дмитриев, В. Э. Зинулов, **О. С. Дмитриева**, Д. С. Винь // Вестник КГЭУ. – 2018. – Т. 10. – № 3 (39). – С. 65-71.
- 76.**Дмитриева, О. С.** Сепарация газового потока при его прохождении между элементами сепаратора / О. С. Дмитриева, В. Э. Зинулов, Ю. О. Семенова // IX Межд. науч.-техн. конф. «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2018» (5-7 декабря 2018 г., Казань) : материалы конф. Ч. 2. – Казань, 2018. – С. 36-38.
- 77.Бектемирова, Э. Р. Улавливание мелкодисперсных частиц прямоугольными сепараторами в пищевой промышленности / Э. Р. Бектемирова, А. В. Дмитриев, **О. С. Дмитриева** // XVI Всерос. конф. молодых ученых, аспирантов и студ. с межд. участием «Пищевые технологии и биотехнологии» (16-19 апреля 2019 г., Казань): материалы конф. в 3 ч. Ч. 1. – Казань : КНИТУ, 2019. – С. 142-144.
- 78.Мадышев, И. Н. Моделирование процесса разделения нефтяных эмульсий в прямоугольных сепараторах / И. Н. Мадышев, Д. С. Винь, **О. С. Дмитриева**, Д. А. Белков, А. В. Дмитриев // XX Межд. науч.-практ. конф. им. проф. Л. П. Кулёва студ. и молодых ученых «Химия и химическая технология в XXI веке» (20-23 мая 2019 г., Томск) : сб. материалов конф. – Томск : ТПУ, 2019. – С. 377-378.
- 79.Дмитриев, А. В. Очистка газовых выбросов котельных установок от твердых частиц / А. В. Дмитриев, В. Э. Зинулов, **О. С. Дмитриева**, В. Л. Нгуен // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2020. – Т. 22. – № 1. – С. 3-9.
- 80.Галимова, А. Р. Исследование различных видов экспериментальных вставок в отстойнике с целью повышения эффективности разделения водонефтяной эмульсии / А. Р. Галимова, **О. С. Дмитриева** // Межд. молодежная науч. конф. «Тинчуринские чтения – 2020 «Энергетика и цифровая трансформация» (28-29 апреля 2020 г., Казань). В 3 т. Т. 2 : материалы конф. – Казань : КГЭУ, 2020. – С. 369-371.
- 81.Зинулов, В. Э. Оценка времени работы пылеуловителя со скругленными сепарационными элементами / В. Э. Зинулов, А. В. Дмитриев, Т. С. Петрова, **О. С. Дмитриева** // Вестник ИргТУ. – 2020. – Т. 24. – № 3. – С. 606–615.
- 82.Зинулов, В. Э. Улавливание мелкодисперсных капель из газового потока в сепарационном устройстве с двутавровыми элементами / В. Э. Зинулов, А. В. Дмитриев, **О. С. Дмитриева** // Промышленная энергетика. – 2020. – № 12. – С. 47-53.
- 83.Галимова, А. Р. Численное моделирование разделения эмульсии / А. Р. Галимова, Г. Р. Бадретдинова, Д. М. Гарипова, **О. С. Дмитриева** // XVII Всерос. конф. молодых ученых, аспирантов и студ. с межд. участием «Пищевые технологии и биотехнологии» (20-23 апреля 2021 г., Казань) : материалы конф. – Казань : КНИТУ, 2021. – С. 135-138.
- 84.Биккулов, Р. Я. Применение сепаратора для снижения выбросов летучих органических веществ / Р. Я. Биккулов, А. П. Иванов, А. И. Ибатуллина, **О. С. Дмитриева** // VI Всерос. студ. науч.-практ. конф. «Интенсификация тепломассообменных процессов, промышленная безопасность и экология» (24-26 мая 2022 г., Казань) : материалы конф. – Казань : КНИТУ, 2022. – С. 460-461.
- 85.Зинулов, В. Э. Определение расчетной скорости газового потока в фильтрах грубой и тонкой очистки при различной степени загрязненности в окрасочных камерах / В. Э. Зинулов, Р. Я. Биккулов, А. В. Дмитриев, **О. С. Дмитриева**, А. Н. Николаев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24. – № 5. – С. 3-12.
- 86.Зинулов, В. Э. Сравнение технических характеристик мультивихревого сепаратора с циклонами различных модификаций / В. Э. Зинулов, А. В. Дмитриев, Р. Я. Биккулов, **О. С. Дмитриева**, А. А. Абдуллина // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – Т. 25. – № 3. – С. 117-127.
- 87.**Дмитриева, О. С.** Интенсификация массообмена в аппаратах полого вихревого типа / О. С. Дмитриева, И. Н. Мадышев, А. Н. Николаев // XVIII Всерос. конф. молодых ученых, аспирантов и студ. с межд. участием «Пищевые технологии и биотехнологии» (18-21 апреля 2023 г., Казань) : сб. статей. – Казань : КНИТУ, 2023. – С. 108-113.