

В диссертационный совет 24.2.312.05,
созданный на базе ФГБОУ ВО
«Казанский национальный
исследовательский технологический
университет»
420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68

ОТЗЫВ

официального оппонента

доктора технических наук, доцента Колобова Михаила Юрьевича
на диссертационную работу

Дмитриевой Оксаны Сергеевны «Совершенствование аппаратов вихревого типа для проведения гидромеханических процессов разделения дисперсных сред», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий

Актуальность диссертационной работы подтверждается стратегией развития химического и нефтехимического комплекса, направленной на разработку и внедрение технических и технологических решений, обеспечивающих повышение эффективности процессов в условиях роста требований к энерго- и ресурсосбережению, а также охране окружающей среды. В этой связи важную роль играет совершенствование гидромеханических процессов разделения дисперсных сред. Малая пропускная способность по газу традиционного оборудования привела к созданию аппаратов вихревого типа, устойчиво работающих при скоростях газа до 40 м/с, но в аппаратурном оформлении традиционных вихревых аппаратов с одиночными вихрями имеются ограничения с обеспечением равномерного распределения фаз и высокой эффективности сепарации. Автором предложено использование конструкций мультивихревых аппаратов для разделения частиц, очистки газов и эмульсий. В таких конструкциях создаются множественные вихри малого масштаба, что позволяет повысить интенсивность процессов, снизить гидравлическое сопротивление и сократить энергозатраты. Это открывает новые возможности для создания компактных и эффективных устройств и для повышения конкурентоспособности отечественных технологий. Перспективность и актуальность разработки методологии совершенствования аппаратов вихревого типа объективно подтверждается получением ряда грантов.

Достоверность и новизна научных положений

Достоверность основных научных положений, изложенных в работе, не вызывает сомнений. Диссертационная работа оригинальна, содержит новые подходы к решению задачи разработки и реализации процессов разделения гетерогенных потоков, их аппаратурного оформления и всестороннего исследования. Научные исследования, предлагаемые модели и расчеты,

проведенные на их основе, базируются на современных фундаментальных теоретических подходах к проблеме, лабораторных экспериментах с использованием современного измерительного оборудования, обеспечивающего воспроизводимость экспериментальных результатов, результатах промышленных обследований на действующих технологических установках. Достоверность результатов исследования обеспечивается также использованием высокоточного программного продукта Ansys Fluent, современных методов машинного обучения и программного обеспечения Orange Data Mining. Данные, полученные с использованием современных методов численного моделирования, подтверждены проведенными экспериментами, что обеспечивает их адекватность.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается глубокой теоретической проработкой известных исследований по теме диссертационной работы, применением широкого спектра методов исследований и статистической обработкой результатов. Полученные результаты исследования не противоречат известным научным достижениям и дополняют их. Рекомендации и выводы подтверждены внедрениями на производстве, которые отражены в актах о внедрении и практическом использовании результатов организациями.

Научная новизна работы состоит в том, что:

- впервые предложена и реализована методология использования мультивихревых течений малого масштаба для интенсификации процессов разделения гетерогенных потоков,
- в результате экспериментальных и теоретических исследований гидродинамики потока в разработанных мультивихревых устройствах получены оригинальные зависимости гидравлического сопротивления и эффективности сепарации от конструктивных и режимных параметров работы, что позволяет усовершенствовать проектирование и эксплуатацию оборудования,
- впервые в результате экспериментальных и теоретических исследований установлены зависимости для определения эффективности процессов очистки, классификации и сепарации потоков при разных конструктивных вариантах исполнения аппаратов мультивихревого типа и значениях режимных параметров указанных процессов,
- впервые экспериментальным путем определены зависимости гидравлического сопротивления потоков при реализации процессов сепарации и классификации частиц, очистки газов от аэрозолей и липких частиц в аппаратах мультивихревого типа, в зависимости от режимных и геометрических параметров,
- создан алгоритм расчета с использованием возможностей машинного обучения и программного обеспечения Orange Data Mining для анализа и прогнозирования эффективности работы мультивихревого устройства с

учетом рационального подбора гидродинамических характеристик работы в период эксплуатации аппарата.

Автором опубликовано 22 статьи в журналах, входящих в Перечень рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, и 30 статей в журналах, индексируемых в Scopus и Web of Science, среди которых в том числе статьи в высокорейтинговых журналах квартили Q1-Q2.

Теоретическая значимость результатов исследований заключается в решении научной проблемы разработки нового подхода для реализации гидромеханических процессов разделения дисперсных сред за счет использования микровихрей в мультивихревых устройствах, представляющих собой аппаратное оформление гидромеханических процессов с высокой степенью разделения и низкими потерями энергии, а также в формулировке теоретических представлений о процессах эффективной классификации, сепарации, разделения гетерогенных потоков и др. Кроме того, теоретическую значимость представляют также подтвержденные экспериментом результаты проведенных численных исследований гидродинамики потоков с множественными вихрями малого масштаба, что позволило получить данные о полях скоростей, перепаде давления и эффективности процессов; зависимости для оценки эффективности и гидравлического сопротивления устройств при различных конструктивных исполнениях мультивихревых устройств и значениях режимных параметров; разработанный алгоритм расчета эффективности мультивихревого классификатора на основе машинного обучения, программирования на языке Python, позволяющий оценивать недостающие сведения о гидродинамических характеристиках работы устройства и его эффективности.

Практическая значимость полученных результатов исследований заключается:

- в создании методологии комплексной оценки гидромеханических процессов в мультивихревых устройствах, что позволяет систематически подходить к их совершенствованию;
- в разработке инженерных методик расчета и проектирования мультивихревых аппаратов, которые обеспечивают их быстрое внедрение и адаптацию к различным условиям эксплуатации в промышленности;
- в разработке и патентовании конструкций мультивихревых аппаратов, позволяющих снизить гидравлическое сопротивление и повысить эффективность процессов классификации, сепарации и разделения гетерогенных систем;
- в разработке рекомендаций и обосновании выбора конструктивных характеристик разработанных аппаратов для сред с различной дисперсной средой;
- в определении технико-экономической эффективности работы разработанных устройств и сравнении ее с традиционными аналогами, экономического эффекта за счет снижения эксплуатационных затрат,

снижения расходов энергоносителей и экономии от предотвращенного экологического ущерба, которые в сумме составляют более 60 млн. рублей;

- во внедрении разработанных технических решений на промышленных предприятиях химической отрасли и в ведущих НИИ России в области технологий производства и переработки легкого углеводородного сырья;

- в разработке технологических процессов очистки отходящего воздуха окрасочно-сушильной камеры и рекомендаций по утилизации уловленных частиц блочным мультивихревым сепаратором в качестве компонентов композитных изделий, что способствует снижению отходов и повышению экологичности процессов.

Анализ содержания диссертационной работы

По своей структуре диссертационная работа состоит из введения, семи глав, выводов по главам, заключения с общими выводами и рекомендациями по работе, списка литературы и приложения. Объем диссертации на 442 страницах машинописного текста и содержит 226 рисунков и 12 таблиц. Список литературы включает 309 наименований, приложения представлены на 26 страницах.

Во введении диссертации сформулированы актуальность работы, цели и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, основные научные положения, выносимые на защиту, методы и достоверность исследований, показано личное участие автора и сведения об апробации результатов.

Первая глава содержит литературный обзор конструкций вихревых аппаратов и предыдущих исследований закрученных потоков. Выявлены преимущества использования закрученных потоков в процессах, реализуемых в химической технологии, обобщены результаты предшествующих исследований гидродинамики одно- и многофазных течений, проведен анализ конструкций как современных, так и традиционных типов вихревых аппаратов. На основе анализа недостатков существующих аппаратов вихревого типа сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе рассмотрены методы моделирования однофазных и многофазных течений, включая дисперсные потоки с малыми концентрациями частиц. Описываются основные подходы и уравнения, используемые для численного моделирования задачи многоскоростного континуума. Малая концентрация дисперсной фазы позволяет пренебречь ее влиянием на течение сплошной фазы и проводить решение гидродинамической задачи в два этапа: моделирование однофазного течения сплошной среды без взвешенных частиц и решение задачи движения одиночных частиц в рассчитанном поле скоростей сплошной фазы. В главе приведен обзор известных моделей турбулентности. Обсуждается возможность моделирования гидродинамики течений в разработанных мультивихревых устройствах методами CFD-анализа с применением специализированной программы Ansys Fluent.

Третья глава посвящена созданию и исследованию работы нескольких конструкций мультивихревых классификаторов-сепараторов. В результате

исследований гидродинамики газового потока определены поля скоростей и взаимосвязь входных и выходных параметров процесса с размерами сепарационной зоны, в которой формируются множественные вихри, и геометрическими размерами прорезей в центральной трубе, относительной высотой трубы, которые определяют условия образования вихрей. Проведено измерение гидравлического сопротивления на созданной экспериментальной установке и дана оценка воспроизводимости результатов. Выполнено моделирование течения рабочих сред в программе Ansys Fluent, позволившее рассчитать гидравлическое сопротивление и эффективности мультивихревых устройств на примере сепарации частиц силикагеля. При этом определено, что наиболее близкие к экспериментальным данным результаты получаются при использовании модели турбулентности $k-\omega$ SST. Описаны граничные условия модели и процедура компьютерного моделирования, включая построение расчетной сетки. Проведенное обобщение результатов исследований позволило получить зависимости перепада давления и эффективности сепарации частиц от режимных параметров. Даны рекомендации по использованию сепаратора для среды жидкость-жидкость, определены размеры отверстий сепарационной зоны устройства, через которые фазы эмульсии покидают межтрубное пространство. Эффективность фракционирования сыпучего материала определена для нескольких типов конструкции и разного масштаба.

В четвертой главе описаны процесс сепарации в разработанных мультивихревых устройствах с модифицированными вставками трех профилей и результаты исследований указанного процесса. Соискатель проводит сравнительный анализ конструкций по их эффективности, как между собой, так и с традиционным циклонным оборудованием. Выполненные численные расчеты по разработанной математической модели позволили проанализировать аэродинамические характеристики устройств, получить картину образования стабильных циркуляционных зон между вставками. Вставки, модифицированные для усиления закрутки потока, могут быть рекомендованы к применению в сепарационных устройствах, где требуется повышение разделительной способности при минимальных потерях давления. Автором даны рекомендации по выбору профиля вставок исходя из условий протекания гидромеханического процесса. Обсуждается вопрос рационального размещения вставок в рабочей зоне сепаратора. Для верификации математической модели разработано несколько экспериментальных установок для исследования гидравлического сопротивления и эффективности сепарации в разработанных конструкциях. Приведены графические зависимости перепада давления и эффективности сепарации от геометрических и режимных параметров устройств.

В пятой главе рассматривается процесс очистки газа от аэрозолей и липких частиц, представлена разработанная конструкция блочного мультивихревого сепаратора и представлен анализ структуры потоков, оценивается эффективность устройства при очистке газа от липких частиц. В результате экспериментальных исследований определена эффективность

сепарации. Численные исследования гидравлического сопротивления двух различных модификаций блочного мультивихревого сепаратора позволили выявить зависимости потери давления в блочных сепараторах скорости воздуха на входе в устройство. Адекватность полученных расчетных значений проверялась путем сравнения результатов расчета с результатами экспериментальных исследований. Сравнение энергозатрат в мультивихревом сепараторе с энергозатратами в циклонах различных типов показало преимущества первых.

В шестой главе разработаны инженерные методики расчета мультивихревых устройств, включая классификаторы, сепараторы с модифицированными вставками и блочные устройства. Особое внимание уделено разработанному алгоритму на основе программного обеспечения Orange Data Mining, который используется для анализа больших массивов экспериментальных данных, прогнозирования эффективности работы устройств и улучшения их параметров работы. Это особенно актуально при недостатке экспериментальных данных или при необходимости быстрого анализа.

Седьмая глава содержит примеры успешного внедрения разработанных устройств в промышленности, включая установки фракционирования сыпучих материалов и очистки воздуха окрасочно-сушильных камер. Также представлены рекомендуемые схемы модернизации установок очистки промышленных газов и разделения водонефтяных эмульсий. Результаты модернизации оборудования и их практическая эффективность обосновываются технико-экономическими расчетами. Дана рекомендация переработки отходов производства на примере окрасочно-сушильной камеры (ООО «Каматек»).

В заключении диссертационной работы представлены выводы, которые полностью согласуются с результатами исследований автора, соответствуют цели и задачам исследования.

В приложениях приведены акты практического применения и испытания разработанных в диссертации материалов и технологий на предприятиях России, а также код программы.

Диссертационная работа Дмитриевой О.С. «Совершенствование аппаратов вихревого типа для проведения гидромеханических процессов разделения дисперсных сред» написана грамотно, выполнена на достаточно высоком теоретическом и экспериментальном уровне и оформлена в соответствии с требованиями. В диссертационной работе отсутствует заимствованный материал без ссылки на автора или источник заимствования. Автореферат полностью отражает содержание материала диссертации, соответствует структуре изложения материала в работе.

С учетом научной новизны и практической значимости диссертационной работы, ее результаты рекомендуется использовать в различных отраслях промышленности, где актуальны процессы разделения дисперсных сред, очистки газов и жидкостей, а также классификации сыпучих материалов. Кроме того, результаты могут быть использованы в учебном

процессе вузов при подготовке специалистов в области химической технологии, экологии, машиностроения и механики. Разработанные мультивихревые аппараты могут быть внедрены в технологические установки для разделения водонефтяных эмульсий, очистки промышленных газов от аэрозолей и липких частиц, а также для фракционирования сыпучих материалов, а созданные в работе инженерные методики расчета мультивихревых устройств могут быть использованы проектными и конструкторскими бюро для проектирования и модернизации сепарационного оборудования.

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

Замечания по диссертации

По диссертации имеются следующие **вопросы и замечания:**

1. В третьей главе рассматривается множество процессов, проводимых в мультивихревом сепараторе. Вместе с тем, хотелось бы отметить, что исследованиям работы мультивихревого классификатора отводится меньше объема, было бы полезно расширить изучение особенностей работы классификатора, включая влияние различных факторов (например, изменение физико-химических свойств дисперсной фазы) на его эффективность и устойчивость работы. Это позволит более полно оценить потенциал разработанного устройства в различных промышленных условиях.

2. В пятой главе диссертационной работы отсутствуют графические зависимости, иллюстрирующие эффективность различных модификаций блочного мультивихревого сепаратора, что могло бы наглядно представить преимущества и отличия исследуемых конструкций.

3. В пятой главе своей работы автор указывает на возможность очистки газов от аэрозолей. Почему в таком случае автор диссертации не рассматривает возможность удаления жидкой дисперсной фазы из газов?

4. Выводы, завершающие представленные в работе главы, носят как правило, констатирующий характер. Следовало бы уделить внимание

выявленным особенностям изучаемых объектов и явлений для прогнозирования поведения устройств при изменении режимных параметров.

5. Каковы критерии выбора конкретного типа мультивихревого аппарата в различных отраслях промышленности? Сведения, содержащиеся в таблицах 7.1 и 7.2, посвященные рекомендациям по использованию аппаратов, целесообразно было бы объединить для повышения полноты и наглядности представления информации. Это позволило бы более четко сопоставить параметры и условия применения различных модификаций устройств, а также облегчило бы восприятие и анализ данных.

Отмеченные замечания относятся в большей степени к недочетам частного характера, не опровергают основные теоретические положения, выводы и практические результаты и не снижают общей значимости диссертации для науки и практики.

Заключение по диссертационной работе

Считаю, что диссертационная работа Дмитриевой Оксаны Сергеевны «Совершенствование аппаратов вихревого типа для проведения гидромеханических процессов разделения дисперсных сред», выполнена самостоятельно на высоком научном уровне. В диссертационной работе изложены новые научные результаты и положения, выдвигаемые автором для публичной защиты, работа имеет внутреннее единство и свидетельствует о личном вкладе автора в науку.

Диссертация Дмитриевой Оксаны Сергеевны «Совершенствование аппаратов вихревого типа для проведения гидромеханических процессов разделения дисперсных сред» является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены научно обоснованные технические и технологические решения по совершенствованию процессов и оборудования для разделения водонефтяных эмульсий, очистки промышленных газов от аэрозолей и липких частиц, а также для фракционирования сыпучих материалов с использованием мультивихревых течений, что позволит повысить разделительную способность при минимальных потерях давления, тем самым вносит существенный вклад в развитие химического и нефтехимического комплекса страны.

На основании вышеизложенного, учитывая актуальность, достоверность результатов исследований, научную новизну, обоснованность научных положений и выводов, значимость результатов работы для науки и практики, связанной с внедрением результатов на промышленных предприятиях, считаю, что диссертация Дмитриевой О.С. «Совершенствование аппаратов вихревого типа для проведения гидромеханических процессов разделения дисперсных сред» соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. (в действующей редакции), предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Дмитриева Оксана Сергеевна,

Колобов
Михаил Юрьевич
« 4 » сентября 2025 г.

Эход. № 05-8525
« 09 » 09 20 25 г.
подпись Дру