

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук Сидягина Андрея Ананьевича
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 темы.

Одним из прогрессивных направлений для реализации гидромеханических процессов разделения дисперсных сред является использование вихревых аппаратов, позволяющих обеспечить достаточно высокую эффективность при конструктивной простоте оборудования и умеренных энергетических затратах. Большинство известных устройств основано на использовании одиночных вихрей или турбулентных потоков, что не всегда позволяет достичь требуемых показателей разделения, особенно при обработке частиц, отличающихся по размеру. Большое количество работ, направленных на усовершенствование конструкций аппаратов вихревого типа и исследование явлений, происходящих в закрученных потоках, свидетельствует о целесообразности и перспективности разработок в данной области. В представленной работе автор предлагает инновационный подход к разработке устройств, использующих закрученные потоки, заключающийся в создании многочисленных вихревых течений с образованием маломасштабных вихрей (минивихрей), которые занимают промежуточное положение между крупномасштабными вихрями и турбулентными микровихрями. Совокупность минивихрей при их совместном действии и частичном наложении друг на друга приводит к образованию локальных зон с интенсивным вращением, способствующим усилению центробежного воздействия на дисперсные среды, что позволяет повысить эффективность разделения, снизить гидравлическое сопротивление и энергозатраты, а также уменьшить габаритные размеры оборудования. Автор рассматривает методологию проектирования и расчета мультивихревых аппаратов, сочетающую экспериментальные исследования и численное моделирование. В связи с этим, представленная работа направлена на решение весьма **актуальной задачи** теоретического и экспериментального исследования гидродинамики и сепарации многофазных дисперсных сред в технологическом оборудовании, в котором реализуются мультивихревые течения.

Научная новизна исследований и полученных результатов.

Научная новизна работы заключается в формировании методологии проектирования аппаратов вихревого типа, в которых используются множественные вихревые потоки малого масштаба. Аппараты, использующие предлагаемый принцип мультивихревых течений, обеспечивают более высокую эффективность сепарации и классификации частиц за счет создания локальных зон с интенсивным вращением без увеличения входной скорости потока. Сочетание экспериментальных исследований с широким применением методов компьютерного моделирования, CFD-анализа и машинного обучения позволило выявить ключевые закономерности гидродинамики и сепарации в таких устройствах, а также разработать инженерные методики их расчета.

Основные научные результаты заключаются в следующем:

- впервые предложено использование микровихрей в мультивихревых устройствах для очистки газов, классификации дисперсных систем и разделения эмульсий. Это открывает новые возможности для повышения эффективности процессов при минимальных энергозатратах;

- предложена методология комплексного изучения гидродинамических процессов, реализующих создание множественных вихрей малого масштаба, включающая экспериментальные и численные исследования полей скоростей, потерь давления и эффективности сепарации. Получены зависимости, связывающие эти показатели с конструктивными характеристиками аппаратов и режимными параметрами протекающих в них процессов;

- разработан алгоритм компьютерной обработки экспериментальных и численных данных, а также инновационная методология корректировки нечеткой информации и оценочного определения недостающих данных по эффективности работы мультивихревых устройств с применением систем машинного обучения (Orange Data Mining);

- созданы инженерные методики расчета мультивихревых классификаторов, сепараторов с модифицированными вставками и блочных мультивихревых сепараторов, которые основаны на анализе гидродинамики потоков и траекторий частиц, что позволяет подбирать конструктивные и режимные параметры проектируемых аппаратов для конкретных технологических задач;

- разработаны и запатентованы конструкции мультивихревых аппаратов, обладающих низким гидравлическим сопротивлением и высокой эффективностью. Даны рекомендации по их внедрению в промышленные процессы, включая модернизацию установок для фракционирования сыпучих материалов, очистки газов и разделения эмульсий.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций.

Обоснованность и достоверность результатов исследований, основных положений и выводов подтверждается тем, что работа базируется на фундаментальных принципах гидродинамики и теории вихревых течений, применении высокоточных программных продуктов для компьютерного моделирования и экспериментальных исследованиях, проведенных с использованием современных поверенных средств измерения. Достоверность результатов диссертационной работы подтверждена использованием специализированного программного обеспечения (Ansys Fluent, Orange Data Mining), а результаты CFD анализа показали хорошее согласование с экспериментальными исследованиями и опубликованными данными по эффективности сепарации и гидродинамике закрученных потоков, что подтверждает их научную обоснованность. Опыт внедрения разработок на промышленных предприятиях (ООО «Скатз», АО «ВНИИУС», ООО "КАМАТЕК"), подтверждает, что автор не ограничился теоретическими изысканиями, а довел работу до стадии, приносящей реальную пользу промышленности.

Полученные результаты исследования изложены в 87 работах, в том числе в 22 статьях в журналах, рецензируемых ВАК при Минобрнауки России (K1, K2), в 30 статьях, индексируемых в системе Scopus Web of Science (Q1-Q4), 15 патентах.

Оценка содержания диссертации, автореферата и степень завершенности.

Диссертация представляет собой завершенное исследование, охватывающее все этапы – от теоретического обоснования до внедрения. Структурно диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы и приложений. Объем работы составляет 442 страницы текста, в том числе 226 рисунков, 12 таблиц, список литературы включает 309 наименований.

Во введении сформулированы актуальность, оценка степени научной разработанности проблемы, цель и задачи диссертационной работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методы и достоверность исследований, положения, выносимые на защиту, приведены сведения о публикациях и апробации работы, а также дана оценка личного участия автора.

В первой главе диссертации рассматриваются перспективы использования вихревых аппаратов в химической и смежных отраслях промышленности. Анализируются преимущества закрученных потоков, включая эффективную сепарацию частиц и интенсификацию тепло- и массообмена, приведена классификация закрученных течений. Особое внимание уделено гидродинамике закрученных потоков, показаны особенности и

достоинства мультивихревых течений, влияние размеров дисперсных частиц на эффективность процесса разделения.

Часть главы посвящена конструктивным особенностям вихревых аппаратов, сепараторов и контактных устройств, применяемым типам завихрителей. Выявлены ключевые проблемы, связанные с устойчивостью вихревых течений, энергозатратами и ограниченной эффективностью при работе с мелкодисперсными частицами. Показано, что процедура подбора оборудования осложняется конкретными свойствами дисперсных частиц. В качестве решения предложено использование мультивихревых течений, которые сочетают преимущества крупномасштабных вихрей и турбулентных потоков. Поставлены цели и задачи исследования.

Вторая глава диссертации также носит обзорно-аналитический характер, в ней рассматриваются подходы к моделированию закрученных одно- и многофазных течений, применяемые для анализа и оптимизации вихревых аппаратов. Описываются методы численного решения гидродинамических задач, включая различные модели турбулентности и определяется их применимость для описания сложных вихревых структур. Особое внимание уделено моделированию многофазных потоков, на основе моделей Эйлера-Лагранжа и Эйлера-Эйлера, рассмотрены допущения при которых малая концентрация дисперсной фазы позволяет пренебречь ее влиянием на течение потока рассмотрены силы, действующих на дисперсные частицы (аэродинамическое сопротивление, сила Магнуса, термофоретические эффекты). Подчеркивается важность выбора адекватной модели турбулентности для точного прогнозирования поведения частиц в закрученных потоках. Перечислены современные CFD-программы оценены их возможности для решения задач гидродинамики. Отмечено, что в представленной работе активно применялся продукт Ansys Fluent. Показано, что комбинация экспериментальных и численных методов позволяет повысить качество изучения работы мультивихревых устройств. В заключении подчеркивается значимость комплексного подхода для оптимизации процессов сепарации и классификации частиц.

В третьей главе представлены результаты исследований работы мультивихревого классификатора-сепаратора, предназначенного для разделения мелкодисперсных частиц размером до 40 мкм. Описана конструкция и принцип действия устройства, а также роль вихревых структур в процессе сепарации. Проведены экспериментальные (воздух) и численные (воздух, вода, водонефтяная эмульсия) исследования, подтверждающие низкие потери давления и высокую эффективность разделения. Установлено, что устойчивая вихревая структура достигается при определенных геометрических параметрах, таких как высота внешнего цилиндра сепаратора, ширина и высота прямоугольных прорезей. С

использованием инструментария Ansys Fluent автором получены поля скоростей и траектории движения частиц в исследуемом устройстве, что дало возможность оценить вихревую структуру и уровень интенсивности турбулентности. Также на основе моделирования выполнена оценка эффективности фракционирования сыпучего материала в мультивихревом классификаторе.

В четвертой главе исследуются конструкции сепараторов с модифицированными вставками (I-, C- и П-профиля) для очистки газовых и жидкостных потоков от дисперсных частиц. Показано, что геометрия вставок существенно влияет на эффективность сепарации: двутавровые элементы (I-профиль) демонстрируют наивысшую эффективность (до 84%) благодаря образованию множества мелких вихрей, в то время как дугообразные вставки (C-профиль) обеспечивают минимальное гидравлическое сопротивление. Приведены результаты численного моделирования и экспериментальных исследований, подтверждающие зависимость эффективности от скорости потока, размера частиц и конструктивных параметров. Выполнен анализ зон образования вихрей в объеме прямоугольного сепаратора, дана оценка координат центров вихрей в зависимости от скоростей потока и высоты бортов вставок. Установлено, что для сепарации эмульсий оптимальное соотношение высоты борта к ширине элемента составляет до 0,5. Разработанные устройства оценены с точки зрения эффективности и гидравлического сопротивления и сделан вывод о целесообразности их использования вместо инерционных и инерционно-центробежных аппаратов, а также традиционных циклонов. Показано, что компактность и высокая эффективность предложенных устройств делают их перспективными для установок с ограниченным пространством.

В пятой главе представлены результаты исследования блочного мультивихревого сепаратора, предназначенного для очистки газов от аэрозолей и липких частиц. Описаны конструктивные особенности устройства, правила выполнения отверстий в боковых стенках блоков квадратного сечения, принцип действия устройства и характер вихревой структуры в сепарационной зоне. Проведены экспериментальные и численные исследования гидродинамики потока, показавшие зависимость гидравлического сопротивления и гидродинамической обстановки от наличия задней крышки: с крышкой сопротивление увеличивается, но обеспечивается устойчивость вихрей. Установлено, что эффективность улавливания частиц возрастает с увеличением скорости потока и числа Стокса, достигая максимальных значений при диаметре отверстий в крышке 5 мм. Сравнение с циклонными сепараторами выявило преимущество блочного мультивихревого сепаратора по эффективности при меньших энергозатратах. Результаты исследований

подтвердили, что уменьшение геометрических размеров устройства повышает эффективность очистки без значительного роста потерь давления.

В шестой главе представлены методики расчета мультивихревых аппаратов, включая классификаторы и сепараторы, для сепарации многофазных сред и очистки газов. Основное внимание уделено рациональному подбору конструктивных параметров и условий эксплуатации с использованием технологии машинного обучения, в частности, программы Orange Data Mining. Подход позволяет составить прогноз эффективности устройства с учетом множества факторов, например, таких как скорость потока и размер частиц и целого ряда других, в том числе при наличии нечетких или неполных данных. Разработаны алгоритмы расчета, включая аппроксимацию данных, подобраны коэффициенты аппроксимирующих функций, оценена точность функций по величине среднеквадратичных отклонений. Предложена методика для оценочных расчетов эффективности при подборе оптимальных значений геометрических размеров сепараторов с двутавровыми элементами при обеспечении минимального прогиба и высокой эффективности. Приведены зависимости для расчета геометрии каналов блочных мультивихревых сепараторов, а также зависимости для расчета продолжительности работы сепарационного устройства при различной степени запыленности пропускаемого через устройство воздуха.

В седьмой главе рассмотрено промышленное применение мультивихревых аппаратов для сепарации и классификации дисперсных сред в химико-технологических процессах. Представлена систематизация аппаратов по характеристикам дисперсионной среды, включая таблицу выбора устройств в зависимости от требований процесса. Описаны модернизированные установки для фракционирования сыпучих материалов; очистки газов, выходящих из реакторов дегидрирования; разделения водонефтяных эмульсий и очистки воздуха в окрасочно-сушильных камерах. Показано, что мультивихревые классификаторы обеспечивают более высокую селективность по сравнению с циклонами. Разработан алгоритм расчета конструктивных параметров сепараторов с дугообразными элементами, учитывающий их эффективность и гидравлическое сопротивление. Приведены результаты технико-экономического анализа, подтверждающие рентабельность внедрения предложенных решений. Особое внимание уделено утилизации уловленных частиц, например, их использованию в композитных наполнителях.

В заключении представлены основные выводы по работе, на основании которых можно оценить теоретическую и практическую значимость работы.

В приложении представлены акты о результатах внедрений работы в промышленность, расчет экономической целесообразности, программный код разработанной программы.

Структура работы логична, а содержание автореферата полно отражает ключевые результаты диссертации, ее основное содержание, новизну и значимость. Выполненная диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий по пунктам 3, 9 и 10.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов исследований:

- разработана методология комплексной оценки гидродинамических процессов в мультивихревых устройствах, что позволяет совершенствовать их конструкцию и повышать эффективность работы;
- получены эмпирические зависимости гидравлического сопротивления и эффективности сепарации, которые могут быть использованы для прогнозирования поведения устройств при изменении режимных параметров;
- разработаны инженерные методики расчета мультивихревых аппаратов;
- созданы и запатентованы конструкции аппаратов с закрученными потоками, характеризующиеся низким гидравлическим сопротивлением и высокой эффективностью, рекомендованные для применения на предприятиях;
- получены результаты технико-экономической эффективности работы мультивихревых устройств, подтверждающие их преимущества перед традиционными решениями;
- сформулированы рекомендации по утилизации уловленных частиц, что способствует снижению экологической нагрузки и использованию вторичных ресурсов;
- разработанные аппараты приняты к внедрению на промышленных предприятиях, что подтверждает их практическую ценность и возможность масштабирования технологий.

Вопросы и замечания по работе

1. При сопоставлении результатов моделирования и экспериментальных исследований, автор делает акцент на расхождении результатов. Это отмечается, например, и при исследовании течения газовых потоков в мультивихревом сепараторе-классификаторе (раздел 3.2, 3.5) и при исследовании работы сепарационных устройств с модифицированными вставками (раздел 4.2, 4.5).

Вместе с тем в тексте отсутствует четкое описание условий проведения экспериментов и по отдельным параметрам применяемого измерительного инструментария. Так, при описании лабораторной установки по измерению сопротивления сепаратора-классификатора не поясняется каким образом и с помощью каких приборов измерялась скорость потока, отмечается только, что измерялась скорость *"в определенной точке подачи газа"* (стр.90), в отношении чего автором было сделано предположение о том, что это является причиной расхождения результатов между физическим экспериментом и численным моделированием, где использовалась среднерасходная скорость. Предположу, в отсутствие другой информации, что в качестве датчика измерения скорости была задействована трубка Пито. Непонятно, почему бы не установить какой-то расходомер (типа сужающего устройства, как было использовано в ряде других экспериментов), чтобы более качественно измерять расход потока и по нему оценивать скорости непосредственно на входе в исследуемое устройство и при прохождении сепарационных отверстий в самом устройстве?

2. При рассмотрении текста в разделе 3.2 внимание привлекла интересная фраза (стр. 94): *"...визуализация образования завихрений в межтрубном пространстве при физическом эксперименте и численном моделировании совпадают"*. Интересно, а как проводилась визуализация завихрений при физическом эксперименте? Осуществлялась ли каким-то образом фиксация визуальных наблюдений? К сожалению, об этом ничего в тексте работы не говорится.

3. При всех показанных в диссертационной работе достоинствах разработанных конструкций, остается открытым вопрос – а каким образом осуществлять очистку устройств от осевших и накопившихся на поверхностях сепараторов загрязнений? Может ли эта процедура быть упрощена и осуществлена без разборки конструкции? Это относится и к сепараторам с модифицированными вставками, рассмотренным в 4 главе, где степень загрязнения будет зависеть от удаленности конкретной вставки от входного отверстия и, в особенности, к блочному мультивихревому сепаратору (глава 5), где в силу конструктивных особенностей частицы оседают в периферийных каналах блока. Вероятно накопление отложений приведет к сужению сечения каналов и необходимости регулярной остановки работы для технического обслуживания. Также была бы уместной оценка возможного вторичного уноса уловленных частиц с загрязненных поверхностей.

4. При описании решения для реактора каталитической очистки углеводородов (раздел 7.2), не учитывается, что сепарационные вставки будут находиться под воздействием высокотемпературного потока дымовых газов и могут деформироваться и выгорать в процессе эксплуатации, поэтому рекомендации по замене циклонов на новые

устройства должны учитывать не только показатели гидравлического сопротивления и эффективности улавливания, но и сохранение работоспособности в особых температурных условиях и дополняться расчетами на прочность и устойчивость конструкции, что скажется на ее габаритах, массе, и, конечно, стоимости. И, возвращаясь к предыдущему замечанию, будет крайне не простой процедура очистки устройства от налипшей катализаторной пыли, особенно при схеме размещения сепарационных секций параллельными блоками (рис.7.5) при существующих габаритах каталитических реакторов, по сравнению с теми же циклонами, традиционно устанавливаемыми в таких реакторах.

5. Отдельно хотелось бы остановиться на некоторых технических недочетах при подготовке иллюстративного материала:

- по тексту имеется некоторая небрежность к ссылкам на рисунки, например на стр.145 указано *"Сравнение результатов на рисунках 3 и 4 показывает, что..."* или на стр.146 *"...для кривых 1, 2, 3, 4, 5 и 6 на рисунке 5 эффективность E составляла..."*. Такие ссылки несколько сбивают с толку, т.к. в работе принята другая система нумерации рисунков;

- на рис. 4.14 названном как "Структура газа в сепараторе с вставками I профиля" показана цветная диаграмма, но не дано пояснений, что это за характеристики – то ли показаны профили скоростей, то ли профили давлений, то ли концентрации частиц в потоке, не приведена цветовая шкала, позволяющая оценить значения величин. Подобное же можно сказать о рис. 3.17;

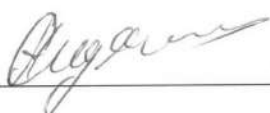
- практически не читаются значения скоростей на цветовых шкалах при иллюстрации профилей скоростей на рис.3.27, 3.28;

- не понятно какую информацию несет практически не читаемый текст на рис.6.4.

Общее заключение о работе

Вышеперечисленные замечания по диссертационной работе не являются критическими и не снижают ее общей положительной оценки. Докторская диссертация О.С. Дмитриевой является самостоятельной, завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основе выполненных автором исследований изложены научно-обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в решение актуальной проблемы совершенствования аппаратов вихревого типа для проведения гидромеханических процессов разделения дисперсных сред. Решение данной проблемы имеет важное значение для повышения эффективности, энергосбережения и экологической безопасности в химической, нефтехимической и смежных отраслях промышленности.

Диссертация Дмитриевой Оксаны Сергеевны «Совершенствование аппаратов вихревого типа для проведения гидромеханических процессов разделения дисперсных сред», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук, отвечает требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Дмитриева Оксана Сергеевна, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий.

Официальный оппонент  Сидягин Андрей Ананьевич

29.08.2025 г.

Сидягин Андрей Ананьевич, доктор технических наук по специальности 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий, доцент, профессор кафедры «Технологическое оборудование и транспортные системы» Дзержинского политехнического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (ДПИ НГТУ)
Почтовый адрес: 606026, Нижегородская область, г. Дзержинск, ул. Гайдара, д. 49
Телефон: +7 (8313) 34-12-88, e-mail: cdo@dpingtu.ru

Подпись официального оппонента Сидягина А.А. заверяю:

Директор Дзержинского политехнического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева"



Петровский Александр Михайлович

Вход. № 05-2523
« 09 » 09. 2025 г.
подпись 