

ОТЗЫВ

официального оппонента **Тукмакова Алексея Львовича** на диссертационную работу **Дмитриевой Оксаны Сергеевны** на тему **«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

На отзыв представлены автореферат и диссертация на 442 страницах машинописного текста, состоящая из введения, 7 глав, заключения, списка условных обозначений, списка литературы из 309 наименований и 6 приложений.

1. Актуальность выбранной темы

В диссертационной работе Дмитриевой Оксаны Сергеевны рассматриваются гидромеханические процессы разделения многофазных потоков и классификации частиц в аппаратах вихревого типа. Автором выполнены теоретические и экспериментальные исследования гидродинамики и сепарации многофазных сред в технологическом оборудовании, в котором реализуются мультивихревые течения. Создание и исследование сепараторов с множественными вихрями малого масштаба позволяет совмещать множество центров вихреобразования с высокой интенсивностью вращения в корпусе одного аппарата, что способствует более эффективной сепарации и классификации дисперсных частиц от несущего газового или жидкостного потока.

В известных аппаратах вихревого типа для разделения многофазных сред используются, как правило, конструкции с одиночными вихрями и турбулентными потоками, которые создаются либо за счет тангенциального ввода двухфазного газового или жидкостного потока, либо с применением специальных закручивающих устройств. И то, и другое аппаратное решение приводит к снижению эффективности сепарации или классификации частиц из-за необходимости постоянного поддержания закрученного турбулентного потока по высоте аппарата. Вследствие этого приходится увеличивать скорость газового или жидкостного потока, либо уменьшать размеры проектируемого аппарата, что негативным образом сказывается на производительности аппаратов и выпускаемой продукции.

Комплексное устранение указанных недостатков классических вихревых

аппаратов в одном устройстве и разработанного на его основе множества классов сепараторов представляется эффективным решением проблемы повышения качества сепарации или классификации частиц с одновременным повышением энерго- и ресурсоэффективности таких процессов.

2. Общая характеристика работы

Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК при Минобрнауки России, изложена технически грамотным языком и соответствует поставленной цели и решаемым задачам.

В первой главе представлены материалы литературного обзора по использованию вихревых течений в процессах химической технологии, выполнен обзор конструкций вихревых аппаратов. Показано, что мультивихревые течения в аппаратах представляют собой перспективное направление для повышения эффективности процессов сепарации или классификации дисперсных частиц. В конце главы сформулированы цели и задачи исследования.

Во второй главе выполнен анализ основных подходов к моделированию закрученных одно- и многофазных течений, представлена оценка моделей турбулентности. Записаны математические уравнения, описывающие гидродинамику закрученных течений при наличии дисперсных частиц при небольшой их концентрации. Представлены зависимости эффективности сепарации от геометрических размеров аппарата и режимных параметров процесса.

В третьей главе изучен процесс сепарации частиц в разработанных мультивихревых классификаторе и сепараторе путем множества численных и экспериментальных исследований. Приведено описание экспериментальной установки, спроектированной и изготовленной для изучения гидрогазодинамики в сепараторе. Представлены результаты исследований по определению гидравлического сопротивления при различных режимах работы и степени крутки газового потока. Выполнено сравнение различных моделей турбулентности в программном комплексе Ansys Fluent. Получено значение коэффициента гидравлического сопротивления. Выполнены численные исследования разделения водонефтяной эмульсии в мультивихревом сепараторе. Кроме того, выполнена оценка эффективности фракционирования частиц силикагеля в мультивихревом классификаторе при различном конструктивном оформлении аппарата.

В четвертой главе диссертации представлены результаты численных и экспериментальных исследований процесса сепарации частиц из потоков газа и жидкости в сепараторах с модифицированными вставками различной геометрии. Получены зависимости эффективности осаждения от ширины двутавров при различных диаметрах дисперсных частиц и среднерасходных скоростях газа. Получены также зависимости эффективности разделения эмульсии внутри сепаратора от расстояния между рядами вставок, высоте устройства при различных числах Рейнольдса. Выполнено сравнение модифицированных вставок по эффективности сепарации газового потока.

В пятой главе представлены результаты численных и экспериментальных исследований процесса очистки газа от аэрозолей и липких частиц в блочном мультивихревом сепараторе. Представлены результаты исследований по определению гидравлического сопротивления блочного сепаратора. Выполнено сравнение расчетов, проведенных с различными моделями турбулентности в программном комплексе Ansys Fluent. Получена оценка эффективности улавливания частиц блочным сепаратором различной модификации в зависимости от диаметра частиц, числа Стокса и входной скорости потока. По результатам проведенных экспериментальных исследований получена зависимость для определения эффективности сепарации частиц от числа Стокса.

В шестой главе представлены инженерные методики расчета разработанных конструкций аппаратов вихревого типа. На основе программы Orange Data Mining разработан алгоритм, позволяющий оценить эффективность фракционирования частиц в зависимости от заданных условий работы аппарата на стадии его проектирования. Методика расчета блочного мультивихревого сепаратора позволяет определить высоту сепарационной зоны, эффективность аппарата и оценить время его эффективной работы.

В седьмой главе представлено промышленное применение мультивихревых аппаратов, для оценки эффективности рассчитаны технико-экономические показатели. Представлена принципиальная схема фракционирования сыпучего материала (силикагеля) при внедрении мультивихревого классификатора. Описывается модернизация установок очистки отходящих промышленных газов из реактора для каталитического дегидрирования углеводородов. Предложена модернизация системы очистки воздуха окрасочно-сушильной камеры. Выполнена модернизация установки разделения эмульсии с близкими значениями плотностей.

Автореферат диссертации, опубликованные статьи и тезисы докладов достаточно полно отражают содержание работы. Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации.

3. Оценка новизны исследования и полученных результатов

1. Автором диссертации получены зависимости для определения эффективности процессов очистки, классификации и сепарации газовых и жидкостных потоков при различном конструктивном оформлении промышленного оборудования и значениях режимных параметров работы.
2. Проведены экспериментальные и численные исследования 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 данных видах промышленного оборудования.
3. Предложено использование микровихрей в мультивихревых устройствах для очистки газов, классификации дисперсных систем по размерам частиц и разделения эмульсий, что позволяет увеличить эффективность работы промышленных установок при небольших затратах энергии.
4. Экспериментальным путем получены зависимости гидравлического сопротивления потоков для процессов сепарации и классификации частиц, очистки газов от аэрозолей и липких частиц от режимных и геометрических параметров работы мультивихревых устройств.
5. Создан алгоритм расчета, основанный на использовании программы Orange Data Mining, с включением машинного обучения для оценки недостающих данных по эффективности работы мультивихревого устройства и улучшения его гидродинамических характеристик.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций. Обоснованность и достоверность результатов исследований, основных положений и выводов подтверждается тем, что работа базируется на фундаментальных представлениях о физико-химической сущности изучаемых процессов, а результаты получены с использованием современного программного обеспечения и методов исследования.

Достоверность экспериментальных данных подтверждается воспроизводимостью результатов в однотипных сериях экспериментов, а также использованием современного аналитического оборудования,

имеющего необходимую точность измерений. Полученные автором результаты хорошо согласуются с данными других исследователей по вихревым аппаратам.

4. Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость результатов диссертационной работы состоит в том, что создана методология комплексной оценки гидродинамических процессов в мультивихревых устройствах с различными конструктивными элементами; получены эмпирические зависимости гидравлического сопротивления и эффективности работы устройств мультивихревого типа.

Практическая значимость состоит в разработке различных конструкций аппаратов с закрученными потоками для интенсификации гидромеханических процессов классификации, сепарации, разделения гетерогенных систем, оригинальность которых подтверждается 15 патентами Российской Федерации. При этом даны рекомендации по выбору конструктивных характеристик разработанных аппаратов для сред с различной дисперсной средой. Научно-практическая ценность результатов диссертационной работы подтверждена актами об их практическом использовании на предприятиях и в организациях ООО «Скатз», ООО «Каматек», АО «ВНИИУС», приведенными в приложении диссертации.

5. Соответствие содержания диссертации заявленной специальности

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий в части:

- 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.

6. Замечания по диссертационной работе

При анализе диссертационной работы возникли замечания в отношении выбора математической модели процесса сепарации; в связи с постановкой краевых задач, а также замечания, связанные с выбором параметров расчетной сетки.

1. Для описания процесса сепарации автором применяется модель динамики одиночной частицы в лагранжево-эйлеровом представлении. Выбор модели одиночной частицы автор обосновывает малой концентрацией дисперсной фазы на входе в мультивихревой сепаратор. В то же время, внутри сепаратора возникают вихревые зоны, где концентрируются частицы с малой скоростной постоянной времени, и где предположение о малости концентрации неверно, модель одиночной частицы не применима и где требуется полностью учесть силовое взаимодействие фаз.
2. При описании динамики частиц автор пренебрегает механизмами дробления и коагуляции. Если для описания газозвесей с твердыми частицами такой подход может быть оправдан, то в задаче о разделении фракций водонефтяной эмульсии в мультивихревом сепараторе сделанное допущение требуется проверить расчетом чисел Лапласа и Вебера.
3. В расчетах применяется нестационарная модель динамики несущей среды. Приведенные в работе решения автор трактует как установившиеся. При этом отсутствуют временные зависимости для газодинамических параметров, которые могли бы свидетельствовать о достижении стационарного режима течения.
4. При постановке краевых задач динамики неоднородных сред на основе нестационарной модели отсутствует описание начальных условий. При задании граничных условий автор ограничивается определением скорости на входе и давления на выходе расчетной области. Не определены граничные условия для скорости на выходе и для давления на входе.
5. Можно отметить нерациональный выбор расчетной сетки при решении динамической (скоростной) задачи о течении в мультивихревом сепараторе, поскольку в расчетах применяются сетки с параметром $y^+ < 1$. Так как уравнение энергии не решается, такая детализация является излишней и ближайший к обтекаемой

поверхности узел расчетной сетки может быть расположен при $y \approx 5$ – в середине линейного участка скоростного пограничного слоя. При таком выборе расположения первого пристеночного узла в случае явного метода условие устойчивости позволило бы использовать более чем в 5 раз больший временной шаг.

Вышеперечисленные замечания не являются критическими и не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

7. Заключение по работе

Диссертационная работа **Дмитриевой Оксаны Сергеевны «Совершенствование аппаратов вихревого типа для проведения гидромеханических процессов разделения дисперсных сред»**, является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основе выполненных автором исследований изложены научно-обоснованные технические и технологические решения по формированию научно-технологических основ совершенствования аппаратов вихревого типа с целью повышения эффективности промышленных химико-технологических процессов очистки, классификации и сепарации газовых и жидкостных потоков, внедрение которых имеет существенное значение для развития ряда современных областей химической и нефтехимической промышленности.

Диссертация **«Совершенствование аппаратов вихревого типа для проведения гидромеханических процессов разделения дисперсных сред»** соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. (в действующей редакции), а автор диссертации Дмитриева Оксана Сергеевна заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий.

Официальный оппонент,

доктор физико-математических наук (01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела, 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы), старший научный сотрудник, профессор кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский

технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ»



/Тукмаков Алексей Львович

«01» 09 2025 г.

Контактные данные:

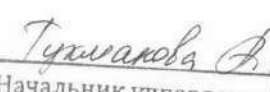
ФИО: Тукмаков Алексей Львович, д.ф.-м.н., с.н.с.

Организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ»

Почтовый адрес: 420111, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10.

Тел: +7 (843) 231-01-56

E-mail: tukmakov@imm.knc.ru

Подпись 
заверяю. Начальник управления
делами производства и контроля



Вход. № 05-8510

«03» 09 2025 г.

подпись 