

Отзыв официального оппонента

Чураковой Светланы Константиновны

на диссертацию Яшина Виктора Евгеньевича

**«Совмещение методов физического и математического моделирования при
определении основных гидродинамических параметров**

работы противоточных тарелок»,

**представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности**

2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий

Актуальность темы исследования. В современной химической промышленности предъявляются высокие требования к эффективности процессов мокрой очистки газов. В этих процессах достаточно широкое распространение имеют перекрёстноточные контактные устройства. Но благодаря пониженной склонности к загрязнению и простоте конструктивного оформления для ряда процессов применяются только противоточные колонные аппараты с пенными контактными устройствами. В этой связи, исследования контактных устройств, которые могут быть применены в аппаратах данного типа, очень актуальны. Особый интерес для исследователей представляет гидродинамика противоточных контактных устройств, поскольку они имеют достаточно узкий диапазон устойчивой и эффективной работы, поэтому точное математическое описание и прогнозирование данного диапазона является очень сложной задачей.

Отсутствие достоверных расчетных методик и экспериментальных данных, позволяющих на этапе проектирования обеспечить устойчивую работу противоточного аппарата и необходимую эффективность очистки газа, является серьёзным ограничением для широкого применения противоточных пенных тарелок. В этом контексте совмещение физического моделирования и методов вычислительной гидродинамики (CFD) представляет собой важный и

перспективный путь, позволяющий одновременно снизить трудоёмкость экспериментальных исследований и повысить точность инженерных расчетов.

Автор диссертационной работы, Яшин Виктор Евгеньевич, справедливо указывает на то, что научный интерес представляет исследование работы тарелок с фиксированными клапанами (тарелки MINIVALVE от Koch-Glitsch, клапаны MVG от Sulzer), которые довольно долго и успешно применяются в перекрёстном токе и практически не применяются на данный момент в противотоке. Актуальность исследований по применению тарелок с фиксированными клапанами в противоточных аппаратах связана также с тем, что этот вид контактных устройств показывает более высокую эффективность по сравнению с типовыми ситчатыми тарелками, которые в основном применяются в аппаратах данного типа. Это обстоятельство делает проведённое исследование особенно значимым с точки зрения прикладного проектирования и применения новых более эффективных контактных устройств в противоточных аппаратах.

Таким образом, тема диссертационной работы является **актуальной**, соответствующей задачам современной химической технологии, и тенденциям цифровизации инженерных расчётов.

Основное содержание работы

Диссертация Яшина В.Е. состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 122 наименования, и 3 приложений. Работа изложена на 137 страницах машинописного текста, содержит 11 таблиц, 51 рисунок.

Во введении представлены обоснование актуальности темы, сформулированы цель и три задачи исследования, выделена научная новизна, а также обоснована теоретическая и практическая значимость работы. Автор определяет цель работы как «восполнение недостающих научных данных для проектирования промышленного пенного аппарата с противоточными тарелками и

брызгоуловителем (туманоуловителем) и расчёта остаточного содержания загрязняющих веществ в газовых выбросах».

В первой главе представлен литературный обзор по теме исследования. Рассмотрены существующие конструкции пенных тарелок, методы их расчета, тенденции развития CFD-моделирования. Автор указывает на то, что значительная часть методик расчёта, используемых в промышленности, не учитывает последних экспериментальных данных, в частности – по составу аэрозольных частиц капельного уноса. Отмечается также недостаток исследований в области противоточных тарелок с крупными отверстиями и тарелок с фиксированными клапанами, что усиливает научный и практический интерес данной работы.

Во второй главе описана экспериментальная часть диссертационной работы, включая конструкцию опытно-исследовательского стенда представляющего физическую модель пенного аппарата диаметром 400 мм, методы измерения параметров (в том числе давления, уровня жидкости, расхода брызгоуноса) и испытанные конструкции тарелок. Приведены количественные характеристики использованных тарелок (с диаметром отверстий 20 и 40 мм, а также с фиксированными клапанами). Выполнены измерения высоты слоя чистой жидкости и пенного слоя, расхода брызгоуноса, а также проведена оценка объемной доли жидкости в пене.

Особое внимание уделено нестабильности высоты пены на противоточной ситчатой тарелке в зависимости от скорости газа и плотности орошения. Показана возможность существования устойчивых гидродинамических режимов с различной высотой пены на противоточной тарелке, при одном и том же диапазоне скоростей газа, что подчёркивает сложность для использования аналитических методов расчёта.

Проведённые автором исследования показывают, что противоточные тарелки с фиксированными клапанами демонстрируют более предсказуемое поведение и меньший брызгоунос, что указывает на их потенциальные преимущества.

В главе проведён анализ теоретических основ и эмпирических данных и выражений для описания параметров режима работы пенных тарелок, показано, что известные эмпирические выражения для определения высоты пенного слоя на противоточной тарелке недостаточно точно описывают экспериментальные данные для противоточных тарелок с крупными отверстиями и фиксированными клапанами.

В третьей главе представлены известные методики CFD-моделирования пенного слоя двумя способами: с использованием модели объёмной доли жидкости (VOF) в программе OpenFOAM и модели взаимопроникающих сред (Эйлера–Эйлера) в ANSYS. Автор показывает, что методики моделирования перекрёстноточных тарелок не работают корректно в случае противоточной тарелки и необходима разработка новых расчётных методик. Основное внимание автор уделяет разработке новой методики расчета коэффициента сопротивления пузырей C_D , с учётом скорости газа и объёмной доли жидкости. Методика представлена в виде формализованных выражений, обеспечивающих устойчивость расчета и соответствие результатов CFD-моделирования экспериментальным данным. Проведена верификация моделей — результаты CFD-моделирования по высоте слоя чистой жидкости и скорости газа хорошо согласуются с результатами физического моделирования. Показано, что модель взаимопроникающих сред Эйлера–Эйлера более адекватно описывает работу противоточной тарелки по сравнению с моделью объёмной доли жидкости VOF.

В главе показано, как результаты CFD-моделирования могут быть использованы для подробного анализа структуры потоков газа и жидкости на противоточной тарелке, отмечено, что отверстия противоточной тарелки промываются жидкостью с различной интенсивностью, большей у стенок аппарата и меньшей в центре тарелки.

В четвертой главе анализируется влияние дисперсности капельного брызгоуноса на остаточное загрязнение газа. Предложена методика расчета остаточного содержания жидкости в газе с учётом эффективности туманоуловителя

и распределения капель по размерам. Используется функция Розина–Рамлера для описания дисперсного состава брызгоуноса и проводится расчёт эффективности улавливания проволоочной сеткой.

Автор предлагает сглаженные аналитические зависимости для расчёта эффективности улавливания и остаточного содержания капель в выбросах, пригодные для автоматизированного расчета на этапе проектирования. Это особенно важно для процессов, чувствительных к санитарно-гигиеническим нормативам выбросов.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Научные положения и выводы, выносимые на защиту, обоснованы сочетанием результатов физического моделирования, численного расчёта, а также аналитической обработки экспериментальных данных. Экспериментальные модельные испытания проведены на крупногабаритном опытно-исследовательском стенде на примере среды вода-воздух, что позволило зафиксировать гидродинамические характеристики необходимые для проектирования противоточных промышленных аппаратов.

CFD-моделирование выполнено в профессиональных программах OpenFOAM и ANSYS с подробным анализом применимости соответствующих моделей. Особое внимание уделено верификации расчётных данных с результатами эксперимента по высоте слоя чистой жидкости на противоточной тарелке. Такая проверка результатов в разных методологических подходах (эксперимент, модель VOF, модель Эйлера–Эйлера) повышает степень обоснованности полученных зависимостей, выводов и рекомендаций.

Методика расчёта остаточного содержания жидкости в выбросах тарельчатого пенного аппарата с проволоочным туманоуловителем, обобщает известные экспериментальные результаты и теоретические положения с собственными результатами, и позволяет провести расчет содержания загрязняющих веществ в выбросах на стадии проектирования.

Таким образом, научные положения, выносимые на защиту, а также сделанные выводы и практические рекомендации, представляются достаточно обоснованными, достоверными и воспроизводимыми в инженерной практике.

Научная новизна и теоретическая значимость

Наиболее интересным с точки зрения научной новизны и теоретической значимости данной работы является определение гидродинамических параметров работы противоточных тарелок с фиксированными клапанами, которое впервые осуществлено на основе физического моделирования.

Вторым важным аспектом научной значимости является CFD-моделирование пенного слоя на противоточных тарелках с фиксированным клапаном, осуществлённое двумя методами: методом объемной доли жидкости (volume of fluid, VOF), с использованием программного пакета OpenFOAM и методом взаимопроникающих сред (модель «Эйлера-Эйлера») с использованием программного пакета ANSYS.

Научный интерес представляет также предложенная Яшиным В.Е. методика расчета эффективности очистки газа в аппарате с противоточными пенными тарелками и проволочным (сетчатым) туманоуловителем, учитывающая дисперсионный состав частиц капельного уноса.

Все эти положения имеют научную и теоретическую значимость, а также формируют научно обоснованный инструментарий для применения на практике.

Практическая значимость

Работа, выполненная Яшиным В.Е. имеет выраженную прикладную направленность и практическую значимость.

Прежде всего хочется отметить, что на крупногабаритном испытательном стенде автором получены экспериментальные данные по гидродинамическим показателям работы противоточных тарелок с фиксированными клапанами и даны рекомендации по их применению в промышленных аппаратах.

Серьезную практическую значимость в работе имеют исследования по апробации различных методов CFD-моделирования пенного слоя. Яшиным В.Е. показано, что наиболее адекватные результаты по моделированию пенного слоя в противоточных тарельчатых аппаратах даёт методика CFD-моделирования по методу взаимопроникающих фаз (Эйлера-Эйлера), адаптированная для противоточной тарелки, которая позволяет сократить объём физического моделирования, повысить точность расчетов, а также проводить более глубокий анализ структуры потоков в пенном слое в различных зонах тарельчатых контактных устройств. Для отечественных исследователей представляет практический интерес также проведённая автором апробация отечественной программы OpenFOAM для исследования работы тарелок пенных аппаратов методом CFD-анализа.

Общие результаты исследований тарелок с фиксированным клапаном и предложенная автором методика очистки газа в аппарате с противоточными пенными тарелками и проволочным (сетчатым) туманоуловителем могут быть использованы проектными и инжиниринговыми организациями, разрабатывающими оборудование для мокрой очистки газов. Учёт дисперсного состава капельного уноса в данной методике позволит более точно оценить остаточное загрязнение газа и добиться соответствия проектных решений требованиям санитарных норм

Справка об апробации результатов работы Яшина В.Е. в ООО «Визави Синтез» и два акта внедрения результатов проведённых автором исследований в НГК АО «Национальная газовая компания» подтверждает практическую значимость работы для промышленной реализации и актуальность внедрения полученных автором результатов на других аналогичных объектах.

Замечания по диссертационной работе

Несмотря на высокую научную и инженерную ценность диссертационной работы, целесообразно отметить следующие замечания:

1. Второй и третий пункты научной новизны могут быть объединены, так как в обоих пунктах речь идет о CFD-моделировании, с применением разного ПО и моделей турбулентности, стр. 7. Целесообразно указать, какое ПО и какая модель турбулентности лучше моделирует гидродинамику противоточной тарелки, стр. 85.

2. Не показано при каких граничных условиях (скоростях газа, плотности орошения) верифицирована адаптированная CFD модель Эйлера-Эйлера, стр. 85.

3. В диссертации на стр.105 говорится о том, что формула Беннета может быть использована для пенных тарелок, и далее по тексту написано, что модель на основе формулы Беннета не может быть использована, требуются пояснения.

4. Следует обосновать правильность выбранного метода расчета расхода газа и скорости газа в экспериментальной установке, стр. 45.

5. В 4 главе диссертации, при расчетах эффективности очистки газа в пенном аппарате с противоточными тарелками, использованы данные по дисперсности уноса, полученные для перекрёстноточных тарелок, стр. 98, почему автор счёл это допустимым?

6. На стр.13 автореферата имеется неточное указание функций в уравнениях 15 и 16.

7. Почему для расчета параметров брызгоуноса (стр. 95 диссертации) не используются методы CFD моделирования и физические эксперименты, которые описаны в первых трех главах?

Все приведённые замечания носят частный характер и не умаляют научной и прикладной ценности диссертационной работы.

Общая характеристика диссертационной работы

Диссертация Яшина Виктора Евгеньевича «Совмещение методов физического и математического моделирования при определении основных гидродинамических параметров работы противоточных тарелок» представляет собой завершённое научное исследование, выполненное на актуальную тему, сочетающее комплекс экспериментальных и численных подходов.

Автор демонстрирует высокий уровень профессиональной подготовки, он свободно владеет как методами для проведения физического моделирования, так и инструментарием вычислительной гидродинамики, позволяющим проводить CFD-анализ. Работа выполнена на качественном научно-методическом уровне, с хорошей аналитикой, глубоким анализом литературы, ясной постановкой целей и задач. Исследование охватывает как теоретические вопросы гидродинамики, так и прикладные аспекты проектирования оборудования для очистки газа.

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертационной работы. Представленные результаты апробированы на ряде международных и всероссийских научных конференций, а также опубликованы в четырёх статьях, 3 из которых – в изданиях, индексируемых в международных базах данных научного цитирования Scopus и Chemical Abstracts. Объём и качество публикаций соответствуют требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Работа выполнена в рамках современной научной школы в области процессов и аппаратов химических технологий, и её результаты имеют реальный потенциал практического применения.

Заключение

Диссертационная работа Яшина Виктора Евгеньевича «Совмещение методов физического и математического моделирования при определении основных гидродинамических параметров работы противоточных тарелок» является завершённым научным исследованием, содержащим новые научно обоснованные положения, имеющие важное теоретическое и практическое значение для развития отечественной химико-технологической науки и инжиниринга.

Представленные в работе результаты обладают научной и практической новизной и достоверностью, подтверждены как экспериментально, так и численно. Актуальность темы, обоснованность подходов и прикладная направленность подтверждают научную и практическую ценность диссертации.

Диссертация В.Е. Яшина «Совмещение методов физического и математического моделирования при определении основных гидродинамических параметров работы противоточных тарелок» полностью соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, предусмотренными Положением о порядке присуждения учёных степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», утверждённом приказом и.о. ректора РХТУ им. Д.И. Менделеева №103 ОД от 14 сентября 2023 г., а её автор, Яшин Виктор Евгеньевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий.

Доктор технических наук (05.17.07- «Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ»),
доцент, профессор базовой кафедры
«Моделирование и проектирование
процессов и аппаратов химических технологий»
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет»

 Чуракова Светлана Константиновна

« 03 » декабря 2025 г.

Адрес: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Уфимский государственный нефтяной технический университет»
450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1

тел. +7 (9

E-mail: ch

ru

Полностью заверяю