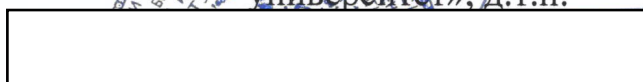


«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе и инновациям
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего
образования «Казанский национальный
исследовательский технологический
университет», д.т.н.



Гильмутдинов И.М.

2025 года

Отзыв ведущей организации

**федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Казанский национальный исследовательский
технологический университет»**

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 научной специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических
технологий (технические науки)

Актуальность темы исследования

Диссертационная работа Яшина Виктора Евгеньевича посвящена
актуальной задаче повышения эффективности пенных аппаратов, применяемых в
процессах очистки газов, путём определения и оптимизации режимов работы и
конструкции противоточных тарелок. В современных химико-технологических
производствах, где требуется удаление твёрдых и газообразных загрязнителей,
пенные тарелки с простыми и надёжными конструкциями обладают
значительными преимуществами, включая низкое гидравлическое сопротивление,

стойкость к загрязнению и удобство эксплуатации.

Однако, в отличие от перекрёстноточных тарелок, противоточные, особенно тарелки с крупными отверстиями и фиксированными клапанами, исследованы недостаточно. Это создаёт значительные трудности при их проектировании и промышленной эксплуатации, поскольку отсутствуют верифицированные методы определения таких параметров, как высота пенного слоя, границы устойчивой работы, величина брызгоуноса и остаточное загрязнение газа.

Применение методов вычислительной гидродинамики (CFD-моделирования) в сочетании с физическим экспериментом открывает возможности для комплексного изучения таких систем. Тем не менее, для противоточных систем отсутствуют надёжные и верифицированные CFD-модели, в отличие от перекрёстноточных. Кроме того, требуется точная оценка параметров брызгоуноса и их влияния на эффективность туманоуловителей, что имеет важное значение в условиях жёсткого экологического регулирования.

Таким образом, работа, сочетающая экспериментальные, теоретические и численные подходы к моделированию противоточных пенных тарелок, представляет собой актуальное и практически значимое исследование, соответствующее современным вызовам в области химической технологии и инженерной экологии.

Основное содержание работы

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

Во введении представлена характеристика научной проблемы и обоснование её актуальности. Сформулированы цель и задачи исследования, определены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, а также основные положения, выносимые на защиту. Указаны сведения об апробации полученных результатов на конференциях и в публикациях, обоснована структура

диссертации и её логическая последовательность.

В первой главе дан обзор современного состояния вопроса. Рассмотрены конструкции тарелок для пенных аппаратов, включая как традиционные перекрёстноточные, так и менее изученные противоточные тарелки с крупными отверстиями и фиксированными клапанами. Освещены вопросы устойчивости пенного слоя, особенности его образования и проблемы расчёта. Отдельное внимание уделено применению CFD-моделирования, рассмотрены основные подходы — модель объёмной доли жидкости (VOF) и модель взаимопроникающих сред (Эйлера–Эйлера), рассмотрен опыт их применения. На основе обзора сформулированы направления и задачи дальнейшего исследования.

Во второй главе представлены методы анализа и результаты физического моделирования пенных режимов. Описана экспериментальная установка диаметром 400 мм, испытанные типы тарелок, методики измерения параметров. Проведены серии экспериментов с различными конструкциями — с круглыми отверстиями и фиксированными клапанами. Получены зависимости высоты слоя чистой жидкости и пены, газосодержания, расхода брызгоуноса от скорости газа и плотности орошения. Установлено, что тарелки с клапанами обеспечивают более стабильную работу и меньший унос жидкости.

В третьей главе изложено CFD-моделирование гидродинамики пенного слоя. Проведены расчёты с использованием модели объёмной доли жидкости (VOF) в пакете OpenFOAM и модели Эйлера–Эйлера в ANSYS. Особое внимание уделено определению коэффициента сопротивления пузырей C_D , предложена формула его расчета для условий противотока с учётом объёмной доли жидкости и скорости газа. Представлены способы сглаживания и ограничения C_D для повышения устойчивости расчётов. Сопоставление результатов моделирования и эксперимента позволило верифицировать численные модели и определить область их применимости.

В четвёртой главе рассмотрено влияние брызгоуноса на остаточное загрязнение газа после абсорбера. Оценены параметры тонкодисперсного и грубодисперсного уноса. Разработана методика расчёта остаточного содержания

жидкости в газе с учётом эффективности проволочного туманоуловителя и использования функции Розина–Рамлера. Полученные модели позволяют рассчитать содержание загрязняющих веществ в газе на выходе и использовать результаты при проектировании и оптимизации аппаратов.

Заключение содержит обобщённые выводы по результатам работы, подтверждает достижение поставленных целей и формулирует практические рекомендации для внедрения разработанных методик в инженерную практику.

Научная новизна диссертации

1. Получены новые экспериментальные данные по гидродинамическим характеристикам работы противоточных тарелок с фиксированными клапанами.

2. Выполнено CFD-моделирование методом объемной доли жидкости (volume of fluid, VOF), с использованием программного пакета OpenFOAM для пенного слоя на противоточных тарелках.

3. Выполнено CFD-моделирование методом взаимопроникающих сред (модель «Эйлера-Эйлера») с использованием программного пакета ANSYS для пенного слоя на противоточных тарелках. Методика расчета коэффициента лобового сопротивления C_D адаптирована для моделирования противоточной пенной тарелки.

4. Разработана методика расчета эффективности очистки газа в аппарате с противоточными пенными тарелками и проволочным (сетчатым) туманоуловителем, учитывающая дисперсионный состав частиц капельного уноса.

Теоретическая и практическая значимость диссертации

Результаты физического моделирования и CFD-расчётов позволяют проектировать аппараты с противоточными тарелками с удовлетворительной точностью и обоснованностью.

Установлены рекомендуемые диапазоны рабочих скоростей газа и плотностей орошения для тарелок с фиксированными клапанами, что обеспечивает снижение затрат на промывную жидкость и повышение

эксплуатационной устойчивости.

Методика моделирования с адаптированным методом расчёта C_D может быть использована при проектировании химико-технологических аппаратов.

Разработанный подход к оценке остаточного загрязнения газа позволяет прогнозировать эффективность очистки и соответствие нормативным требованиям на стадии проектирования.

Предложенные конструкции и методики обоснованно рекомендованы для промышленных объектов в производстве гранулированных солей.

Степень обоснованности и достоверности научных положений и выводов

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, обоснованы на основе:

- многократно повторяемых лабораторных экспериментов на полупромышленной установке;
- независимого физического и численного моделирования с последующей верификацией;
- аналитических расчётов, согласующихся с современными представлениями о гидродинамике многофазных потоков;
- корректного применения численных моделей с контролем устойчивости расчётов и сопоставлением результатов с экспериментальными данными.

Достоверность подтверждается статистической обработкой, визуализацией пенного слоя, контролем условий эксперимента и публикацией результатов в рецензируемых научных изданиях.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ, в том числе 3 статьи в изданиях, индексируемых в международных базах данных, 1 статья в рецензируемом издании. Результаты научного исследования подтверждены участием на научных мероприятиях: опубликовано 5 работ в материалах

всероссийских и международных конференций.

Замечания и рекомендации

1. В работе не обосновывается выбор конструкций противоточных тарелок для экспериментального исследования.
2. Как представлено в описании на стр.45 на экспериментальной колонне установлено 3 исследуемых тарелки, однако на рис. 2.3 их две. Многие измеряемые величины (высота слоя чистой жидкости, величина брызгоуноса и т.д) определялись по интегральным величинам для всей колонны, например измеряя разницу в уровня жидкости в кубе или скорости убывания воды в системе. Как потом эти величины распределялись по тарелкам?
3. На рисунках 3.7, 3.8 для количественной визуальной оценки согласования расчетных и экспериментальных данных их желательно было бы поместить их на один график
4. По результатам эксперимента для единственного варианта конструкции тарелки №1 высота чистого слоя жидкости в зависимости от скорости газа рис. 2.5 имела ярко выраженный минимум. С чем может быть связано такое аномальное поведение?
5. Из текста диссертации не совсем понятно, в каком варианте проводилось CFD моделирование в стационарном или нестационарном. Что означает физическое время моделирования (табл. 3.1, рис.3.4)? Это время минимизации ошибки при решении стационарной задачи или реальное временное изменение физических полей на тарелке? В то же время в модели взаимопроникающих сред (3.9, 3.10) нестационарный член присутствует!

6. Соответствие диссертации предъявляемым требованиям

Диссертационная работа Яшина В.Е. соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а также паспорту специальности

2.6.13 – «Процессы и аппараты химических технологий» в части:

п. 2. Теория подобия, моделирование и масштабирование химико-технологических процессов и аппаратов, машин и агрегатов;

п. 3. Способы, приемы, методология исследования гидродинамики движения жидкости, газов, перемещение сыпучих материалов в технологических аппаратах и схемах;

п. 7. Способы, приемы, методология изучения нестационарных режимов протекания процессов в химической аппаратуре, в том числе с целью формирования предпосылок эффективного управления и автоматизации;

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.

Оформление диссертации и автореферата соответствует требованиям. Результаты представлены на ряде всероссийских и международных конференций, опубликованы в научных журналах. Работа демонстрирует высокий уровень самостоятельности, глубину проработки и практическую направленность.

Заключение

Диссертационная работа Яшина Виктора Евгеньевича «Совмещение методов физического и математического моделирования при определении основных гидродинамических параметров работы противоточных тарелок» является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных теоретических, экспериментальных и численных исследований решена актуальная научно-техническая задача оптимизации конструкции и расчёта противоточных пенных тарелок.

Полученные результаты обладают новизной, достоверностью и значимой практической применимостью. Работа соответствует требованиям Положения о присуждении учёных степеней и заслуживает присуждения учёной степени

кандидата технических наук по специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий.

Предоставленная диссертация 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.

Отзыв рассмотрен, обсужден и одобрен на заседании кафедры «Процессы и аппараты химической технологии» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (протокол № 4 от « 18 » ноября 2025 г.).

Доцент кафедры «Процессы и аппараты химической технологии»
к.т.н., доцент

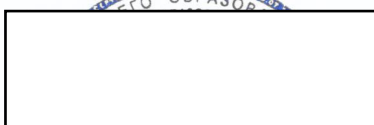


Анашкин Иван Петрович
т: +7(843)231-40-46
AnashkinIP@corp.knrtu.ru

Подпись И.П. Анашкина заверяю:

Ученый секретарь

Ученого совета ФГБОУ ВО «КНИТУ»



И.А. Загидуллина

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»)

Почтовый адрес: 420015, Республика Татарстан, г. Казань, ул. К. Маркса, 68;

e-mail: <http://www.kstu.ru>; office@kstu.ru;

Контактные телефоны: +7(843)231-42-16