

ОТЗЫВ

на автореферат диссертационной работы Яшина Виктора Евгеньевича
«Совмещение методов физического и математического моделирования при определении
основных гидродинамических параметров работы противоточных тарелок»
на соискание учёной степени кандидата технических наук
по специальности 2.6.13 — Процессы и аппараты химических технологий

Общая характеристика работы и её актуальность

Автореферат отражает результаты диссертационной работы, выполненной на кафедре Процессов и аппаратов химической технологии ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева». Тема исследования — изучение гидродинамических параметров работы противоточных пенных тарелок с использованием сочетания физического моделирования и вычислительной гидродинамики (CFD) — является современной и имеет высокую практическую значимость. Пенные тарелки применяются в процессах мокрой очистки газа и абсорбции в химической промышленности; совершенствование их конструкции и методов расчёта способствует снижению уноса жидкости, повышению эффективности очистки и экономичности аппаратов.

В автореферате корректно обоснована необходимость совмещения экспериментальных и численных методов: физические эксперименты дают достоверные данные о реальном поведении пенного слоя, а CFD позволяет детализировать поле скоростей, давления и объёмных долей фаз, что особенно важно при переходе к промышленным масштабам и оптимизации конструкции.

Во введении автор обосновывает актуальность проблемы, формулирует цель исследования — восполнение недостающих научных данных для проектирования пенных аппаратов с противоточными тарелками и проволочным туманоуловителем — и уточняет задачи исследования: экспериментальное изучение гидродинамических режимов, проверка и адаптация методов CFD и исследование брызгоуноса. Во введении также перечислены положения, выносимые на защиту, указаны сведения об апробации результатов и публикациях. Введение даёт ясный методологический контекст и логически подводит к четырём главам работы.

Первая глава содержит развернутый обзор отечественных и зарубежных исследований по пенным тарелкам, моделям пенного слоя и методикам CFD. Автор корректно рассматривает достоинства и ограничения моделей VOF (объёмной доли жидкости) и модели Эйлера–Эйлера, анализирует существующие эмпирические корреляции (в т.ч. формулу Беннета) и указывает на пробелы в применении этих методик к противоточному режиму, особенно для тарелок с крупными отверстиями и фиксированными клапанами. На основании анализа обоснована необходимость экспериментальной верификации и адаптации CFD-подходов для рассматриваемых конструкций.

Вторая глава подробно описывает экспериментальную установку (вертикальная колонна диаметром 400 мм, от 1 до 3 тарелок, расстояние между тарелками 750 мм) и методики измерений: расхода фаз, перепадов давления, визуального определения высоты чистой жидкости и пенного слоя, измерения брызгоуноса. Испытаны тарелки с круглыми отверстиями диаметром 20 и 40 мм и тарелки с фиксированными клапанами. По результатам экспериментов получены зависимости высоты слоя чистой жидкости от

скорости газа и плотности орошения. Экспериментально показано преимущество тарелок с фиксированными клапанами по устойчивости работы и уменьшению брызгоуноса.

Третья глава посвящена численному моделированию пенного слоя двумя подходами: VOF и моделью взаимопроникающих сред. Автор провёл серию расчётов и сопоставил результаты с экспериментом. Для модели Эйлера–Эйлера выявлена необходимость адаптации коэффициента лобового сопротивления C_D : предложена сглаженная и ограниченная функция $C_D = f(\epsilon_L, U_G)$ с конкретными параметрами ($A_1, A_2, \dots, B_3$), что позволило устранить завышение высоты слоя в модели Эйлера–Эйлера и «захлёбывание» в расчётах при скоростях газа выше 1 м/с. Для модели VOF показано, что при малых скоростях (до ~0,5–1 м/с) она удовлетворительно воспроизводит высоту слоя и усреднённую объёмную долю фаз.

Четвёртая глава рассматривает влияние брызгоуноса на остаточное загрязнение газа. Используются эмпирические аппроксимации для общего и тонкодисперсного уноса, применена модель Розина–Раммлера для описания дисперсного состава и критерий Стокса для расчёта эффективности проволоочного туманоуловителя. Предложены сглаженные функции эффективности ($K_{\text{сгл}}$) для устранения численных разрывов и алгоритмы расчёта остаточной влажности и остаточного содержания загрязняющих веществ на выходе. На основании моделирования даны рекомендации по числу слоёв и параметрам туманоуловителя.

Научная новизна

По материалам автореферата новизна работы выражена в следующих положениях:

1. Комплексное экспериментальное исследование противоточных тарелок с фиксированными клапанами и крупными отверстиями (20 и 40 мм), включая определение зон устойчивой работы и показ многорежимности пенного слоя.
2. Реализация CFD-исследований пенного слоя двумя подходами (VOF в OpenFOAM и Эйлера–Эйлера в ANSYS) применительно к противоточному режиму и определение границ применимости моделей.
3. Разработка и апробация адаптированной модели коэффициента лобового сопротивления C_D для условий противотока, обеспечивающей корректное воспроизведение высоты слоя чистой жидкости и предотвращающей «захлёбывание» в расчётах.
4. Методика расчёта эффективности туманоуловителя с учётом дисперсного состава брызгоуноса и выводы по его влиянию на остаточное содержание загрязняющих веществ.

Эти положения представляют собой оригинальные научно-методические результаты и могут быть признаны новыми в рамках специальности.

Практическая значимость результатов диссертации выражается в:

- рекомендованных диапазонах нагрузок и параметров для тарелок с фиксированными клапанами, что позволяет снизить расход промывных растворов и брызгоунос;
- предложенных методиках CFD-моделирования, которые при внедрении в проектную практику сокращают число дорогостоящих натурных испытаний;
- методике расчёта остаточного загрязнения, позволяющей на стадии проектирования оценивать соответствие выбросов нормативам.

Обоснованность положений и рекомендаций обеспечена сочетанием экспериментальных данных и верифицированных численных расчётов. Сопоставление CFD-результатов с экспериментом на установке диаметром 400 мм позволяет говорить о доброкачественной валидации предложенных методик в заданном диапазоне параметров.

Замечания и рекомендации

1. Расширение экспериментальной базы. Следует дополнить исследования результатами длительной эксплуатации тарелок в реальном промышленном процессе (опытно-промышленные испытания), чтобы подтвердить долговременную стабильность режимов.
2. Масштабирование. Необходимо более подробно изложить процедуру масштабного перехода результатов с модели Ø400 мм на аппараты промышленного диаметра: указать критерии сохранения режимов и возможные искажения.
3. Экономическая оценка. Рекомендуется добавить расчётный раздел по оценке экономического эффекта внедрения клапанных тарелок (снижение затрат на циркуляцию растворов, снижение простоев и т.п.).
4. Чувствительность CFD. Желательно провести анализ чувствительности численной модели к сетке, времени шага и выбранным турбулентным моделям; привести критерии сходимости и оценки погрешности расчёта.
5. Погрешности измерений брызгоуноса. В описании методики измерений уноса следует добавить оценки абсолютной и относительной погрешности измерений, методику калибровки объёмных измерений и измерений влажности.

Замечания уточняющего и рекомендательного характера; большинство из них может быть устранено при оформлении результатов работы в виде монографии.

Заключение

Диссертационная работа Яшина Виктора Евгеньевича «Совмещение методов физического и математического моделирования при определении основных гидродинамических параметров работы противоточных тарелок» является актуальной, завершённой научно-квалификационной работой, полностью соответствующей требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, предусмотренным Положением о порядке присуждения учёных степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», утверждённым 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 физико-математических наук, профессор по научной специальности 05.17.08 - Процессы и аппараты химических технологий, начальник Управления организации научно-исследовательской и инновационной деятельности, заведующий кафедрой "Теоретическая и прикладная механика" ФГБОУ ВО "Ярославский государственный технический университет" (ЯГТУ)

(подпись)

Капанова Анна Борисовна

25.11.2025
(дата)

Адрес: 150023, г. Ярославль, Московский пр., д. 88
Тел: +7 (4852) 44-52-83, E-mail: kapanovaab@ystu.ru
«Подпись Капановой Анны Борисовны заверяю»

Ректор ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет»,
к.э.н., доцент

Елена Олеговна Степанова

25.11.2025
(дата)