

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе



ФГБОУ ВО «Нижегородский

государственный технический

университет им. Р.Е. Алексеева»

д-р физ-мат. наук, профессор

А.А.Куркин

«21» ноября 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения

высшего образования «Нижегородский государственный технический

университет им. Р.Е. Алексеева»

на диссертационную работу **Аласгарли Сеймура Ульви оглы** «Эффективность совместных интенсифицированных процессов теплообмена и разделения аэрозолей в насадочных и барботажных скрубберах», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника»

Актуальность работы

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности процессов охлаждения и очистки газов в скрубберах контактного типа. Известно, что при непосредственном контакте фаз эффективность процессов значительно выше, чем при передаче тепла через разделяющую стенку, но увлажнение газов, сложная структура потоков в аппарате, разнообразные термодинамические и гидродинамические условия

определяют требование уточнения расчетных зависимостей и разработки конструкций с интенсифицированными тепломассообменными характеристиками. Предложенный в работе подход направлен на решение задачи повышения эффективности процессов тепломассообмена и сепарации аэрозольных систем в насадочных и барботажных скрубберах за счет оптимизации гидродинамической структуры потоков и выбора типов насадок, что имеет значительный практический интерес для предприятий теплоэнергетики и химической промышленности. Таким образом, тема диссертационной работы является актуальной.

Целью диссертационной работы является поиск решений, направленных на повышение эффективности совместных процессов охлаждения и очистки газовых сред от дисперсной фазы в скрубберах с барботажными тарелками и контактными насадками на основе физического и математического моделирования взаимодействия фаз с применением отечественных конструкций насадок.

Общая характеристика работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, перечня условных обозначений, библиографического списка из 130 наименований. Текст диссертации изложен на 190 страницах машинописного текста, содержит 47 рисунков, 33 таблиц и 2 приложения.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, положения выносимые на защиту, охарактеризованы примененные в работе методы исследования и достоверность полученных результатов, показана степень апробации работы в публикациях и выступлениях на научных конференциях, оценен личный вклад соискателя.

В первой главе представлен аналитический обзор отечественных и зарубежных исследований по процессам охлаждения и мокрой очистки газов в контактных аппаратах — насадочных, барботажных и скрубберах Вентури. Рассмотрены механизмы тепломассообмена при контактном охлаждении газов, механизмы сепарации аэрозолей. Описаны конструктивные особенности скрубберов-охладителей, различных типов насадок и их влияние на гидродинамику, тепло- и массообмен. Приведены основные зависимости для расчёта коэффициентов массоотдачи и гидравлического сопротивления, критерии подобия, описаны методы экспериментальных исследований. Рассмотрены современные подходы к численному моделированию процессов. Показаны пути совершенствования скрубберов, направленные на повышение энергоэффективности и интенсификацию процессов тепломассообмена и разделения аэрозолей. На основании выполненного анализа сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава посвящена экспериментальному изучению гидравлических и массообменных характеристик в колонне с регулярной и комбинированной насадками для системы газ-жидкость. Сформулированы цели и задачи моделирования процессов тепломассообмена при противотоке воды и воздуха. Представлено описание лабораторной установки, методики экспериментальных исследований и обработки полученных данных, приведены характеристики рулонной сетчатой насадки, послужившей основным объектом исследований. Получены эмпирические зависимости для определения гидравлического сопротивления и объёмных коэффициентов массоотдачи, установлена высокая эффективность массообмена (80–90 %) и низкое гидравлическое сопротивление изучаемой насадки. Разработан модифицированный метод единиц переноса с учётом обратного перемешивания фаз, позволяющий точнее определять высоту насадочного слоя и эффективность процессов тепломассообмена. Результаты использованы для моделирования и расчёта скруббера охлаждения газов, что

подтверждает теоретическую и практическую ценность проведённых исследований.

В третьей главе представлена разработка математической модели и численное исследование процессов тепломассообмена и сепарации аэрозолей в насадочных скрубберах. Записана система уравнений переноса теплоты, массы и дисперсной фазы в цилиндрических координатах, с осреднением локальных параметров. Описаны и обоснованы допущения модели. Разработаны модели совместного переноса теплоты и частиц в насадочном слое, включая поликанальную и ячеечную структуры, позволяющие учитывать неравномерность распределения скоростей газа и жидкости. Проведено сравнение различных типов насадок (колец Рашига, Мебиуса, «Инжехим», рулонных и сегментных), определены зависимости тепловой и сепарационной эффективности от геометрических и гидродинамических параметров. Показано, что увеличение удельной поверхности и равномерность распределения потоков повышают эффективность тепло- и массообмена, тогда как неравномерность распределения скоростей приводит к её снижению. Разработанные модели обеспечивают прогнозирование эффективности скрубберов и выбор рациональных конструкций при проектировании и модернизации аппаратов.

В четвёртой главе приведены математические модели процессов тепломассообмена и сепарации в скрубберах с барботажными тарелками различных конструкций. Рассмотрены гидродинамические и тепломассообменные характеристики процесса барботажа на ситчатых, провальных и клапанных тарелках, включая расчёт минимальной скорости газа, высоты статического столба жидкости и эффективности процессов. Представлены аналитические и численные модели тепломассообмена в турбулентном барботажном слое, основанные на уравнениях сохранения массы, импульса и энергии, с применением ячеечной модели структуры потока. Проведено сопоставление расчётных и известных экспериментальных данных,

показавшее удовлетворительное совпадение. Разработаны алгоритмы для расчёта тепловой эффективности, температурного профиля и расхода фаз, что позволяет прогнозировать работу скрубберов при различных режимах охлаждения и сепарации.

В пятой главе разработаны научно-технические решения по модернизации скруббера, применяемого для охлаждения и очистки пирогаза на установке Э-100 АО «Казаньоргсинтез». Приведено описание исходной технологической схемы и параметров работы аппарата до модернизации. На основе анализа промышленного опыта и расчётных данных предложена замена устаревших контактных устройств на современные регулярные и нерегулярные насадки типа «Инжехим». Проведено моделирование тепломассообменных и сепарационных процессов в модернизированном аппарате, рассчитаны профили температур и влагосодержания, а также эффективность осаждения частиц различного диаметра. Показано, что после внедрения новых насадок обеспечивается требуемая температура пирогаза на выходе (41–42 °С) при устойчивом гидродинамическом режиме и допустимом перепаде давления, что подтверждает эффективность предложенных технических решений и достоверность математической модели.

В заключении обобщены основные результаты диссертационной работы. Автором проведён значительный объём экспериментальных исследований, направленных на определение гидродинамических и тепломассообменных характеристик различных типов насадок в скрубберах. На основании теоретического анализа и численного моделирования решена задача оценки влияния неравномерности газового потока на эффективность процессов охлаждения газа и массообмена.

Достоинством работы является сочетание экспериментальных и расчётно-теоретических методов, позволивших получить аналитические зависимости для

оценки эффективности процессов тепломассообмена и разработать алгоритмы инженерных расчётов.

Результаты исследования имеют как теоретический, так и прикладной характер и могут быть использованы при проектировании и модернизации промышленных аппаратов охлаждения и очистки газов. Основные положения диссертации отражены в опубликованных работах и представлены на научно-технических конференциях. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации и достоверно отражает её новизну и практическую значимость.

Степень обоснованности и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Степень обоснованности и достоверности полученных в диссертации положений подтверждается использованием современных методов экспериментальных исследований, а также согласованием полученных результатов с известными данными других авторов; применением апробированных методик математического моделирования тепломассообменных процессов и фундаментальных законов сохранения в дифференциальной форме, что обеспечивает корректность и надёжность полученных зависимостей.

Выводы и рекомендации, сформулированные в работе, логически вытекают из представленных экспериментальных и расчётных данных, что подтверждает их научную достоверность и практическую применимость.

Научные положения, выносимые на защиту, раскрыты в тексте диссертации и в опубликованных соискателем работах.

Основное содержание диссертации отражено в 13 работах, в том числе в 3 статьях в рецензируемых журналах из списка рекомендованного ВАК, двух статьях входящих в базу Scopus. Получен 1 патент на изобретение. Имеются справки о применении результатов научных исследований.

Значимость результатов работы для развития соответствующей отрасли науки

Научная новизна

1. Получены и обобщены экспериментальные зависимости для расчёта гидравлического сопротивления и объёмного коэффициента массоотдачи в колонных аппаратах с рулонной и комбинированной насадками, включающей регулярные и хаотичные элементы.

2. Разработаны численные и упрощённые математические модели, позволяющие рассчитывать тепловую эффективность охлаждения газов в градирнях и скрубберах с учётом неравномерности распределения скоростей воздуха и плотности орошения по сечению аппарата.

3. Предложен модифицированный метод расчета единиц переноса, учитывающий обратное перемешивание фаз и позволяющий более точно оценивать эффективность тепломассообмена в аппаратах противоточного типа.

4. Установлены закономерности влияния гидродинамических и конструктивных параметров насадок на эффективность процессов тепло- и массообмена при различных режимах орошения и скорости газа.

5. Разработаны инженерные зависимости для расчёта эффективности процессов охлаждения газов при контакте с водой, пригодные для практического применения при проектировании и модернизации промышленных аппаратов в разных отраслях промышленности и энергетики.

Практическая значимость работы подтверждена использованием результатов диссертационного исследования в ряде профильных организаций. Результаты экспериментальных и численных исследований, а также разработанные математические модели тепломассообмена и гидродинамики использованы в Институте механики и машиностроения КазНЦ РАН, где они применяются при выполнении фундаментальных и прикладных научных исследований в области тепломассообменных процессов.

Разработанные инженерные решения по модернизации скруббера охлаждения и очистки пирогаза апробированы в производственных условиях ПАО «Казаньоргсинтез» на установке газоразделения завода «Этилен». Совместно со специалистами ООО «Инженерно-внедренческий центр “Инжехим”» произведена замена контактных устройств в скруббере К-5 на комбинированную насадку, обеспечивающую снижение температуры пирогаза на выходе до 42–43 °С и повышение эффективности очистки от кокса и смол.

Таким образом, практическая значимость подтверждена внедрением результатов в промышленность, использованием математических моделей в научно-образовательной деятельности и их применением при проектировании и модернизации промышленных теплообменных аппаратов для газожидкостного контакта.

Соответствие паспорту специальности

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника» в части направлений исследований:

– пункту 3: «Процессы взаимодействия интенсивных потоков энергии с веществом; совместный перенос массы, импульса и энергии в бинарных и многокомпонентных смесях веществ, включая химически реагирующие смеси»;

– пункту 5: «Научные основы и методы интенсификации процессов тепло– и массообмена и тепловой защиты. Процессы тепло– и массообмена в оборудовании, предназначенном для производства, преобразования, передачи и потребления теплоты»;

– пункту 6: «Научные основы повышения эффективности использования энергетических ресурсов в теплотехническом оборудовании и использующих теплоту системах и установках».

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при проектировании и эксплуатации оборудования для охлаждения и очистки газов на предприятиях нефтехимического и топливно-энергетического комплексов, в частности, ПАО «Казаньоргсинтез», АО «Танэко», АО «Нижекамскнефтехим», АО «Татэнерго», ООО «Инжехим», а также в профильных инжиниринговых и проектных организациях, выполняющих разработку и модернизацию градирен, скрубберов и абсорберов. Материалы исследования могут быть применены в учебном процессе вузов при подготовке инженеров-теплотехников и специалистов по промышленной теплоэнергетике и экологии.

Вопросы и замечания по диссертационной работе

1. В отдельных фрагментах текста диссертации наблюдается стилистическая неоднородность изложения и повтор отдельных формулировок, что может быть уточнено при дальнейшей публикации результатов.

2. В некоторых формулах, таблицах и рисунках отсутствует единообразие оформления обозначений и подписей осей, что частично затрудняет сопоставление данных. На ряде графиков не нанесены экспериментальные точки, на рис.3.5 не хватает подрисуночных подписей с расшифровкой позиций.

3. При описании методики эксперимента следовало бы более подробно указать параметры калибровки измерительных приборов и погрешность измерений.

4. В разделе, посвящённом анализу результатов моделирования (глава 4), следовало привести более развернутое сравнение с зарубежными исследованиями по аналогичной тематике.

Приведённые замечания не снижают научной ценности и прикладной направленности диссертационной работы, а выявленные недочёты носят частный характер.

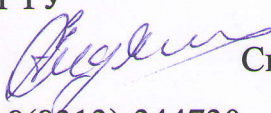
Заключение

При общей положительной оценке диссертационной работы следует отметить высокий уровень выполненных экспериментальных исследований, направленных на изучение процессов тепломассообмена и разделения аэрозолей в насадочных и барботажных скрубберах, а также новизну предложенных математических моделей и алгоритмов расчёта тепловой эффективности аппаратов. Результаты исследования обладают практической значимостью, подтверждённой внедрением разработанных технических решений в промышленность и использованием математических моделей в научной и образовательной деятельности научной организацией РАН.

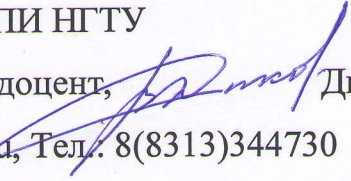
Диссертационная работа Аласгарли Сеймура Ульви оглы «Эффективность совместных интенсифицированных процессов тепломассообмена и разделения аэрозолей в насадочных и барботажных скрубберах» является завершённой научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно-обоснованные технические решения направленные на повышение эффективности процессов тепло- и массообмена, соответствует требованиям, предъявляемым ВАК Минобрнауки России, установленным в пп. 9–14 Положения о порядке присуждения учёных степеней (Постановление Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. в актуальной редакции), а её автор – Аласгарли Сеймур Ульви оглы заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника».

Диссертационная работа Аласгарли Сеймура Ульви оглы и отзыв на нее
обсуждены на заседании кафедры «Технологическое оборудование и
транспортные системы» федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский
государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», 20 ноября 2025
года, протокол № 3.

профессор кафедры «Технологическое оборудование
и транспортные системы» ДПИ НГТУ

доктор технических наук, доцент,  Сидягин Андрей Ананьевич
e-mail: cdo@dpingtu.ru, Тел: 8(8313)-344730 20.11.25

зав. кафедрой «Технологическое оборудование
и транспортные системы» ДПИ НГТУ

кандидат технических наук, доцент,  Диков Вадим Александрович
e-mail: dva@dpingtu.ru, Тел.: 8(8313)344730 20.11.25

Подписи Сидягина Андрея Ананьевича и Дикова Вадима Александровича
заверяю: Директор Дзержинского политехнического института (филиала)
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования "Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева"

/  / Петровский Александр Михайлович

Адрес ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева»: Российская Федерация, 603155, г. Нижний
Новгород, ул. Минина, 24

Телефон: +7(831)436-63-07; e-mail: nntu@nntu.ru,

Сайт <https://www.nntu.ru/>