

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

доктор техн. наук, профессор

Гутиков Владимир Валентинович



2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» на диссертацию БАДРЕТДИНОВОЙ Гузель Рамилевны «Теплообмен при конденсации парогазовых смесей с твердыми частицами на оребренных поверхностях в теплообменных аппаратах», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника»

Актуальность работы

В настоящее время во многих отраслях промышленности (энергетике, химическом, целлюлозно-бумажном производстве и т.д.) одной из центральных задач является повышение энергоэффективности теплотехнического оборудования, функционирующего в режимах конденсации парогазовых смесей. При наличии в парогазовом потоке твердых включений (пыль, зола, частицы волокнистых материалов), возникает высокий риск интенсивного загрязнения теплопередающих поверхностей. Подобные отложения приводят к заметному снижению коэффициента теплопередачи, что влечёт за собой рост энергозатрат на производство и увеличение расходов на обслуживание таких установок.

Отложения на оребренных и других интенсифицированных теплообменных поверхностях сокращают ресурс работы оборудования, усложняют эксплуатацию и требуют регулярного обслуживания с вынужденными остановками производственного процесса. Разработка математических моделей, способных прогнозировать формирование твердых отложений при конденсации парогазовых смесей и одновременно оценивать эффективность теплообмена, является актуальной научно-технической задачей. Такие модели позволяют обоснованно планировать обслуживание оборудования, оптимизировать их рабочие режимы и снижать производственные издержки.

Целью диссертационного исследования является построение математической модели, описывающей процесс формирования отложений на наружной оребренной поверх-

ности в теплообменнике, и изучение особенностей теплообмена при конденсации парогазовой смеси, содержащей твёрдые частицы.

Общая характеристика работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения по работе, списка используемых источников из 136 наименований. Текст диссертации изложен на 142 страницах машинописного текста, содержит 47 иллюстраций, 5 таблиц и 3 приложения.

Первая глава диссертационной работы посвящена аналитическому обзору опубликованных данных по тематике исследования. На основе анализа отечественной и зарубежной литературы обобщены сведения о механизмах осаждения примесей на стенках теплообменного оборудования, факторах, влияющих на интенсивность загрязнения (геометрия теплообменных поверхностей, свойства дисперсной фазы, режимные параметры процесса). Значительное внимание уделено подходам при математическом моделировании повышения плотности отложений и образованием плёнки жидкости на поверхностях конденсации. Рассмотрен вклад конвективной и диффузионной составляющих в процесс переноса твёрдых частиц к стенке. Рассмотрены вопросы влияния отложений на процесс теплообмена. Проанализированы современные подходы к повышению эффективности теплообменников, включая использование различных типов оребрения и гидрофобных (или гидрофильных) покрытий, а также существующие методы очистки и профилактики загрязнений. Отдельный акцент сделан на вопросах безопасности и надёжности эксплуатации оборудования, поскольку обрастание отложениями способствует росту теплового сопротивления и увеличению затрат энергоресурсов. Анализ литературных источников позволило сформулировать цель и задачи исследования, основанные на важной роли точных расчётов загрязнений для практики эксплуатации и повышения энергоэффективности оборудования.

Вторая глава посвящена описанию предлагаемой математической модели, которая описывает процесс конденсации парогазовой смеси с одновременным увеличением слоя твёрдых отложений на поверхности цилиндрических и прямых рёбрах. Представлены основные уравнения теплопроводности в тонком ребре, учитывающие его конечную толщину и распределение температуры вдоль и поперёк элемента. Описаны допущения, упрощающие математическую модель, среди которых предполагается однородность материала отложений, а также пропорциональная зависимость скорости нарастания их толщины от локальной плотности теплового потока. Представлены задаваемые граничные условия, учитывающие постоянство температуры в основании ребра (в зоне контакта с теплообменивающей трубой) и конденсацию пара на внешней границе загрязнённого слоя. В главе приводятся выводы об изменении уровня теплопередачи по мере накопления слоя отложений, и методика учёта нестационарности данного процесса. Значительное внимание уделялось построению конечно-разностных схем и алгоритмов численного решения задачи, позволяющих поэтапно рассчитывать локальную температуру в ребре и динамику увеличения толщины отложений. Приведён анализ сходимости предложенных численных алгоритмов, а также сформулированы критерии останова и сшивки решений на каждом вре-

менном шаге. Уделено место рассмотрению автомодельных режимов, когда загрязнение сосредоточено вблизи основания ребра и распространяется вдоль его длины по мере накопления твёрдой фазы. Результаты главы обеспечивают теоретическую основу для последующего численного моделирования и сопоставления с результатами физического эксперимента.

В третьей главе описаны результаты численного моделирования на основе методов вычислительной гидродинамики (CFD) и представленных во второй главе моделей образования отложений. Для решения задач внешнего обтекания труб с цилиндрическим и спиральным оребрением, где циркулирует парогазовая смесь с различным содержанием твёрдых частиц, применялся программный комплекс Ansys Fluent. В нём сформированы 3D-сеточные компьютерные модели с учётом пристеночных слоёв и особенностей турбулентного пограничного слоя. Проанализирована эффективность применения различных моделей турбулентности (k - ϵ , k - ω , SST k - ω , Spalart–Allmaras и др.) при сравнении результатов расчёта коэффициентов теплоотдачи и перепада давления. Особое внимание уделено режимам, близким к переходным значениям числа Рейнольдса, а также механизмам образования и стекания конденсата на оребрённой поверхности. Показано, что при увеличении концентрации твёрдых частиц толщина загрязнённого слоя возрастает быстрее, особенно в зонах рециркуляции потока. Представлены сравнительные характеристики гладких, цилиндрических и спиральных рёбер с точки зрения тепловой эффективности и склонности к загрязнению. Отдельно рассмотрен случай протекания воды внутри трубы при температурах, близких к точкам кипения, где возникает комбинированный процесс испарения и конденсации, что потребовало использование расчётной модели Ли. Полученные результаты моделирования сопоставлялись с экспериментальными данными полученными на реальных промышленных установках, что подтвердило их корректность и позволило уточнить ряд физических предположений. Представлен также анализ влияния геометрических параметров оребрения на динамику формирования отложений и сохранение высоких значений коэффициента теплоотдачи.

В четвертой главе описано практическое применение разработанной модели и программного комплекса на промышленном объекте целлюлозно-бумажного производства. Описана технологическая схема установки теплообменника, в которую подаётся парогазовая смесь, содержащая волокнистыми частицами. Показано, как регулярное осаждение примесей приводит к снижению эффективности нагрева воды и росту энергозатрат. Приведены результаты расчёта оптимального распределения форсунок для гидравлической очистки рёбер и оценено влияние различных режимов подачи воды на восстановление теплопередающих свойств. Кроме того, предложена методика оценки финансово-экономического эффекта от реализации периодических промывок, позволяющая определить интервал времени между очистками с учётом стоимости воды, простоя оборудования и возможных потерь тепла. Подтверждена реальность экономии энергоресурсов и увеличения срока службы теплообменника. Обсуждена возможность использования предложенной методики в иных отраслях, где применяются оребрённые поверхности и где присутст-

вуют риск образования твёрдых отложений или зольных наслоений. Показано, что периодическая, хорошо рассчитанная система промывки позволяет поддерживать высокий коэффициент теплопередачи и снизить затраты на эксплуатацию.

В заключении изложены основные результаты диссертационной работы и сформулированы выводы, отражающие достижения автора в области моделирования конденсации парогазовых смесей на оребренных поверхностях с учётом образования твёрдых отложений.

Основные результаты диссертационного исследования раскрыты в опубликованных работах, доложены на международных научно-технических конференциях.

Автореферат соответствует содержанию диссертации и отражает её научную новизну, теоретические и практические результаты.

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

Научные положения, выводы и рекомендации, представленные в диссертационном исследовании, обладают высокой степенью обоснованности и достоверности, что подтверждается совокупностью теоретических, численных и экспериментальных результатов. Автор корректно формулирует исходные уравнения тепло- и массообмена, детально описывает механизмы накопления загрязнений при конденсации парогазовых смесей, обосновывает допущения и граничные условия, а также предлагает верифицированные методики расчёта. В ходе решения поставленных задач использован комплексный подход, включающий моделирование в программном комплексе Ansys Fluent, проверку сходимости численных алгоритмов и сопоставление результатов расчётов с данными промышленного эксперимента.

Научные положения, выносимые на защиту, полно и последовательно раскрыты во всех разделах диссертации. Результаты авторского исследования отражены в публикациях, демонстрирующих разные аспекты выполненной работы: обоснование математических моделей, постановку и решение задач численного моделирования, экспериментальную проверку эффективности предложенных решений.

Основное содержание диссертации отражено в 18 работах, среди которых 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России, 2 статьи в изданиях, индексируемых в международной базе данных цитирования Scopus, 11 тезиса и полных докладов конференций. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Указанные материалы подтверждают оригинальность и научный уровень выполненного исследования, а также достоверность представленных выводов и рекомендаций.

**Значимость результатов работы для развития соответствующей отрасли науки,
научная новизна**

Научная новизна исследований заключается в следующем:

1. Разработаны математические модели образования твёрдых отложений на цилиндрических и прямых рёбрах в теплообменных аппаратах, учитывающие особенности конденсации парогазовой смеси с твёрдыми частицами и локальные тепломассообменные процессы.

2. Получено автомодельное решение задачи, описывающей конденсацию парогазовой смеси с твёрдыми включениями на прямом ребре, что позволяет аналитически оценивать начальное нарастание слоя загрязнений.

3. Построена и верифицирована трёхмерная модель, позволяющая рассчитывать характеристики тепло- и массообмена при движении воды в трубопроводе в условиях переходного режима течения и температур, близких к точке кипения; корректность подтверждена сравнением с экспериментальными данными.

4. Установлена зависимость коэффициента теплоотдачи от парогазовой смеси к поверхности трубы со спиральными ребрами от плотности отбираемого теплового потока при заданной скорости входа парогазовой смеси, что даёт возможность целенаправленно управлять параметрами процесса конденсации.

Практическая значимость работы заключается в том, что результаты исследования могут быть непосредственно внедрены при проектировании, эксплуатации и модернизации теплообменных аппаратов, работающих в условиях конденсации парогазовых смесей с твёрдыми включениями. Разработанные алгоритмы и математические модели позволяют прогнозировать образование отложений на оребренных поверхностях и оценивать влияние этих отложений на эффективность процесса теплообмена, что даёт возможность заблаговременно планировать мероприятия по их очистке и оптимизировать рабочие параметры.

Результаты исследования автора приняты к использованию в учебном процессе при чтении дисциплины «Техническая термодинамика и теплообмен» в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет». Включение разработанных методик и математических моделей в образовательную программу позволяет готовить специалистов, знакомых с актуальными методами расчёта и прогноза загрязнений в конденсационных системах теплообмена.

Разработана инженерная методика расчёта процесса восстановления оребренной поверхности теплообмена после загрязнений путём промывки. Предложенный подход позволяет определять оптимальные интервалы и параметры очистки, снижая эксплуатационные затраты и увеличивая ресурс оборудования.

Создана программа для ЭВМ (Свидетельство о государственной регистрации программы № 2024681667 РФ), позволяющая моделировать образование отложений на оребренных трубах при конденсации парогазовой смеси, содержащей твёрдые частицы. Использование такой программы обеспечивает инженерам возможность оперативной оценки темпов загрязнения и корректировки режимов работы теплообменника.

Разработана также компьютерная программа, предназначенная для моделирования процесса образования отложений на поверхностях прямых рёбер. Подобное программное обеспечение дополняет инструментарий специалистов, занимающихся проектированием и анализом оребрённых конструкций, повышая точность и надёжность расчётов при выборе оптимальных технических решений.

Теоретическая значимость обусловлена вкладом в развитие научных представлений о процессах конденсации парогазовых смесей, сопровождающихся образованием твёрдых отложений на теплопередающих поверхностях. Предложенные математические модели вносят уточнения в классические уравнения теплообмена, расширяя диапазон рассмотрения за счёт учёта нелинейного влияния слоя отложений и локальных характеристик конденсации. Полученные аналитические и численные решения способствуют более глубокому пониманию кинетики формирования загрязнений, их влияния на распределение температур и теплоотдачи на оребрённых поверхностях. Представленные разработки создают теоретическую базу для дальнейших исследований, связанных с оптимизацией конструкций теплообменного оборудования, изучением переходных режимов при наличии фазовых переходов и примесей. Также могут служить основой для формирования комплексного подхода к математическому моделированию многокомпонентных систем в энергетике и смежных областях.

Соответствие паспорту специальности

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника» в части направлений исследований: пункту 4: «Процессы переноса массы, импульса и энергии при свободной и вынужденной конвекции в широком диапазоне свойств теплоносителей и характеристик теплопередающих поверхностей, в одно- и многофазных системах и при фазовых превращениях ...»; пункту 5: «Научные основы и методы интенсификации процессов теплообмена Процессы тепло- и массообмена в оборудовании, предназначенном для ... передачи ... 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

Полученные в рамках диссертационного исследования научно-технические результаты рекомендуется использовать на предприятиях энергетики, химии, нефтехимии и целлюлозно-бумажной промышленности (например, АО «Татэнерго», АО «Нижнекамскнефтехим», ООО «Палп Инвест» и др.), а также в проектных организациях, инжиниринговых компаниях и в учебном процессе (ВУЗах, центрах дополнительного профессионального образования и др.), при подготовке специалистов теплоэнергетического и химико-технологического профиля.

Вопросы и замечания по диссертационной работе

1. Возможно ли использовать положительные результаты повышения эффективности работы конкретного теплообменника, полученные в диссертации, при совершенствовании режимов работы и конструкции аналогичных рекуперативных теплообменных аппаратов с оребренными поверхностями другой тепловой мощности?
2. Поясните математическую модель динамики роста отложений на поверхности ребер? Как рассчитывали массообмен между взвесями в парогазовой двухфазном потоке и поверхностью ребер?
3. В чем принципиальное отличие модели Ли для расчета теплообмена в зоне закипания-конденсации воды от известных в отечественной литературе моделей?
4. Какой критерий сходимости сеточных решений был применен в диссертационной работе? И что такое «сшивка решений»?
5. Появление газообразной (паровой) фазы в жидкости приводит к появлению лучистой составляющей переноса теплоты. Каким образом учитывался радиационный теплообмен в этом случае?
6. В чем заключается отличие понятия «экономический эффект» от понятия «финансово-экономический эффект», которое было предложено в диссертации?
7. Из текста диссертации не понятно, как в предложенной математической модели учитывается химический состав твёрдых частиц, образующих отложения. Например, частицы летучей золы, содержащие CaSO_4 и CaO , характеризуются повышенной способностью задерживаться на поверхностях теплообмена, особенно в условиях образования конденсатной плёнки.

Заключение по работе

Содержание представленной диссертационной работы соответствует паспорту специальности 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника». Диссертация Бадретдиновой Г.Р. на тему «Теплообмен при конденсации парогазовых смесей с твердыми частицами на оребренных поверхностях в теплообменных аппаратах», в которой изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, направленные на совершенствование теплообменных аппаратов, что имеет существенное значение для развития страны.

Диссертационная работа Бадретдиновой Гузель Рамилевны «Теплообмен при конденсации парогазовых смесей с твердыми частицами на оребренных поверхностях в теплообменных аппаратах» соответствует требованиям, предъявляемым ВАК Минобрнауки России, установленным в пп.9-14 Положения о порядке присуждения ученых степеней (Постановления Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 (актуальной редакции)), а ее автор Бадретдинова Гузель Рамилевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6 «Теоретическая и прикладная теплотехника».

Диссертационная работа Бадретдиновой Гузель Рамилевны и отзыв обсуждены на заседании кафедры «Теоретические основы теплотехники» ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», протокол № 7 от 27 февраля 2025 г.

Зав. кафедрой

«Теоретические основы теплотехники»

ФГБОУ ВО «ИГЭУ»

доктор технических наук, доцент

e-mail: zavkaf@tot.ispu.ru, Тел.: +7(4932)269-77

Бушуев

Евгений Николаевич

Директор

УМЦ ИГЭУ «Энергосбережение»,

доктор технических наук, профессор

профессор кафедры «Теоретические основы теплотехники» ФГБОУ ВО «ИГЭУ»

e-mail: buhmirov@tot.ispu.ru, Тел.: +7(4932)269-778

Бухмиров

Вячеслав Викторович

Адрес ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»: Российская Федерация, 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д.34

Телефон: +7(4932)269-999, факс: +7(4932)385-701

e-mail: office@ispu.ru, сайт: <http://ispu.ru>

Подписи В.В. Бухмирова и Е.Н. Бушуева заверяю:

Секретарь ученого совета ФГБОУ ВО ИГЭУ

к.э.н., доцент



Вылгина

Юлия Вадимовна

28.02.2025