

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента кандидата технических наук **Лопатина Алексея Александровича** на диссертационную работу **Бадретдиновой Гузель Рамилевны** на тему «**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 (технические науки)**

### **Актуальность темы исследования**

Диссертация Бадретдиновой Г. Р. «Теплообмен при конденсации парогазовых смесей с твердыми частицами на оребренных поверхностях в теплообменных аппаратах» посвящена решению задач по прогнозированию образования отложений на поверхностях в теплообменных аппаратах при конденсации парогазовых смесей, содержащих в себе твердые частицы. Целью диссертационного исследования является разработка математической модели, позволяющая описать процесс формирования отложений на оребренных поверхностях в теплообменных аппаратах во времени и исследовать влияние образовавшихся отложений на тепловой поток. Исследование процесса формирования отложений и их влияние на теплообменные характеристики аппаратов, предназначенные для утилизации теплоты от парогазовых смесей, содержащие твердые частицы, представляют теоретическое и практическое значение для многих отраслей промышленности и энергетики. Актуальными являются как теоретические исследования в данной области, так и разработка инженерной методики, позволяющая рассчитать процесс восстановления оребренной поверхности теплообмена после загрязнений путём смывания отложений водой.

**Диссертация соответствует паспорту научной специальности 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника по следующим направлениям:**

П4. 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. Радиационный теплообмен в прозрачных и поглощающих средах. П5. 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. П6. Научные основы повышения эффективности использования энергетических ресурсов в теплотехническом оборудовании и использующих теплоту системах и установках.

**Научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследований.**

В диссертации Бадретдиновой Г.Р. представлены результаты, обладающие научной новизной и имеющие практическую значимость:

1. Созданы математические описания процесса образования отложений на поверхностях ребер различной геометрии (цилиндрической и прямой формы) в теплообменных устройствах при конденсации парогазовой смеси с твёрдыми частицами.

2. Получено автомодельное решение задачи о конденсации парогазовой смеси с твёрдыми частицами на прямом ребре.

3. Разработана и подтверждена корректность трёхмерной модели, которая позволяет рассчитывать параметры тепло- и массообмена при движении воды в трубе при температурах, близких к температуре кипения, в условиях переходного режима течения.

4. Определена зависимость коэффициента теплоотдачи от парогазовой смеси к поверхности трубы со спиральными рёбрами при конденсации пара на ней от плотности отводимого теплового потока при заданной входной скорости.

**Обоснованность и достоверность полученных результатов** диссертации обеспечена: современными средствами сбора и обработки экспериментальных и численных данных на основе математических моделей с использованием уравнений сохранения и переноса массы, энергии и импульса; согласованием с исследованиями других авторов и результатами математического моделирования.

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных конференциях и семинарах. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

### **Общая характеристика работы**

Диссертация изложена на 142 страницах машинописного текста, включает 47 рисунка и 5 таблиц. Иллюстративный материал представлен в достаточном объеме и в хорошем качестве, что дает полное представление о выполненных исследованиях и полученных результатах. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений.

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования. Указаны обстоятельства, подтолкнувшие автора к исследованию в данном научном направлении. Сформулирована цель работы, подробно расписаны задачи исследования, указаны объекты и предмет исследования. Показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационной работы. Отмечен личный вклад автора. Сформулированы положения, выносимые на защиту. Кратко описана апробация результатов на международных и всероссийских конференциях.

**В первой главе** представлен обзор и анализ современного состояния исследований в области загрязнения внешних обретенных поверхностей в теплообменных аппаратах. Отдельно рассмотрены научные направления, связанные с эффективной работой теплообменных аппаратов, а также области при-

менения результатов, представляющих научный и практический интерес. Особое внимание уделяется анализу влияния обрастания поверхностей отложениями на процесс теплообмена.

По приведенным исследованиям отечественных и зарубежных авторов показано, что на осаждение твердых частиц влияют множество параметров, такие как скорость газового потока, геометрические особенности поверхности в теплообменных аппаратах, физические свойства поверхности, фазовых переходы и т.д.

Рассмотрены механизмы осаждения твердых частиц на теплопередающие поверхности, способы очистки и минимизации загрязнений на теплообменных поверхностях. Выделены проблемы снижения тепловых потоков при интенсивном загрязнении поверхностей, что влияет на эффективность работы теплообменных аппаратов. Дается обоснование того, что для контроля и определения толщины слоя отложений, влияющая на снижение тепловых потоков необходимо построение математических моделей, позволяющие определить данные параметры.

Из проведенного анализа следует, что отсутствуют исследования по прогнозированию процесса отложения на ребренных поверхностях в теплообменных аппаратах при конденсации парогазовых смесей, содержащие твердые частицы.

Автором работы делается вывод о необходимости создания математических моделей процесса образования отложений на поверхности ребер цилиндрической и прямой формы при конденсации парогазовых смесей, содержащих твердые частицы и разработки инженерной методики, позволяющая рассчитывать процесс восстановления ребренной поверхности теплообмена после загрязнений путём смывания отложений водой.

**Во второй главе** представлена математическая модель процесса образования отложений на поверхности цилиндрических и прямых ребер. Дана формулировка задачи. В математической модели приведены упрощающие предположения, представлены уравнения для определения температур и толщины

слоя отложений на цилиндрическом ребре. Показана конечно-разностная схема для цилиндрического ребра, а именно схема для температуры в ребре по толщине слоя отложений. Приведены уравнения, позволяющие рассчитать объем отложений на поверхности ребра по методу трапеций и уравнения, позволяющие, рассчитать тепловые потоки, отводимые ребром. Автором приведен численный расчет, позволяющий определить процесс нарастания толщины отложений на поверхности ребра.

Получены зависимости теплового потока от одного ребра за 60 суток работы теплообменного аппарата при различных значениях толщины, радиуса и коэффициента теплопроводности ребра, а также при различных значениях коэффициента теплопроводности отложений. Показано, что увеличение коэффициента теплопроводности материала и отложений приводит к росту теплового потока в 2-2,16 раза, а снижение теплового потока, отводимого ребром к трубе, происходит при уменьшении толщины ребра и радиуса трубы в 2,67 и 1,8 раза соответственно.

В работе представлено решение задачи образования отложений на поверхности цилиндрического ребра в безразмерном виде и свойства для ее решения. Автором установлено, что увеличение разности температур ребра и окружающей среды с 10 до 50°C и с 10 до 100°C способствует росту теплового потока, отнесенного к термической проводимости ребра в 3,45 и 5,9 раза соответственно. Повышение коэффициента теплопроводности отложений приводит к росту исследуемого параметра, а увеличение коэффициента теплопроводности ребра – к его уменьшению.

В диссертационном исследовании представлена конечно-разностная схема для прямого ребра, позволяющая рассчитать распределение температур в ребре и тепловых потоков, дан расчет толщины и объема отложений на прямом ребре. Получено автомодельное решение для прямого ребра, позволяющее определить начальные распределения толщины и температуры при численном решении задач о формировании отложений на ребрах конечной высоты.

**В третьей главе** представлены результаты математического моделирования, проведенных с помощью программного комплекса Ansys Fluent. В работе проведен подбор модели турбулентности на основе сравнения коэффициентов теплоотдачи, рассчитанного по известным зависимостям и полученного с помощью численного моделирования. По полученным данным, выявлено, что для решения задачи о конденсации парогазовой смеси на ребренных поверхностях наиболее подходящей моделью турбулентности является  $k-\omega$  SST, так как данная модель показывает наилучшую сходимость результатов. Также данная модель была выбрана по наилучшим критериям качества сетки для решаемой задачи. Критерии качества в работе определены для каждой исследуемой модели турбулентности и представлены в виде таблиц. Получено сравнение интенсивности теплоотдачи при различных числах Рейнольдса. Установлено, что с применением спиральных ребер интенсивность теплоотдачи увеличивается до 40% по сравнению с цилиндрическими ребрами.

Рассмотрено исследование по теплоотдаче при движении воды в трубе при температурах близких к температурам кипения в переходном режиме. В ходе проведения исследования была разработана трехмерная модель для расчета характеристик тепло- и массообмена при движении воды. Разработанная модель верифицирована с экспериментальными данными.

Исследован процесс конденсации воды из паровоздушной смеси на поверхности цилиндрических ребер с помощью компьютерного моделирования. Проведена верификация численной модели с эмпирическими формулами, которая подтверждает адекватность используемой модели. Результаты численного моделирования и результаты расчетов по формулам отличаются не более чем на 5,19%. При численном моделировании получена картина распределения диффузионного потока, массовой концентрации дисперсной фазы и температуры стенки на поверхности цилиндрического ребра. Установлено, что картина распределения исследуемых параметров зависит от диаметра ребра. Однако при данной постановке задачи значения диффузионного потока не зависят от диаметра ребра, определено влияние на него от концентрации пара в

парогазовой смеси. Получена зависимость коэффициента теплоотдачи при изменении ребра и концентрации пара в паровоздушной смеси.

На основе проведенных исследований было проведено численное моделирование конденсации парогазовой смеси на поверхности спирального ребра. Был исследован коэффициент теплоотдачи от парогазовой смеси к оребренной поверхности. Результаты сравнивались с результатами, полученными при экспериментальных исследованиях. Определена доля теплового потока, отбираемого от парогазовой смеси за счет ее конденсации на поверхности трубы со спиральными ребрами.

**В четвертой главе** приведена инженерная методика расчета процесса восстановления поверхности с ребрами в теплообменных аппаратах после загрязнения твердыми частицами путем их смывания водой.

**В заключении** представлены основные результаты по диссертационной работе, а также перспективы дальнейшей разработки темы исследования.

В целом текст диссертации написан научным языком, материал изложен логично, подробно и четко. Практические рекомендации вполне обоснованы и вытекают из результатов работы.

**Рекомендации по использованию научно-технических результатов и выводов диссертации.**

Из диссертационной работы следует, что автором проведен большой объем экспериментальных и численных исследований по прогнозированию процесса отложений на оребренных поверхностях в теплообменных аппаратах. На основе разработанной математической модели получено распределение температурного поля в ребре и толщины слоя отложений по времени.

Полученные результаты могут применены на предприятиях различных отраслей промышленности, в проектных организациях, а также в учебных заведениях.

**Вопросы и замечания по работе:**

1. В работе не рассмотрены вопросы, связанные с возможным влиянием качеством и чистотой обработки рабочих поверхностей на условия теплоотдачи. При этом, известно, что наличие неровностей на теплообменных поверхностях может оказывать существенное влияние на теплоотдачу, особенно в условиях фазового перехода.

2. В работе не представлена оценка факторов неопределенности, что в некоторой степени затрудняет рассмотрение результатов моделирования и верификацию полученных результатов.

3. В работе не представлены данные по возможному совместному влиянию второго и последующих пучков труб на общую эффективность процесса конденсации.

4. В работе рассматривается влияние геометрических параметров основных элементов теплообменного оборудования, при этом в исследовании не представлено обоснование выбора этих параметров. Вместе с тем, необходимо отметить, что рассмотрение соискателем различных геометрий позволило бы распространить полученные результаты на более широкий класс теплообменных аппаратов.

5. Несмотря на то, что исследование посвящено вопросам конденсации парогазовой смеси, движущейся со значительной скоростью, в работе не рассматриваются гидравлические параметры течения. При этом учет теплогидравлической эффективности, по моему мнению, позволил бы дать более широкие возможности для сравнения полученных результатов с данными других авторов.

Высказанные замечания и вопросы не повлияли на положительную оценку диссертационной работы в целом.

### **Заключение**

Диссертация Бадретдиновой Гузель Рамилевны является завершенной научно-квалификационной работой, содержащей большой объем экспериментальных и численных исследований, выполненных с помощью известных и

оригинальных методик, которые сделали возможным проведение математического моделирования процессов конденсации парогазовых смесей с твердыми частицами на оребренных поверхностях в теплообменных аппаратах. Разработанные методы расчета процесса образования отложений на оребренных поверхностях и тепловых потоков, а также методы расчета процессов восстановления поверхности от загрязнений путем смывания водой вносит значительный вклад в развитие объектов энергетики и других промышленных предприятий. Полученные автором результаты полностью соответствуют заявленной цели и поставленным задачам. Автореферат достоверно и объективно отражает основное содержание диссертации. Опубликованные работы полностью освещают материал диссертации.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 18 научных работах, 4 из них из списка рекомендованного ВАК, 2 из них в изданиях, индексируемых в международных базах данных цитирования Scopus, а также получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Уровень решаемых задач соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника.

Представленная 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 от 24.09.2013 №842 (в актуальной редакции)), а соискатель Бадретдинова Гузель Рамилевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника.

Я, Лопатин Алексей Александрович, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Бадретдиновой Гузель Рамилевны, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

Заведующий кафедрой «Реактивные двигатели и энергетические установки» ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», кандидат технических наук (01.02.05 Механика жидкости, газа и плазмы), доцент

Лопатин Алексей Александрович

«26» февраля 2025 г.

420111, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. К. Маркса, 10.

Тел.: +7 (843) 231-01-09 (справочная), e-mail: [kai@kai.ru](mailto:kai@kai.ru)

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» (КНИТУ-КАИ)

Подпись Лопатина Алексея Александровича заверяю:

Ученый секретарь ФГБОУ ВО  
«Казанский национальный  
исследовательский технический  
университет им. А.Н. Туполева-КАИ»

Ф. А. Жестовская

«26» февраля 2025 г.

