



КГЭУ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и коммерциализации


И.В. Ившин

« 3 » 10 2024г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Казанский государственный энергетический университет»
(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

Диссертация «Теплообмен при конденсации парогазовых смесей с твердыми частицами на оребренных поверхностях в теплообменных аппаратах» выполнена на кафедре «Автоматизация технологических процессов и производств» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» (ФГБОУ ВО «КГЭУ»).

С февраля 2017г. по апрель 2020г. соискатель Бадретдинова Гузель Рамилевна работала на кафедре «Теоретические основы теплотехники» в должности лаборанта, с сентября 2020г. по август 2021г. работала на кафедре «Теоретические основы теплотехники» в должности инженера.

В период подготовки диссертации соискатель Бадретдинова Гузель Рамилевна работала с сентября 2021г. по август 2024г. на кафедре «Теоретические основы теплотехники» в должности ассистента, далее и по настоящее время работает на кафедре «Автоматизация технологических процессов и производств» в должности

ассистента.

С мая 2024г. по настоящее время работает по совместительству в Инжиниринговом центре «Компьютерное моделирование и инжиниринг в области энергетики и энергетического машиностроения» в должности лаборанта-исследователя.

В 2019 году окончила ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» по направлению подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника, профиль «Энергообеспечение предприятий», присуждена квалификация бакалавр, рег. номер № ITE-6050 от 11.07.2019г.

В 2021 году окончила ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» по направлению подготовки 16.04.01 Техническая физика, профиль «Теплофизика», присуждена квалификация магистр, рег. номер № ITE-7390 от 08.07.2021г.

В 2021г. поступила на очную аспирантуру в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия, специальность 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Справка о сданных кандидатских экзаменах выдана 09.12.2024г. в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

Научный руководитель – доктор технических наук (05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий), профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация технологических процессов и производств» ФГБОУ ВО «КГЭУ», Дмитриев Андрей Владимирович.

По итогам обсуждения диссертации Бадретдиновой Гузель Рамилевны «Теплообмен при конденсации парогазовых смесей с твердыми частицами на оребренных поверхностях в теплообменных аппаратах» принято следующее **заключение:**

1. Актуальность

На сегодняшний день приоритетным направлением в сфере энергетической промышленности всех стран мира является энергосбережение и повышение

энергоэффективности технологического оборудования, которое способствует рациональному использованию ресурсов и снижению выбросов, негативно влияющих на окружающую среду.

Во многих сферах промышленности теплообменные аппараты применяются в конденсационных котлах, тепловых насосах, экономайзерах, парогенераторах, охладителях и т.п. Во время эксплуатации теплообменные аппараты подвержены интенсивному внешнему загрязнению. Загрязнение оребренных поверхностей в теплообменном оборудовании способствует снижению коэффициента теплопередачи, что влечет к экономическим потерям промышленных компаний.

Конденсация парогазовой смеси, которая содержит в себе твердые частицы, в процессе передачи тепла сопровождается образованием отложений на оребренной поверхности в теплообменном аппарате, вследствие этого, происходит снижение теплового потока. Исследования по прогнозированию образования отложений на оребренных поверхностях в теплообменных аппаратах и определению интенсивности теплообмена способствуют минимизации степени загрязнения, так как результаты работы позволят определить место установки в корпусе аппарата форсуночных устройств для очистки водой оребренных поверхностей в теплообменнике от твердых частиц. Все это обуславливает актуальность темы данной работы.

2. Связь диссертационной работы с приоритетными научно-исследовательскими работами

Диссертационная работа направлена на решение задач по прогнозированию образования отложений на оребренной теплообменной поверхности и повышение эффективности работы теплообменных аппаратов.

3. Научная новизна результатов работы

1. Разработаны математические модели процесса образования отложений на поверхности цилиндрических и прямых ребер в теплообменных аппаратах при

конденсации парогазовой смеси, содержащей твердые частицы.

2. Получено автомодельное решение задачи о конденсации на прямом ребре парогазовой смеси, содержащей твердые частицы.

3. Разработана и верифицирована трехмерная модель, позволяющая рассчитывать характеристики тепло- и массообмена при движении воды в трубе при значениях температур близких к температурам кипения в переходном режиме течения.

4. Получена зависимость коэффициента теплоотдачи от парогазовой смеси к поверхности трубы со спиральными ребрами при конденсации пара на ней от плотности отбираемого теплового потока при входной скорости.

4. Теоретическая и практическая значимость результатов

1. Теоретическая значимость работы включает разработку математических моделей процесса образования отложений на теплообменных поверхностях, получение автомодельного решения задачи о конденсации парогазовой смеси, создание трехмерной модели для расчета тепло- и массообмена в трубах с учетом температур кипения и получение зависимости коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока и скорости потока, что способствует оптимизации работы теплообменных систем и повышению их эффективности.

2. В 2020 году была проведена научно-исследовательская работа на тему: «Расчет теплообменного аппарата для нагрева воды за счет тепла парогазовой смеси» по заказу компании ООО «Филиал ВПМ», г. Казань.

3. Результаты исследования автора приняты к использованию в учебном процессе при чтении дисциплины «Техническая термодинамика и теплообмен» для студентов в ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет».

4. Разработана инженерная методика, позволяющая рассчитать процесс восстановления оребренной поверхности теплообмена после загрязнений путём смывания отложений водой.

5. Разработана программа для ЭВМ, позволяющая моделировать образование отложений на поверхности оребренных труб в теплообменных аппаратах при

конденсации парогазовой смеси, содержащей твердые частицы (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024681667 РФ).

6. Разработана программа для ЭВМ, позволяющая моделировать образование отложений на поверхности прямых ребер в теплообменных аппаратах при конденсации парогазовой смеси, содержащей твердые частицы.

5. Личное участие авторов в получении результатов научных исследований, изложенных в диссертации

Автор лично участвовал в постановке цели и задач исследований, разработке математической модели и инженерной методики расчета, проведении численного моделирования, в получении результатов, представленных в диссертации и публикациях.

6. Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность и обоснованность научных результатов и выводов математических моделей подтверждается использованием фундаментальных уравнений сохранения и переноса массы, энергии и импульса. Достоверность научных положений, теоретических выводов и практических рекомендаций диссертации подтверждается хорошим совпадением результатов математического моделирования с экспериментальными данными, а также широкой публикацией результатов и их обсуждением на международных и российских конференциях.

7. Соответствие диссертации научной специальности

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.4.6. «Теоретическая и прикладная теплотехника» и охватывает следующие направления: 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. Пб. Научные основы повышения эффективности использования энергетических ресурсов в теплотехническом оборудовании и использующих теплоту системах и установках.

8. Полнота изложения результатов диссертации в работах, опубликованных автором

По материалам диссертации опубликовано 18 печатных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России для соискателей ученых степеней доктора и кандидата наук, 2 статьи в изданиях, индексированных в международных базах данных цитирования Scopus, 1 свидетельство на ЭВМ.

Статьи в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК РФ

1. **Бадретдинова Г.Р.** Особенности решения задачи о конденсации пара, содержащего твёрдые частицы на ребре / Н.Д. Якимов, А.В. Дмитриев, Г.Р. Бадретдинова, С.Д. Борисова // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24, № 3. – С. 121-129. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-3-121-129.

2. **Бадретдинова Г.Р.** Оценка моделей турбулентности при внешнем обтекании нагреваемой трубы / Г.Р. Бадретдинова, И.Р. Калимуллин, В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – Т. 25, № 2. – С. 176-186. – DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-2-176-186.

3. **Бадретдинова Г.Р.** Конденсация парогазовой смеси с твердыми частицами на поверхности оребренных труб / Г.Р. Бадретдинова, Н.Д. Якимов, А.В. Дмитриев, И.Р. Калимуллин // Вестник МЭИ. 2024. № 3. С. 72-77. DOI: 10.24160/1993-6982-2024-3-72-77.

4. **Бадретдинова, Г. Р.** Теплоотдача при движении воды в трубе при температурах,

близких к температурам кипения в переходном режиме / Г.Р. Бадретдинова, А.В. Дмитриев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2024. – № 5. – С. 42-51. – DOI 10.17588/2072-2672.2024.5.042-051.

*Статьи в изданиях, включенных в международную базу цитирования SCOPUS
и Web of Science*

5. Dmitriev A.V., Yakimov N.D., Khar'kov V.V., **Badretdinova G.R.** Calculation of Sediment Formation on Finned Heat Exchanger Tubes on Condensation of a Vapor–Gas Mixture with Solid Particles // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2023. – P. 1-8. <https://doi.org/10.1007/s10891-023-02812-y>

6. **Badretdinova G.R.**, Popkova O.S., Dmitriev A.V., Kalimullin I.R. Condensation of Water from a Vapor-Air Mixture on a Surface with Annular Round Straight Ribs of Constant Thickness //2024 6th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). – IEEE, 2024. – P. 1-5. DOI: 10.1109/REEPE60449.2024.10479828

Публикации в других изданиях и материалах конференций

7. **Бадретдинова Г.Р.** Восстановление поверхности теплообмена в условиях ее загрязнения при конденсации парогазовой смеси / А.В. Дмитриев, Г.Р. Бадретдинова, С.Д. Борисова, А.Н. Николаев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24, № 1. – С. 176-185. – DOI 10.30724/1998-9903-2022-24-1-176-185.

8. **Бадретдинова Г.Р.** Исследование теплообмена от парогазовой смеси при передаче тепла через ребристую поверхность / В.Э. Зинуров, А.Р. Галимова, Г.Р. Бадретдинова, И.В. Санников // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXI Бенардосовские чтения): Материалы международной научно-технической конференции, Иваново, 02–04 июня 2021 года. Том II. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2021. С. 241-243.

9. **Бадретдинова Г.Р.** Восстановление теплопередающей поверхности при загрязнении твердыми частицами целлюлозы, содержащиеся в парогазовой смеси / Г.Р. Бадретдинова, А.В. Дмитриев, Г.Х. Гумерова // Энергетика, инфокоммуникационные технологии и высшее образование: Международная научно-техническая конференция. Электронный сборник научных статей по материалам конференции В 3-х томах, Алматы, Казань, 20–21 октября 2022 года. Том 1. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023. С. 15-21.

10. **Бадретдинова Г.Р.** Режим работы теплообменника в условиях его загрязнения при конденсации парогазовой смеси / Н.Д. Семанина, Г.Р. Бадретдинова, А.В. Дмитриев // Интенсификация тепломассообменных процессов, промышленная безопасность и экология : Материалы VI Всероссийской студенческой научно-технической конференции, Казань, 24–26 мая 2022 года. Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2022. С. 237-240.

11. **Бадретдинова Г.Р.** К расчету формирования осадка при конденсации на оребренных трубах теплообменника / Г.Р. Бадретдинова, В.В. Харьков, Н.Д. Якимов // Интенсификация тепломассообменных процессов, промышленная безопасность и экология: Материалы VI Всероссийской студенческой научно-технической конференции, Казань, 24–26 мая 2022 года. Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2022. С. 307-309.

12. **Бадретдинова Г.Р.** Влияние осадка на тепловой поток оребренной трубы / Г.Р. Бадретдинова, А.В. Дмитриев // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (XXII Бенардосовские чтения) : Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 75-летию теплоэнергетического факультета, Иваново, 31 мая – 02 2023 года. Том 2. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2023. С. 181-183.

13. **Бадретдинова Г.Р.** Промышленное внедрение рекуперативного теплообменного аппарата с ребристой поверхностью / Г.Р. Бадретдинова, А.А. Каюмова, Э.Р. Ханафеева // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тезисы

докладов Двадцать восьмой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Москва, 17–19 марта 2022 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Центр полиграфических услуг " РАДУГА", 2022. С. 745.

14. **Бадретдинова Г.Р.** Влияние геометрических размеров круглого ребра на тепловую эффективность теплообменника при конденсации парогазовой смеси / Г.Р. Бадретдинова // Бутаковские чтения: Сборник статей III Всероссийской с международным участием молодёжной конференции, Томск, 12–14 декабря 2023 года. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2023. С. 162-164.

15. **Бадретдинова Г.Р.** Конденсация парогазовой смеси с твердыми частицами на поверхности кольцевого круглого прямого ребра постоянной толщины / Г.Р. Бадретдинова // XXVII Всероссийский аспирантско-магистерский научный семинар, посвященный Дню энергетика и 55-летию КГЭУ: материалы докладов, Казань, 05–06 декабря 2023 года. Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2023. С. 392-395.

16. **Бадретдинова Г.Р.** Экспериментальное исследование рекуперативного теплообменного аппарата с ребристой поверхностью / Г.Р. Бадретдинова, А.А. Абдуллина, В.Э. Зинуров // XXVI Туполевские чтения (школа молодых ученых): Материалы Международной молодёжной научной конференции. Сборник докладов, Казань, 09–10 ноября 2023 года. Казань: ИП Сагиев А.Р., 2023. С. 961-965.

17. **Бадретдинова Г.Р.** Численное моделирование конденсации двухфазной смеси на оребренной поверхности теплообменного аппарата / Г.Р. Бадретдинова, В.Э. Зинуров, Т.Р. Якупов // Тинчуринские чтения - 2024 «Энергетика и цифровая трансформация»: Материалам Международной молодежной научной конференции. В 4-х томах, Казань, 24–26 апреля 2024 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2024. – С. 669-671.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №

2024681667 Российская Федерация. Программа для решения задач образования отложенных на поверхности оребренных труб теплообменных аппаратов при конденсации парогазовой смеси / Н.Д. Якимов, Г.Р. Бадретдинова, А.В. Дмитриев; заявл. № 2024680683, 09.09.2024; опубл. 12.09.2024. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 12.09.2024

9. Апробация работы

Основные положения и отдельные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных научно-технических конференциях «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XXI – XXII Бенардосовские чтения) (ИГЭУ, г. Иваново, 2021г., 2023г.); ежегодной международной научно-технической конференции «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (МЭИ, г. Москва, 2022г.); на XII Международной научно-технической конференции «Энергетика, инфокоммуникационные технологии и высшее образование» (АУЭС им. Г. Даукеева, г. Алматы, 2022г.); ежегодной конференции «Интенсификация теплообменных процессов, промышленная безопасность и экология» (КНИТУ-КХТИ, г. Казань, 2022г.); ежегодных форумах «Татарстанский международный форум по энергетике и энергоресурсоэффективности» (г. Казань, 2023-2024г.); на итоговой научной конференции сотрудников Казанского университета за 2023 г (К(П)ФУ, г. Казань, 2024г.); на XXVII Всероссийском аспирантско-магистерском научном семинаре, посвященному Дню энергетика (КГЭУ, г. Казань, 2023г.); на III Всероссийской с международным участием молодежной конференции «Бутаковские чтения» (ТюмГУ, г. Томск, 2023г.); ежегодной международной молодежной научной конференции «XXVI Туполевские чтения (школа молодых ученых)» (КНИТУ им. А.Н. Туполева-КАИ, г. Казань, 2023г.); ежегодной международной молодежной научной конференции Тинчуринские чтения – 2024 «Энергетика и цифровая трансформация» (КГЭУ, г. Казань, 2024г.).

10. Ценность научных работ соискателя

Ценность научных работ соискателя состоит в следующем:

1. Разработаны математические модели процесса образования отложений на поверхности цилиндрических и прямых ребер в теплообменных аппаратах при конденсации парогазовой смеси, содержащей твердые частицы.

2. На основе разработанной математической модели для цилиндрического ребра установлено, что с увеличением разности температур ребра и окружающей среды наблюдается увеличение теплового потока. В момент времени 60 суток при увеличении разности температур с 10 до 50°C тепловой поток увеличивается в 3,45 раза, а при повышении разности температур с 10 до 100°C – в 5,9 раз. Причем значительные изменения теплового потока наблюдаются в первые 10 суток.

3. Полученные данные позволили провести численное сравнение процессов теплообмена для труб с различным типом оребрения. Было установлено, что трубы со спиральным оребрением обеспечивают увеличение интенсивности теплоотдачи до 40% по сравнению с цилиндрическим оребрением.

4. Разработана и верифицирована трехмерная модель позволяющая рассчитывать характеристики тепло- и массообмена при движении воды при значениях температур близких к температурам кипения в переходном режиме течения.

5. Доказана применимость модели Ли для решения задач течения воды в трубопроводе при ее частичном испарении. При образовании пара необходимо учитывать процессы испарения и конденсации, например по модели Ли, и проводить расчеты в нестационарном режиме.

6. Во всем рассматриваемом диапазоне исследований адекватные результаты получаются лишь при учете влияния температуры на такие параметры, как поверхностное натяжение, коэффициент теплопроводности воды, коэффициент динамической вязкости воды. Расхождение результатов в этом случае менее 6%.

7. Получена зависимость числа Нуссельта от числа Рейнольдса для условий течения воды в диапазоне $Re = 2600-3600$, при ее нагреве до температур близких к температурам кипения.

8. Предложена инженерная методика, позволяющая рассчитать процесс

восстановления оребренной поверхности теплообмена после загрязнений путём смывания отложений водой в теплообменном аппарате, установленном на промышленном объекте, занимающемся производством бумаги санитарно-гигиенического назначения и изделий тисью в России. Теплообменный аппарат был установлен компанией ООО «Филиал ВПМ», г. Казань.

11. Характер результатов

Характер результатов соответствует п. 9 Положения о присуждении ученых степеней ВАК Министерства образования и науки РФ.

12. Рекомендации и выводы

Диссертационная работа Бадретдиновой Гузель Рамилевны «Теплообмен при конденсации парогазовых смесей с твердыми частицами на оребренных поверхностях в теплообменных аппаратах» является завершённой научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, в которой содержится решение задач, связанных с повышением тепловой эффективности теплообменного оборудования при конденсации парогазовых смесей, содержащих твердые частицы.

Диссертационная работа обобщает самостоятельные исследования автора, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые на защиту, свидетельствует о личном вкладе автора в науку. При выполнении диссертационной работы Бадретдинова Г.Р. проявила себя зрелым научным работником, способным ставить и решать сложные теоретические и практические задачи.

Работа соответствует критериям Положения о присуждении ученых степеней, принятого Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013г. №842, с изменениями, принятыми Постановлением Правительства РФ от 26 сентября 2022г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук.

Диссертационная работа «Теплообмен при конденсации парогазовых смесей с

твердыми частицами на оребренных поверхностях в теплообменных аппаратах»
Бадретдиновой Гузель Рамилевны рекомендуется к защите на соискание ученой
степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6. Теоретическая и
прикладная теплотехника.

Заключение принято на расширенном заседании кафедры «Автоматизация
технологических процессов и производств» ФГБОУ ВО «КГЭУ», которое
состоялось 3 октября 2024г. протокол № 21. На заседании присутствовало 18
человек, из них 6 докторов наук. Результаты голосования: «за» – 18, «против» – нет,
«воздержалось» – нет.

Председатель заседания:

Халитов Фарит Гусманович

д. х. н., профессор, профессор кафедры
«Автоматизация технологических процессов
и производств» ФГБОУ ВО «КГЭУ»,

Секретарь заседания:

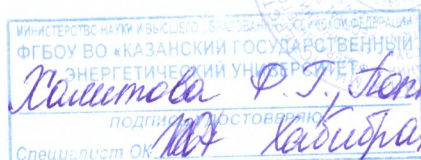
Попкова Оксана Сергеевна

к.т.н., доцент, доцент кафедры
«Автоматизация технологических процессов
и производств» ФГБОУ ВО «КГЭУ»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Казанский государственный энергетический университет»,
420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51.
Тел. (843)519-43-21, e-mail: ee-kgeu@mail.ru

Сведение о лице, утвердившем заключение

Ившин Игорь Владимирович: доктор технических наук, профессор
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Казанский государственный энергетический университет»,
проректор по науке и коммерциализации,
420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51.
Тел. (843)519-42-73, e-mail: ivshini@mail.ru



Халитова Ф. Г., Попковой О. С.
подпись
Халибрахманова О. А.