

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента доктора технических наук

**Гаряева Андрея Борисовича** 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 диссертационного исследования**

Одним из важных направлений повышение энергетической эффективности является использование теплоты парогазовых смесей, образующихся в технологических процессах. Значительная часть парогазовых смесей, как например, отходящий сушильный агент после сушки зерна или тканей, парогазовые смеси после производства бумаги, содержат твердые частицы. При конденсации таких смесей на оребренных поверхностях теплообменных аппаратов образуются отложения, что уменьшает передаваемый тепловой поток. Это приводит к их интенсивному загрязнению, нерасчетным режимам работы и экономическим потерям.

Исследования по прогнозированию отложений и определению интенсивности теплообмена помогают минимизировать загрязнение.

**Актуальность темы** обусловлена необходимостью прогнозирования и борьбы с образованием отложений на оребренных поверхностях теплообменного оборудования, в котором происходит выпадение конденсата из парогазовой смеси, содержащей твердые частицы.

**Научная новизна исследований, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

В диссертационной работе были получены следующие новые результаты:

1. Разработаны математические модели для описания процессов образования отложений на поверхностях цилиндрических и прямых ребер в

теплообменных аппаратах при конденсации парогазовых смесей, содержащих твердые частицы и на их основе исследованы закономерности образования отложений.

2. Получено автомодельное решение задачи о конденсации пара из парогазовой смеси с твердыми частицами на прямом ребре.

3. Разработана и верифицирована трехмерная модель для расчета тепло- и массообмена при течении воды в трубе при температурах, близких к температуре кипения, в условиях переходного режима течения.

4. На основе численного эксперимента определены зависимости коэффициента теплоотдачи от парогазовой смеси к наружной поверхности трубы со спиральными ребрами от плотности подводимого теплового потока и входной скорости.

Считаю, что новизна каждого из указанных пунктов, а также полученных результатов является обоснованной.

#### **Практическая значимость диссертации**

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

2. Разработаны программы для ЭВМ, позволяющие моделировать образование отложений на поверхности оребренных труб в теплообменных аппаратах при конденсации парогазовой смеси, содержащей твердые частицы.

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

#### **Соответствие темы диссертации паспорту специальности 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника.**

Диссертационная работа соответствует пунктам паспорта специальности 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника, а именно: 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. Радиационный теплообмен в прозрачных и поглощающих средах.»; 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».

**Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Достоверность и обоснованность научных результатов и выводов математических моделей подтверждается корректным 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 в реферируемых журналах и их обсуждением на международных и российских конференциях.

**Структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения по работе, списка использованных источников (136 наименований). Текст диссертации изложен на 142 страницах машинописного текста, содержит 47 рисунка, 5 таблиц.

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования. Показана научная и практическая значимость полученных результатов. Обозначены основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** диссертации посвящена анализу проблемы интенсивного загрязнения поверхности теплообменных аппаратов, которое происходит при

конденсации парогазовых смесей в тех случаях, когда эти смеси содержат твердые частицы. В рамках исследования рассмотрены ключевые аспекты этого явления, включая механизмы осаждения твердых частиц на поверхности теплообменников, а также влияние этих отложений на процесс теплопередачи. Внимание уделено разработке и применению методов, направленных на минимизацию негативного воздействия загрязнений на эффективность теплообменных процессов.

Подчеркнута необходимость создания и внедрения новых математических моделей и методов численного моделирования, которые позволят прогнозировать и оптимизировать процессы тепломассообмена в условиях загрязненной среды. Поставлены задачи исследования.

**Во второй главе** представлена разработанная математическая модель образования отложений на поверхности прямых и цилиндрических ребер при конденсации парогазовой смеси, содержащей твердые примеси. Введены основные упрощающие предположения, необходимые для создания модели. Формулируется задача определения распределения толщины отложений и теплового потока, переносимого по ребру к теплообменной поверхности.

Разработана конечно-разностная схема для численного решения задачи, позволяющая рассчитать распределение температуры в ребре и скорость образования отложений во времени. Проведены численные эксперименты, которые показали эффективность и точность предложенной модели. Результаты расчетов позволили выявить влияние различных параметров, таких как толщина ребра, теплопроводность материалов, а также начальных условий на процесс образования отложений.

Разработана методика расчета роста отложений на наружной поверхности оребренных труб в теплообменниках. Исследована зависимость теплового потока, передаваемого в теплообменнике, от времени при различных конструктивных и режимных параметрах.

**Третья глава** диссертации посвящена численному моделированию процессов теплообмена при конденсации парогазовой смеси на поверхности



цилиндрических и спиральных ребер. Проведено сравнение моделей турбулентности для расчета внешнего обтекания нагреваемой трубы, выбрана наиболее подходящая модель турбулентности для численного моделирования. Рассмотрено влияние параметров сетки на коэффициент теплоотдачи и проведено сравнение интенсивности теплоотдачи при различных числах Рейнольдса для нагреваемой трубы с оребрением.

Изучена теплоотдача при движении воды в трубе при температурах, близких к температурам кипения, в переходном режиме. Проведена проверка применимости численного моделирования для расчета таких процессов.

Проведено численное моделирование конденсации пара из паровоздушной смеси на поверхности спиральных и цилиндрических ребер. Определены ключевые факторы, влияющие на этот процесс и рассмотрено их влияние на эффективность теплообмена.

Разработана математическая модель для оценочного прогнозирования коэффициента теплоотдачи в зависимости от различных параметров системы.

В четвертой главе обсуждается установка теплообменника с оребренными трубами на промышленном производстве. Основное внимание уделено загрязнению теплообменных поверхностей целлюлозой, снижающему эффективность теплопередачи. Предложено увеличить поверхность теплообмена через оребрение труб, но это вызывает проблему их быстрого загрязнения, требующую эффективных методов очистки. Разработан метод восстановления теплопередающих свойств теплообменника после загрязнений. Рассчитан процесс восстановления поверхности путем ее промывки водой с учетом изменения теплового потока и затрат на очистку. Также исследуется возможность создания замкнутого водяного цикла для минимизации отходов и решения экологических проблем, связанных с целлюлозными частицами.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы. Указаны перспективные направления дальнейших исследований в рамках темы диссертации.

В приложении приведен код программ для ЭВМ, разработанных по теме исследования, а также документы, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы.

**Замечания по содержанию диссертации:**

1. Предложенная модель роста отложений на одиночном ребре не всегда применима для описания процесса отложений на ребренной поверхности, поскольку в этом случае также происходит рост отложений на участке поверхности между ребрами, которые будут постепенно перекрывать межреберный канал.
2. Одним из допущений модели роста отложений на ребре является я близость температуры поверхности ребра к температуре насыщения. Для парогазовой смеси это допущение выполняется не всегда.
3. Термин «тепловая проводимость» применяется в диссертации в одном случае для обозначения произведения коэффициента теплопроводности ребра на его толщину, а во втором случае как частное от деления коэффициента теплопроводности на толщину слоя отложений. Эти величины имеют различную размерность и разный физический смысл. Под термической проводимостью обычно понимают величину, обратную термическому сопротивлению, поэтому корректное применение этого термина справедливо только во втором случае.
4. Следовало бы указать в автореферате, что полученные в результате численного моделирования результаты по соотношению тепловых потоков, передаваемых от парогазовой смеси путем конвекции и конденсации справедливы только в рассматриваемом диапазоне параметров. При других исходных значениях начальных температур теплоносителей они могут существенно меняться.
5. В описании практической значимости диссертации отмечено выполнение научно исследовательской работы по рассматриваемой тематике. Следовало указать не сам факт успешного проведения



работы, а полученные в ходе ее выполнения практические результаты.

Указанные замечания не меняют общей положительной оценки диссертационной работы.

### **Заключение по диссертационной работе**

Несмотря на указанные замечания, диссертационная работа выполнена на высоком научно-техническом уровне и содержит новые научные результаты в области математического моделирования теплообменного оборудования.

Результаты работы прошли хорошую апробацию на конференциях различного уровня и опубликованы в журналах из перечня ВАК.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Считаю, что диссертационная работа Бадретдиновой Гузель Рамилевны «Теплообмен при конденсации парогазовых смесей с твердыми частицами на оребренных поверхностях в теплообменных аппаратах», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6. Теоретическая и прикладная теплотехника (технические науки), является самостоятельной завершенной научно-квалификационной работой, в которой разработаны новые научно обоснованные технические решения по прогнозированию состояния оребренных труб для обеспечения надежной работы теплообменных аппаратов для конденсации пара из парогазовых смесей, содержащих твердые частицы.

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

Даю согласие на обработку моих персональных данных, связанных с работой диссертационного совета 24.2.310.03.

**Официальный оппонент:**

Профессор кафедры «Тепломассообменные процессы и установки»

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,  
доктор технических наук, профессор



Гаряев

Андрей Борисович

«28» февраля 2025 г.

Докторская диссертация Гаряева А.Б. защищена по специальности 05.14.04 «Промышленная теплоэнергетика» (2010 г.).

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1.

Тел.: +7 495 362-70-01, +7 495 362-72-01 E-mail: universe@mpei.ac.ru

Подпись профессора кафедры «Тепломассообменные процессы и установки» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» доктора технических наук, профессора Гаряева Андрея Борисовича заверяю:



ЗАМЕСТИТЕЛЬ НАЧАЛЬНИКА  
БУ РАБОТЫ С ПЕРСОНАЛОМ

Л.И. Полевая  
*Л.И. Полевая*