

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента, кандидата технических наук, доцента Ангелюка Ильи Павловича на диссертационную работу Перепелицы Никиты Сергеевича на тему: «Совершенствование теплообменных процессов в рекуперативных системах отведения дымовых газов от водогрейных котлов малой мощности», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение

На отзыв были представлены:

- диссертационная работа, состоящая из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, содержащего 168 наименований, 8 приложений; объем работы 231 страница машинописного текста с 48 рисунками и 27 таблицами;
- автореферат диссертации на 20 страницах.

### **АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

Среди современных систем утилизации вторичных энергоресурсов значительное место занимают рекуперативные теплообменники коаксиального типа, широко применяемые в системах децентрализованного теплоснабжения. Перспективным направлением развития таких систем является интеграция когенерационных модулей, позволяющая осуществлять комбинированную рекуперацию тепловой энергии с попутной генерацией электроэнергии.

Особый интерес представляет модернизация традиционных двухтрубных конструкций теплообменников путём внедрения кожухов сложной геометрии и теплопроводящих прослоек, способствующих интенсификации теплообмена. Однако до настоящего времени отсутствовали комплексные методики расчёта и оптимизации таких гибридных систем, что ограничивало их практическое внедрение.

В связи с этим актуальность диссертационного исследования обусловлена необходимостью разработки научно обоснованных методов проектирования коаксиальных теплообменников, сочетающих рекуперацию низкопотенциального тепла дымовых газов с термоэлектрическим преобразованием энергии, что соответствует приоритетам государственной политики в области энергосбережения и повышения энергоэффективности.

Вышесказанное подтверждает, что выполненная Перепелицей Никитой Сергеевичем диссертационная работа является, несомненно, актуальной.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**В введении** соискателем обоснована актуальность выбранной темы исследований, определены цель и задачи, сформулирована научная новизна диссертационной работы, установлены теоретическая и практическая значимость, приведены методология и методы исследований, оценка достоверности полученных результатов, представлены сведения об апробации работы, а также внедрении результатов исследований.

**В первой главе** представлен анализ современных направлений развития систем утилизации низкопотенциального тепла дымовых газов с использованием рекуперативных теплообменников коаксиального типа. Рассмотрены методы интенсификации теплообмена, включая геометрическую оптимизацию каналов и применение термоэлектрических модулей. На основании проведенного анализа установлена необходимость создания энергоэффективного оборудования, сочетающего высокоинтенсивный теплообмен с генерацией электроэнергии.

**Во второй главе** представлено математическое и численное моделирование теплоаэродинамических процессов в модифицированном теплообменнике с когенерационными модулями. Предложено решение по внедрению рекуператора в существующую систему коллективного коаксиального дымоудаления, обеспечивающее рекуперацию тепла без модернизации базовой конструкции дымохода. Уточнен алгоритм определения эквивалентного диаметра для модифицированной конструкции рекуператора типа «труба в трубе», который позволяет достоверно оценивать интенсивность теплообмена и является основой для моделирования рабочих процессов. Установлено преимущество пятиугольной геометрии кожуха, обеспечивающей повышение эффективности теплообмена по сравнению с базовой конструкцией.

**В третьей главе** приведены результаты экспериментальных исследований, подтвердившие адекватность математических моделей. Получены регрессионные уравнения зависимости перепада температур нагреваемого теплоносителя от входных параметров системы. Установлены количественные зависимости вырабатываемой мощности элементами Пельтье

от температуры греющего теплоносителя на входе и скорости нагреваемого потока. Получены зависимости потерь давления и аэродинамического коэффициента местного сопротивления в межтрубном канале от скорости нагреваемого теплоносителя.

**В четвёртой главе** выполнена комплексная оценка эффективности предложенного решения, включая энергетический, экономический и экологический анализ. Определён срок окупаемости модернизированной конструкции и условия её максимальной эффективности. Разработаны практические рекомендации по внедрению результатов в теплоэнергетический комплекс.

### **ДОСТОВЕРНОСТЬ И НОВИЗНА НАУЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ, ВЫВОДОВ И РЕКОМЕНДАЦИЙ, СФОРМУЛИРОВАННЫХ В ДИССЕРТАЦИИ**

Достоверность полученных результатов характеризуется:

– корректностью применения фундаментальных законов теплообмена, аэродинамики при разработке математической модели рекуперации низкопотенциального тепла дымовых газов;

– отсутствием статистически значимых противоречий между данными численного моделирования и результатами натурных испытаний в пределах допустимой для теплотехнических экспериментов погрешности (не более 10%);

– верификацией результатов на экспериментальном стенде, воспроизводящем геометрию и режимы работы модифицированного теплообменника (патенты РФ №225005, №2833444, №2830924, №2725303), с использованием аттестованных средств измерений.

Основные решения тесно согласованы и подтверждаются актами о внедрении.

Новизна диссертационной работы:

– уточнен алгоритм определения эквивалентного диаметра для модифицированной конструкции рекуператора типа «труба в трубе», который позволяет достоверно оценивать интенсивность теплообмена и является основой для моделирования рабочих процессов.

– получена закономерность, описывающая взаимосвязь температуры нагрева теплоносителя в межтрубном канале от его скорости и от температуры греющего теплоносителя на входе.

– определена зависимость вырабатываемой мощности элементами Пельтье от температуры греющего теплоносителя на входе и скорости нагреваемого теплоносителя.

– аналитически получено уравнение аэродинамического коэффициента местного сопротивления в межтрубном канале с когенерационными модулями от его скорости.

– разработаны номограммы для определения величины утилизации энергии от дымовых газов в предложенном рекуператоре при различных режимах работы водогрейных котлов, которые позволили усовершенствовать инженерную методику расчета и обеспечили возможность практической оценки энергоэффективности системы при изменении эксплуатационных условий.

## **СТЕПЕНЬ ОБОСНОВАННОСТИ НАУЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ, ВЫВОДОВ И РЕКОМЕНДАЦИЙ, СФОРМУЛИРОВАННЫХ В ДИССЕРТАЦИИ**

Основные научные положения, выводы и практические рекомендации, представленные в диссертационной работе, являются достаточно обоснованными и аргументированными. Всесторонний анализ проблемы утилизации низкопотенциального тепла дымовых газов позволил автору четко определить направления теоретических, численных и экспериментальных исследований. В результате проведенного исследования доказана эффективность комбинированного метода рекуперации тепловой энергии с одновременной генерацией электроэнергии в модифицированном коаксиальном теплообменнике.

Цель и задачи диссертационного исследования сформулированы корректно и в полной мере соответствуют поставленной научной проблеме. Выводы по главам, а также общее заключение работы являются научно обоснованными, логичными и достоверно отражают суть и результаты проведенного многопланового исследования. Автором выполнен

значительный объём самостоятельных научных изысканий, охватывающих численное моделирование, натурный эксперимент и технико-экономический анализ.

Полученные результаты прошли успешную апробацию на ряде научных конференций и семинаров, а также внедрены в учебный процесс профильных дисциплин. Практические разработки защищены патентами на полезную модель.

Сформулированные в диссертации научные положения, итоговые выводы и рекомендации в полной мере подтверждаются результатами обширного цикла экспериментальных исследований, статистической обработкой данных и их согласованностью в пределах допустимой погрешности с результатами численного моделирования.

На основании вышесказанного можно считать, что основные положения, выводы и рекомендации диссертационного исследования Перепелицы Никиты Сергеевича обладают научной новизной, высокой степенью обоснованности и достоверности.

## **ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ**

Предложен алгоритм расчёта модифицированного теплообменника типа «труба в трубе» с интегрированными когенерационными модулями, который может быть непосредственно использован при проектировании систем децентрализованного теплоснабжения с водогрейными котлами малой мощности.

Разработан основной конструктивный элемент – пятиугольный кожух с теплопроводящей прослойкой, геометрия которого обеспечивает интенсификацию теплообмена за счёт оптимизации аэродинамики потока в межтрубном пространстве, в конструкцию которого интегрированы когенерационные модули, которые обеспечивает комбинированную утилизацию низкопотенциального тепла дымовых газов (патенты РФ №225005, №2833444, №2830924, №2725303).

Технико-экономическое обоснование, выполненное для условий города Курска, подтвердило экономическую целесообразность внедрения разработки со сроком окупаемости 6,4 года, что обосновывает её практическое применение в жилищно-коммунальном хозяйстве и малой

энергетике. Результаты работы могут быть использованы для модернизации существующих и проектирования новых энергоэффективных систем утилизации тепла дымовых газов.

## **РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДОВ ДИССЕРТАЦИИ**

Результаты теоретических, численных и экспериментальных исследований, представленные в диссертационной работе, могут быть использованы для подбора, проектирования и модернизации коаксиальных рекуператоров тепла дымовых газов, внедряемых в системы децентрализованного теплоснабжения зданий различного назначения.

Предложенный алгоритм расчета модифицированного двухтрубного теплообменника внедрен в практику проектирования ООО «Праймкей» и ОБУ «Курскгражданпроект» (г. Курск), что подтверждается полученными актами о внедрении.

Результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс и используются при проведении лабораторных работ, практических занятий, а также в курсовом и дипломном проектировании бакалавров направлений подготовки 08.03.01 «Строительство» и 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», магистров направлений 08.04.01 «Строительство» и 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» в ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (г. Курск).

### **Замечания по содержанию и оформлению диссертационной работы**

1. В работе при расчетах предполагается равномерное распределение температуры по поверхности пятиугольного кожуха, однако в реальности из-за геометрии канала и граничных условий могут возникать значительные локальные перепады. Не исследовано, как такая неравномерность нагрева/охлаждения влияет на эффективность и возможный перегрев отдельных термоэлектрических модулей, что критично для их долговечности и общей надёжности системы.

2. В технико-экономических расчётах не учтена стоимость периодического обслуживания (например, очистки поверхностей,

диагностики контактов), а также потенциальные затраты на замену утративших первоначальные свойства элементов Пельтье в течение жизненного цикла установки. Это может привести к занижению реальных эксплуатационных расходов и, как следствие, к завышению срока окупаемости и общей привлекательности проекта.

3. Недостаточное обоснование выбора именно оловянной прослойки. Хотя олово обладает высокой теплопроводностью, не проведён сравнительный анализ с другими возможными материалами-наполнителями с точки зрения оптимального сочетания теплопроводности, стоимости, технологичности заливки и температурной стабильности.

4. Не рассмотрены вопросы, связанные с генерацией электрического тока в непосредственной близости от металлических дымоходных систем и газового оборудования. Не проведена оценка влияния на системы автоматики котла, а также не предложены меры по электробезопасности и заземлению генерирующей установки, что является обязательным требованием для сертификации любого электротехнического оборудования.

5. Разработанные подходы к расчёту и оптимизации строго привязаны к конкретной геометрии коаксиального канала с пятиугольным кожухом. Не показана принципиальная возможность их адаптации к другим широко распространённым типам рекуператоров (пластинчатым, кожухотрубчатым, спиральным), что сужает потенциальную область внедрения результатов работы.

6. При моделировании и расчётах использованы идеализированные гладкие поверхности. Не учтено влияние технологической шероховатости, а также её неизбежного увеличения в процессе эксплуатации из-за коррозии и загрязнений, что может существенно изменить как теплообменные характеристики, так и динамику роста аэродинамических потерь со временем.

Сделанные замечания не носят принципиального характера и не снижают общую положительную оценку работы.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Диссертационное исследование представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в которой решена актуальная задача, имеющая существенное значение для повышения энергоэффективности систем децентрализованного теплоснабжения. На основании выполненных

теоретических и экспериментальных исследований автором предложены новые технические решения, направленные на увеличение эффективности работы коаксиального теплообменника для комбинированной рекуперации тепла дымовых газов.

Диссертация выполнена автором самостоятельно, оформлена в полном соответствии с установленными требованиями. Текст работы изложен лаконично, научным языком. Представленные графики, диаграммы и иллюстрации отличаются высоким качеством исполнения и наглядностью.

Содержащиеся в работе новые научные результаты и положения, выносимые на защиту, являются оригинальными и свидетельствуют о значительном личном вкладе автора в развитие теории и практики интенсификации теплообмена в каналах сложной геометрии с интегрированными когенерационными модулями.

В диссертации приведены сведения о практическом использовании полученных результатов, подтверждающие их прикладную ценность для решения важных задач в области проектирования и оптимизации теплообменного оборудования.

В представленной к защите диссертационной работе Перепелицы Никиты Сергеевича, выполненной на тему «Совершенствование теплообменных процессов в рекуперативных системах отведения дымовых газов от водогрейных котлов малой мощности» по специальности 2.1.3 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение», не используются чужие материалы без ссылок на автора и источников заимствования, то есть отсутствуют элементы плагиата, что подтверждает отчет о проверке текста диссертации в системе «Антиплагиат».

Основные результаты диссертации: опубликованы 19 научных работ, в том числе 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 3 статьи проиндексированы в Web of Science и Scopus, получены 4 патента РФ на изобретения.

Таким образом, диссертация Перепелицы Никиты Сергеевича полностью соответствует требованиям п. п. 9, 10, 11, 13 и 14 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842 в действующей редакции с изменениями от

