

На правах рукописи



ПЕРЕПЕЛИЦА НИКИТА СЕРГЕЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ
В РЕКУПЕРАТИВНЫХ СИСТЕМАХ ОТВЕДЕНИЯ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ОТ
ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ**

Специальность 2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование
воздуха, газоснабжение и освещение

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Юго-Западный государственный университет».

Научный руководитель: **Ежов Владимир Сергеевич**,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Корниенко Сергей Валерьевич**,
советник РААСН, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», кафедра «Архитектура зданий и сооружений», заведующий кафедрой

Ангелюк Илья Павлович,
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Теплогазоснабжения, вентиляции, водоснабжения и водоотведения им. академика Б.И. Боровского» Института «Академия строительства и архитектуры» ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского»

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»**

Защита состоится «08» апреля 2026 года в 10-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.286.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» по адресу: 394006, Воронежская область, г. Воронеж, улица 20-летия Октября, дом 84, корпус 2, ауд. 2228.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Воронежского государственного технического университета и на сайте ВГТУ: <http://cchgeu.ru>.

Автореферат разослан «03» февраля 2026 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

С. В. Чуйкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Разработка решений для повышения эффективности потребления тепловой энергии и увеличения использования вторичных энергетических ресурсов является важной задачей, соответствующей стратегическим направлениям государственной политики в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности в Российской Федерации, а именно: «увеличение количества объектов, использующих в качестве источников энергии вторичные энергетические ресурсы и (или) возобновляемые источники энергии» и «повышение эффективности использования энергетических ресурсов в системах коммунальной инфраструктуры» (п. 2 и п. 5 ч. ст. 14 Федерального закона от 27 июля 2006 г. № 261-ФЗ). В связи с этим, перспективным направлением является разработка рекуперативных теплообменных устройств, позволяющих утилизировать низкопотенциальное тепло уходящих газов. Использование поверхностного теплообменника со встроенными когенерационными модулями позволяет получить тепловую и электрическую энергию. Конструкция такого теплообменного устройства обеспечивает повышение общего КПД теплогенератора за счет предварительного подогрева воздуха.

Однако решение задачи по исследованию интенсивности теплопередачи в таких комбинированных системах зависит от множества изменяющихся во времени факторов, тогда как существующие методики расчета теплообменников типа «труба в трубе» основаны на использовании усредненных параметров потока. То есть, уточнение алгоритма расчета, учитывающего пространственное изменение температур приточного воздуха и дымовых газов по длине теплообменника, в системах когенерации представляет собой актуальную научно-техническую задачу. Ее решение позволит создать более эффективные системы утилизации тепла, соответствующие современным требованиям энергосбережения.

Степень разработанности темы исследования. Фундаментальные основы тепломассообмена и работы теплообменных аппаратов заложены в трудах отечественных и зарубежных ученых: В. П. Исаченко, А. А. Жукаускаса, Б. С. Петухова, Т. Холбера. Значительный вклад в исследование процессов теплообмена в канальных течениях внесли Э. К. Калинин, Г. А. Дрейцер, С. А. Ярхо, Й. Джалурия, Н. Сайред.

Проблемам интенсификации теплообмена в теплообменных аппаратах посвящены работы В. М. Бузника, О. А. Сотниковой, О. Н. Зайцева, С. В. Чуйкина, А. В. Баракова, А. И. Леонтьева, С. В. Корниенко, Л. М. Коваленко, А. Ф. Глушкова, О. Н. Ермакова, В. Я. Губарева, А. Г. Лаптева, Ю. Ф. Гортышова. Исследованием турбулентных течений в каналах сложной формы занимались С. С. Кутателадзе, А. И. Леонтьев, Б. Я. Бендерский, А. А. Чернова, М. Н. Чекардовский. Вопросам рекуперации теплоты дымовых газов уделяли внимание И.П. Ангелюк, В. В. Беспалов, Ю. А. Рахманов, Э. В. Сазонов, В. Е. Злотин, В. И. Тимошпольский, А. М. Парамонов, А. П. Несенчук. Исследования в области термоэлектричества связаны с именами А. Ф. Иоффе, Е. К. Иорданишвили, Л. И. Анатычук, Т. Ј. Seebek. Применению термоэлектрических эффектов для утилизации низкопотенциального

тепла посвящены работы В. С. Ежова, Н. Е. Семичевой, Л. П. Булата, А. В. Дмитриева, В. В. Каратаева, а также зарубежных исследователей A. Eldesoukey, K. Qiu, M. Borcuch, R. Y. Nuwayhid, D. M. Rowe.

Однако, в настоящее время, недостаточно изученными остаются вопросы совместного использования рекуперации тепла при использовании теплообменников типа «труба в трубе» с когенерационными модулями. Также требуют дальнейшей разработки методы и алгоритмы расчета таких комбинированных систем.

Таким образом, проведение теоретического и экспериментального исследования аэродинамических и теплообменных процессов в рекуперативном когенерационном теплообменнике представляет собой актуальную научную задачу.

Изложенное выше позволяет определить цель и задачи работы.

Цель и задачи работы: Целью работы является совершенствование процессов конвективного теплообмена при утилизации тепла от дымовых газов в рекуператорах с когенерационными модулями.

Достижение поставленной цели осуществляется путем решения **следующих задач:**

1) На основе аналитического обзора современных конструкций рекуператоров типа «труба в трубе», технологий утилизации низкопотенциального тепла и методов интенсификации теплопередачи предложить эффективную конструкцию теплообменного устройства с комбинированной рекуперацией тепловой и электрической энергии.

2) Уточнить математическую модель тепловых процессов в модифицированном рекуперативном теплообменнике типа «труба в трубе» с когенерационными модулями, учитывающую изменение температур нагреваемого приточного воздуха и отработанных дымовых газов по длине теплообменного аппарата.

3) Выполнить экспериментальные исследования процесса утилизации низкопотенциальной теплоты дымовых газов на разработанной лабораторной установке модифицированного теплообменника типа «труба в трубе», а также выполнить статистическую обработку полученных данных и верификацию теоретической модели.

4) Разработать алгоритм расчета рекуперативного теплообменника типа «труба в трубе» с многослойной структурой для подогрева приточного воздуха при использовании когенерационных модулей.

5) Провести технико-экономическую оценку эффективности внедрения опытно-промышленного образца рекуператора типа «труба в трубе» с многослойной структурой и когенерационными модулями, определить показатели энергетической, экономической и экологической эффективности.

В качестве **гипотезы** в работе предложено использование систем когенерации для утилизации энергии от дымовых газов.

Объект исследования: Системы комплексной утилизации дымовых газов от водогрейных котлов малой мощности.

Предмет исследования: Теплообменные процессы и аэродинамические характеристики в системах комплексной утилизации дымовых газов на основе рекуператора типа «труба в трубе».

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. 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.

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

3. Определена зависимость вырабатываемой мощности элементами Пельтье от температуры греющего теплоносителя на входе и скорости нагреваемого теплоносителя.

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

5. Разработаны nomограммы 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.

Теоретическая значимость работы состоит в разработке комплекса теоретических моделей и алгоритмов расчета, описывающих теплообменные и аэродинамические процессы в модифицированном рекуператоре типа «труба в трубе» с когенерационными модулями, а также проведении экспериментальных исследований тепловых и аэродинамических характеристик с верификацией полученных данных.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Предложен алгоритм расчета для проектирования модифицированного теплообменника типа «труба в трубе» с когенерационными модулями для систем децентрализованного теплоснабжения с водогрейными котлами малой мощности.

2. Выполнена оценка энергетической, экономической и экологической эффективности внедрения рекуперативных систем с комбинированной генерацией тепловой и электрической энергии, которая показала, что максимальная эффективность установки достигается при замене газового на твердое и жидкое топливо. Так для модифицированного теплообменника «труба в трубе», работающего на дизельном топливе и сжиженном газе срок окупаемости ниже в 5 раз, чем при работе на природном газе, а экологический эффект при замене природного газа на уголь повышается в 18,5 раза.

3. Выполнено технико-экономическое обоснование внедрения конструкции модифицированного двухтрубного теплообменника (МДТ), основанное на расчете годовой экономии топлива, капитальных затрат и срока окупаемости, который составляет 6,4 года для г. Курска.

Методология и методы исследования.

Методологическую основу диссертационного исследования составили фундаментальные положения теории теплообмена и аэродинамики. В работе применен комплекс методов, включающий теоретический анализ существующих разработок,

математическое моделирование тепловых и гидродинамических процессов, численное моделирование в среде SolidWorks Flow Simulation, а также экспериментальные исследования на лабораторных и промышленных установках.

Для проведения экспериментов использовалось современное измерительное оборудование: дифференциальный манометр Testo 512, многофункциональный измеритель Testo 440, термопары типа К и цифровой мультиметр Megeon 12700S. Обработка экспериментальных данных выполнялась с применением методов статистического анализа, включая критерий Стьюдента для оценки достоверности результатов. Верификация математических моделей проводилась путем сопоставления расчетных данных с результатами натурных испытаний.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель теплоаэродинамических процессов в модифицированном двухтрубном теплообменнике с пятиугольным профилем кожуха, учитывая пространственное распределение температур теплоносителей и параметры утилизации энергии дымовых газов.

2. Конструкция теплообменного устройства, отличающаяся применением многослойной структуры с теплопроводящим заполнителем и равномерным распределением когенерационных модулей по поверхности пятиугольного кожуха, обеспечивающая комбинированную рекуперацию тепловой энергии от дымовых газов (патенты на изобретение РФ №225005, №2833444, №2830924, №2725303).

3. Экспериментальные зависимости, характеризующие тепловые и аэродинамические параметры модифицированного двухтрубного теплообменника, полученные на основе статистической обработки данных, которые позволили получить температурное и скоростное распределение в предложенной конструкции утилизатора.

4. Алгоритм расчета энергетической, экономической и экологической эффективности внедрения разработанного модифицированного двухтрубного теплообменника в системы децентрализованного теплоснабжения с водогрейными котлами, который показал, что максимальная эффективность установки достигается при замене природного газа на твердое и жидкое топливо.

5. Уточненные значения коэффициента аэродинамического сопротивления для предложенного модифицированного двухтрубного теплообменника с пятиугольным профилем поперечного сечения, которые позволили усовершенствовать методы проектирования рекуперативных систем.

6. Результаты теоретического и экспериментального исследования теплообменных процессов в модифицированном двухтрубном теплообменнике с когенерационными модулями, подтвердившие повышение эффективности утилизации тепла дымовых газов до 0,27 руб. на каждый кВт мощности котла (по сравнению с базовым теплообменником-utiлизатором типа «труба в трубе»).

Степень достоверности научных положений и выводов диссертационной работы подтверждается корректным применением фундаментальных положений теории теплообмена и аэrodинамики при разработке математической модели тепловых и аэродинамических процессов. Достоверность результатов обоснована использованием современных методов численного моделирования в среде

SolidWorks Flow Simulation и статистической обработкой экспериментальных данных, а также отсутствием противоречий между теоретическими и практическими результатами в рамках допустимых погрешностей (до 10%). Применение аттестованных средств измерений и успешное внедрение результатов исследований в производственную деятельность дополнительно подтверждают обоснованность полученных научных положений и выводов.

Реализация результатов работы. Разработанный алгоритм расчета модифицированного двухтрубного теплообменника внедрен в практику проектирования ООО «Праймкей» и ОБУ «Курскгражданпроект» (г. Курск), что подтверждается полученными актами о внедрении. Результаты докторской диссертации 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).

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты докторской диссертации докладывались на следующих научно-практических конференциях: 7-я Всероссийская научная конференция перспективных разработок молодых ученых «Молодежь и наука: шаг к успеху» (Курск, 2024 год); 4-я Всероссийская научная конференция перспективных разработок «Инновационный потенциал развития общества: взгляд молодых ученых» (Курск, 2023 год); 12-я Международная молодежная научная конференция «Поколение будущего: Взгляд молодых ученых-2023» (Курск, 2023 год); Всероссийская молодежная научная конференция «Будущее науки: взгляд молодых ученых на инновационное развитие общества» (Курск, 2023 год); 9-я Международная молодежная научная конференция «Юность и знания - гарантия успеха – 2022» (Курск, 2023 год); 5-я Всероссийская научная конференция «Проблемы и перспективы развития России: Молодежный взгляд в будущее» (Курск, 2023 год); 7-я Международная научная конференция перспективных разработок молодых ученых «Наука молодых - будущее России» (Курск, 2022 год).

Публикации. По теме докторской диссертации опубликованы 19 научных работ, в том числе 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 3 статьи, входящие в базу статей Scopus и Web of Science, получены 4 патента на изобретения.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач докторской диссертации, проведении комплексного аналитического обзора литературных источников, разработке теоретических положений и математической модели теплообменных процессов. Автором лично осуществлялись планирование и проведение численного моделирования в среде SolidWorks Flow Simulation, организация и проведение натурных экспериментов на лабораторных и промышленных установках, статистическая обработка полученных экспериментальных данных. Личное участие автора включало анализ и обобщение результатов исследований, подготовку научных публикаций и апробацию результатов работы на конференциях. Все основные научные положения и выводы, содержащиеся в докторской диссертации, получены автором самостоятельно.

Структура и содержание работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Диссертация изложена на 231 странице машинописного текста, содержит 27 таблиц, 48 рисунков, 8 приложений, библиографический список состоит из 168 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В введении к диссертационной работе представлено обоснование актуальности темы, сформулированы цель и задачи исследования, определена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, а также приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен комплексный анализ современных направлений развития систем утилизации низкопотенциального тепла дымовых газов с использованием рекуперативных теплообменников типа «труба в трубе». Особое внимание удалено методам интенсификации теплопередачи и применению когенерационных модулей в таких системах.

Повышение энергоэффективности теплообменного оборудования остается одной из наиболее актуальных проблем современной теплоэнергетики.

Проведенный анализ выявил перспективные направления совершенствования теплообменных процессов в рекуперативных теплообменниках типа «труба в трубе», что потребовало разработки и исследования новой конструкции устройства с комбинированной рекуперацией тепловой энергии за счет использования когенерационных модулей.

Во второй главе представлены результаты математического и численного моделирования процессов теплопередачи и аэродинамики в предложенном двухтрубном теплообменнике с термоэлектрическими модулями. По результатам выполненного анализа сформулирована концепция нового рекуператора, встраиваемого в коаксиальный дымоход, который обеспечивает комбинированную утилизацию низкопотенциальной тепловой энергии дымовых газов, новизна которого защищена патентами на изобретения РФ №225005, №2833444, №2830924, №2725303.

Предложено решение по внедрению рекуператора в существующую систему коллективного коаксиального дымоудаления. Принципиальная схема системы рекуперации при включении в коллективную коаксиальную систему дымоудаления жилого многоквартирного дома приведена на рис. 1-2.

Выбор типа конструкции кожуха был выполнен исходя из условия наименьшей площади сечения и возможности расположения на его стороне элемента Пельтье, (был принят наиболее распространенный элемент, который имеет размеры 40x40x4 мм).

В рамках предложенного алгоритма расчета сложное сечение кожуха было заменено гидравлически эквивалентным кольцевым зазором. В результате чего были получены эквивалентные диаметры оловянных вставок и алюминиевой рамки, при этом увеличение радиуса внутреннего патрубка от исходного значения радиуса составило +11,1% (рис. 3).

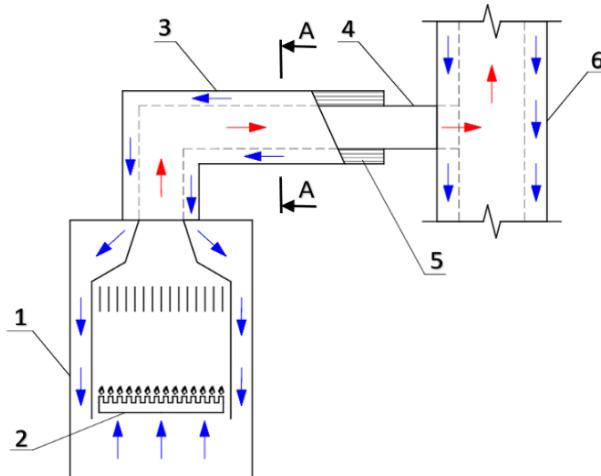


Рис. 1. Схема установки рекуператора в коаксиальном дымоходе: 1 – газовый котел с закрытой камерой сгорания; 2 – горелка; 3 – внешний (воздушный) патрубок; 4 – внутренний (газовый) патрубок; 5 – кожух с элементами Пельтье; 6 – коллективный коаксиальный дымоход

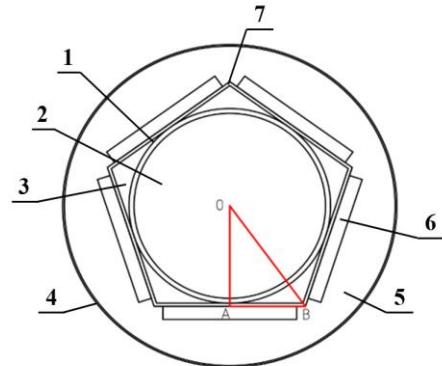


Рис. 2. Разрез А-А: 1 – внутренний (газовый) патрубок; 2 – канал для дымовых газов; 3 – теплопроводящий материал; 4 – внешний (воздушный) патрубок из нержавеющей стали; 5 – канал для приточного воздуха; 6 – элемент Пельтье; 7 – алюминиевый кожух

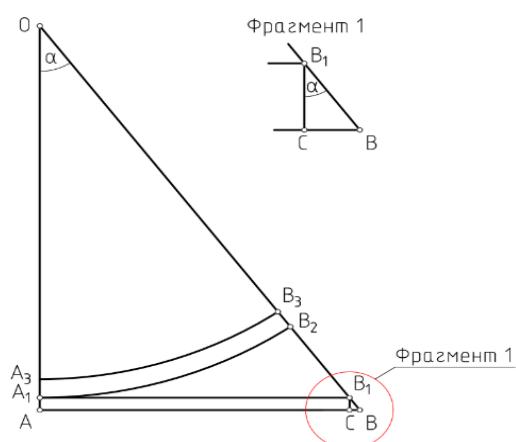
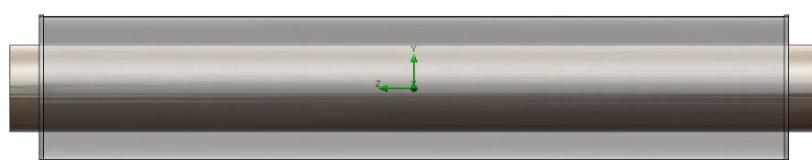


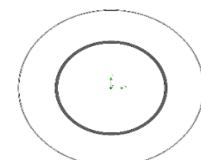
Рис. 3. Чертеж для определения эквивалентных диаметров

Для исследования теплообменных характеристик и верификации расчетных методик выполнена разработка двух моделей теплообменников для сравнительного анализа их эффективности:

1. Базовая модель двухтрубного теплообменника (БДТ) (рис. 4);
2. Модифицированная модель двухтрубного теплообменника с пятиугольным кожухом и элементами Пельтье (рис. 5).

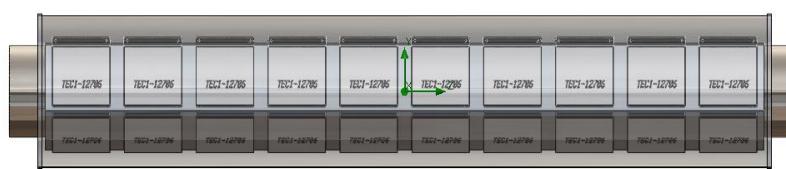


a)

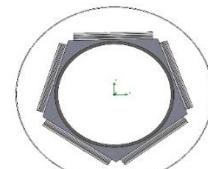


б)

Рис. 4. Модель базового двухтрубного теплообменника: а) вид сбоку; б) вид в разрезе



a)



б)

Рис. 5. Модель двухтрубного теплообменника с кожухом и элементами Пельтье: а) вид сбоку; б) вид в разрезе

При моделировании в SolidWorks Flow Simulation сравниваемые конструкции имели одинаковые геометрические параметры (длину, диаметр и толщину стенок внутреннего и внешнего патрубков). Расчет сравниваемых моделей производился при одинаковых скоростных и температурных режимах. Анализ тепловых характеристик теплообменников на основе визуализации температурных полей теплоносителей (рис. 6) позволил сделать вывод об обеспечении в предложенном теплообменнике более интенсивного теплообмена между греющим и нагреваемым теплоносителями.

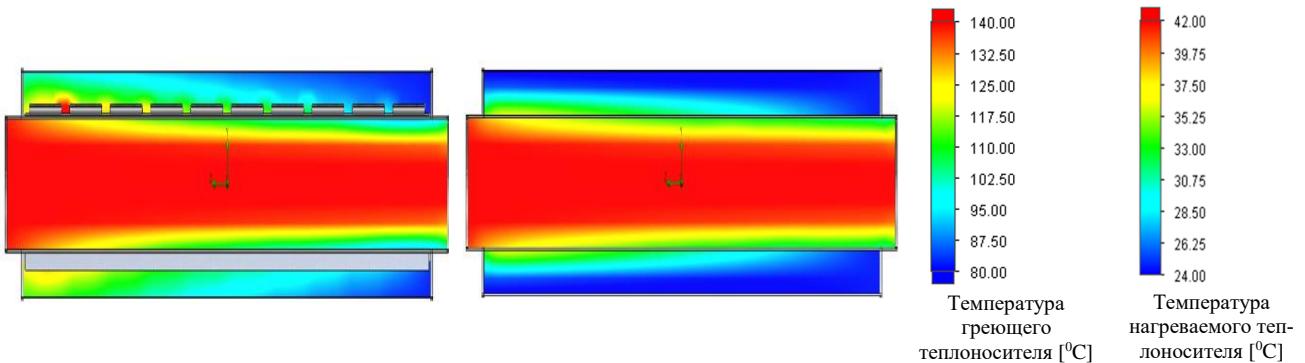


Рис. 6. Сечения с распределением температуры для модифицированного и базового теплообменников при температуре греющего теплоносителя $t_1' = 140^{\circ}\text{C}$ и средней скорости нагреваемого теплоносителя в межтрубном канале $w_2 = 1,5 \text{ м/с}$

Моделирование распределения скоростей теплоносителей показало различия характеристик потока в межтрубном канале для сравниваемых теплообменников (рис. 7).

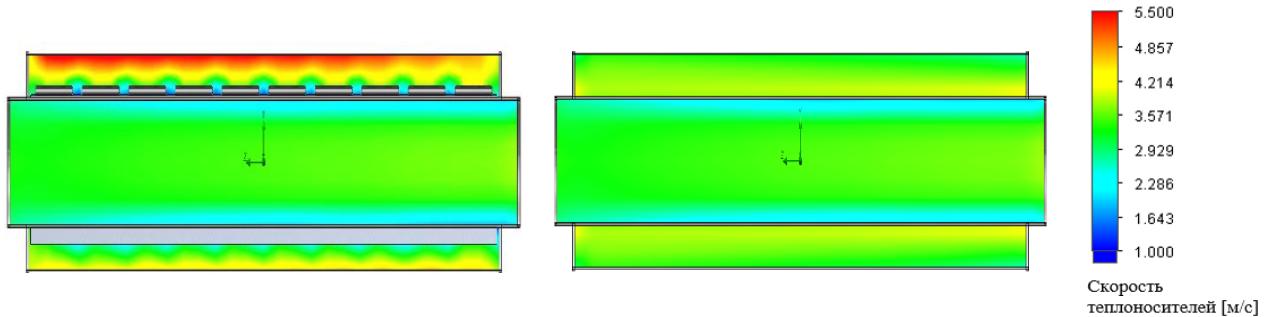


Рис. 7. Сечения с распределением скоростей теплоносителей для модифицированного и базового теплообменников при $w_2 = 3,5 \text{ м/с}$

Выявлено, что геометрия пятиугольного кожуха и наличие элементов Пельтье на поверхности кожуха создает дополнительные микровозмущения потока (рис. 7).

На основе полученных результатов приведены сравнительные зависимости потерь давления от скорости потока (рис. 8).

Анализ графика (рис. 8) показал, что предложенный теплообменник имеет более высокие значения аэродинамического сопротивления. Наибольший рост наблюдался при максимальной скорости $w_2=3,5 \text{ м/с}$, где потери давления увеличились в 15,7 раза. С понижением скорости относительный рост снижается.

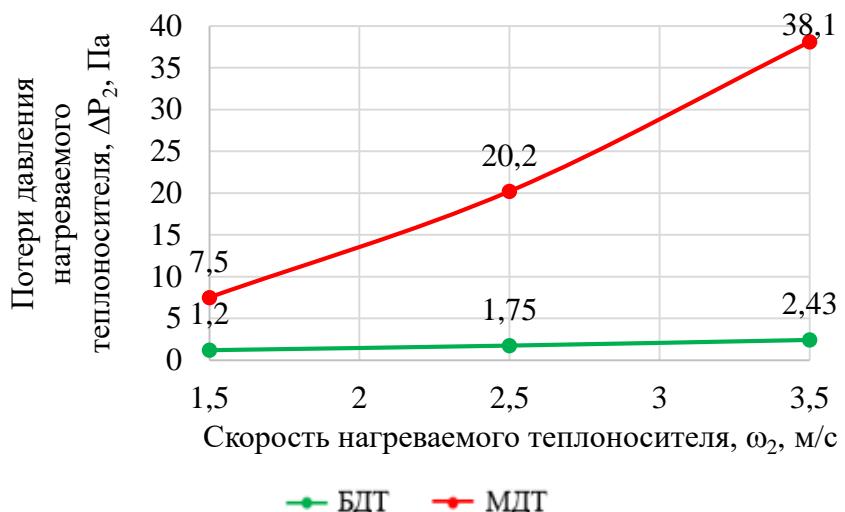


Рис. 8. Сравнительный график зависимости потерь давления нагреваемого теплоносителя в межтрубном канале для двух типов двухтрубных теплообменников

В третьей главе приведены результаты экспериментального исследования двухтрубного теплообменника с пятиугольным кожухом и термоэлектрическими элементами. Экспериментальные образцы базового и модифицированного двухтрубных теплообменников (рис. 9 и 10) соответствуют моделям (рис. 4 и 5), разработанными в среде SolidWorks.

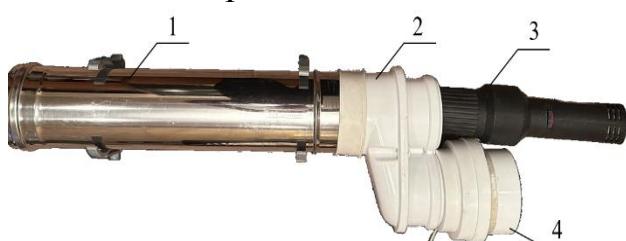


Рис. 9. Экспериментальная установка:
1 – двухтрубный теплообменник; 2 – адаптер разделительный моноблочный;
3 – технический фен; 4 – канальный вентилятор

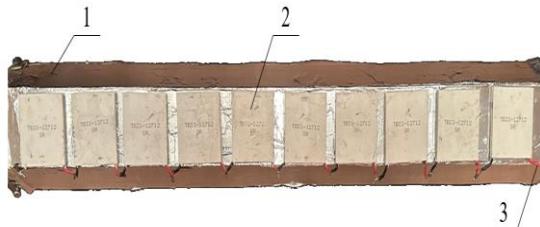


Рис. 10. Насадка на внутренний патрубок для исследования МДТ: 1 – алюминиевый пятиугольный кожух; 2 – элемент Пельтье; 3 – токовывод

Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях на созданном стенде. Так на рис. 11 представлена схема работы экспериментальной конструкции модифицированного двухтрубного теплообменника, включающая расположение измерительных датчиков и расстояния между точками снятия показаний.

Расчет сравниваемого КПД модифицированного теплообменника с базовым определялся как:

$$\gamma = \frac{\eta_{MDT}}{\eta_{BDT}} = \frac{Q_{2MDT} + Q_{Pe}}{Q_{2BDT}} \quad (1)$$

где Q_{2MDT} – суммарное количество теплоты, полученной нагреваемым теплоносителем в межтрубном канале путем конвективного теплообмена и за счет сил трения, Вт; Q_k – тепловой поток от калорифера, Вт; P_{Pe} – количество выработанной элементами Пельтье электрической энергии, Вт.

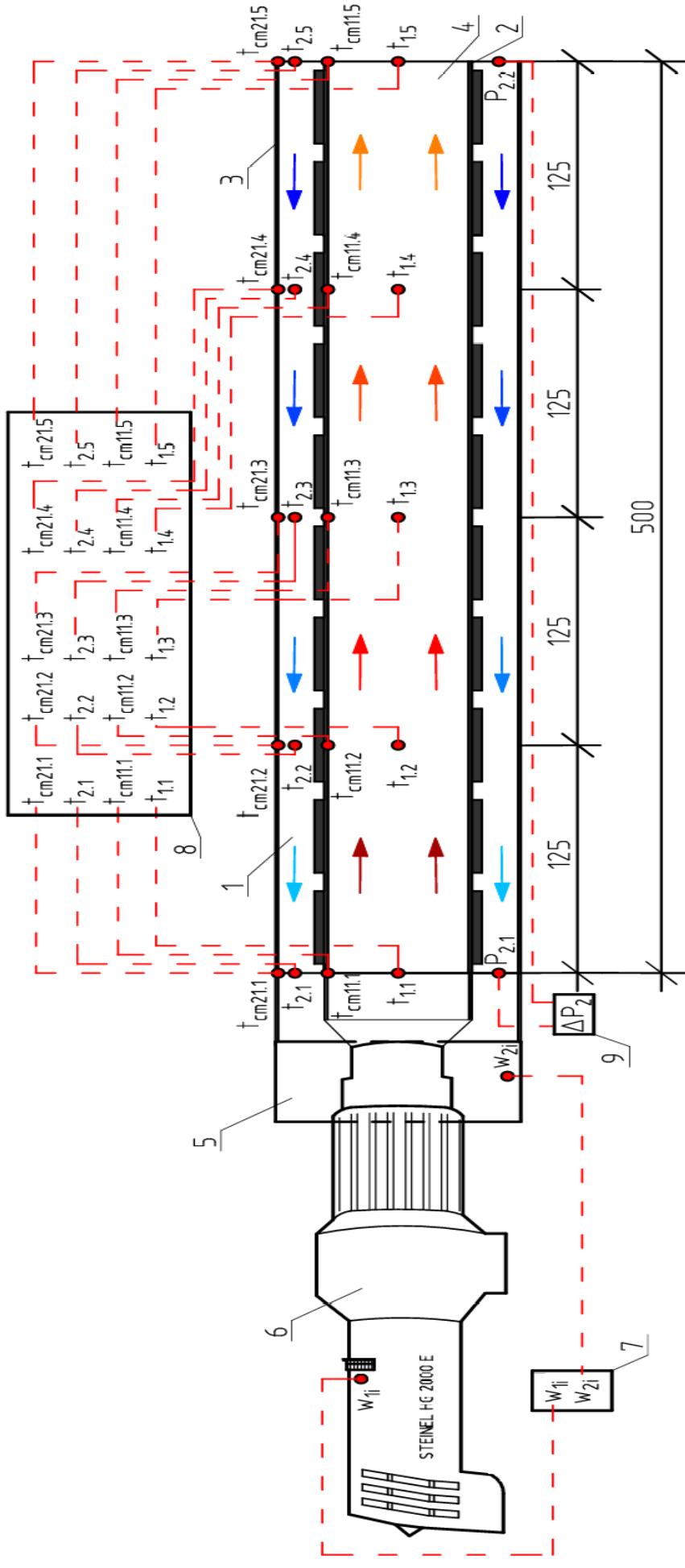


Рис. 11. Схема работы экспериментальной конструкции рекуператора: 1 – межтрубный канал для нагреваемого теплоносителя; 2 – внутренний патрубок; 3 – внешний патрубок; 4 – канал для греющего теплоносителя, 5 – вытяжной вентилятор; 6 – технический фен; 7 – блок контроллер управления; 8 – блок мониторинга температуры; 9 – блок контроля перепада давления; $t_{1,i}$, $t_{2,i}$, ω_{2i} – датчики измерения скорости греющего и нагреваемого теплоносителей в i -ом опыте соответственно; $t_{1,i}$, $t_{cm11.1}$, $t_{2,i}$, $t_{cm21.1}$ – датчики измерения температуры греющего теплоносителя, внутренней поверхности внутреннего патрубка, нагреваемого теплоносителя и внутренней поверхности внешнего патрубка соответственно; $P_{2,1}$ и $P_{2,2}$ – датчики давления на входе и на выходе нагреваемого теплоносителя соответственно; ΔP_2 – перепад давления нагреваемого теплоносителя

Результаты показали, что коэффициент относительного повышения КПД γ варьируется от 2,4 до 3,1, достигая максимума при $w_2=1,5$ м/с. То есть, при снижении скорости наблюдается наибольший прирост эффективности.

Полученное значение тепловой инерционности предложенной конструкции не превысило $\sum D = 0,18$, это позволило определить, что конструкция относится к категории легкой массивности, а время выхода на стационарный режим не превышает 600 с.

На основании проведенного регрессионного анализа экспериментальных данных было получено уравнение в натуральных переменных, связывающее перепад температур нагреваемого теплоносителя (параметр отклика) с температурой греющего теплоносителя на входе и скоростью нагреваемого теплоносителя:

для модифицированного двухтрубного теплообменника:

$$\Delta t_2 = 5,84 + 0,783 \cdot \left(\frac{t_1' - 130}{10} \right) - 2,717 \cdot \left(\frac{w_2 - 2,5}{1,0} \right) + 0,183 \cdot \left(\frac{t_1' - 130}{10} \right)^2 + 1,083 \cdot \left(\frac{w_2 - 2,5}{1,0} \right)^2 - 0,375 \cdot \left(\frac{t_1' - 130}{10} \right) \cdot \left(\frac{w_2 - 2,5}{1,0} \right) \quad (2)$$

для базового двухтрубного теплообменника:

$$\Delta t_2 = 2,422 + 0,283 \cdot \left(\frac{t_1' - 130}{10} \right) - 0,783 \cdot \left(\frac{w_2 - 2,5}{1,0} \right) + 0,117 \cdot \left(\frac{w_2 - 2,5}{1,0} \right)^2 \quad (3)$$

На основе уравнений регрессии (2) и (3) были построены графики поверхности отклика, соответствующие двум конфигурациям теплообменников (рис. 12 -13).

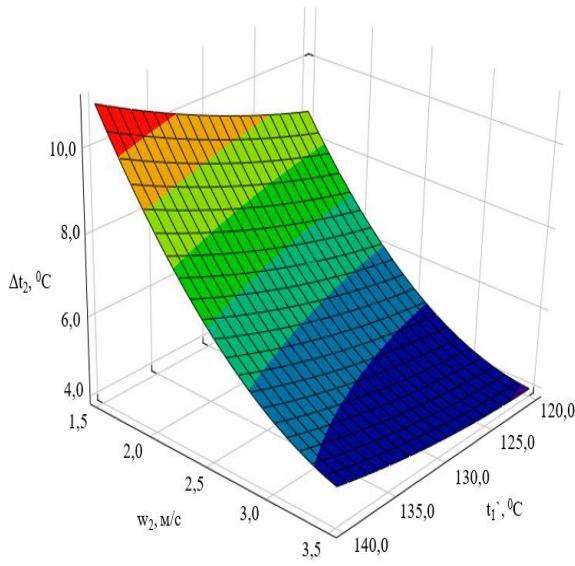


Рис. 12. График поверхности отклика для модифицированного двухтрубного теплообменника

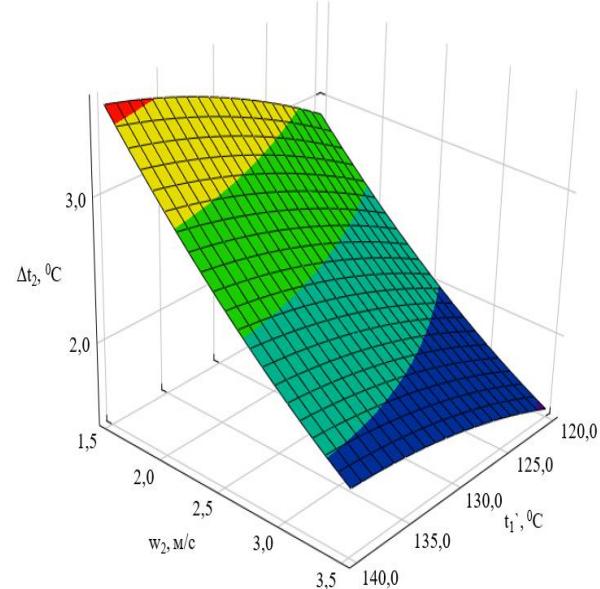


Рис. 13. График поверхности отклика для базового двухтрубного теплообменника

Анализ графиков показал, что предложенный двухтрубный теплообменник обеспечивает значительно более высокий перепад температур нагреваемого тепло-

носителя. Максимальная эффективность теплообмена наблюдалась при наибольшей температуре греющего теплоносителя ($t_1' = 140^\circ\text{C}$) и минимальной скорости нагреваемого теплоносителя ($w_2 = 1,5 \text{ м/с}$), где Δt_2 достигло значения $10,94^\circ\text{C}$, что в 3,0 раза превысило показатели базового теплообменника.

Также было получено регрессионное уравнение зависимости мощности элементов Пельтье от температуры греющего теплоносителя на входе и скорости нагреваемого теплоносителя для предложенного теплообменника:

$$P_{Pe} = 7,175 + 0,052 \cdot t_1' - 1,032 \cdot w_2 - 0,017 \cdot w_2^2, \quad (4)$$

и регрессионное уравнение, описывающие зависимость потерь давления нагреваемого теплоносителя в межтрубном канале от его скорости для МДТ и БДТ соответственно:

$$\Delta P_2 = 3,1 \cdot w_2^2 + 1,4 \cdot w_2 - 1,1 \quad (5)$$

$$\Delta P_2 = 0,029 \cdot w_2^2 + 0,517 \cdot w_2 + 0,41 \quad (6)$$

Уравнение, описывающие зависимость аэродинамического коэффициента местного сопротивления в межтрубном канале от его скорости для МДТ имеет вид:

$$\xi_{MDT} = -0,14 \cdot w_2 + 5,98 \quad (7)$$

Верификация полученных данных подтвердила корректность и адекватность полученных зависимостей. Относительная погрешность полученных результатов не превысила 7,2%.

В четвертой главе приведены результаты промышленного испытания и предложен комплексный подход к проектированию МДТ по определению его эффективности (рис. 14), включающий расчетные методы, алгоритм испытаний и технико-экономическое обоснование для различных условий эксплуатации.

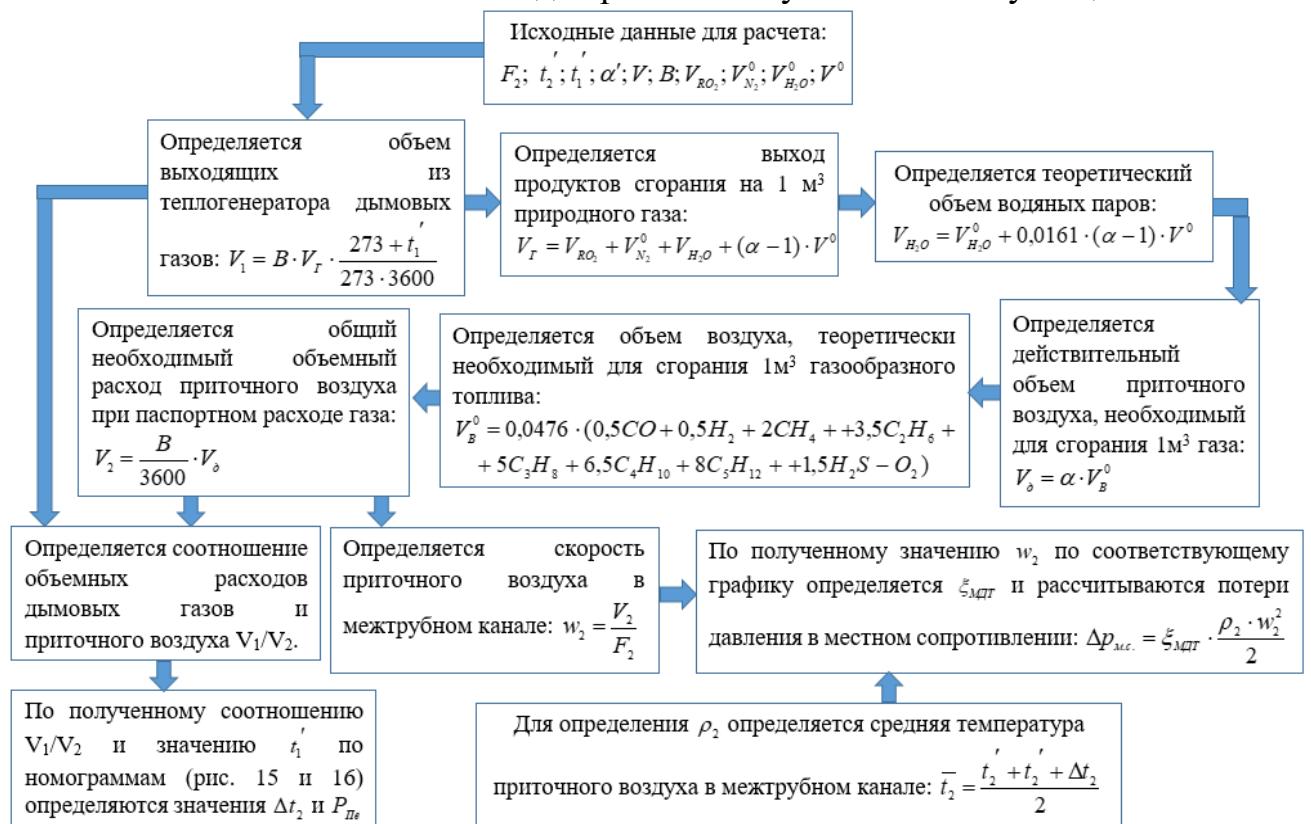


Рис. 14. Алгоритм расчета параметров эффективности внедрения разработанного модифицированного двухтрубного теплообменника

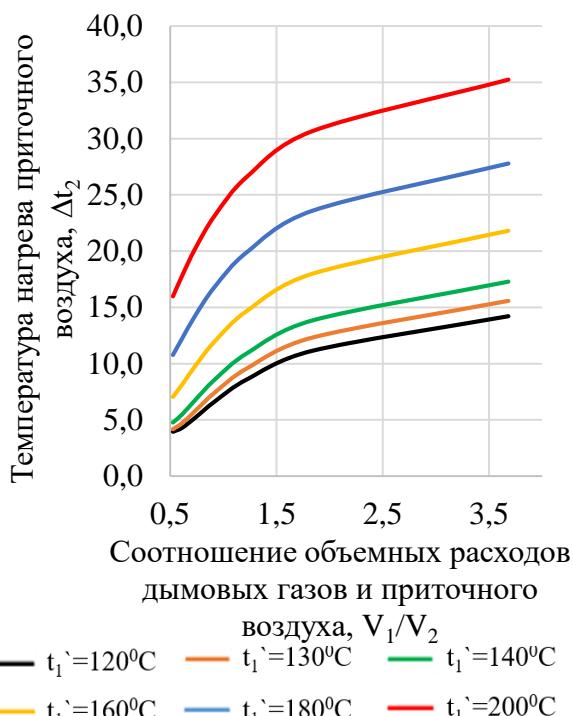


Рис. 15. Номограмма для определения температуры нагрева приточного воздуха при его протекании в межтрубном пространстве МДТ

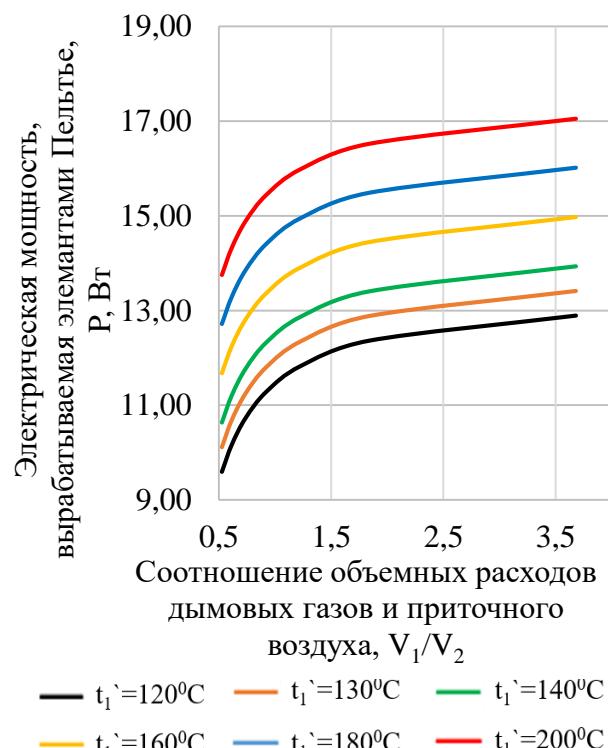


Рис. 16. Номограмма для определения электрической мощности, вырабатываемой элементами Пельтье

Расчет экономической эффективности показал, что срок окупаемости капитальныхложений в 5 раз ниже при использовании МДТ на дизельном топливе и сжиженном газе, чем при эксплуатации на природном газе. Расчет экологической эффективности показал, что переход с природного газа на угольное топливо с применением данного теплообменника позволяет повысить экологический эффект в 18,5 раз. Было определено, что повышение эффективности утилизации тепла дымовых газов достигает 0,27 руб. на каждый кВт мощности котла (по сравнению с базовым теплообменником-utiлизатором типа «труба в трубе»).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного диссертационного исследования:

- Произведен анализ современных тенденций и технических решений в области повышения энергоэффективности децентрализованных систем теплоснабжения, в результате чего сформулирована и защищена патентами на изобретения №225005, №2833444, №2830924, №2725303 концепция инновационного двухтрубного теплообменника, встраиваемого в коаксиальный дымоход. Устройство позволяет утилизировать низкопотенциальную теплоту дымовых газов в когенерационных модулях предложенной конструкции.

- На основании анализа геометрических конфигураций и комплексного математического моделирования тепловых и аэродинамических процессов определена и оптимизирована конструкция модифицированного двухтрубного теплообмен-

ника (МДТ) с пятиугольным кожухом. Предложена численная модель, которая показала существенное превосходство МДТ по эффективности теплообмена по сравнению с базовым аналогом.

3. Уточнен и экспериментально подтвержден алгоритм расчета эквивалентного диаметра для многослойной конструкции с элементами Пельтье. На основании комплексного теплового баланса и регрессионного анализа установлены количественные зависимости, описывающие тепловые и аэродинамические характеристики теплообменника от основных режимных параметров.

4. Экспериментально доказано преимущество модифицированной конструкции (МДТ) над базовой (БДТ) по всем основным режимным показателям. Установлено, что МДТ обладает более высокой эффективностью теплопередачи, а также низкой тепловой инерционностью, обеспечивающей быстрый выход на стационарный режим работы в условиях переменных нагрузок.

5. Верификация разработанных математических моделей показала их адекватность. Сопоставление теоретических и экспериментальных данных подтвердило достоверность полученных регрессионных зависимостей (расхождение не превысило 7,2%), что позволяет рекомендовать алгоритм и установленные закономерности для практического применения при проектировании энергоэффективных теплообменных систем с когенерационными модулями.

6. Предложен и апробирован комплексный подход к проектированию и оценке эффективности модифицированного двухтрубного теплообменника (МДТ), интегрированного в систему коаксиального дымоудаления, который включает:

- алгоритм расчета аэродинамических и тепловых параметров устройства, позволяющий прогнозировать его эксплуатационные характеристики на этапе проектирования, в том числе и для проведения промышленных испытаний, регламентирующий условия, средства измерений, порядок контроля параметров работы и обработки результатов для подтверждения заявленных характеристик;

- оценку энергетической эффективности за счет утилизации тепла уходящих газов и генерации электроэнергии, экономической эффективности на основе расчета срока окупаемости и экологической эффективности при снижении теплового загрязнения и вредных выбросов в окружающую среду.

7. Результаты диссертационного исследования, подтверждающие работоспособность, энергетическую и экономическую эффективность разработанного устройства внедрены в практику проектирования ООО «Праймкей» и ОБУ «Курскгражданпроект» (г. Курск), что подтверждается полученными актами о внедрении. Результаты также 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).

Перспективы дальнейших исследований направлены на:

1. Модернизацию для конденсационных котлов: углубленное изучение работы в условиях низких температур и кислотного конденсата для создания гибридной системы утилизации явного и скрытого тепла.

2. Развитие экологических функций: интеграция технологий очистки дымовых газов (нейтрализация NO_x , SO_x) в процесс рекуперации для создания комбинированной энерго-экологической когенерационной установки.

3. Фундаментальную оптимизацию конструкции: применение аддитивных технологий для изготовления теплообменных поверхностей, позволяющих одновременно интенсифицировать теплосъём и минимизировать аэродинамическое сопротивление.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, В КОТОРЫХ ИЗЛОЖЕНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОТЫ

В журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК и индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science

1. **Перепелица Н.С.** Анализ влияния пассивного метода интенсификации теплообмена в конструкции двухтрубных теплообменников / В. С. Ежов, Н. С. Перепелица // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2025. – № 1(77). – С. 39-50. – DOI 10.36622/2541-7592.2025.77.1.004.

2. **Н. С. Перепелица.** Анализ способов повышения производительности термоэлектрических генераторов при разработке энергоэффективных поквартирных систем отопления / В. С. Ежов, Н. С. Перепелица // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2023. – № 10(1070). – С. 60-63.

3. **Н. С. Перепелица.** Исследование вредных выбросов теплогенерирующих установок в окружающую среду и методы их снижения / В. С. Ежов, Н. Е. Семичева, А. П. Бурцев, Н. С. Перепелица // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2023. – № 11(1071). – С. 46-48. – EDN DBCPS.

4. **Perepelitsa N. S.** Experimental calculation of the main characteristics of thermo-electric EMF source for the cathodic protection station of heat supply system pipelines / V. S. Yezhov, N. E. Semicheva, A. P. Burtsev, N.S. Perepelitsa // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2021. – Vol. 1259. – P. 225-237. – DOI 10.1007/978-3-030-57453-6_19.

5. **Perepelitsa N. S.** Integrated Heat Recovery of Waste Gases and Ventilation Emissions in a Multilayer Plate Heat Exchanger / A. Burtsev, V. Yezhov, N. Semicheva, N. S. Perepelitsa, P. A. Akulshina // Modern Problems in Construction : Selected Papers from MPC 2022, Kursk, 17–18 ноября 2022 года. – Kursk: Springer Nature Switzerland AG , 2024. – P. 1-8.

6. **Perepelitsa N. S.** Characterization of Thermoelectric Generators for Cathodic Protection of Pipelines of the City Heating / A.P. Burtsev, V.L. Yezhov, N.E. Semicheva, E. G. Pakhomova, N. S. Perepelitsa // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018 : Серия: Advances in Intelligent Systems and Computing Volume 983, Voronezh and Samara, Russia, 10–13 декабря 2018 года. Vol. 2. – Cham: Springer, 2019. – P. 670-678. – DOI 10.1007/978-3-030-19868-8_65.

В сборниках трудов конференций

- 7. Перепелица, Н. С.** О сферах применения термоэлектрических модулей / Н. С. Перепелица, А. Р. Семикоп // Молодежь и наука: шаг к успеху : сборник научных статей 7-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок молодых ученых, Курск, 21–22 марта 2024 года. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2024. – С. 207-210.
- 8. Перепелица, Н. С.** Об устройстве и физических основах работы полупроводниковых термоэлектрических модулей / Н. С. Перепелица, А. Р. Семикоп // Молодежь и наука: шаг к успеху : сборник научных статей 7-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок молодых ученых, Курск, 21–22 марта 2024 года. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2024. – С. 210-214.
- 9. Перепелица, Н. С.** Методы интенсификации теплообмена в двухтрубных теплообменниках / Н. С. Перепелица, А. И. Петрищев // Инновационный потенциал развития общества: взгляд молодых ученых : сборник научных статей 4-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок, Курск, 01 декабря 2023 года. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2023. – С. 227-231.
- 10. Перепелица, Н. С.** О рекуперации тепла дымовых газов / Н. С. Перепелица, Д. А. Степанов, Е. А. Хоркина // Поколение будущего: Взгляд молодых ученых-2023 : Сборник научных статей 12-й Международной молодежной научной конференции. В 4-х томах, Курск, 09–10 ноября 2023 года. – Курск: ЗАО "Университетская книга", 2023. – С. 276-279.
- 11. Перепелица, Н. С.** О свойствах материалов, используемых для термоэлектрических модулей / Н. С. Перепелица, Д. А. Степанов, Е. А. Хоркина // Поколение будущего: Взгляд молодых ученых-2023 : Сборник научных статей 12-й Международной молодежной научной конференции. В 4-х томах, Курск, 09–10 ноября 2023 года. – Курск: ЗАО "Университетская книга", 2023. – С. 284-287.
- 12. Перепелица, Н. С.** Экспериментальное исследование и сравнение эффективности работы термоэлектрических модулей разной ценовой категории / Н. С. Перепелица, О. О. Горобец, Н. В. Завидовский // Будущее науки: взгляд молодых ученых на инновационное развитие общества : сборник научных статей Всероссийской молодежной научной конференции : в 3 т., Курск, 30 мая 2023 года. Том 3. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2023. – С. 376-383.
- 13. Перепелица, Н. С.** Использование термоэлектрического источника электроснабжения для обеспечения автономной работы теплогенераторов / А. П. Бурцев, Н. С. Перепелица, Н. Ю. Авдеева // Проблемы и перспективы развития России: Молодежный взгляд в будущее : Сборник научных статей 5-й Всероссийской научной конференции. В 4-х томах, Курск, 20–21 октября 2022 года / Ответственный редактор А.А. Горохов. Том 3. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. – С. 337-341.
- 14. Перепелица, Н. С.** Утилизация низкопотенциального сбросных газов и вентиляционных выбросов с попутной генерацией термоэлектричества на промышленных котельных / Н. С. Перепелица, А. П. Бурцев, А. В. Озеров // Наука молодых - будущее России : сборник научных статей 7-й Международной научной

конференции перспективных разработок молодых ученых, Курск, 12–13 декабря 2022 года / Р. Том 5. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. – С. 382-389.

15. **Перепелица, Н. С.** Использование эффекта термоэлектричества для повышения энергосберегающих и экологических характеристик газовых котлов / А. П. Бурцев, Н. С. Перепелица // Современные проблемы в строительстве: постановка задач и пути их решения : сборник научных статей Международной научно-практической конференции, Курск, 17 июля 2020 года / Юго-Западный государственный университет. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. – С. 142-147.

16. **Перепелица, Н. С.** Исследование характеристик и расчет основных параметров термоэлектрического генератора с использованием различных типов полупроводников / В. С. Ежов, Д. Н. Тютюнов, А. П. Бурцев, Н. С. Перепелица // Математика и ее приложения в современной науке и практике : сборник научных статей X Международной научно-практической конференции студентов и аспирантов, Курск, 20 мая 2020 года. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. – С. 52-58.

17. **Перепелица, Н. С.** Исследование теплообмена в термоэлектрических преобразователях / А. П. Бурцев, В. С. Ежов, Н. С. Перепелица, А. П. Бурцев // Проектирование и строительство : сборник научных трудов 4-й Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, магистров и бакалавров, Курск, 13 марта 2020 года / Юго-Западный государственный университет. – Курск: Б. и., 2020. – С. 58-62.

18. **Перепелица, Н. С.** Экспериментальное исследование характеристик и расчет основных параметров термоэлектрического генератора с использованием проводников типа хромель-копель / В. С. Ежов, Д. Н. Тютюнов, А. П. Бурцев, Н. С. Перепелица // Математика и ее приложения в современной науке и практике : сборник научных статей X Международной научно-практической конференции студентов и аспирантов, Курск, 20 мая 2020 года. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. – С. 58-67.

19. **Перепелица, Н. С.** Разработка инновационной конструкции автономного термоэлектрического источника ЭДС для использования в системах теплоснабжения / В. С. Ежов, А. П. Бурцев, Н. С. Перепелица // Молодежь и XXI век - 2020 : материалы X Международной молодежной научной конференции, Курск, 19–20 февраля 2020 года. Том 3. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. – С. 245-249.

Объекты интеллектуальной собственности

20. Пат. 2833444 РФ, МПК H10N 10/00, H10N 10/80, F24H 3/02. Полифункциональный воздухоподогреватель для автономного теплогенератора / В. С. Ежов, Н. Е. Семичева, А. П. Бурцев, **Н. С. Перепелица**, ФГБОУ ВО ЮЗГУ. – 2024114472, заявл. 28.05.2024; опубл. 21.01.2025, Бюл. № 3.

21. Пат. 225005 РФ, МПК H10N 10/00. Комплексный воздухоподогреватель для автономного теплогенератора / **Н. С. Перепелица**, В. С. Ежов, Н. Е. Семичева, ФГБОУ ВО ЮЗГУ. – 2023126790, заявл. 19.10.2023; опубл. 11.04.2024, Бюл. № 11.

22. Пат. 2830924 РФ, МПК F24H 3/00. Термоэлектрический воздухоподогреватель для автономного теплогенератора / В. С. Ежов, Е. Г. Пахомова, Н. Е. Семицева, **Н. С. Перепелица**, ФГБОУ ВО ЮЗГУ. – 2024100826, заявл. 28.08.2023; опубл. 26.11.2024, Бюл. № 33.

23. Пат. 2725303 РФ, МПК H01L 35/00, H01L 35/02, H01L 35/28. Термоэлектрический источник электроснабжения для автономного теплогенератора / В. С. Ежов, А. П. Бурцев, **Н. С. Перепелица**, ФГБОУ ВО ЮЗГУ. – 2019133525, заявл. 22.10.2019; опубл. 30.06.2020, Бюл. № 19.