

*На правах рукописи*



**АНГЕЛЮК ИЛЬЯ ПАВЛОВИЧ**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СИСТЕМ  
ОТОПЛЕНИЯ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ НА ОСНОВЕ РЕКУПЕРАТИВНЫХ  
ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ**

**Специальность 05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция,  
кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

Белгород 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского»

**Научный руководитель**

**Зайцев Олег Николаевич**

доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:**

**Кочев Алексей Геннадьевич,**

доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Нижегородский  
государственный архитектурно-  
строительный университет»,  
заведующий кафедрой  
теплогазоснабжения

**Корниенко Сергей Валерьевич,**

доктор технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Волгоградский  
государственный технический  
университет»,  
заведующий кафедрой архитектуры  
зданий и сооружений

**Ведущая организация:**

**ФГБОУ ВО «Иркутский  
национальный исследовательский  
технический университет»**

Защита состоится «16» апреля 2021 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д. 212.014.07, созданного на базе ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» по адресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, ауд. ГК242.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» и на сайте [https://gos\\_att.bstu.ru/dis/Angeluck](https://gos_att.bstu.ru/dis/Angeluck)

Автореферат разослан «04» марта 2021 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Д.Ю. Сулов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** На долю теплоснабжения жилищного сектора в Российской Федерации приходится 31,2 % от общего теплопотребления систем теплоснабжения. При этом наблюдается устойчивая тенденция по децентрализации систем теплоснабжения современного многоэтажного строительства, т.е. за счет установки бытовых индивидуальных котельных агрегатов в каждой квартире. Такая схема весьма эффективна и сточки зрения отсутствия потерь при транспортировке теплоносителя, и с точки зрения эффективности использования топливно-энергетических ресурсов. Реализация такой схемы теплоснабжения в жилищном секторе, согласно действующего законодательства, возможна с применением системы коллективного удаления дымовых газов от данных котлоагрегатов. Каждый котлоагрегат, сжигая газ, выбрасывает в коллективный дымоход около 50 килограмм дымовых газов в час с температурой свыше 120 °С, то есть, данные дымовые газы в системе коллективного дымоудаления, являются высокопотенциальным вторичным энергетическим ресурсом жилых зданий, использование которого, позволит значительно повысить энергоэффективность системы отопления и инженерных систем здания в целом.

В тоже время процессы рекуперации таких вторичных источников тепла не изучены в достаточной мере, особенно при естественном удалении дымовых газов.

Таким образом, вопросы эффективной рекуперации теплоты дымовых газов коллективного дымохода в многоэтажном жилищном строительстве являются современными и актуальными.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного Совета Республики Крым и в рамках НИОКТР ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского», темы НИР: «Термомодернизация зданий и сооружений» № АААА-А19-119011790033-7 от 17.01.2019.

**Степень разработанности темы исследования.** Фундаментальные вопросы работы систем отопления поднимались в трудах В.Н. Богословского, А.Н. Сканави, низкотемпературных систем отопления – Г. Крафта. Вопросам конструирования теплообменных аппаратов посвящены труды Б.С. Петухова, Т. Холбера.

В последнее время вопросами совершенствования систем отопления занимались О.Н. Зайцев, А.Г. Кочев, вопросы рекуперации теплоты дымовых газов рассматривались Л.А. Куцевым, Э.В. Сазоновым, В.М. Семеновым, В.М. Павловцом, вопросы повышения энергоэффективности – С.В. Корниенко, С.А. Кибовским. Моделированию газоздушных потоков посвящены исследования К.И. Логачева, О.А. Аверковой, А.М. Зиганшина, исследованию турбулентных газоздушных течений – О.Н. Зайцева, В.М. Уляшевой, М. Abrahamsson. Также, были рассмотрены результаты трудов многих других авторов, чьи работы посвящены фундаментальным вопросам газодинамики, вопросам рекуперации и проблемам энергосбережения в целом.

**Объект исследования** – система рекуперации теплоты дымовых газов коллективного дымохода жилых многоквартирных зданий.

**Предмет исследования** – аэродинамические и термодинамические характеристики рекуператора системы рекуперации теплоты дымовых газов.

**Цель работы** заключается в совершенствовании процессов рекуперации теплоты от дымовых газов в системах коллективного дымоудаления с естественной тягой и использовании утилизированного тепла в системе отопления.

Для достижения поставленной цели диссертационной работы были сформулированы следующие **задачи**:

- методом численного моделирования систем коллективного дымоудаления определить основные термодинамические показатели теплоотдающей и тепловоспринимающей сред, участвующих в процессе рекуперации;

- исследовать рекуператоры различных конструкций, применяемых в газоходах, методами численного моделирования, для получения массива данных, характеризующих работу системы рекуперации теплоты дымовых газов в условиях естественной тяги дымохода;

- на основании результатов численного моделирования разработать конструкцию рекуператора теплоты дымовых газов и определить характеристики работы системы рекуперации с целью определения области экспериментальных исследований и основных влияющих факторов;

- экспериментально определить аэродинамические и термодинамические характеристики предложенной конструкции рекуператора теплоты дымовых газов и выполнить анализ полученных регрессионных уравнений;

- уточнить методику конструктивного подбора рекуператора системы рекуперации теплоты дымовых газов коллективного дымохода с учетом разработанной конструкции;

- выполнить оценку экономической эффективности внедрения разработанной системы рекуперации теплоты дымовых газов коллективного дымохода в жилых зданиях для различных регионов Российской Федерации.

**Научная новизна** исследования заключается в следующем:

1. Численным моделированием аэродинамических, гидродинамических и теплотехнических характеристик различных конструкций рекуператоров выявлена тенденция устойчивого повышения эффективности работы конусных спиральных теплообменников за счет интенсификации процесса эжекции дымовых газов. Исходя из этого, предложена новая конструкция рекуператора теплоты дымовых газов (ППМ РФ №158256) при работе в условиях естественной тяги коллективного дымохода.

2. Получена регрессионная зависимость потерь давления дымовыми газами в рекуператоре предложенной конструкции (ППМ РФ №158256) от массового расхода дымовых газов системы коллективного дымоудаления и площади компенсационного отверстия внутреннего конуса кожуха

рекуператора, анализ которой показал, что изменение потерь давления становится практически линейным при увеличении расхода дымовых газов.

3. Уточнен коэффициент аэродинамического сопротивления для рекуператора дымовых газов с учетом конструктивных отличий предлагаемого рекуператора.

4. Получено уравнение и создана графоаналитическая методика определения коэффициента аэродинамического сопротивления рекуператора системы коллективного дымоудаления в условиях естественной тяги дымохода.

5. Установлена регрессионная зависимость результирующей температуры нагреваемого теплоносителя после рекуперации от массового расхода и температуры дымовых газов системы коллективного дымоудаления, анализ которой показал, что рост температуры теплоносителя ограничивается с увеличением массового расхода дымовых газов, что позволяет определить наиболее рациональное соответствие температуре дымовых газов его массовому расходу для получения максимальной температуры нагреваемого теплоносителя.

**Теоретическая значимость** диссертационного исследования заключается в разработке численных моделей аэродинамических и тепловых процессов, происходящих в рекуператорах различных конструкций при естественной тяге в коллективном дымоходе, позволивших разработать новую конструкцию рекуператора дымовых газов, отличающуюся тем, что повышение эффективности работы происходит из-за увеличения расхода дымовых газов через межтрубное пространство рекуператора за счет возникновения эффекта эжекции. Также, в результате экспериментальных исследований получены новые зависимости давления дымовых газов и температур нагреваемого теплоносителя, позволившие уточнить аэродинамические коэффициенты и температуры теплоносителей в методике подбора рекуператоров.

**Практическая значимость** диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Уточнена методика инженерного подбора рекуператора теплоты дымовых газов коллективного дымохода в условиях естественной тяги.

2. Предложен методический подход к определению экономической эффективности внедрения системы рекуперации теплоты дымовых газов с естественной тягой для различных регионов Российской Федерации.

3. Техническое решение по рекуперации теплоты дымовых газов, уточненная методика подбора рекуператора и методический подход к определению экономической эффективности внедрения системы рекуперации теплоты дымовых газов апробированы на предприятиях Республики Крым и **внедрены** в практику проектирования и монтажа систем отопления и вентиляции ООО «Кирамет», ООО «Ти-М-Си Крым».

**Методология и методы исследований.** Методологической основой диссертационного исследования служат основные теоретические положения теплообмена, аэродинамики и гидродинамики в рекуперативных

аппаратах. Методами в диссертационном исследовании послужили численное моделирование, методы планирования и обработки экспериментальных исследований, графоаналитический метод.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты численного моделирования аэродинамических, гидродинамических, теплотехнических характеристик различных конструкций рекуператоров с выявленной интенсификацией процесса эжекции дымовых газов при работе в условиях естественной тяги коллективного дымохода.

2. Предложенная конструкция рекуператора, отличающаяся тем, что состоит из корпуса, образованного двумя усеченными конусами разного диаметра с одинаковыми углами конусности, расположенными коаксиально, основания которых лежат в одной плоскости, между которыми навита медная труба-теплообменник таким образом, что опускается к усеченной части по внутренней поверхности наружного конуса, а поднимается по внешней поверхности внутреннего конуса в шахматном порядке и выходит наружу рекуператора, при этом сверху, на основания конусов, помещена крышка-эжектор, на боковой части наружной стороны которой сделана эжекционная прорезь, снизу – к усеченной части наружного конуса присоединен конусовидный конфузор (ППМ №158256).

3. Регрессионная зависимость потерь давления дымовыми газами в рекуператоре предложенной конструкции (ППМ №158256) от массового расхода дымовых газов системы коллективного дымоудаления и площади компенсационного отверстия внутреннего конуса кожуха рекуператора.

4. Коэффициент аэродинамического сопротивления для рекуператора дымовых газов с учетом конструктивных отличий предлагаемой конструкции, полученная графическая зависимость, позволившая создать графоаналитическую методику определения коэффициента аэродинамического сопротивления предложенной конструкции рекуператора в условиях естественной тяги дымохода.

5. Регрессионная зависимость результирующей температуры нагреваемого теплоносителя после рекуперации от массового расхода и температуры дымовых газов системы коллективного дымоудаления.

6. Уточненная методика инженерного подбора рекуператора теплоты дымовых газов коллективного дымохода в условиях естественной тяги.

7. Результаты расчетов экономической эффективности внедрения системы рекуперации теплоты дымовых газов с естественной тягой для различных регионов Российской Федерации.

**Степень достоверности** диссертационных исследований подтверждается использованием фундаментальных положений расчета теплообменных аппаратов рекуперативного действия; применением современных методов численного моделирования, расчетно-аналитического программного обеспечения; подтверждается удовлетворительным согласованием итогов теоретических исследований с результатами экспериментальных исследований.

**Апробация результатов.** Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались на следующих научно-практических конференциях: Международная научно-практическая конференция молодых ученых и студентов «Современные экологически безопасные и энергосберегающие технологии в природопользовании», Киев (2011 г.); III, V Научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава, аспирантов, студентов и молодых ученых КФУ «Дни науки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского», Симферополь (2017 г., 2019 г.); Международный научный форум «Неделя науки - 2019» на базе Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург (2019 г.).

**Внедрение.** Техническое решение по рекуперации теплоты дымовых газов, уточненная инженерная методика подбора рекуператора и методический подход к определению экономической эффективности внедрения системы рекуперации теплоты дымовых газов апробированы на предприятиях Республики Крым (материалы исследований и методики расчета переданы в Государственный совет Республики Крым) и внедрены в практику проектирования и монтажа систем отопления и вентиляции ООО «Кирамет» и ООО «Ти-М-Си Крым». Также результаты исследований используются в учебном процессе при подготовке магистров по направлению 08.04.01 – Строительство.

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 11 научных работ; в том числе 5 статей в журналах, входящих в перечень научных изданий, рекомендованных ВАК РФ; 1 статья в издании, индексируемом в базе данных Scopus; получен 1 патент РФ на полезную модель.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, с выводами по каждой из них, заключения, условных обозначений, библиографического списка и приложений. Общий объем работы 198 страниц, в том числе: 136 страниц – основной текст, содержащий 20 таблиц, 70 рисунков, 113 формул; список сокращений и условных обозначений на 8 страницах; список литературы из 161 наименования на 17 страницах; 8 приложений на 37 страницах.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность проводимых исследований, обозначены объект и предмет исследований, поставлена цель и определены задачи исследования, приведены научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов исследования. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации, публикациях и внедрении результатов исследования.

**В первой главе** проведен аналитический обзор энергосберегающих технологий источников теплоснабжения жилых зданий, который показал значительный рост энергоэффективности за счет использования в качестве источников теплоснабжения вторичных энергоресурсов, а именно:

- применение выбросного вентиляционного воздуха в качестве вторичного энергоресурса при рекуперации около 50 % дает возможность сократить потребление тепловой энергии примерно на 20 % (при условии применения теплового насоса);

- применение канализационных стоков, совместно с тепловым насосом, позволяет достичь экономии до 32 % тепловой энергии в сравнении с теплоисточником на газовом топливе.

Также было выявлено, что применение дымовых газов в качестве вторичного энергоресурса за счет применения воздухоподогревателей и котлов-утилизаторов широко распространено в промышленности и на производстве, где дымовые газы имеют значительные энергетические параметры, однако, для жилых зданий, при децентрализованном теплоснабжении, с системами коллективного дымоудаления, процессы рекуперации теплоты дымовых газов в условиях естественной тяги коллективного дымохода не изучены в достаточной мере.

**Во второй главе** выполнены теоретические исследования характеристик рекуператора системы дымоудаления.

Для определения параметров дымовых газов системы коллективного дымоудаления, участвующих в процессе рекуперации, было произведено моделирование и расчет системы в максимально возможном диапазоне ее функционирования. На основании полученных данных, выявленных во второй главе данных по параметрам, характеризующим процесс теплообмена при рекуперации теплоты дымовых газов системы коллективного дымоудаления, и участвующих в расчете аппарата рекуперации теплоты дымовых газов системы коллективного дымоудаления, были предложены четыре следующие конструкции рекуператоров:

- рекуператор с теплообменной поверхностью в виде пространственно-навитой прямой спирали с шахматным расположением рядов труб (рисунок 1а);

- рекуператор с теплообменной поверхностью в виде пространственно-навитой конусовидной спирали с шахматным расположением рядов труб (рисунок 1б);

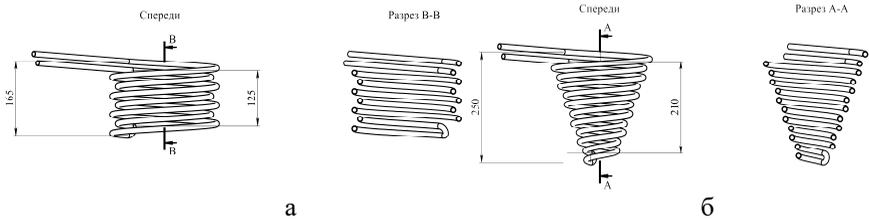


Рисунок 1 – Основные геометрические характеристики рекуператоров:  
а – в виде прямой спирали; б – в виде конусовидной спирали

– рекуператор в виде пространственно-навитой конусовидной спирали с шахматным расположением рядов труб и кожухом, который создает межтрубное пространство и, прилегая к трубам, является интенсификатором теплообмена (рисунок 2а);

– рекуператор в виде пространственно-навитой конусовидной спирали с кожухом и крышкой-эжектором, которая замыкает межтрубное пространство, создавая прорезь для эжекции дымовых газов из межтрубного пространства (рисунок 2б).

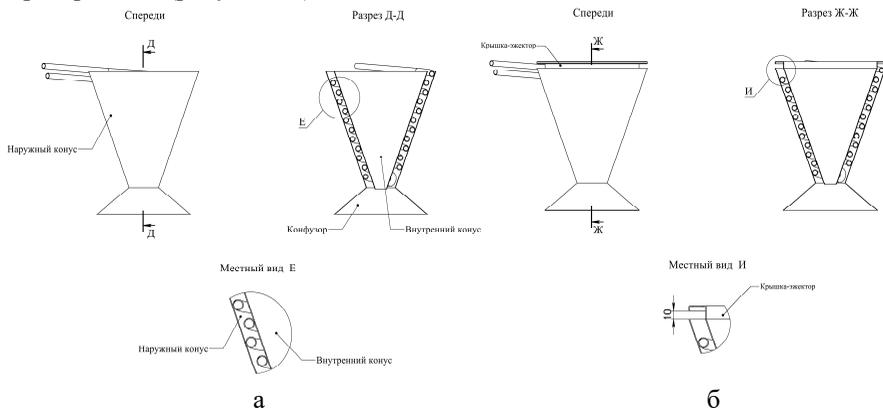


Рисунок 2 – Основные геометрические характеристики рекуператоров:  
а – в виде конусовидной спирали с кожухом; б – в виде конусовидной спирали с кожухом и крышкой-эжектором

В связи с тем, что течение дымовых газов в системе коллективного дымоудаления носит нестационарный характер как во времени, так и по режиму течения, и принятые конструкции рекуператоров имеют геометрически сложные конфигурации, численное моделирование их работы выполнено на основании математического аппарата, предлагаемого программным продуктом Flow Simulation комплекса SolidWorks.

На рисунке 3 приведены результаты по распределению скорости движения дымовых газов.

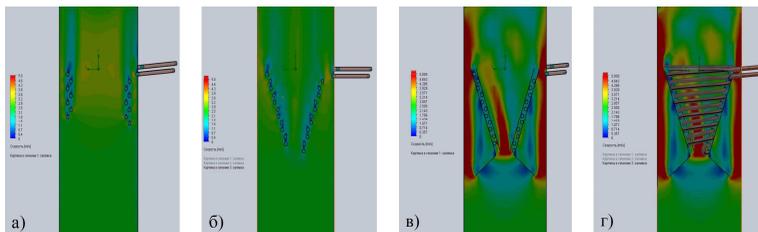


Рисунок 3 – Распределение скорости дымовых газов по исследуемым конструкциям рекуператоров:

а – в виде прямой спирали; б – в виде конусовидной спирали; в – в виде конусовидной спирали с кожухом; г – в виде конусовидной спирали с кожухом и крышкой-эжектором

В случае прямой и конусовидной спиралей (рисунок 3 (а, б)) выявлено, что скорость движения дымовых газов падает на пучках труб, и в межтрубном пространстве наблюдаются зоны с нулевой скоростью движения, что снижает эффективность работы дынных рекуператоров. Для рекуператоров с кожухами (рисунок 3 (в, г)) наблюдается ускорение движения дымовых газов в местах сужения прохода – вокруг патрубка захвата дымовых газов, в месте расширения верхней части рекуператора, что может свидетельствовать об уменьшении толщины пограничного слоя. При этом, скорость дымовых газов в межтрубном пространстве для данных рекуператоров не превышает 1,5 м/с.

На рисунке 4 приведены результаты по распределению температуры дымовых газов.

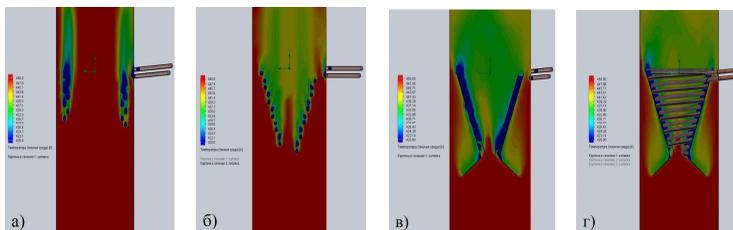


Рисунок 4 – Распределение температуры дымовых газов по исследуемым конструкциям рекуператоров:

а – в виде прямой спирали; б – в виде конусовидной спирали; в – в виде конусовидной спирали с кожухом; г – в виде конусовидной спирали с кожухом и крышкой-эжектором

В случае прямой спирали (рисунок 4а) дымовые газы охлаждаются неравномерно. В случае конусовидной спирали (рисунок 4б) теплообмен происходит более равномерно. В конструкциях с кожухами (рисунок 4 (в, г)) наблюдается интенсивное падение температуры дымовых газов в межтрубном пространстве.

На рисунке 5 приведены итоги численного моделирования по распределению давления дымовых газов.

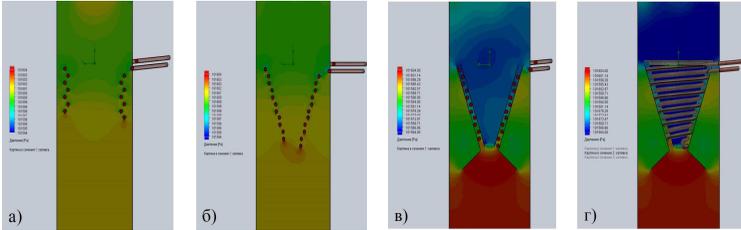


Рисунок 5 – Распределение давления дымовых газов по исследуемым конструкциям рекуператоров:

а – в виде прямой спирали; б – в виде конусовидной спирали; в – в виде конусовидной спирали с кожухом; г – в виде конусовидной спирали с кожухом и крышкой-эжектором

Равномерное падение давления по высоте дымового канала для рекуператоров на рисунке 5 (а, б) объясняется простотой конструкции. В случае рекуператоров с кожухами (рисунок 5 (в, г)) наблюдается отчетливое падение давления на конструкции рекуператоров, в местах сужения проходов выявлены концентрические зоны пониженного давления, что предполагает возникновение зон дополнительного перемешивания, интенсифицирующих теплообмен.

На рисунке 6 представлен сводный график распределения скорости дымовых газов для рекуператоров различной конструкции, построенный по линии тока дымовых газов, обходящих рекуператор снаружи.

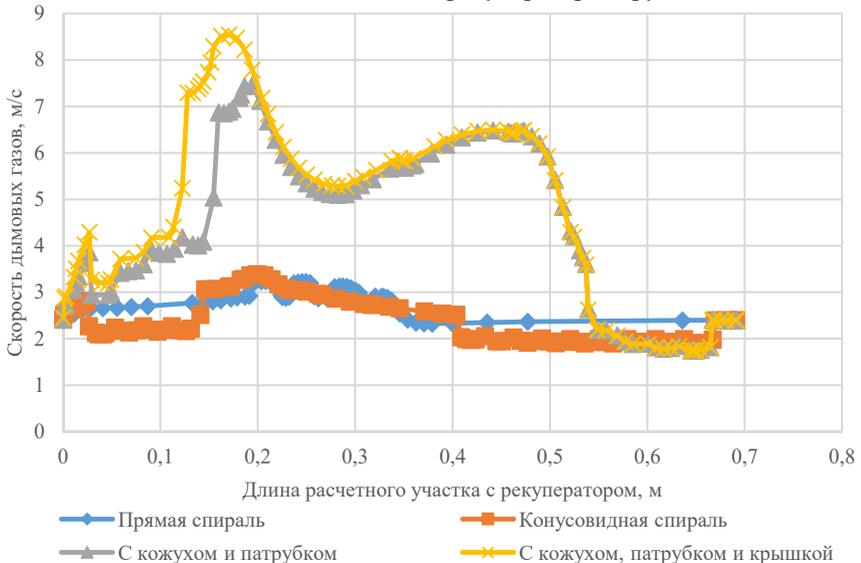


Рисунок 6 – Сводный график распределения скорости дымовых газов по высоте рекуператоров различной конструкции

Анализ полученных данных (рисунок 6) показал, что для рекуператоров с прямой и конусовидной спиралями, колебание скорости незначительно – до 1 м/с. Для рекуператоров с кожухами выявлены более амплитудные колебания – до 6 - 7 м/с, при этом пики графиков приходится на места сужения прохода дымовых газов. Скачок скорости в зоне 0,1 - 0,2 м – в зоне выхода дымовых газов из межтрубного пространства, говорит о возникновении эффекта эжекции.

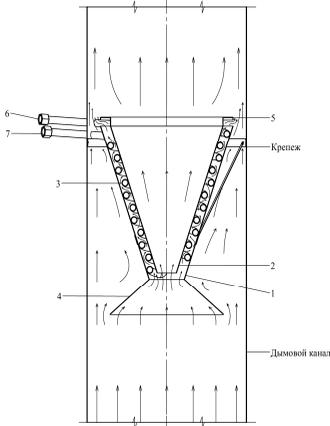


Рисунок 7 – Схема предлагаемой конструкции рекуператора:  
 1 – наружный усеченный конус;  
 2 – внутренний усеченный конус;  
 3 – пространственно-спирально навитая труба – теплообменник;  
 4 – конфузор для захвата потока дымовых газов; 5 – крышка - эжектор; 6 – патрубок входа нагреваемого теплоносителя;  
 7 – патрубок выхода нагреваемого теплоносителя.

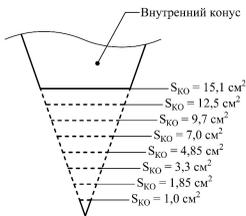


Рисунок 8 – Положение усечения внутреннего конуса с обозначением компенсационного отверстия  $S_{КО}$ , соответствующей площади

Таким образом, полученные результаты численного моделирования, позволили разработать конструкцию рекуператора (рисунок 7) в виде пространственно-навитой конусовидной спирали с кожухом и крышке-эжектором для работы в условиях естественной тяги системы коллективного дымоудаления (патент на полезную модель рекуператора №158256).

Предложенный рекуператор работает следующим образом. Нагретые дымовые газы, поднимаясь по коллективному дымоходу, делятся конфузором 4 на два потока, один из которых поступает в межтрубное пространство, образованное наружным усеченным конусом 1 и внутренним усеченным конусом 2, второй – обходит рекуператор снаружи. В межтрубном пространстве поток, поступивший в рекуператор, омывает трубу-теплообменник 3, отдавая тепло и нагревая теплоноситель. Затем, уже охлажденный, поток поступает в верхнюю камеру рекуператора, где эжектируется через щель в крышке-эжекторе 5 в поток дымовых газов, обходящих рекуператор снаружи. Эффект эжекции достигается благодаря увеличению скорости потока дымовых газов, обходящих рекуператор снаружи, и конструкции крышки, которая замыкает межтрубное пространство и создает область пониженного давления.

Для стабилизации потока дымовых газов и варьирования аэродинамическим сопротивлением рекуператора выполнено усечение внутреннего конуса 2 (рисунок 8).

В третьей главе, для получения численных характеристик работы предложенной конструкции рекуператора, были выполнены экспериментальные исследования на разработанном экспериментальном стенде (рисунок 9).

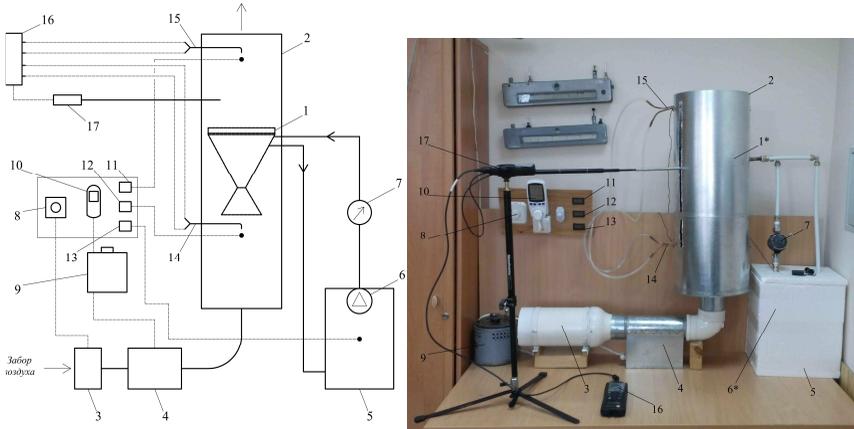


Рисунок 9 – Схема и общий вид экспериментально стенда:

- 1 – рекуператор предлагаемой конструкции; 2 – дымовой канал;  
 3 – вентилятор; 4 – воздухонагреватель; 5 – буферная емкость; 6 – циркуляционный насос; 7 – водомер; 8 – реостат вентилятора; 9 – ЛАТР воздухонагревателя;  
 10 – ваттметр; 11 – термометр за рекуператором; 12 – термометр перед рекуператором; 13 – термометр в буферной емкости; 14 – трубка Пито перед рекуператором; 15 – трубка Пито за рекуператором; 16 – многофункциональный прибор Testo 480; 17 – зонд для измерения скорости и температуры Testo

Исследование аэродинамических и термодинамических характеристик рекуператора предложенной конструкции проводилось на основании ортогонального плана 2-го порядка. Определение основных влияющих факторов исследований выполнено с соответствующей оценкой значимости по критерию Стьюдента и адекватности по критерию Фишера.

Исследование **аэродинамических** характеристик проводилось для выявления закономерности между сопротивлением рекуператора набегающему потоку газов  $\Delta P_{\text{ту}}$  в зависимости от площади компенсационного отверстия во внутреннем конусе кожуха рекуператора  $S_{\text{КО}}$  при изменении массового расхода газов  $M_{\text{дг}}$  и площади компенсационного отверстия  $S_{\text{КО}}$ . В исследовании постоянными параметрами приняты:

- температура окружающей среды  $t_{\text{ср}} = 22 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- давление окружающей среды  $P_{\text{атм}} = 101325 \text{ Па}$ ;
- температура дымовых газов  $t_{\text{дг}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Варьируемые параметры:

- массовый расход дымовых газов  $M_{дг}, (X_1) = 0,074 \div 0,243$  кг/с;
- площадь компенсационного отверстия во внутреннем конусе кожуха рекуператора  $S_{ко}, (X_2) = 0,27 \div 15,11$  см<sup>2</sup>.

В результате обработки данных эксперимента получена регрессионная зависимость в натуральном выражении входящих величин:

$$\Delta P_{ту} = 15,934 + 12,366 \cdot M_{дг} - 0,615 \cdot S_{ко} + 4,075 \cdot M_{дг}^2 - 0,784 \cdot S_{ко}^2, \quad (1)$$

где  $M_{дг}$  – массовый расход дымовых газов через участок с рекуператором в долях от диапазона измерений;

$S_{ко}$  – площадь компенсационного отверстия во внутреннем конусе кожуха рекуператора в долях от диапазона измерений.

По полученному регрессионному уравнению (1) построены графики зависимости потерь давления дымовыми газами, приведенные на рисунке 10.

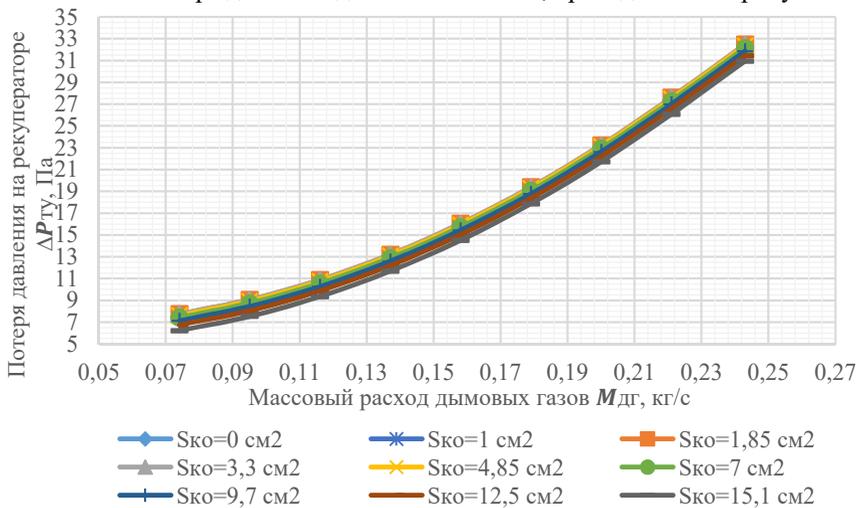


Рисунок 10 – Графики зависимости потерь давления

Определение **коэффициента аэродинамического сопротивления** для рекуператора дымовых газов с учетом конструктивных отличий предлагаемой конструкции выполнено путем преобразование параметра  $v$  – скорости текучей среды стандартного выражения коэффициента аэродинамического сопротивления, через массовый расход дымовых газов  $M_{дг}$  и площадь сечения коллективного дымохода  $S_{дк}$ .

По итогам преобразования получено выражение:

$$\zeta_{ту} = \Delta P \cdot \frac{\pi^2 \cdot \rho \cdot d_{дк}^4}{8 \cdot M_{дг}^2}. \quad (2)$$

После подстановки (1) в (2), получено уточненное выражение коэффициента аэродинамического сопротивления рекуператора предложенной конструкции:

$$\zeta_{\text{ТУ}} = (15,934 + 12,366 \cdot \dot{M}_{\text{дг}} - 0,615 \cdot S_{\text{КО}} + 4,075 \cdot \dot{M}_{\text{дг}}^2 - 0,784 \cdot S_{\text{КО}}^2) \cdot \frac{\pi^2 \cdot \rho \cdot d_{\text{дк}}^4}{8 \cdot \dot{M}_{\text{дг}}^2}. \quad (3)$$

Анализ зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления рекуператора  $\zeta_{\text{ТУ}}$  предложенной конструкции от массового расхода дымовых газов  $\dot{M}_{\text{дг}}$  и площади компенсационного отверстия  $S_{\text{КО}}$  во внутреннем конусе кожуха рекуператора приведен на рисунке 11.

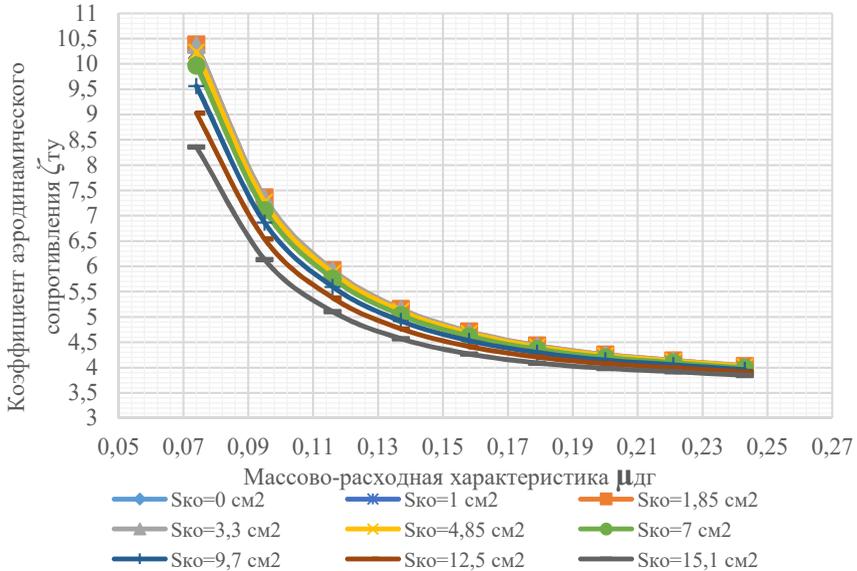


Рисунок 11 – Графики зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления рекуператора

Исследование **термодинамических** характеристик рекуператора предложенной конструкции выполнено для выявления зависимости результирующей температуры теплоносителя после нагрева его в рекуператоре  $t_{\text{ж2}}$  от массового расхода дымовых газов  $\dot{M}_{\text{дг}}$  и температуры дымовых газов  $t_{\text{дг}}$ . Эксперименты проводились отдельно для девяти вариантов площади компенсационного отверстия  $S_{\text{КО}}$ , в соответствии с рисунком 8, а именно:  $S_{\text{КО}} = 0 \text{ см}^2$  – внутренний конус рекуператора без подреза;  $S_{\text{КО}} = 1 \text{ см}^2$ ;  $S_{\text{КО}} = 1,85 \text{ см}^2$ ;  $S_{\text{КО}} = 3,3 \text{ см}^2$ ;  $S_{\text{КО}} = 4,85 \text{ см}^2$ ;  $S_{\text{КО}} = 7 \text{ см}^2$ ;  $S_{\text{КО}} = 9,7 \text{ см}^2$ ;  $S_{\text{КО}} = 12,5 \text{ см}^2$ ;  $S_{\text{КО}} = 15,1 \text{ см}^2$  – максимальный подрез до первого витка трубы.

В исследовании постоянными параметрами приняты:

- температура окружающей среды  $t_{\text{ср}} = 22 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- давление окружающей среды  $P_{\text{атм}} = 101325 \text{ Па}$ ;
- начальная температура нагреваемой жидкости  $t_{\text{ж1}} = 22 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- масса нагреваемой жидкости  $m_{\text{ж}} = 40 \text{ л}$ .

Варьируемые параметры:

– массовый расход дымовых газов через участок с рекуператором  $M_{дг}, (X_1) = 0,074 \div 0,243$  кг/с;

– температура газов перед рекуператором  $t_{дг}, (X_2) = 50 \div 190$  °С.

В результате обработки данных эксперимента получена регрессионная зависимость в натуральных величинах:

$$t_{ж2} = 44,89 - 3,27 \cdot M_{дг} + 11,95 \cdot t_{дг} - 3,22 \cdot M_{дг} \cdot t_{дг} + 7,02 \cdot M_{дг}^2 - 5,42 \cdot t_{дг}^2 \quad (4)$$

где  $M_{дг}$  – массовый расход дымовых газов через участок с рекуператором в долях от диапазона измерений;

$t_{дг}$  – температура газов перед рекуператором в долях от диапазона измерений.

По выражению (4) построены зависимости результирующей температуры теплоносителя  $t_{ж2}$  от массового расхода дымовых газов  $M_{дг}$  и их температуры  $t_{дг}$ , для всех значений  $S_{КО}$ . Так на рисунке 12 приведены графики для  $S_{КО} = 4,85$  см<sup>2</sup>.

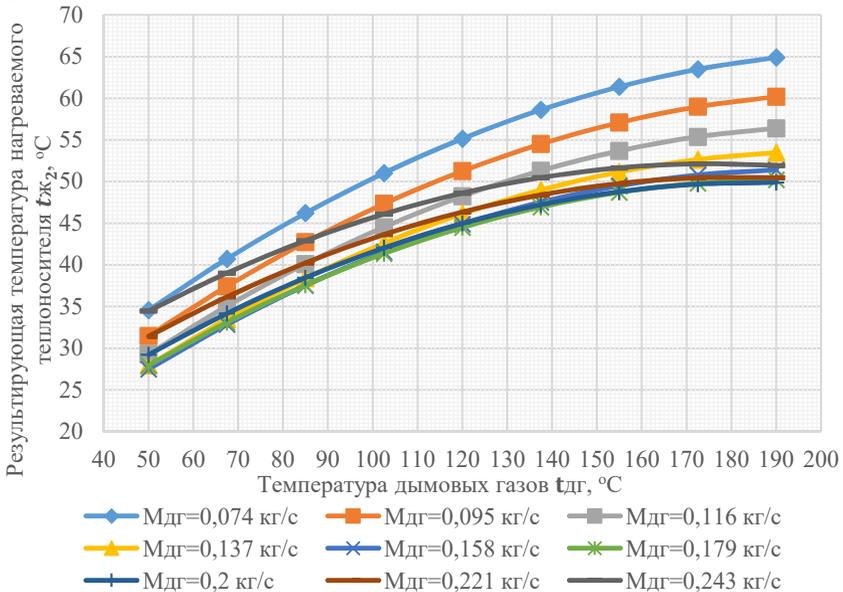


Рисунок 12 – Графики зависимости результирующей температуры нагреваемого теплоносителя для рекуператора с  $S_{КО} = 4,85$  см<sup>2</sup>

Метрологический анализ экспериментальных исследований показал ошибку в пределах 5 %, что позволяет говорить о достаточной достоверности полученных результатов.

Сопоставление результатов экспериментальных и теоретических исследований проводилось на основании графоаналитического метода, и показали расхождение в пределах 7 %, что подтверждает адекватность

полученных результатов и говорит о возможности их использования в инженерных расчетах.

**В четвертой главе** приведены методики промышленного испытания и инженерного подбора рекуператора, выполнено технико-экономическое обоснование внедрения системы рекуперации.

На основании результатов численного моделирования и экспериментальных исследований для определения наиболее рациональной компоновки системы рекуперации теплоты дымовых газов, определения ее мощности  $Q_{TU}$  и максимальной температуры нагреваемого теплоносителя  $t_{ж2}$ , предложен следующий алгоритм:

1. По диаграмме (рисунок 13), в зависимости от массового расхода дымовых газов  $M_{дг}$  в коллективном дымоходе, задаются интервалом значений коэффициента аэродинамического сопротивления рекуператора  $\zeta_{TU}$  для различных площадей компенсационного отверстия  $S_{КО}$  во внутреннем конусе кожуха рекуператора.

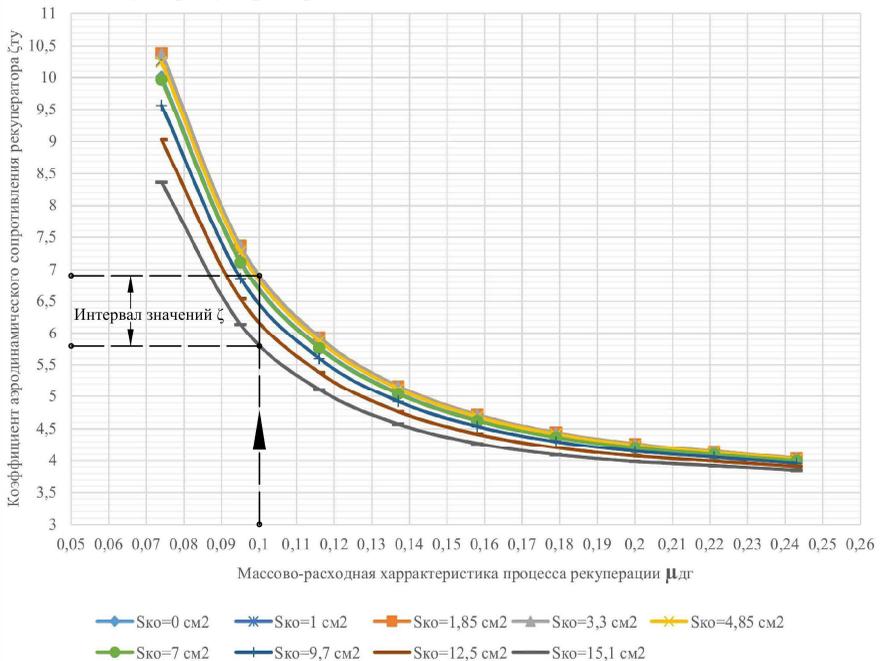


Рисунок 13 – Графики для определения интервала значений коэффициента аэродинамического сопротивления рекуператора  $\zeta_{TU}$

2. Пересчитывают аэродинамическое сопротивление на участке дымохода, полученное ранее при расчете системы коллективного дымоудаления, подставляя большее, из полученных в интервале значений, значение коэффициента аэродинамического сопротивления рекуператора

$\zeta_{\text{ТУ}}$ , уточняя сумму коэффициентов аэродинамического сопротивления участка дымохода  $\sum \zeta_j$ :

$$P_{R,\text{ТУ}} = S_E \left( \psi_j \frac{L_j}{D_h} + \sum \zeta_j \right) \frac{\rho_{m,j}}{2} w_{m,j}^2, \quad (5)$$

где  $D_h$  – внутренний гидравлический диаметр коллективного дымохода, м;

$\rho_{m,j}$  – средняя плотность дымовых газов на участке дымохода, кг/м<sup>3</sup>;

$w_{m,j}$  – средняя скорость дымовых газов на участке дымохода, м/с;

$L_j$  – длина участка дымохода, м;

$\psi$  – коэффициент гидравлического сопротивления участка дымохода;

$\sum \zeta_j$  – сумма коэффициентов аэродинамического сопротивления участка дымохода, куда входит коэффициент аэродинамического сопротивления рекуператора  $\zeta_{\text{ТУ}}$ ;

$S_E$  – аэродинамический коэффициент безопасности.

3. Пересчитывают, располагаемое (избыточное) давление дымохода, которое уменьшается после размещения рекуператора:

$$P_{Z,j} = -P_L + \sum_{k=j}^N (P_{H,k} - P_{R,j}), \quad (6)$$

где  $P_{H,k}$  – тяга (естественная), созданная эффектом дымохода на участке дымохода  $k$ , Па;

$P_{R,j}$  – аэродинамическое сопротивление на участке дымохода  $k$ , Па, один из которых рассчитан по формуле 5 для участка с рекуператором;

$P_L$  – динамическое давление воздуха, Па;

$N$  – количество участков дымохода.

4. Проверяют условия по давлению после установки рекуператора, для недопущения опрокидывания тяги:

$$|P_{Z,j} - P_{Ze,j}| \leq 0,1, \quad (7)$$

где  $P_{Z,j}$  – избыточное давление коллективного дымохода после размещения рекуператора, рассчитанное по формуле 6, Па;

$P_{Ze,j}$  – избыточное давление в месте присоединения последнего теплогенератора, Па.

5.1. Если условия равновесия соблюдены, переходят к пункту 6.

5.2. Если условия равновесия не соблюдены, пересчитывают пункты 2 – 4, подставляя в формулу 5 меньшее значение коэффициента аэродинамического сопротивления рекуператора  $\zeta_{\text{ТУ}}$ , определенного из принятого интервала в пункте 1, до тех пор, пока не будет соблюдено условие п. 4.

6. Определив коэффициент аэродинамического сопротивления рекуператора и соответствующую ему площадь компенсационного отверстия  $S_{\text{КО}}$ , по графику зависимости результирующей температуры нагреваемого теплоносителя, соответствующей  $S_{\text{КО}}$  рекуператора, в зависимости от температуры дымовых газов  $t_{\text{дг}}$  и массового расхода дымовых газов  $M_{\text{дг}}$  определяют результирующую температуру нагреваемого теплоносителя  $t_{\text{ж2}}$ .

Для примера, на рисунке 14 приведена номограмма для рекуператора с  $S_{K0} = 4,85 \text{ см}^2$ .

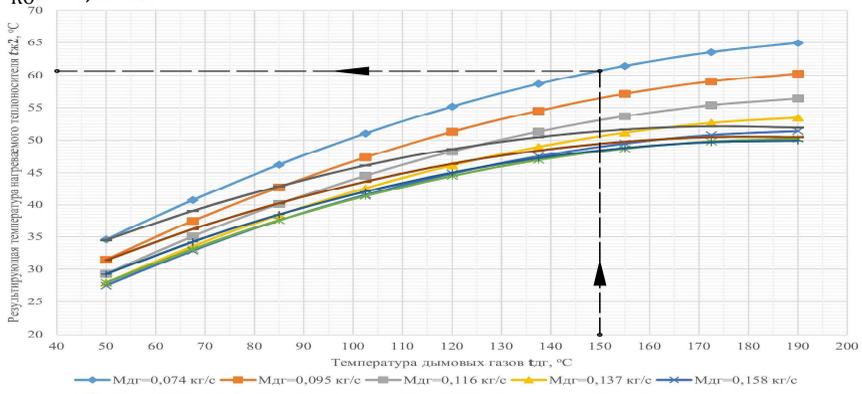


Рисунок 14 – Номограмма определения результирующей температуры нагреваемого теплоносителя

7. По номограмме (рисунок 15) в зависимости от определенной температуры теплоносителя  $t_{ж2}$ , определяют мощность системы рекуперации теплоты  $Q_{ту}$ .

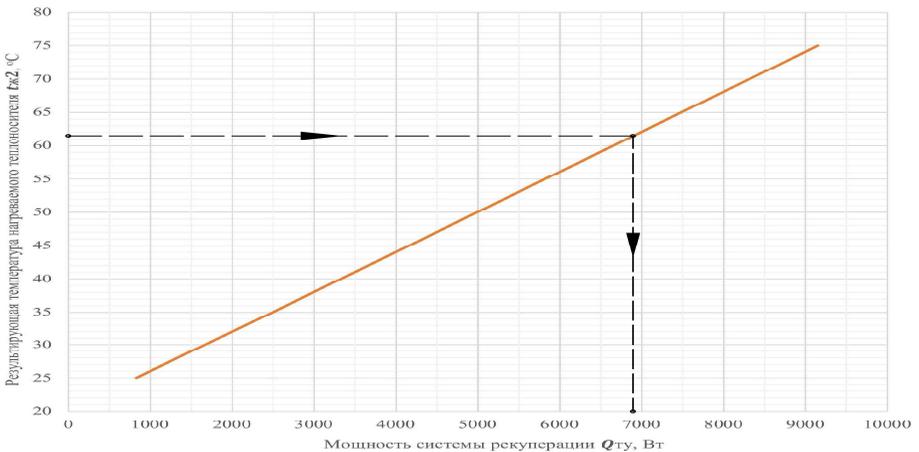


Рисунок 15 – Номограмма определения результирующую мощности системы рекуперации

Полученные значения температуры нагреваемого теплоносителя  $t_{ж2}$  и мощности системы рекуперации  $Q_{ту}$  используются для подбора и расчета других компонентов системы рекуперации, таких как бак-накопитель, циркуляционный насос и др.

Для расчета показателей технико-экономической эффективности реализован следующий подход к определению экономической

эффективности внедрения системы рекуперации теплоты дымовых газов системы коллективного дымоудаления в жилых многоквартирных зданиях, блок схема которого приведена на рисунке 16, а результаты расчета в сравнении с системой на основе газового котла для различных регионов Российской Федерации приведены на рисунках 17, 18.

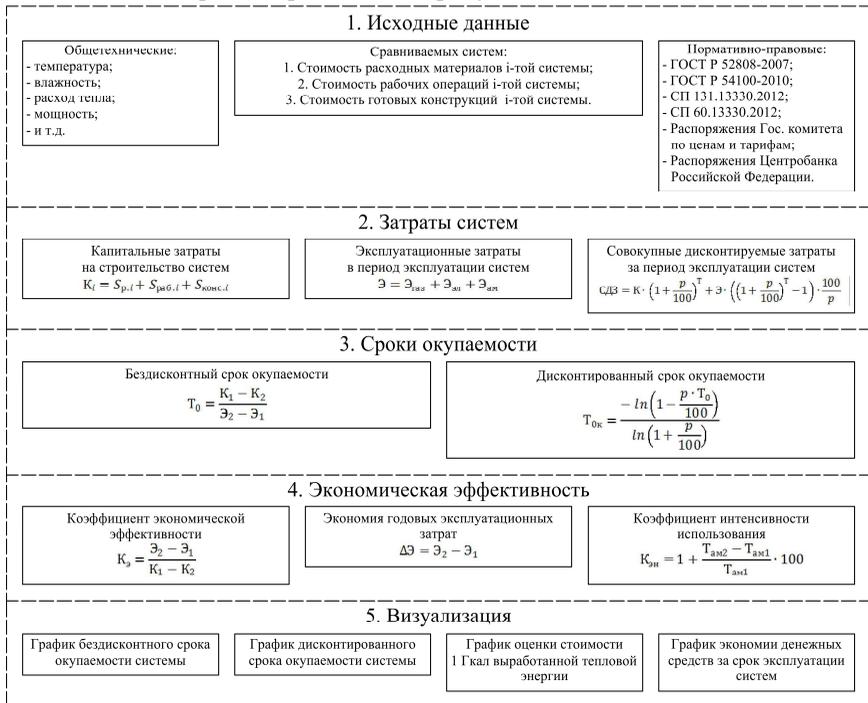


Рисунок 16 – Блок-схема методического подхода

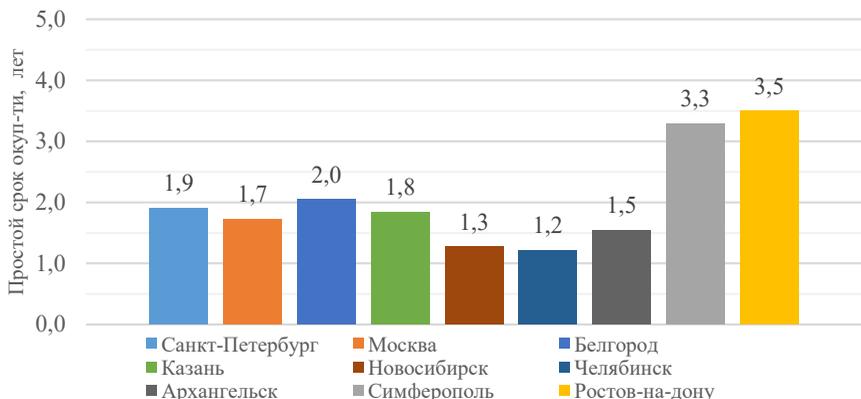


Рисунок 17 – Срок окупаемости системы рекуперации теплоты дымовых газов

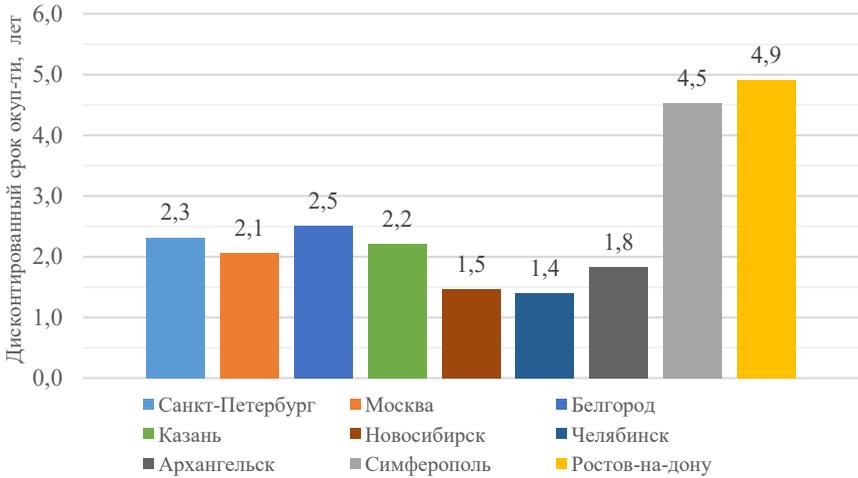


Рисунок 18 – Дисконтированный срок окупаемости системы рекуперации теплоты дымовых газов

Так, для регионов с холодным и умеренно-холодным климатом, сроки окупаемости колеблются в пределах 1,5 – 2 лет. Для южных регионов с теплым климатом сроки окупаемости увеличивается до 5 лет.

На основе предложенного методического подхода, рассчитана стоимость 1 Гкал выработанной тепловой энергии системой рекуперации теплоты дымовых газов, системой на основе газового котла и получаемой из коммунальной сети города для различных регионов Российской Федерации. На рисунке 19 приведена зависимость для г. Белгород.

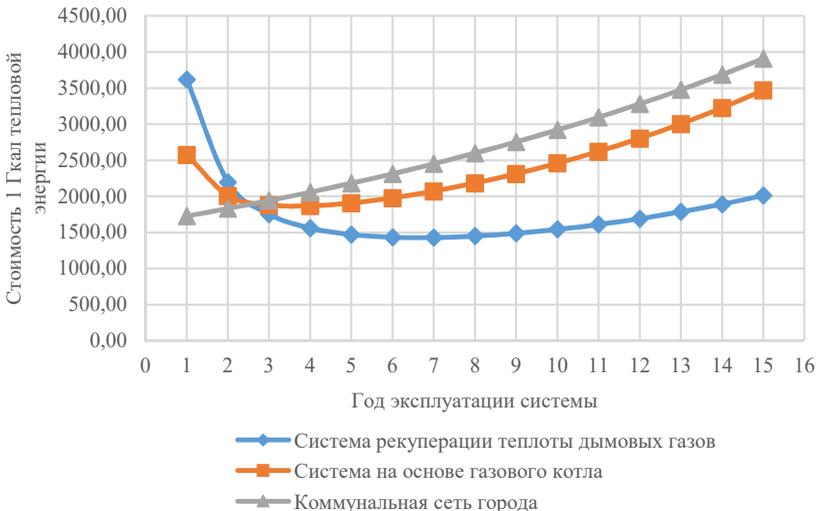


Рисунок 19 – Сравнение стоимости 1 Гкал тепловой энергии

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Итоги выполненного исследования

1. Численным моделированием различных конструкций рекуператоров получены аэродинамические, гидродинамические, теплотехнические характеристики их работы в условиях естественной тяги коллективного дымохода.

2. В результате анализа итогов численного моделирования предложена новая конструкция рекуператора теплоты дымовых газов при работе в условиях естественной тяги коллективного дымохода (ППМ РФ №158256).

3. По результатам экспериментальных исследований получена регрессионная зависимость потерь давления дымовыми газами в рекуператоре предложенной конструкции (ППМ №158256) от массового расхода дымовых газов системы коллективного дымоудаления и площади компенсационного отверстия внутреннего конуса кожуха рекуператора.

4. Уточнен коэффициент аэродинамического сопротивления для рекуператора дымовых газов с учетом конструктивных отличий предлагаемой конструкции.

5. Получено уравнение и создана графоаналитическая методика определения коэффициента аэродинамического сопротивления рекуператора системы коллективного дымоудаления в условиях естественной тяги дымохода.

6. Установлена регрессионная зависимость результирующей температуры нагреваемого теплоносителя после рекуперации от массового расхода и температуры дымовых газов системы коллективного дымоудаления, анализ которой показал, что рост температуры теплоносителя ограничивается с увеличением массового расхода дымовых газов, что позволяет определить наиболее рациональное соответствие температуре дымовых газов его массовому расходу для получения максимальной температуры нагреваемого теплоносителя.

7. Уточнена методика инженерного подбора рекуператора теплоты дымовых газов коллективного дымохода в условиях естественной тяги, позволяющая определить аэродинамические и термодинамические параметры рекуператора и выбрать наиболее эффективный вариант компоновки системы рекуперации тепла дымовых газов.

8. Предложен методический подход к определению экономической эффективности внедрения системы рекуперации теплоты дымовых газов с естественной тягой для различных регионов Российской Федерации, который позволяет определить все виды затрат на систему, дисконтированный и простой сроки окупаемости системы, коэффициент экономической эффективности, коэффициент интенсивности использования системы, стоимость 1 Гкал выработанной тепловой энергии системой.

9. Техническое решение по рекуперации теплоты дымовых газов, уточненная методика подбора рекуператора и методический подход к определению экономической эффективности внедрения системы

рекуперации теплоты дымовых газов апробированы на предприятиях Республики Крым и **внедрены** в практику проектирования и монтажа систем отопления и вентиляции ООО «Кирамет», ООО «Ти-М-Си Крым». Результаты теоретических и экспериментальных исследований диссертационной работы **рекомендуются** для внедрения жилищно-эксплуатационным организациям и управляющим компаниям на объектах с системами коллективного дымоудаления.

**Перспективы дальнейших исследований** направлены на повышение интенсивности теплообмена рекуператора при снижении аэродинамического сопротивления, выявление закономерностей отношений коэффициента теплопередачи к коэффициенту аэродинамического сопротивления при изменении геометрических характеристик рекуператора, а также использование предложенного рекуператора в технологических процессах на объектах промышленности.

## **ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ**

*Статьи в журналах, входящих в перечень научных изданий,  
рекомендованных ВАК РФ*

1. **Зайцев, О.Н.** Низкотемпературные системы отопления жилых зданий / О.Н. Зайцев, **И.П. Ангелюк** // Строительство и техногенная безопасность. – 2011. – №37. – С. 118-122.

2. **Зайцев, О.Н.** Использование тепла канализационных стоков на нужды отопления жилых зданий / О.Н. Зайцев, **И.П. Ангелюк**, А.М. Верламов // Строительство и техногенная безопасность. – 2011. – №40. – С. 145-148.

3. **Ангелюк, И.П.** Утилизация теплоты отходящих дымовых газов бытовых котлов / И.П. Ангелюк // Строительство и техногенная безопасность. – 2016. – №5(57). – С. 32-33.

4. **Зайцев, О.Н.** Конусно-спиральный рекуператор теплоты отходящих дымовых газов бытовых котлов / О.Н. Зайцев, **И.П. Ангелюк**, Н.А. Степанцова // Строительство и техногенная безопасность. – 2018. – №13(65). – С. 159-161.

5. **Зайцев, О.Н.** Техничко-экономическое обоснование использования системы рекуперации теплоты дымовых газов / О.Н. Зайцев, **И.П. Ангелюк** // Строительство и техногенная безопасность. – 2019. – №16(68). – С. 99-104.

*Статья в издании, индексируемом в базе данных Scopus*

6. **Zaycev, O.N.** Experimental study of the aerodynamic resistance of a conical-spiral heat exchanger of the outgoing flue gases / O.N. Zaycev, **I.P. Angeluck**, S.S. Toporen // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – №698 – 055033.

*Статьи в сборниках трудов конференций*

7. **Ангелюк, И.П.** Теплоисточники низкотемпературных систем отопления жилых зданий / И.П. Ангелюк // Сборник тезисов докладов: международной научно-практической конференции молодых ученых и

студентов «Современные экологически безопасные и энергосберегающие технологии в природопользовании». – Киев: Изд-во КНУСА, 2011. – Часть.1. – С. 171-174.

8. **Ангелюк, И.П.** Модернизация системы отопления на основе установки рекуперации тепла [Электронный ресурс] / И.П. Ангелюк // Сборник тезисов докладов III научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов, студентов и молодых ученых «Дни науки КФУ им. В.И. Вернадского». – Симферополь: Изд-во КФУ им. В.И. Вернадского, 2017. – Том.2. – С. 198-199. – Режим доступа: <http://science.cfuv.ru/wp-content/uploads/2017/11/ACA.pdf>.

9. **Зайцев, О.Н.** Рекуперация теплоты дымовых газов коллективного дымохода в жилых многоквартирных зданиях [Электронный ресурс] / О.Н. Зайцев, **И.П. Ангелюк** // Сборник тезисов докладов участников V научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов, студентов и молодых ученых «Дни науки КФУ им. В.И. Вернадского». – Симферополь: Изд-во КФУ им. В.И. Вернадского, 2019. – С. 129-130. – Режим доступа: [https://science-days.cfuv.ru/sites/default/files/2019-12/Тезисы\\_АСиА\\_12\\_12.pdf](https://science-days.cfuv.ru/sites/default/files/2019-12/Тезисы_АСиА_12_12.pdf).

10. **Зайцев, О.Н.** Экспериментальное исследование термодинамических характеристик рекуператора теплоты дымовых газов коллективного дымохода / О.Н. Зайцев, **И.П. Ангелюк**, С.А. Егоров // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, Инженерно-строительный институт. – СПб.: Изд-во СПбПУ, 2019. – С. 31-33.

*Объекты интеллектуальной собственности*

11. Патент РФ № 158256. МПК51 F24H 1/00 (2006.01) Конусный теплоутилизатор дымовых газов бытовых котлов / **Ангелюк И.П.** // № 2015103325/06; заявл. 02.02.2015; опубл. 27.12.2015, Бюл. №36. 2 с.

## **АНГЕЛЮК ИЛЬЯ ПАВЛОВИЧ**

### **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ НА ОСНОВЕ РЕКУПЕРАТИВНЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ**

**Специальность 05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция,  
кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

Подписано в печать 12.02.2021 г.

Формат 60x84/16

Усл. печ. л. 1,4

Тираж 120

Заказ №

Отпечатано в БГТУ им. В.Г. Шухова  
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46