

На правах рукописи



ГУБАРЕВ АНТОН ЮРЬЕВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ВРАЩАЮЩИХСЯ
РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛОВ ТЭС**

**05.14.14 - Тепловые электрические станции,
их энергетические системы и агрегаты**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново 2017

Работа выполнена на кафедре «Тепловые электрические станции» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор **Кудинов Анатолий Александрович**

Официальные оппоненты:

Печенегов Юрий Яковлевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина», профессор кафедры «Промышленная теплотехника»

Ледуховский Григорий Васильевич, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доцент кафедры «Тепловые электрические станции»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань.

Защита состоится « 3 » марта 2017 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Учёный совет ИГЭУ. Тел.: (4932) 38-57-12, 26-98-61, факс: (4932) 38-57-01. E-mail: uch_sovet@ispu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета.

Текст диссертации размещен http://ispu.ru/files/Dissertaciya_Gubarev_A.Yu_.pdf

Автореферат размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.064.01
доктор технических наук, доцент



Бушуев Евгений Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ*

Актуальность работы. Основными теплообменными аппаратами, используемыми в отечественной и зарубежной энергетике для подогрева дутьевого воздуха энергетических котлов, являются вращающиеся регенеративные воздухоподогреватели (РВП). Однако существующие модели вращающихся РВП имеют низкую эффективность вследствие малых значений коэффициентов теплоотдачи как от газов к теплообменной поверхности, так и от поверхности к воздуху, что обуславливает большие габариты и массу. Кроме того, при работе вращающихся РВП возникают значительные перетоки воздуха через уплотнения ротора (набивки), что приводит к повышенному расходу дутьевого воздуха и к увеличению затрат электроэнергии на привод дутьевых вентиляторов и дымососов. С целью уменьшения габаритов и массы вращающихся РВП необходимо интенсифицировать процессы теплообмена, протекающие внутри набивок. При этом экономия материалов достигается не только за счет уменьшения габаритов теплообменников, но и за счет повышения их компактности.

Учитывая изложенное, совершенствование конструкций вращающихся регенеративных воздухоподогревателей энергетических котлов ТЭС путем интенсификации процессов теплообмена является актуальной задачей и представляет практический интерес.

Актуальность темы диссертации подтверждается ее соответствием приоритетному направлению развития науки, технологии и техники в Российской Федерации «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика» (указ Президента РФ № 899 от 07.07.2011), критической технологии «Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе».

Диссертационная работа выполнена в рамках госбюджетной НИР кафедры ТЭС «Анализ и совершенствование тепломеханического оборудования ТЭС и систем теплоснабжения» и по договору № 386/12 (7600-FA 054/02-014/0017-2012) «Испытание тепловой изоляции и составление паспорта тепловой изоляции энергетического котла ТГМ-84 ст. № 5 и паровой турбины ПТ-60-130/13 ст. № 5 НК ТЭЦ-2».

Степень разработанности темы. К настоящему времени изучены процессы теплообмена во вращающихся РВП цилиндрической формы, разработаны соответствующие методики расчетов; однако опубликованные данные не позволяют моделировать изменение параметров процессов теплообмена по высоте набивки воздухоподогревателя. Для обоснования эффективности применения на практике новых конструкций регенеративных воздухоподогревателей требуются инженерные методики тепловых и аэродинамических расчетов и математические модели процессов теплообмена, позволяющие рассчитывать параметры в произвольном сечении набивки вращающегося РВП. Более глубоко исследованы процессы интенсификации теплообмена в набивках РВП, однако отсутствуют данные, характеризующие эффективность работы различных теплообменных поверхностей, применяемых в современных вращающихся регенеративных воздухоподогревателях.

*) В руководстве работой принимала участие к.т.н., доцент Зиганшина С.К.

Цель работы – повышение эффективности работы энергетических котлов тепловых электростанций путем совершенствования конструкций вращающихся регенеративных воздухоподогревателей и их поверхностей нагрева на основе разработки методик теплового и аэродинамического расчетов и математических моделей новых конструкций воздухоподогревателей.

Задачи работы. Поставленная цель работы достигается последовательным решением следующих задач:

- обследование и анализ работы вращающихся регенеративных воздухоподогревателей энергетических котлов БКЗ-420-140 НГМ ст. № 3, ст. № 5 Самарской ТЭЦ;

- разработка перспективных конструкций вращающихся РВП в форме прямого усеченного конуса и двухпоточного двухходового регенеративного воздухоподогревателя, позволяющих повысить эффективность работы воздухоподогревателей и энергетических котлов ТЭС;

- разработка математических моделей, описывающих процессы теплообмена на поверхностях нагрева предлагаемых конструкций РВП, и программ теплового и аэродинамического расчетов на ЭВМ новых перспективных конструкций вращающихся РВП;

- исследование процессов теплообмена во вращающемся регенеративном воздухоподогревателе в форме прямого усеченного конуса и в двухпоточном двухходовом регенеративном воздухоподогревателе;

- экономическое обоснование применения предлагаемых перспективных конструкций вращающихся РВП в форме прямого усеченного конуса и двухпоточного двухходового воздухоподогревателя;

- разработка перспективных конструкций теплообменных поверхностей вращающихся РВП энергетических котлов.

Научная новизна.

1. Разработаны математические модели вращающихся регенеративных воздухоподогревателей энергетических котлов, позволяющие учитывать изменение температур теплоносителей и коэффициентов теплоотдачи по высоте их набивок.

2. Предложены математические модели и основанные на них методики теплового и аэродинамического расчетов вращающихся РВП в форме прямого усеченного конуса и двухпоточного двухходового РВП, использованные для научного обоснования эффективности применения новых конструкций РВП.

3. На основе численного исследования обоснована возможность повышения интенсивности теплообмена в набивках вращающихся регенеративных воздухоподогревателей энергетических котлов; получены новые данные, характеризующие эффективность работы различных теплообменных поверхностей, применяемых в современных вращающихся РВП.

Методы исследования. Экспериментальные и расчетно-теоретические методы, базирующиеся на фундаментальных основах гидрогазодинамики и тепломассообмена, численных методах решения систем дифференциальных уравнений при помощи самостоятельно разработанных автором методик, алгоритмов и программы

для ЭВМ, применения специализированных программных комплексов для гидродинамического и теплового компьютерного моделирования.

Теоретическая значимость работы.

Предложенные математические модели позволяют определять температуры потоков дымовых газов и воздуха, а также коэффициенты теплоотдачи по высоте набивки, а не средние значения, как с использованием существующих методик. Кроме того, существующие методики теплового и аэродинамического расчетов не позволяли выполнить расчет для вращающихся РВП сложной формы, такой как усеченный конус и двухпоточной двухходовой. С разработкой новой методики, учитывающей параметры форм перспективных конструкций вращающихся РВП, появляется возможность проведения конструкторских и поверочных тепловых и аэродинамических расчетов таких подогревателей.

Представленные в работе численные исследования позволили количественно установить влияние конструктивных особенностей поверхностей нагрева на показатели эффективности теплообмена поверхностей нагрева, применяемых в современных вращающихся РВП.

Практическая значимость работы.

1. Предложенные математические модели и методики реализованы в виде программы для ЭВМ (Свид. о гос. рег. № 2015661549 (RU)) теплового и аэродинамического расчета, которые могут быть использованы для анализа эффективности работы действующих вращающихся РВП и определения основных геометрических и тепло-технических параметров новых конструкций вращающихся РВП.

2. По результатам исследования разработаны конструкции вращающихся регенеративных воздухоподогревателей в форме прямого усеченного конуса и двухпоточного двухходового РВП, предназначенные для подогрева дутьевого воздуха энергетических котлов ТЭС и обеспечивающие, в сравнении с существующими конструкциями РВП, повышение эффективности использования теплоты и уменьшение эксплуатационных и ремонтных затрат.

Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов работы обеспечивается: комплексным подходом и полнотой экспериментальных исследований, проведенных в условиях промышленной эксплуатации ТЭС; применением апробированных методов математического моделирования и сертифицированного программного обеспечения; сходимостью результатов теоретических исследований с результатами других авторов; разработанные математические модели и методы расчетов не противоречат законам сохранения массы и энергии и согласуются с экспериментальными данными, полученными на Самарской ТЭЦ и Новокуйбышевской ТЭЦ-2.

Реализация результатов работы. Результаты исследований по совершенствованию вращающихся РВП приняты к использованию на Новокуйбышевской ТЭЦ-2, разработанные математические модели и программы расчета на ЭВМ внедрены в учебный процесс на кафедре «Тепловые электрические станции» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Конструкция вращающегося РВП в форме прямого усеченного конуса, методика, математическая модель и программа теплового и аэродинамического расчетов, результаты численных экспериментов.

2. Программы конструктивного и поверочного теплового и аэродинамического расчетов вращающихся РВП, позволяющие определять основные геометрические и теплотехнические параметры и проводить анализ их работы.

3. Конструкция двухпоточного двухходового вращающегося РВП, методика, математическая модель программа теплового и аэродинамического расчетов, результаты численных экспериментов.

4. Конструкции теплообменных поверхностей, применяемых во вращающихся РВП энергетических котлов, результаты численных экспериментов.

Личный вклад автора в получение результатов работы заключается в постановке задач исследования, разработке и обосновании принципов новых технических решений и методик расчета, непосредственном участии в проведении натурных испытаний теплоутилизационного оборудования и энергетических котлов и обработке опытных данных, проведении численных расчетов, обработке, анализе и обобщении полученных результатов, выработке практических рекомендаций и внедрении результатов исследований.

Соответствие паспорту специальности. Тема диссертации, ее содержание, положения, выносимые на защиту, соответствуют паспорту специальности научных работников 05.14.14 «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты» в части формулы специальности – «работа по совершенствованию действующих и обоснованию новых типов и конструкций основного и вспомогательного оборудования тепловых электрических станций»; в части области исследования: пункту 1: «Разработка научных основ методов расчета, выбора и оптимизации параметров, показателей качества и режимов работы агрегатов, систем и тепловых электростанций в целом»; пункту 2: «Исследование и математическое моделирование процессов, протекающих в агрегатах, системах и общем цикле тепловых электростанций»; пункту 4: «Разработка конструкций теплового и вспомогательного оборудования и компьютерных технологий их проектирования и диагностирования».

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск, 2010, 2012, 2013, 2014 гг.); Международной молодежной научной конференции «XIX Туполевские чтения» (г. Казань, 2011 г.); Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (г. Иваново, 2011 г.); XVIII, XIX Международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2012, 2013 гг.); Международной научной конференции «Современные научно-технические проблемы теплоэнергетики и их пути решения» (г. Саратов, 2012 г.); XVI Международной научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности» (г. Ульяновск, 2013 г.); VIII Международной молодежной научной конфе-

ренции «Гинчуриные чтения» (г. Казань, 2013 г.); XII Международной научно-технической конференции «Современные научно-технические проблемы теплоэнергетики. Пути решения» (г. Саратов 2014, 2016 гг.).

Публикации. Основные положения и результаты диссертационного исследования опубликованы в 20 печатных работах, в том числе 5 работ в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки России, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов по работе, списка литературы из 156 наименований и шести Приложений. Работа изложена на 187 страницах машинописного текста, включает 80 рисунков и 20 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, приведены научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Перечислены основные положения, выносимые на защиту, и представлен перечень научно-технических конференций, на которых докладывались и обсуждались результаты исследований. Показан личный вклад автора работы, обоснована теоретическая значимость результатов исследований, представлены сведения о внедрении результатов исследований.

В первой главе представлен анализ современного состояния проблемы в области повышения эффективности вращающихся РВП.

Приведены основные типы конструкций воздухоподогревателей и поверхностей теплообмена, дана характеристика конструктивным особенностям вращающихся РВП, перечислены их основные недостатки. Вопросами совершенствования конструкций и теплообменных поверхностей вращающихся РВП энергетических котлов занимались многие ученые: Боткачик И.А., Зройчиков Н.А., Серебрянников И.И., Зарянкин А.Е., Надыров И.И., Локшин В.А., Мигай В.К., Кирсанов Ю.А., Коротов Е.И., Низамова А.Ш., Кудинов А.А., Зиганшина С.К., Стефанюк С.А. и другие. Несмотря на это, некоторые вопросы, связанные с оптимизацией конструкций и теплообменных поверхностей вращающихся РВП, не решены. В частности, существующие исследования по совершенствованию конструкций вращающихся РВП не в полной степени раскрыли потенциал повышения эффективности работы вращающихся РВП. Результаты экспериментальных исследований процессов теплообмена в существующих типах теплообменных набивок показывают их низкую тепловую эффективность, что вызывает необходимость проведения исследований по распределению коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи по высоте набивки и коэффициентов теплоотдачи по поверхностям дистанционирующих листов

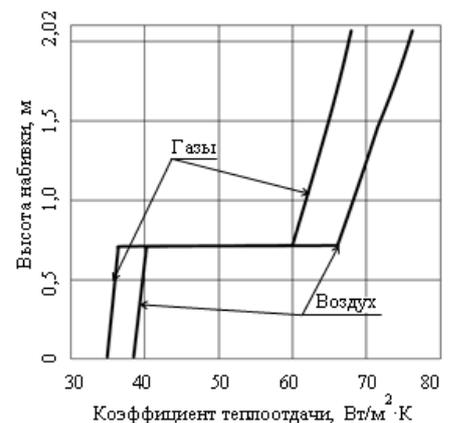


Рис. 1. Распределение коэффициентов теплоотдачи в РВП-54 цилиндрической формы

На основании проведенного анализа научных работ проведена конкретизация задач диссертационного исследования.

Во второй главе «Исследование режимов работы вращающихся РВП и разработка методик расчетов» представлены результаты экспериментального обследования энергетических котлов ст. №№ 3, 5 БКЗ-420-140 НГМ Самарской ТЭЦ, снабженных регенеративными воздухоподогревателями типа РВП-54, приведены методика, математические модели и программы конструктивного и поверочного расчетов вращающихся РВП. Приведены результаты вариантных расчетов режимов работы РВП-54 цилиндрической формы.

В основе существующей методики конструктивного теплового расчета вращающегося регенеративного воздухоподогревателя используется критериальное уравнение типа:

$$Nu = A \cdot Re^n \cdot Pr^m \cdot C_t \cdot C_l, \quad (1)$$

где A – коэффициент, зависящий от типа набивки; n , m – степени влияния критериев Рейнольдса Re и Прандтля Pr на интенсивность теплообмена; C_l – поправка на относительную длину канала; C_t – поправка, учитывающая влияние температурного фактора.

Разработанная методика поверочного теплового расчета вращающегося регенеративного воздухоподогревателя, основана так же на решении критериального уравнения типа (1) и позволяет получить данные о параметрах теплоносителей и характеристиках теплообмена по высоте набивки РВП, проанализировать работу воздухоподогревателя в целом.

Выполнение тепловых расчетов осуществляется путем последовательных приближений, в связи с чем, были разработаны математические модели и программы конструктивного и поверочного расчетов.

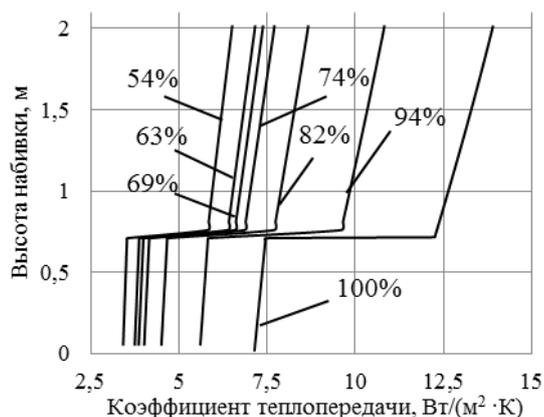


Рис. 2. Распределение коэффициентов теплопередачи в РВП-54 по высоте набивки на переменных режимах работы

Суть модели заключается в задании прироста температуры одного из потоков теплоносителей с последующим тепловым расчетом расчетного элемента набивки вращающегося РВП. Далее после операции сравнения рассчитанной площади теплообмена с фактической происходит начало следующей итерации или окончание расчета с выводом результатов. Подобный подход позволяет получать результаты расчета по всей высоте набивки по мере нагревания (остывания) потоков теплоносителей.

С помощью математических моделей и программ теплового и аэродинамического расчетов были смоделированы фактические режимы работы регенеративных воздухоподогревателей РВП-54 цилиндрической формы, установленных на котлоагрегатах ст. №№ 3, 5 БКЗ-420-140 НГМ Самарской ТЭЦ, и получены результаты, характеризующие процессы теплообмена в набивке, построен график распределения

коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи по высоте набивки воздухоподогревателя (рис. 1, 2). На рис. 2 представлены графики распределения коэффициентов теплопередачи по высоте набивки РВП-54 на переменных режимах работы котлоагрегата, где расход перегретого пара котлоагрегата указан в процентах от номинальной паропроизводительности $D_{пе} = 420$ т/ч.

Анализ результатов расчетов показывает, что для РВП-54 цилиндрической формы числовые значения коэффициентов теплоотдачи от продуктов сгорания к теплообменной поверхности по мере охлаждения газов снижаются на 13%, а по воздуху – на 15%. Снижение эффективности процессов теплообмена объясняется уменьшением скорости движения продуктов сгорания в каналах теплообменных поверхностей по мере охлаждения газов и уменьшения их удельного объема.

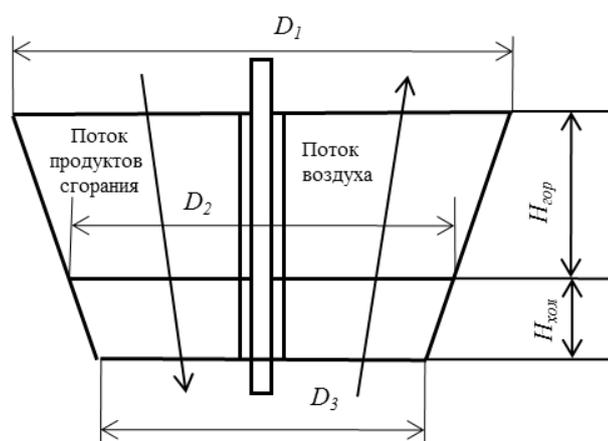


Рис. 3. Схема однопоточного РВП с набивкой в форме усеченного конуса

проходные сечения для потоков теплоносителей изменялись пропорционально изменению их удельных объемов.

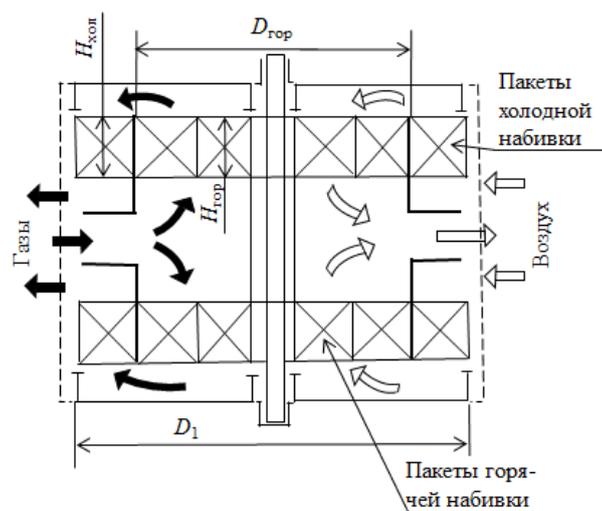


Рис. 4. Схема двухпоточного двухходового РВП

бивки.

При использовании существующей методики теплового расчета вращающихся РВП требуется задание граничных условий на входе потоков теплоносителей в РВП

В третьей главе «Разработка перспективных конструкций вращающихся РВП» представлены схемы конструкций вращающихся РВП, разработанные на кафедре ТЭС СамГТУ (патенты на изобретения РФ №№ 2241907, 2269062): вращающегося РВП в форме усеченного конуса (рис. 3); двухпоточного двухходового вращающегося РВП (рис. 4).

Для сохранения максимальных значений коэффициентов теплоотдачи по высоте теплообменной поверхности набивка РВП выполняется таким образом, чтобы

Отличительной особенностью вращающегося регенеративного воздухоподогревателя в форме прямого усеченного конуса является переменная площадь проходного сечения набивки по высоте. Параметром, характеризующим уменьшение диаметров и проходных сечений, является конусность. Для теплового расчета вращающегося РВП в форме усеченного конуса разработана методика, учитывающая влияние конусности холодной и горячей частей ротора. Методика основана на критериальном уравнении типа (1), характеризующим процесс теплообмена для определенного типа теплообменной на-

и на выходе из него. При этом параметры по высоте набивки усредняются, и зависимость становится линейной. Для повышения точности вычислений и для получения более подробного описания тепловых процессов, протекающих внутри набивки РВП, предлагается выполнять разделение теплообменной поверхности по высоте на расчетные элементы.

Расчетным элементом является объем набивки высотой Δh , в котором происходит малое изменение температур потоков воздуха Δt_B и продуктов сгорания Δt_r . Количество итераций зависит от количества расчетных элементов и от величины $\Delta t_r = t_{n-1}^r - t_n^r$ и чем меньше эта величина, тем более точно определяются зависимости основных параметров процессов теплообмена по высоте набивки вращающегося РВП. Математическая модель описания процессов теплообмена в расчетном элементе малой высоты dh в каналах набивки вращающихся РВП представляется системой дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} dh &= \frac{G_r \cdot c_r(t_r)}{k(t_r, t_B) \cdot (t_r - t_B) F_1} dt ; \\ dh &= \frac{G_B \cdot c_B(t_B)}{k(t_r, t_B) \cdot (t_r - t_B) F_1} dt , \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где G_B, G_r – расходы воздуха и газов, c_B, c_r – теплоемкости воздуха и газов, t_B, t_r – температура воздуха и газов, k – коэффициент теплопередачи, F_1 – поверхность нагрева, заключенная в слое набивки высотой, равной 1 м.

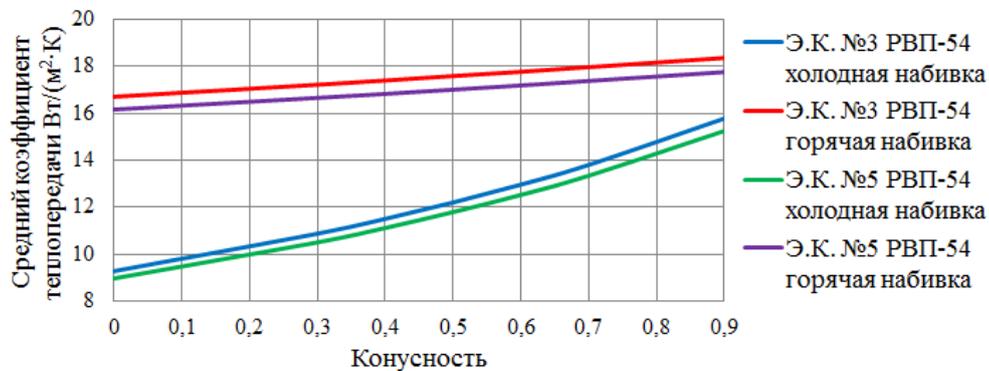


Рис. 5. Зависимость среднего коэффициента теплопередачи от величины конусности набивки

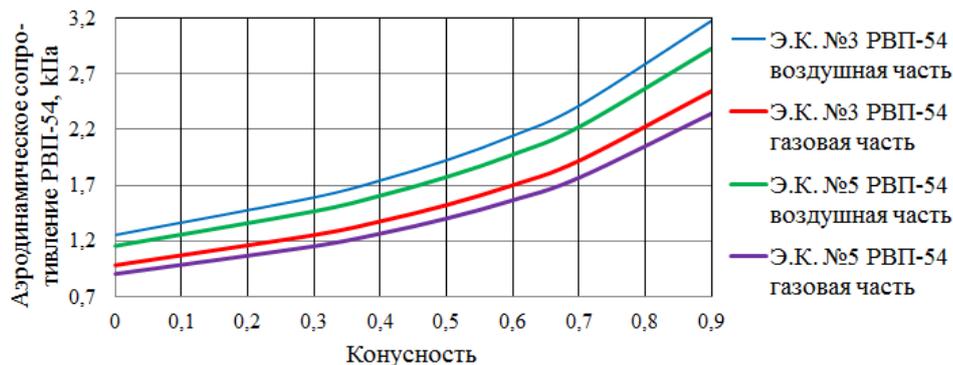


Рис. 6. Зависимость аэродинамического сопротивления от величины конусности набивки

Для автоматизации итеративных вычислений разработаны математическая модель и программа теплового и аэродинамического расчетов вращающегося РВП в форме усеченного конуса. Математическая модель и методика расчетов позволяют определять конусность холодной и горячей частей ротора РВП.

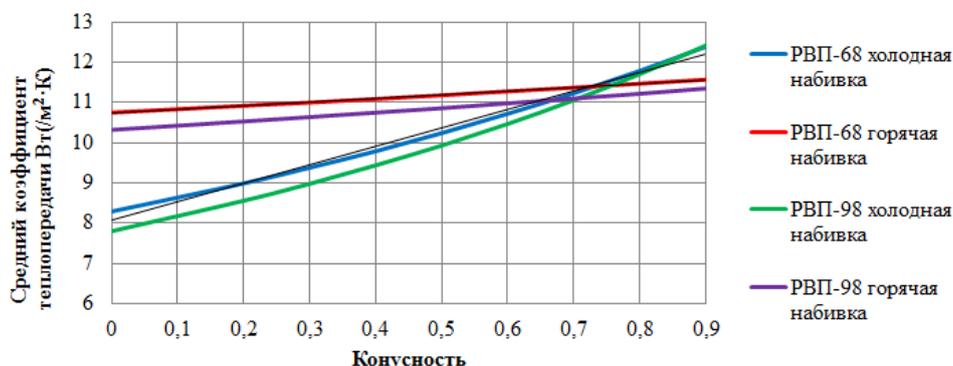


Рис. 7. Зависимость среднего коэффициента теплопередачи от величины конусности набивки

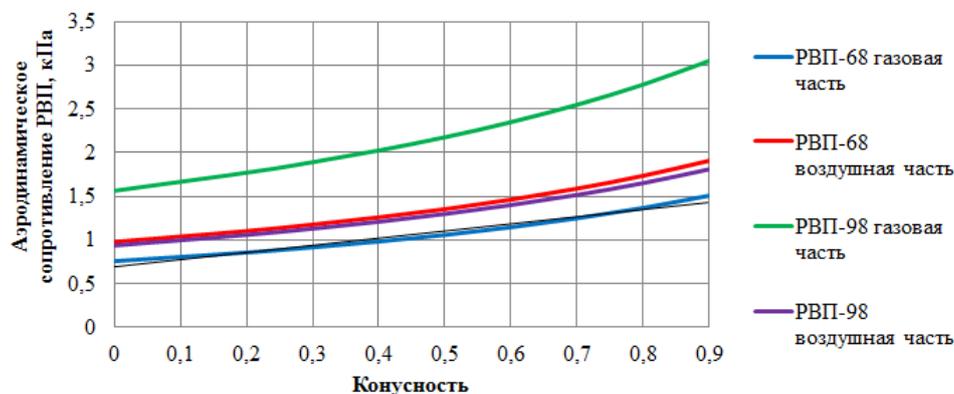


Рис. 8. Зависимость аэродинамического сопротивления вращающегося РВП от величины конусности набивки

Согласно модели в начале выполнения алгоритма необходимо задать значения конусностей горячей и холодной набивок $K_{гор}$, $K_{хол}$. Затем осуществляется разбиение холодной набивки прототипа по высоте на m расчетных элементов с определением диаметров и площадей проходных сечений первого расчетного элемента. Расчет теплового баланса расчетного элемента начинается с задания малого приращения температуры воздуха Δt . После операторов расчета теплового баланса следуют циклические операции, решение которых приводит к оператору по расчету площади поверхности нагрева и высоты набивки в расчетном элементе. Для каждого расчетного элемента все результаты расчета заносятся в массив результатов.

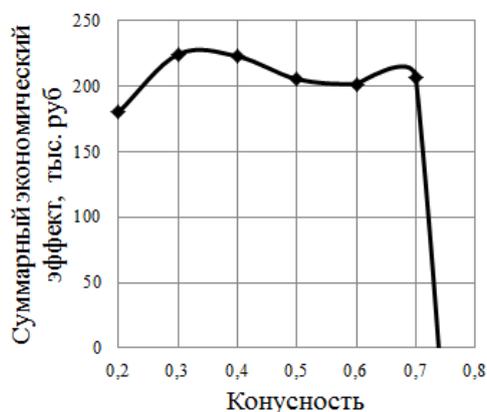


Рис. 9. Зависимость суммарного экономического эффекта от конусности набивки РВП

Выполнены вариантные расчеты. По результатам исследований влияния конусности на эффективность процессов теплообмена (рис. 5) и величину аэродинамического сопротивления

(рис. 6), а также технико-экономических расчетов построен график зависимости суммарного экономического эффекта от конусности. Определены оптимальные значения конусностей холодной и горячей частей набивки на примере РВП-54 энергетических котлов ст. № 3, 5 БКЗ-420-140 НГМ Самарской ТЭЦ (рис. 9). Кроме того, проанализировано влияние увеличения значения конусности на работу вращающихся РВП -68 и РВП-98 (рис. 7, 8)

На рис. 10 представлены графики распределения коэффициентов теплоотдачи в набивках РВП-54 цилиндрической формы и РВП-54 в форме усеченного конуса. При равном количестве теплоты, воспринимаемом воздухом, для РВП в форме усеченного конуса интенсивность теплообмена по сравнению со стандартным РВП возрастает в 1,47 раза в холодной части набивки и в 1,11 раза в ее горячей части. В среднем теплопередача от газов к воздуху для РВП в форме усеченного конуса возрастает в 1,23 раза. Данные о снижении массы набивки для различных моделей РВП представлены в таблице 1. Установлено, что для вращающегося РВП в форме усеченного конуса аэродинамическое сопротивление набивки возрастает не более чем на 20% (в зависимости от нагрузки котла), при условии использования традиционной конструкции набивки, состоящей из стальных дистанционирующих листов.

Таблица 1. Данные о снижении массы набивки

Наименование параметра	Единица измерения	РВП-54		РВП-68		РВП-98	
		Цилиндр	Конус	Цилиндр	Конус	Цилиндр	Конус
Средняя скорость движения дымовых газов	м/с	7,82	8,23	9,81	10,1	10,97	11,39
Средняя скорость движения воздуха	м/с	8,62	9,08	11,07	11,41	8,4	8,72
Аэродинамическое сопротивление	Па	1370	1566	1739	2095	2503	3023
Масса набивки	т	66,6	61,03	155,2	147,19	350	333,12
Снижение массы набивки	т	5,57		8,01		16,88	

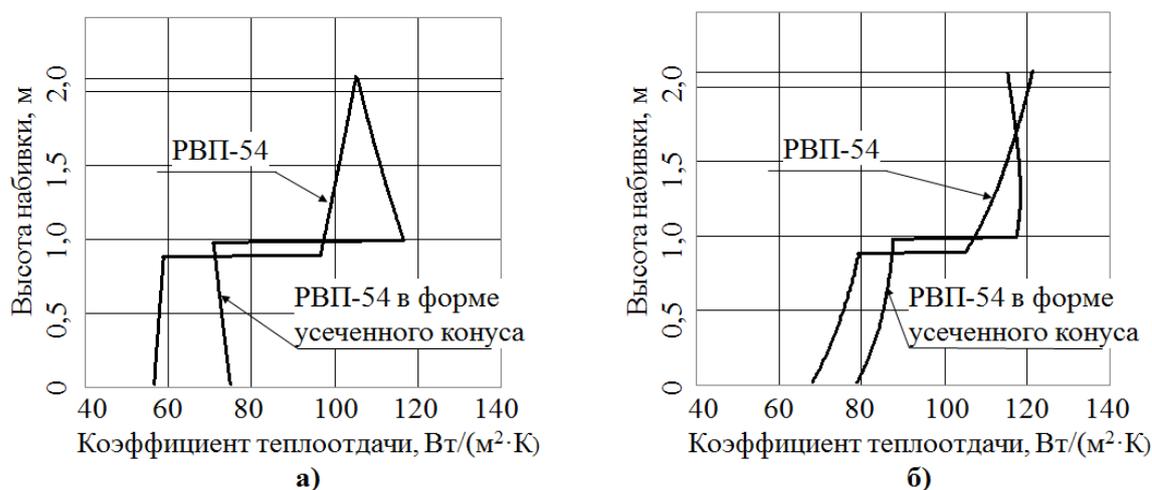


Рис. 10. Распределение коэффициентов теплоотдачи от уходящих газов к теплообменной поверхности (а) и от теплообменной поверхности к воздуху (б)

Повышенная величина перетоков воздуха через уплотнения ротора вращающегося РВП приводит к излишним расходам воздуха, подаваемым дутьевыми вентиля-

торами в газоздушный тракт котла и, соответственно, увеличению затрат электроэнергии на привод дутьевых вентиляторов и дымососов. Перетоки воздуха во вращающихся РВП являются следствием неравномерных температурных деформаций ротора, вызванных значительным изменением температур сред, проходящих по каналам теплообменных поверхностей.

Для снижения энергетических затрат предложена двухпоточная двухходовая компоновка вращающегося регенеративного воздухоподогревателя (рис. 4). Задача исследования заключалась в разработке методики теплового и аэродинамического расчетов с возможностью определения величин температурных деформаций ротора двухпоточного двухходового РВП. При разработке методики выдерживались следующие условия: новая конструкция должна обеспечивать передачу необходимого количества теплоты; площади поверхностей теплообменных набивок должны быть равны площадям прототипа; аэродинамическое сопротивление не должно быть завышенным. При этом, для уменьшения тепловых деформаций необходимо, чтобы наружный диаметр двухпоточного двухходового РВП был не больше чем у прототипа (вращающегося РВП традиционной цилиндрической формы, например РВП-54).

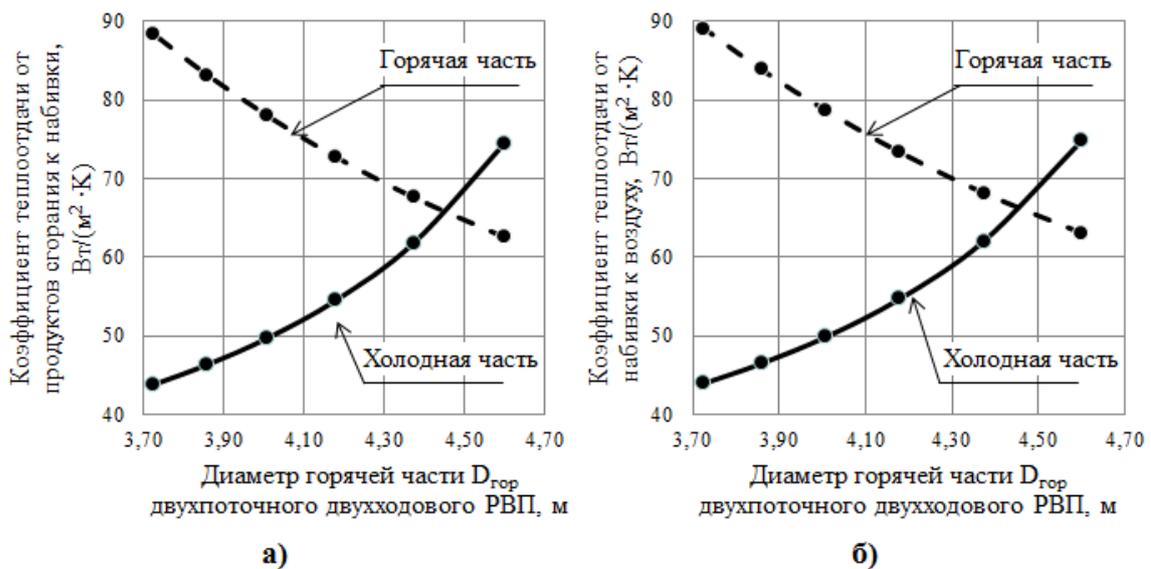


Рис. 11. Зависимость коэффициентов теплоотдачи от продуктов сгорания к набивке (а) и от набивки к воздуху (б) от диаметра горячей части двухпоточного двухходового РВП

Как и для вращающегося РВП в форме усеченного конуса, для двухпоточного двухходового РВП методика расчета основана на разбиении теплообменной поверхности на расчетные элементы с итеративным расчетом каждого элемента. Методика определения температурных деформаций основана на определении средних температур секторов ротора для каждого расчетного элемента.

После получения распределения температур по секторам в расчетном элементе, а также по высоте каждого расчетного элемента выполняется расчет температурных деформаций по формуле:

$$\Delta l = \frac{\alpha}{1000} \cdot \left(\frac{D_{гор}}{2} \cdot (t_n^r - 20) + \frac{D_1 - D_{гор}}{2} \cdot (t_n^x - 20) \right), \quad (3)$$

где α – коэффициент линейного расширения материала набивки, мм/(мм·К); t_n^r, t_n^x – температура набивки сектора соответственно горячей и холодной части ротора, °С; $D_1, D_{гор}$ – диаметры ротора, м (см. рис. 4).

Разработаны методика, математическая модель и программа теплового и аэродинамического расчетов двухпоточного двухходового РВП. Вычисления в каждом расчетном элементе выполняются последовательно с применением циклов с использованием условных операторов. Алгоритм служит для определения основных геометрических параметров, параметров процесса теплообмена и аэродинамического сопротивления двухпоточного двухходового РВП на ПЭВМ. Также разработан алгоритм расчета температурных деформаций секторов набивки для каждого расчетного элемента теплообменной поверхности ротора.

По результатам численных вариантных расчетов определены оптимальные геометрические параметры двухпоточного двухходового РВП (рис. 11). Критериями оптимизации являлись наименьшая величина аэродинамического сопротивления при достаточной величине тепловосприятости воздуха.

Рассчитаны величины температурных деформаций ротора (рис. 12) и проведена оценка снижения величины перетоков воздуха в газовую часть. Получено распределение температур потоков теплоносителей по высоте набивки (рис.13). Установлено, что применение двухпоточной двухходовой конструкции РВП позволяет снизить присосы воздуха на 0,04 (до $\Delta\alpha=0,13$), при этом коэффициент избытка воздуха в уходящих газах α_{yx} снижается с 1,21 до 1,17. Годовая экономия при оснащении одного котла БКЗ-420-140 НГМ двумя двухпоточными двухходовыми РВП, при нагрузке 80% от номинальной, составит 1678680 руб./год.

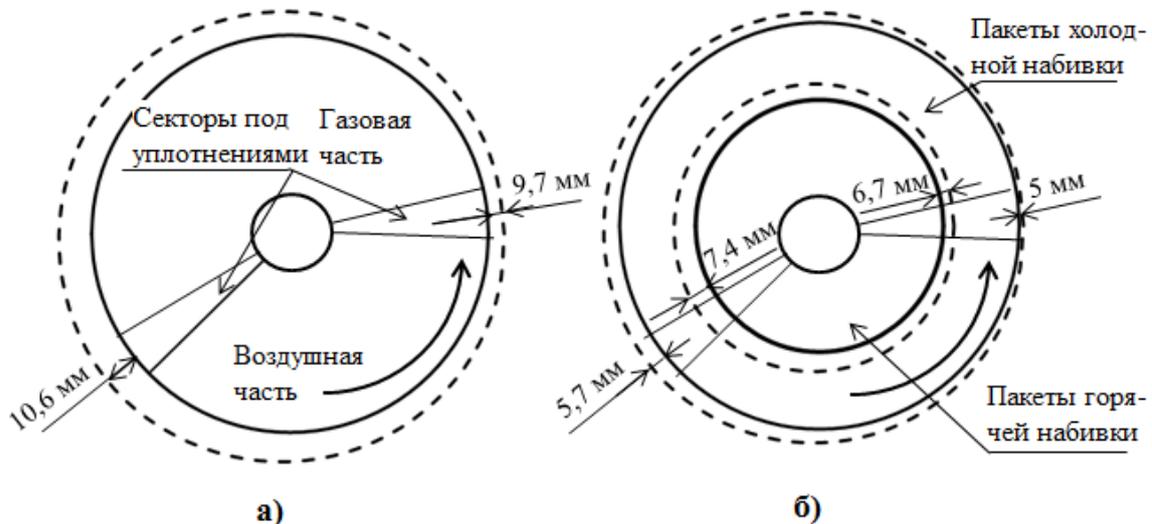


Рис. 12. Схемы температурных расширений роторов а - РВП-54, б - двухпоточного двухходового РВП

В четвертой главе «Моделирование процессов теплообмена в каналах поверхностей нагрева, применяемых во вращающихся РВП. Разработка эффективных поверхностей нагрева» диссертации представлены результаты моделирования процессов теплообмена в каналах теплообменных поверхностей, применяемых во вращающихся РВП.



Рис. 13. Распределение температур потоков в двухпоточном двухходовом РВП

Для анализа процессов теплообмена и движения потоков воздуха и продуктов сгорания в каналах, образованных листами набивки РВП, была создана модель набивки интенсифицированного профиля в программном комплексе ANSYS. После создания трехмерной модели объема воздуха, заключенного в канале набивки, следовал этап разделения на конечные элементы – построение расчетной сетки. Для получения достоверного решения задачи построена сетка, состоящая из 3,3 млн. тетраэдральных элементов, при этом для детального расчета пристенного пограничного слоя вблизи стенок набивки построено 10 инфляционных слоев. Часть расчетной сетки показана на рис. 14.

Для нахождения единственного решения системы уравнений задаются граничные условия:

- на входном сечении: $u_x = u_{x0}$, $u_y = u_{y0}$, $u_z = u_{z0}$, $t = t_0$;
- на выходном сечении: $p = p_0$;
- на стенках набивки: $u_x = u_y = u_z = 0$, $t = t_w$.

При этом, для моделирования развитого турбулентного потока, на входном сечении скорость потока воздуха задавалась в виде профиля на выходном сечении, полученного в результате предыдущего решения задачи.

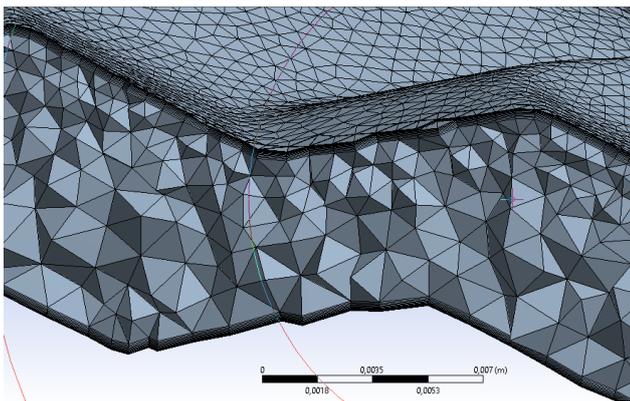


Рис. 14. Расчетная сетка

Для получения решения задачи использовалась модель турбулентности SSG Reynolds Stress. Качество сетки и достаточность количества конечных элементов оценивалось критерием y^+ , максимальное значение которого составило 1,12 при максимально допустимой величине 300.

В модели в качестве теплоносителя использовался сухой воздух. Физические свойства воздуха, зависящие от температуры (плотность, вязкость, теплоемкость), были заданы уравнениями, полученными путем полиномиальной аппроксимации табличных значений в диапазоне температур 0 - 500 °С.

На рис. 15, а представлено распределение коэффициентов теплоотдачи по поверхности дистанционирующего листа. Как видно из рисунка, максимальные значения коэффициентов теплоотдачи достигаются на «подъемах» волн, где осуществляется набегание потока воздуха на выпуклые части поверхности набивки. Именно в

Целью моделирования являлось исследование влияния конструктивных особенностей набивки (волн и гофр) на интенсивность теплообмена с последующей разработкой более эффективных теплообменных поверхностей.

Для анализа процессов теплообмена и движения потоков воздуха и продуктов сгорания в каналах, образованных листами набивки РВП, была создана модель набивки интенсифицированного профиля в программном комплексе ANSYS. После создания трехмерной модели объема воздуха, заключенного в канале набивки, следовал этап разделения на конечные элементы – построение расчетной сетки. Для получения достоверного решения задачи построена сетка, состоящая из 3,3 млн. тетраэдральных элементов, при этом для детального расчета пристенного пограничного слоя вблизи стенок набивки построено 10 инфляционных слоев. Часть расчетной сетки показана на рис. 14.

этих областях образуются зоны турбулизации потока и снижается толщина пограничного слоя, что и приводит к локальным максимумам теплосъема. Также можно отметить зоны максимальной теплоотдачи на дистанционирующей гофре в точках соприкосновения соседних листов набивки и в областях набегания потоков воздуха, направленных волной под углом в 30° на гофру.

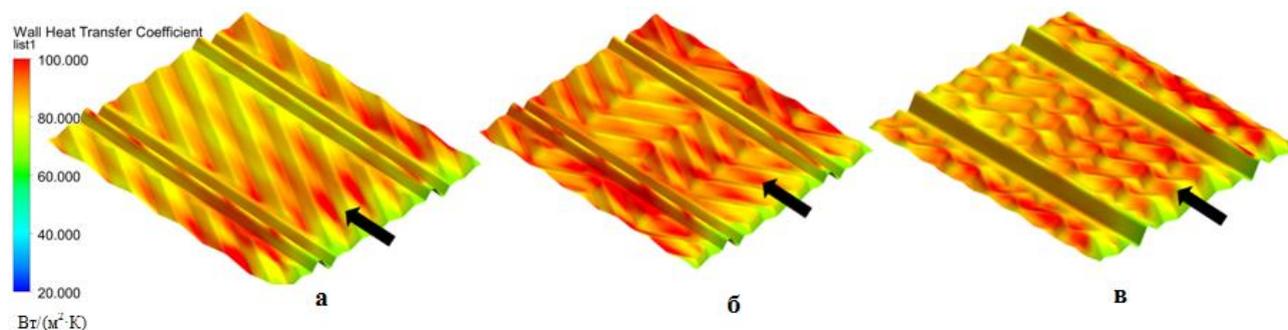


Рис. 15. Распределение коэффициентов теплоотдачи по поверхности дистанционирующего листа: а - набивка интенсифицированного профиля; б – набивка типа А; в – набивка типа Б

В диссертационной работе предлагается модернизация дистанционирующего листа набивки путем изменения форм волн, без изменения площади проходного сечения и соответственно гидравлического диаметра. Разработаны два типа набивок, отличающихся формой дистанционирующего листа (рис. 15 б, в).

Набивка типа А (рис. 15, б) отличается от набивки, применяемой в современных вращающихся РВП, тем, что по длине листов изменяется направление наклона волн по отношению к потоку, последнее приводит к дополнительной турбулизации потока, и вызывает увеличение образования зон с повышенными коэффициентами теплоотдачи.

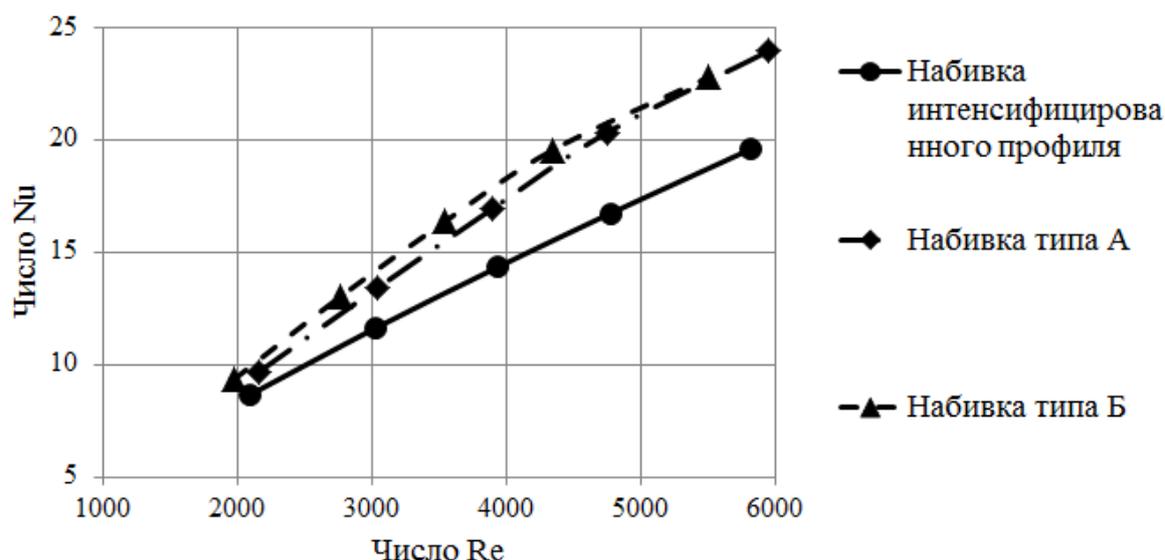


Рис. 16. Графики зависимости Nu от Re для различных типов набивок

Профиль набивки типа Б (рис. 15, в) выполнен с разным продольным шагом волн. Данное решение дополнительно повышает турбулизацию потока, а также способствует снижению аэродинамического сопротивления набивки.

Анализ результатов исследований показывает, что предложенные изменения формы дистанционирующего листа приводят к увеличению образования локальных зон повышенного теплообмена. На рис. 16 представлены графики зависимостей безразмерного коэффициента теплоотдачи Nu от критерия Re для различных типов набивок. Установлено, что коэффициенты теплоотдачи разработанных конструкций теплообменных поверхностей больше, чем у стандартной набивки на 7-20% в зависимости от значения критерия Re .

Для предлагаемых типов конструкций теплообменных поверхностей выполнены численные исследования, получены критериальные уравнения:

набивка типа А: $Nu=0,011Re^{0,906}Pr^{0,45} \cdot C_t \cdot C_l$;

набивка типа Б: $Nu=0,014Re^{0,882}Pr^{0,45} \cdot C_t \cdot C_l$.

Для набивки интенсифицированного профиля: $Nu=0,023Re^{0,800}Pr^{0,400} \cdot C_t \cdot C_l$.

Практическая реализация диссертационной работы подтверждена справкой об использовании результатов научных исследований, принятых к использованию на Новокуйбышевской ТЭЦ-2, и актом о внедрении результатов в учебный процесс на кафедре «Тепловые электрические станции» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. В диссертации проведен комплекс численных и экспериментальных исследований вращающихся РВП, который позволил разработать новые математические модели и методики расчета и обосновать с их помощью применение перспективных конструкций вращающихся РВП с целью повышения эффективности работы энергетических котлов. Проведено экспериментальное обследование энергетических котлов ст. №№ 3, 5 БКЗ-420-140 НГМ Самарской ТЭЦ, снабженных регенеративными воздухоподогревателями типа РВП-54. Составлены математические модели и программы теплового и аэродинамического расчетов с помощью ПЭВМ.

2. На основе экспериментальных данных смоделированы фактические режимы работы вращающихся РВП-54, установленных на энергетических котлах ст. №№ 3, 5 типа БКЗ-420-140 НГМ Самарской ТЭЦ. Установлено, что для РВП-54 коэффициенты теплоотдачи от продуктов сгорания к теплообменной поверхности по мере их охлаждения снижаются на 13%, а по воздуху – на 15% вследствие снижения скоростей потоков теплоносителей.

3. Для конструкции вращающегося РВП в форме усеченного конуса (патент на изобретение РФ № 2241907) разработана методика теплового и аэродинамического расчетов. Составлена математическая модель, разработана программа теплового и аэродинамического расчетов на ПЭВМ, выполнены исследования процессов теплообмена. Представлено технико-экономическое обоснование применения на практике данной конструкции вращающегося РВП. При равном количестве теплоты, воспринимаемом воздухом, для РВП в форме усеченного конуса интенсивность теплообмена по сравнению со стандартным РВП возрастает в 1,47 раза в холодной части набивки и в 1,11 раза в ее горячей части. В среднем теплопередача от газов к воздуху для РВП в

форме усеченного конуса возрастает в 1,23 раза. При этом объем набивки снижается на 8,4%, а масса на 5,57 т (с 66,6 т до 61,03 т). Для двух РВП-54, устанавливаемых за котлом БКЗ-420-140 НГМ, снижение суммарной массы набивки воздухоподогревателей составит 11,14 т.

4. Установлено, что для вращающегося РВП в форме усеченного конуса, при оптимальных значениях параметра конусности, аэродинамическое сопротивление по сравнению с РВП цилиндрической формы возрастает до 20%. При этом, данное увеличение аэродинамического сопротивления может компенсироваться установкой современных типов набивок, обладающих значительно меньшим аэродинамическим сопротивлением, таких, например, как набивка состоящая из тел ромбической формы поперечного сечения (патент на изобретение РФ № 2215963), а также набивка типа Б, предложенная в данной работе.

5. Для конструкции двухпоточного двухходового вращающегося РВП (патент на изобретение РФ № 2269062) составлена математическая модель, разработаны методика и программа его теплового и аэродинамического расчетов на ПЭВМ. Определены оптимальные геометрические параметры и проведена оценка снижения величины присосов воздуха в газовую часть РВП при уменьшении величин температурных деформаций ротора. Выполнено технико-экономическое обоснование применения на практике данной конструкции вращающегося РВП. Применение двухпоточной двухходовой конструкции РВП позволяет снизить присосы воздуха на 0,04 (до $\Delta\alpha=0,13$), при этом коэффициент избытка воздуха в уходящих газах α_{yx} снижается с 1,21 до 1,17. Годовая экономия при оснащении одного котла БКЗ-420-140 НГМ двумя двухпоточными двухходовыми РВП составит 1678680 руб./год.

6. Смоделированы процессы движения и теплообмена потоков воздуха в каналах стандартной набивки, применяемой в современных вращающихся РВП. Проанализировано влияние формы дистанционирующего листа на образование локальных зон повышенного теплосъема. Предложены две конструкции теплообменной поверхности, отличающиеся формой дистанционирующего листа.

7. Разработаны критериальные уравнения, описывающие процессы теплообмена в каналах набивок типа А и Б. Установлено, что при применении набивки типа А в горячей части ротора РВП-54 площадь поверхности теплообмена уменьшается на 10,23%, аэродинамическое сопротивление повышается на 2%. Для набивки типа Б в горячей части ротора площадь поверхности теплообмена уменьшается на 14,08%, а аэродинамическое сопротивление снижается на 37,4%. При этом интенсивность процессов теплообмена в предложенных конструкциях поверхностей теплообмена возрастает на 20% по сравнению с набивкой интенсифицированного профиля.

8. Результаты диссертационной работы приняты к использованию на Новокуйбышевской ТЭЦ 2 (филиал «Самарский» ПАО «Т Плюс»), внедрены в учебный процесс на кафедре «Тепловые электрические станции» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», что подтверждается Справкой об использовании результатов исследований и Актом о внедрении.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях из перечня ВАК Минобрнауки России

1. Кудинов А.А., Губарев А.Ю. Исследование процессов теплообмена во вращающихся регенеративных воздухоподогревателях энергетических котлов // Энергетик. 2012. № 6. С. 32-34.

2. Кудинов А.А., Губарев А.Ю. Анализ процессов теплообмена во вращающихся регенеративных воздухоподогревателях // Энергосбережение и водоподготовка. 2013. № 3(83). С. 72-75.

3. Кудинов А.А., Губарев А.Ю. Повышение эффективности вращающихся регенеративных воздухоподогревателей энергетических котлов // Промышленная энергетика. 2013. № 4. С. 21-26.

4. Кудинов А.А., Губарев А.Ю., Зиганшина С.К. Двухпоточный двухходовой вращающийся регенеративный воздухоподогреватель // Электрические станции. 2013. № 10. С. 50-55.

5. Кудинов А.А., Зиганшина С.К., Губарев А.Ю. Повышение эффективности вращающихся регенеративных воздухоподогревателей энергетических котлов ТЭС// Энергосбережение и водоподготовка. 2016. № 5(103). С. 26-31.

В других изданиях

6. Кудинов А.А., Губарев А.Ю. Тепловой расчет регенеративных воздухоподогревателей энергетических котлов // Межвузовский сборник научных трудов «Повышение энергоэффективности зданий и сооружений». - Самара: СГАСУ, 2011, Вып. 6, с.68-73.

7. Кудинов А.А., Губарев А.Ю. Повышение эффективности работы регенеративного воздухоподогревателя котла БКЗ-420-140НГМ // Межвузовский сборник научных трудов «Повышение энергоэффективности зданий и сооружений». - Самара: СГАСУ, 2012, Вып. 7, с. 46-55.

8. Кудинов А.А., Губарев А.Ю., Зиганшина С.К. Такие разные РВП // Энергонадзор. 2013 г. № 4(45). с. 22-23.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015661549 (RU). «Программа теплового и аэродинамического расчетов вращающихся РВП» / Губарев А.Ю., Кудинов А.А., Зиганшина С.К. зарег. 29.10.2015.

В материалах конференций

10. Губарев А.Ю., Кудинов А.А. Двухпоточный двухходовой вращающийся регенеративный воздухоподогреватель // Материалы всероссийской научн. конф. «Наука. Технологии. Инновации». – Новосибирск: НГТУ, 3-5 декабря 2010, Ч. 2 с. 13-14.

11. Губарев А.Ю., Кудинов А.А. Программы теплового расчета стандартных регенеративных воздухоподогревателей и регенеративных воздухоподогревателей в форме усеченного конуса // Материалы межд. науч. конф. «XIX Туполевские чтения». – Казань: КНИТУ-КАИ, 24-26 мая 2011, Т. 1, с. 190-192.

12. Губарев А.Ю., Кудинов А.А. Регенеративный вращающийся воздухоподогреватель в форме усеченного конуса и программа теплового расчета RVP-cone // Сборник трудов межд. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVI Бенардовские чтения) – Иваново: ИГЭУ, 1-3 июня 2011, Т. 2, с. 41-42.

13. Губарев А.Ю., Кудинов А.А. Совершенствование конструкций регенеративных воздухоподогревателей энергетических котлов // Тезисы докладов XVIII 20 межд.

науч.-техн. конф. «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» – М: Издательский дом МЭИ, 1-2 марта 2012, Т. 4, с. 112-113.

14. **Губарев А.Ю.**, Кудинов А.А. Исследование процессов теплообмена в набивке вращающегося РВП в форме усеченного конуса // Материалы всероссийской науч. конф. «Наука. Технология. Инновации». – Новосибирск: НГТУ, 29 ноября – 2 декабря 2012, Ч. 5, с. 17-21.

15. **Губарев А.Ю.**, Кудинов А.А. Перспективная конструкция вращающегося регенеративного воздухоподогревателя // Материалы всероссийской науч. конф. молодых ученых. «Наука. Технологии. Инновации». – Новосибирск: НГТУ, 21-24 ноября 2013, Ч. 5, с. 21-24.

16. **Губарев А.Ю.**, Кудинов А.А. Вращающийся регенеративный воздухоподогреватель в форме усеченного конуса // Тезисы докладов девятнадцатой межд. науч.-техн. конф. «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». – М: Издательский дом МЭИ, 28 февраля – 1 марта 2013, Т. 4. с. 77.

17. **Губарев А.Ю.**, Кудинов А.А. Двухпоточный двухходовой вращающийся регенеративный воздухоподогреватель // Материалы докладов VIII Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения». – Казань: КГЭУ, 27-29 марта 2013, с. 194.

18. Кудинов А.А., **Губарев А.Ю.** Разработка конструкции и анализ тепловых процессов двухпоточного двухходового РВП // Сборник научных трудов Шестой Международной научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности». – Ульяновск: УлГТУ, 21-22 апреля 2013, с. 180-184.

19. **Губарев А.Ю.**, Кудинов А.А. Совершенствование конструкций вращающихся регенеративных воздухоподогревателей // Материалы VIII Всероссийской научн. конф. молодых ученых. «Наука. Технологии. Инновации». – Новосибирск: НГТУ, 2-6 декабря 2014, Ч. 5, с. 21-24.

20. **Губарев А.Ю.**, Кудинов А.А. Повышение эффективности энергетических котлов ТЭС путем совершенствования вращающихся регенеративных воздухоподогревателей // Сборник научных трудов по материалам XII Международной научно-технической конференции «Проблемы теплоэнергетики». – Саратов: СГТУ, Выпуск 3, 29-31 октября 2014, с. 120-124.

21. **Губарев А.Ю.**, Кудинов А.А. Совершенствование конструкций теплообменных поверхностей вращающихся регенеративных воздухоподогревателей энергетических котлов // Сборник научных трудов по материалам XIII Международной научно-технической конференции «Проблемы совершенствования топливно-энергетического комплекса». - Саратов: СГТУ, Выпуск 8, 01-03 ноября 2016, с. 300-304.

ГУБАРЕВ Антон Юрьевич

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ВРАЩАЮЩИХСЯ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ВОЗДУХОПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛОВ ТЭС

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 30.12.2016г.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Усл. п.л. 1,16. Уч.-изд. л. 1,00.

Тираж 100 экз. Заказ № 145

Отдел типографии и оперативной полиграфии СамГТУ.

443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Главный корпус