

На правах рукописи



**Хаустов Сергей Александрович**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ  
КОНСТРУКТИВНЫХ СХЕМ ЖАРОТРУБНЫХ КОТЛОВ  
НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ И ТЕПЛОМАССОБМЕНА**

05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

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

Красноярск – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Заворин Александр Сергеевич

Официальные оппоненты: Старченко Александр Васильевич,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский  
Томский государственный университет», кафедра  
вычислительной математики и компьютерного мо-  
делирования, заведующий кафедрой

Пузырёв Евгений Михайлович,  
доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО  
«Алтайский государственный технический универ-  
ситет им. И.И. Ползунова», кафедра котло- и реак-  
торостроения, профессор

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образо-  
вательное учреждение высшего образования  
«Уральский федеральный университет имени пер-  
вого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екате-  
ринбург

Защита состоится «21» декабря 2016 года в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.07 на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу: г. Красноярск, ул. Ленина, 70, ауд А-204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» [www.sfu-kras.ru](http://www.sfu-kras.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» ноября 2016 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета



Сизганова Евгения Юрьевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы** заключается в необходимости совершенствования процессов вихревого сжигания газообразного топлива в жаротрубных котлах.

Согласно энергетической стратегии России до 2030 г. с целью оптимального сочетания централизованного и децентрализованного теплоснабжения планируется снижение доли тепла, централизованно производимого на ТЭЦ, с 43 (2005 год) до 35 процентов. Кроме того, запланирована модернизация и развитие систем децентрализованного теплоснабжения с применением высокоэффективных котлов малой мощности и автоматизированных индивидуальных теплогенераторов нового поколения для сжигания разных видов топлива.

подавляющее большинство мировых производителей котлов малой мощности в диапазоне до 30 МВт как за рубежом, так и в России уже десятки лет ориентируются на выпуск именно жаротрубных котлов. Однако научная проработка процессов сжигания в их камерах сгорания в настоящее время недостаточна и не позволяет проектировать жаротрубные котлы конкурентоспособные на мировом рынке энергетического оборудования.

Научная проработка вопроса конструирования жаротрубных котлов находится в сфере приоритетных направлений науки, технологий и техники РФ («Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика») и критических технологий РФ («Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе»). Исследования, изложенные в настоящей работе, были поддержаны финансированием Министерства образования и науки РФ в рамках госзадания НИР (тема 13.948.2014/К).

**Объект исследований** – жаротрубные котлы.

**Предмет исследований** – характеристики процессов вихревого сжигания газообразного топлива в камерах сгорания жаротрубных котлов.

**Целью диссертационной работы** является совершенствование конструктивных схем жаротрубных котлов на основе многофакторной компьютерной оптимизации газодинамики, направленное на повышение их энергоэффективности.

Исходя из поставленной цели работы, определены следующие **задачи исследований**:

1) определить основные закономерности формирования газодинамической структуры топочной среды в камерах сгорания жаротрубных котлов и интегральные характеристики производительности;

2) предложить новый метод количественной оценки влияния локальных газодинамических структур на интегральные характеристики производительности котла;

3) создать алгоритм для конструирования камер сгорания жаротрубных котлов, реализующий предложенный метод;

4) разработать конструктивные схемы, направленные на повышение эффективности использования экранирующих камеру сгорания поверхностей нагрева.

**Методика исследований.** Экспериментальные исследования проводились на натурном объекте – жаротрубном котле «Турботерм-500». Численные исследования выполнены методом конечных элементов в апробированном пакете прикладных программ ANSYS Fluent 12.1.4. Оценка достоверности результатов математического моделирования произведена методом сравнения значений контрольных параметров, замеренных в ходе натуральных испытаний, с результатами расчета значений этих же параметров на модели.

**Научная новизна и основные положения, выносимые на защиту:**

1) Выявлены новые особенности газодинамики реверсивного факела. Обнаружено, что в жаровой трубе с реверсивным факелом при достижении значения параметра крутки 1,4 происходит срыв потока с центральной оси горелки.

2) Разработан метод для проектирования жаротрубных котлов с учетом характеристик процессов вихревого сжигания газообразного топлива.

3) Предложен метод управления вихревыми структурами в топке жаротрубного котла, позволяющий учитывать конструктивные и режимные параметры, тепломассообмен рециркуляцией, влияние крутки потока на эжекционную способность и дальнобойность факела.

**Достоверность результатов** обеспечивается применением апробированных математических моделей и надежных методов вычислений, согласованием расчетов с экспериментальными данными других авторов, а также результатами испытаний, проведенных в экспериментальных цехах фирм-производителей.

**Практическая значимость результатов работы** состоит в том, что новые теоретические и технологические решения позволили предложить метод и алгоритм, позволяющие повысить точность и достоверность проектирования камер сгорания жаротрубных котлов. Предложенные методы являются новыми и могут быть использованы в теплотехнических расчетах широкого класса энергоустановок. Техническая новизна подтверждена патентом РФ.

**Результаты выполненных исследований** используются в ЗАО «СМП-95» (г. Томск) и ООО «Инженерный центр «Теплоуниверсал» (г. Томск) и включены в образовательную практику по направлению «Энергетическое машиностроение» в Томском политехническом университете.

**Апробация работы.** Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, докладывались и были представлены на: международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2012 – 2015), Всероссийской молодежной конференции «Пути совершенствования работы теплоэнергетических установок» (г. Владивосток, 2012), VII Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (г. Казань, 2012), международном молодежном форуме «Интеллектуальные энергосистемы» (г. Томск, 2013, 2015), VIII Всероссийском семинаре вузов по теплофизике и энергетике (г. Екатеринбург, 2013), Всероссийской научно-практической конференции «Теплофизические основы энергетических технологий» (г. Томск, 2014), IX Всероссийской конференции с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (г. Новосибирск, 2015).

**Личный вклад автора** состоит в том, что им на основе анализа литературных источников поставлены задачи исследования, разработаны основные методики, настроены и отлажены математические модели, проведены расчеты, обработаны и проанализированы полученные данные, сформулированы выводы, а также предложены пути практического применения результатов исследования.

**Публикации по работе:** по теме диссертации опубликованы 23 научных работы, в том числе 6 статей в изданиях, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки РФ для опубликования основных результатов диссертаций, 6 статей, индексируемых Scopus, а также получены патент РФ, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации:** диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников (190 наименований) и четырех приложений, содержит 159 страниц, 3 таблицы и 39 рисунков.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность совершенствования конструктивных схем жаротрубных котлов, направленного на повышение их энергоэффективности. Дается описание научных положений, выносимых на защиту, подчеркивается их обоснованность, новизна и практическая ценность.

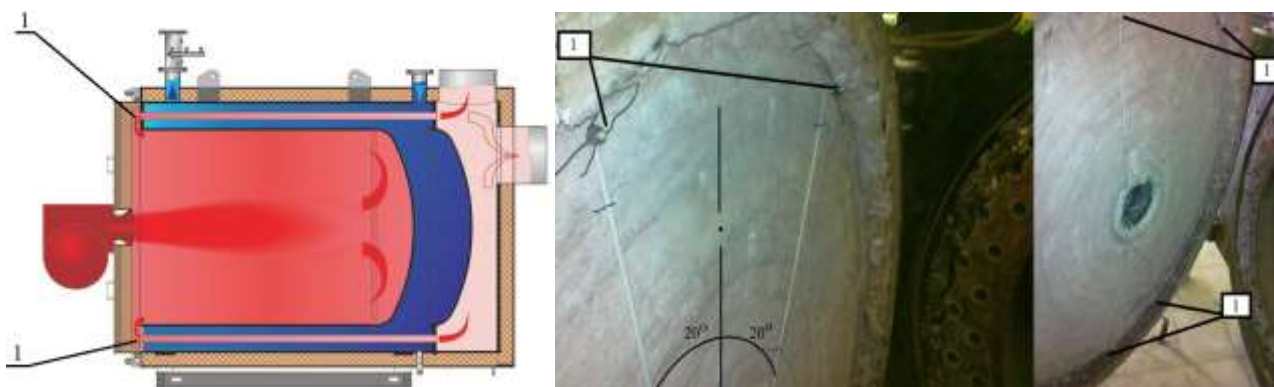
**В первой главе** произведен аналитический обзор литературных источников, посвященных теории топочных процессов, аэродинамике факела и закрученных струй. Представлены и проанализированы существующие конструктивные схемы жаротрубных котлов и состояние практики их проектирования. При конструировании котлов основным средством прогнозирования интегральных теплофизических характеристик жаровых труб в РФ являются формулы теории подобия. Однако применительно к жаротрубным котлам строгое геометрическое подобие топочной камеры не выдерживается. Работы Наумейко А.В., Остапенко Д.В., Рыжкова А.Ф., Степанова Д.В., Шахлиной Н.А и др. свидетельствуют о том, что расчет теплообмена в конвективных поверхностях нагрева жаротрубных котлов для отечественной практики проектирования является многократно решенной задачей. В то же время наиболее сложными и наименее освещенными в литературе остаются вопросы конструирования жаровых труб с факелом реверсивного типа.

На основе анализа работ Алексеенко С.В., Ахмедова Р.Б., Вулиса Л.А., Ляховского Д.Н., Ярина Л.П., Штыма К.А. и др. отмечено, что вихревые образования играют важную роль в формировании турбулентной реагирующей среды в камере сгорания с одной горелкой. В ряде работ установлено, что в цилиндрических топках создаются вихревые структуры тороидальной формы. Однако в литературе практически отсутствуют сведения о закономерностях формирования таких аэродинамических структур, не раскрыты для конструкторской практики особенности теплообмена между факелом и окружающим его тороидальным вихрем.

На основе произведенного обзора зарубежных источников отмечена мировая тенденция внедрения в практику энергетического машиностроения современных информационных технологий и процессных подходов. Заключено, что без методов виртуального прототипирования и эволюционного поиска оптимальных конструкторских решений отечественным конструкторским бюро неперспективно конкурировать в сфере промышленной теплоэнергетики.

Во второй главе произведена физико-математическая постановка задачи, в которой на основе обзора математических моделей приведены уравнения, которые адекватно воспроизводят газодинамику, перемешивание, горение и теплообмен. Выполнена дискретизация выбранных уравнений и предложен алгоритм их численного решения. В результате анализа современных пакетов прикладных программ выбран и верифицирован инструмент исследования – программный комплекс ANSYS FLUENT, реализующий численное решение принятых математических моделей.

По результатам адаптационного вариантного исследования отобраны модель горения в сочетании с моделью турбулентности, которые позволяют получить приемлемые результаты при минимальных затратах вычислительных ресурсов. Для численного исследования протекания химической реакции в турбулентном реагирующем потоке отобрана гибридная модель (совместное использование Eddy-Break-Up и кинетической моделей) с необратимым двухстадийным окислением горючего:  $2\text{CH}_4 + 3\text{O}_2 = 2\text{CO} + 4\text{H}_2\text{O} + 1168 \text{ кДж}$ ;  $2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2 + 566 \text{ кДж}$ . Наиболее производительным способом расчёта лучистого теплообмена является P1-модель. Для моделирования турбулентности выбрана стандартная k-ε-модель. По результатам вариативных расчётов с использованием сеток с разной топологией и числом ячеек установлено, что сетка, содержащая  $6,8 \cdot 10^5$  контрольных объёмов, обеспечивает приемлемо низкую чувствительность результатов к дальнейшему измельчению сетки.



*а) – принципиальная схема, б) – фотоснимки установки термопар;  
1 – места установки термопар*

**Рисунок 1 – Установка термопар при натурных испытаниях котла**

Для верификации выбранной математической модели выполнена процедура оценки, основанная на сравнении значений контрольных параметров, замерен-

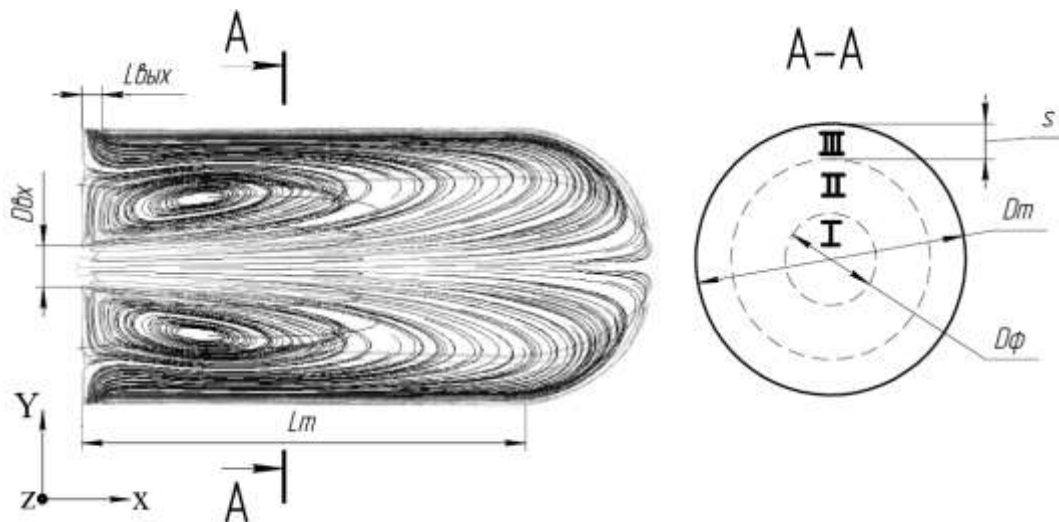
ных во время испытаний на реальном котле, и результатов расчета значений этих же параметров на модели.

Таблица 1 – Средние температуры на выходе из камеры сгорания

Исполнение подпорной шайбы	Натурные испытания		Математическая модель	
	Нагрузка 100%	Нагрузка 60%	Нагрузка 100%	Нагрузка 60%
стандартное исполнение	900 – 930 °С	690 – 710 °С	864 – 929 °С	684 – 712 °С
исполнение LN	870 – 905 °С	480 – 500 °С	843 – 906 °С	467 – 577 °С

Для натуральных испытаний камеры сгорания котла «Турботерм–500» задействованы 4 ХА-термопары, установленные в наиболее удобном месте для экспериментального замера температур таким образом, чтобы избежать прямого излучения на горячий спай от ядра горения: в поворотной камере на выходе из топки. Термопары расположены по окружности, концентричной основанию цилиндрической части жаровой трубы, с отклонением не более 20° от вертикали и на удалении 0,934 м от центральной оси камеры сгорания (рис. 1). Результаты контрольного эксперимента (табл. 1) показали значения температуры на выходе из топки, не противоречащие полученным на принятой модели.

В третьей главе с применением математического моделирования получена подробная картина процессов, протекающих в реверсивном факеле. Рассмотрена обобщенная конструктивная схема (рис. 2) камеры сгорания с реверсивным факелом. Выход продуктов сгорания из топки такого типа осуществляется по периметру обечайки через щелевой сегмент шириной  $L_{\text{вых}}$ , примыкающий к фронту котла. Подача топливовоздушной смеси осуществляется по цилиндрическому каналу горелки с диаметром  $D_{\text{вх}}$ .



I – струя прямого тока, II – область разворота; III – возвратный ход дымовых газов

Рисунок 2 – Обобщенная конструктивная схема камеры сгорания с реверсивным факелом и газодинамическая структура в продольной плоскости и поперечном сечении А-А

В ходе вариативного исследования рассмотрено 750 вариантов компьютерных моделей камер сгорания в широком диапазоне конструктивных характеристик. Диаметр изучаемой топки ( $Dm$ ) изменялся от 0,5 до 1,5 м с шагом 0,1 м. Длина её цилиндрической части – от 1,5 м до 2,5 м с шагом 0,2 м. Диаметр канала горелки задавался в диапазоне  $0,1 \cdot Dm \dots 0,25 \cdot Dm$ . К рассмотрению принимались варианты с шириной выходного окна 50, 100 и 150 мм.

Для каждого варианта модифицированной конструктивной схемы численный эксперимент проводился на нагрузках 50, 75 и 100%. Массовый расход топливовоздушной смеси на номинальной нагрузке выбирался таким образом, чтобы расчетное тепловое напряжение топочного объема равнялось  $1 \text{ мВт/м}^3$ .

Газодинамическая структура топочной среды представлялась как динамическая система, которая с изменением исследуемых параметров меняет своё состояние. Если при изменении значений параметров в анализируемом диапазоне сохраняется качественная картина разбиения газодинамической структуры на траектории, то к объекту исследования применима математическая абстракция грубой динамической системы, процесс смены состояний которой предсказуем. Таким образом, производилось выявление монотонных функциональных зависимостей тепловых и аэродинамических параметров топочной среды от конструктивных и режимных характеристик топочного устройства.

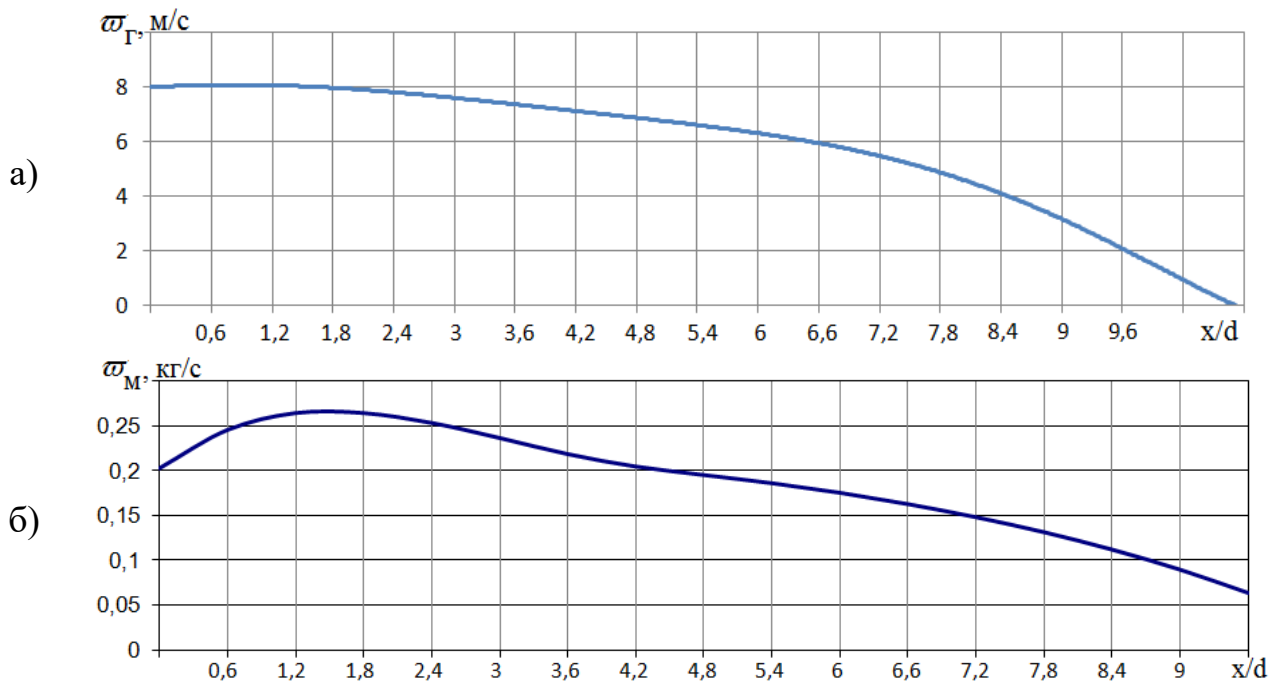


Рисунок 3 – Средняя скорость движения (а) и массовый расход (б) топочной среды в приосевой зоне факела (м/с)

Результаты математического моделирования показывают, что протекающие в топке процессы в усреднении Рейнольдса симметричны относительно оси горелки. Усредненные линии тока топочной среды (рис. 2) демонстрируют, что факел занимает приосевую зону жаровой трубы, воспламенение происходит с наружной границы топливовоздушной струи, а разворот продуктов сгорания идет по всей длине факела.



Полученный вид функциональной зависимости линейной скорости от относительной координаты  $x/d$  (рис. 3,а) качественно повторяет известный на практике обобщенный график осевой составляющей затопленной струи. Параметр  $x/d$  представляет собой отношение абсолютной продольной координаты  $x$  (м) к диаметру горелки  $d$  (м). Использование этого параметра многими авторами при обобщении экспериментальных данных свидетельствует о том, что диаметр выходного сечения горелки  $d$  оказывает значительное влияние на аэродинамическую структуру топочной среды.

График массового расхода топочной среды в приосевой зоне факела (рис. 3,б) качественно повторяет известный график присоединенной массы для затопленной струи. При количественном сравнении отмечено, что вследствие противодействия в тупике камеры сгорания и эжекционной способности пристеночных обратных токов точка перегиба на графике ( $x/d = 1$ ) при реверсивной организации аэродинамики значительно смещается в направлении устья горелки.

Установлено, что в топках с реверсивным факелом с наружной образующей топливовоздушной струи создается зона рециркуляции части продуктов сгорания к корню факела. Вихри наблюдаются посередине между встречными течениями: зона ограничена струей свежей топливовоздушной смеси, с одной стороны, и обратными токами продуктов сгорания, с другой. По результатам серии произведенных вариативных расчетов можно оценить объемную долю рециркулирующих газов. В рассмотренном диапазоне конструктивных характеристик при любой нагрузке доля рециркулирующих газов в большей степени зависит от геометрических характеристик живых сечений на входе и выходе из жаровой трубы. Эта зависимость удовлетворительно описывается степенным уравнением

$$r = 3,16 \cdot e^{-0,8 \cdot f},$$

где  $f$  – это отношение диаметра сечения канала горелки ( $D_{вх}$ ) к ширине выходного окна ( $L_{вых}$ ).

При описанной организации топочной аэродинамики в результате теплообмена между факелом и примыкающей к нему ветвью вихря наблюдается понижение температуры в ядре горения вследствие теплоотвода из реакционной зоны. При этом часть отведенного от факела тепла покидает топку с уходящими газами, а часть – вследствие рециркуляции возвращается свежей смеси.

Расчетная область была дополнительно проанализирована на подробной адаптированной сетке с применением LES-методов моделирования турбулентных течений, что позволило детально изучить мелкомасштабную турбулентность, в частности, в вихревой области, расположенной между встречными течениями горелочной струи и обратными токами продуктов сгорания. Установлено, что эжекционная способность приосевого течения снижается по длине топки, в связи с «раскручиванием струи», и в точке  $x/d = 1$ , где тангенциальная составляющая скорости достигает минимального значения, уравнивается с эжекционной способностью обратных токов дымовых газов. Поверхность раздела встречных течений весьма неустойчива и быстро свертывается в один или несколько вихрей. С тыла камеры сгорания (на границе зоны рециркуляции) за поверхностью раздела образуется крупный вихрь; второй такой же вихрь обра-

зуются со стороны горелки. Эти вихри попеременно отрываются из приосевой области, уносятся по течению и постепенно рассеиваются; на их месте возникают новые вихри. В результате образуется турбулентный след. Наличие значительной диссипации энергии во всем объеме турбулентного следа, а также образование поверхности раздела приводят, с одной стороны, к высокой скорости реакции и узкому фронту пламени на границах вихря, а, с другой, – к росту аэродинамического сопротивления. Анализ изменения полей давления при различных режимных параметрах свидетельствует о том, что сопротивление жаровой трубы с реверсивным факелом определяется в основном местным сопротивлением на выходе из горелки и сопротивлением, создаваемым вихрем зоны рециркуляции.

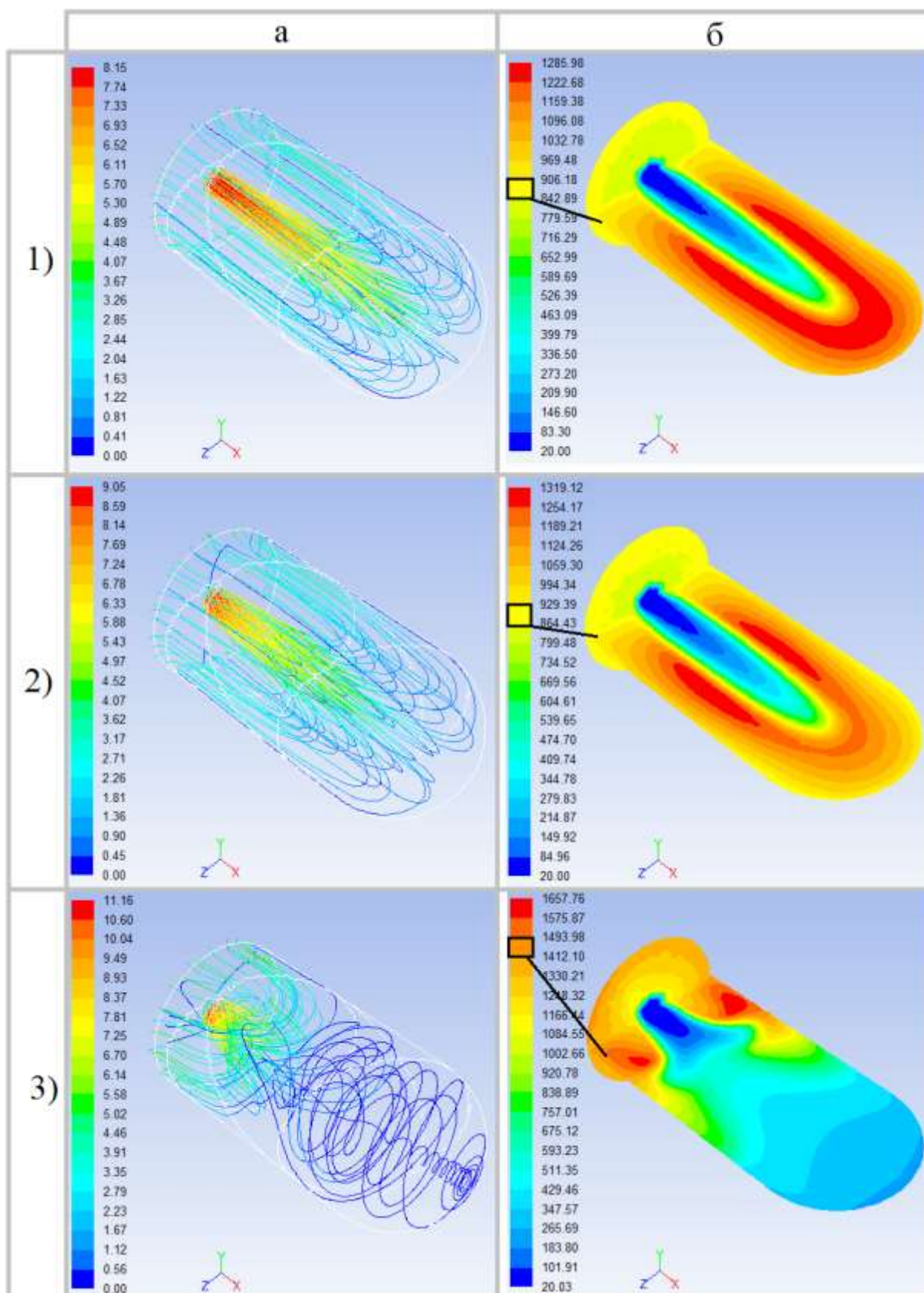
Использование вихревых горелочных устройств интенсифицирует воспламенение и позволяет вести процесс при меньших избытках воздуха, однако увеличивает аэродинамическое сопротивление камеры сгорания в сравнении с прямоточной организацией топливоподачи. Количественно интенсивность завихрения потока оценивается параметром крутки  $n$ . Для аксиального лопаточного завихрителя, используемого в исследуемом котле, параметр крутки является функцией его геометрических параметров

$$n = \frac{\sqrt{2(d^2 + D^2)}}{D} \operatorname{tg} \beta_d,$$

где  $d$ ,  $D$  - внутренний и наружный диаметры канала горелки соответственно, а  $\beta_d$  - угол наклона выходной части лопатки относительно продольной оси канала.

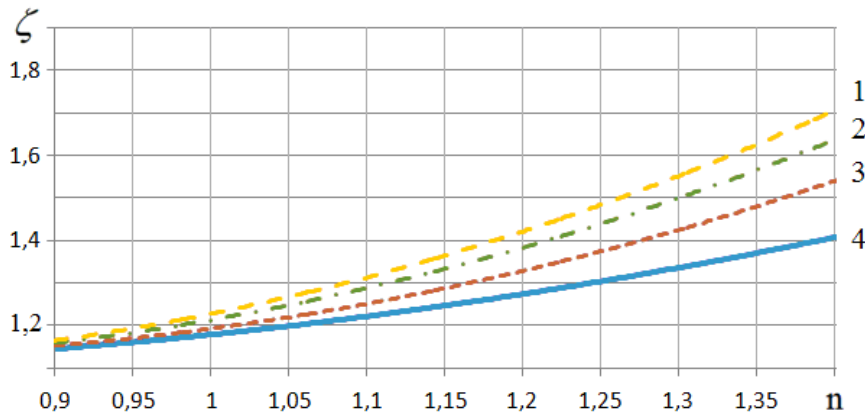
Серия численных расчётов с применением RANS-моделей, выполненная для определения влияния угла наклона выходной части лопатки горелки на положение ядра горения и температуру топочной среды, смоделировала условия сжигания газа с параметрами крутки потока  $n$  от 0 до 2. Расчёт показывает, что по мере увеличения параметра крутки максимальная температура в ядре факела возрастает, а его положение смещается к фронту котла, что, в свою очередь, влечет за собой увеличение температуры уходящих из топки дымовых газов (рис. 4). Таким образом, вариант жаровой трубы с прямоточной горелкой характеризуется наименьшей температурой продуктов сгорания на выходе из топки, и, следовательно, обладает наибольшим тепловосприятием.

В серии численных расчетов установлено, что для всех рассмотренных вариантов при значениях тангенциальной составляющей скорости потока, превышающих значения аксиальной, качественная картина разбиения аэродинамической структуры на траектории резко изменяется. Увеличение угла наклона выходной части лопатки завихрителя более чем на  $45^\circ$  ( $n \geq 1,4$ ) сопровождается отрывом потока от центральной оси горелки и появлением обширной зоны обратных токов, что приводит к преждевременному развороту факела с последующим его набросом на стены жаровой трубы.



Варианты с параметром крутки: 1)  $n = 0$ ; 2)  $n = 1$ ; 3)  $n = 2$

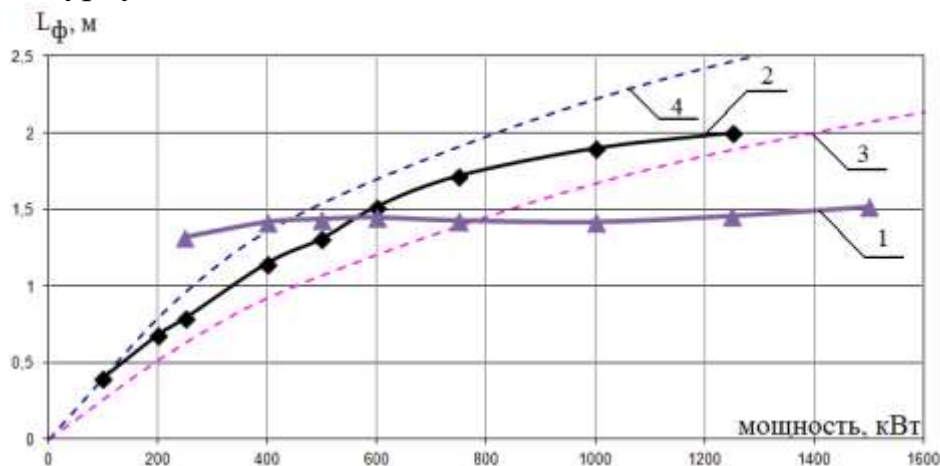
Рисунок 4 – Траектории и скорости движения дымовых газов (а) и температурные поля (б) топочной среды (вихревая структура в зоне рециркуляции условно не показана)



1 –  $F_{vx}/F_m = 0,09$ ; 2 –  $F_{vx}/F_m = 0,075$ ; 3 –  $F_{vx}/F_m = 0,055$ ; 4 –  $F_{vx}/F_m = 0,035$

Рисунок 5 – Зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления камеры сгорания с реверсивным факелом от параметра крутки ( $n$ ) и отношения площади сечения канала горелки к площади сечения жаровой трубы ( $F_{vx}/F_m$ )

Расчёты и компьютерное моделирование показали, что при прямоточной и слабо закрученной подаче топливоздушная смесь ( $n \leq 0,9$ ) коэффициент аэродинамического сопротивления топки является функцией, мало зависящей от степени крутки, и с приемлемой точностью может приниматься равным 1,1 в широком диапазоне конструктивных характеристик. С увеличением крутки  $n > 0,9$  наблюдается повышение коэффициента аэродинамического сопротивления жаровой трубы с различной в зависимости от конструктивных характеристик интенсивностью (рис. 5). Это вызвано увеличением расхода рециркулирующих газов в реверсивном факеле, и, как следствие, ростом диссипации энергии в объеме турбулентного следа.



1 – реверсивный факел; 2 – проточный факел; 3, 4 – минимальное и максимальное значения диапазона дальности по данным Riello

Рисунок 6 – Зависимость дальности факела от мощности горелки

Полученная в результате численного эксперимента зависимость дальности прямоточного факела от тепловой мощности горелки (рис. 6) не противоречит опубликованным результатам экспериментов, проведенных в центре прикладных исследований концерна Riello. При изменении тепловой мощности горелки в диапазоне 100–1250 кВт дальность одноходового факела воз-

растает в 5 раз – с 0,4 до 2 м. Расчетная длина реверсивного факела при изменении тепловой мощности в 6 раз (с 250 кВт до 1,5 мВт) увеличивается лишь на 15% (рис. 6).

Для систематизации полученных результатов в виде единого параметрического семейства динамических систем, состоящего из частных случаев газодинамической структуры, выявлен список варьирующих параметров камеры сгорания, изменение которых позволяет влиять на эффективность работы котельной установки: конструктивные  $D_t$  – диаметр топки,  $L_t$  – длина цилиндрической части топки,  $D_g$  – диаметр канала горелки,  $L_{\text{вых}}$  – ширина выходного окна,  $n$  – параметр крутки горелки; режимный  $Q$  – тепловая мощность горелки.

Подтверждено, что при соблюдении следующих условий к объекту исследования применима математическая абстракция грубой динамической системы, процесс смены состояний которой предсказуем, а зависимости критериев эффективности от варьирующих параметров монотонны и не имеют исключительных точек.

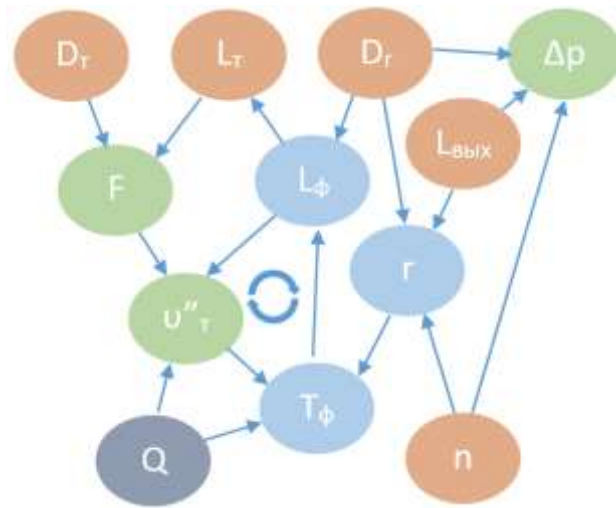
1. Длина цилиндрической части топки определяется дальностью факела и исключает касание факела к поверхности металла.

2. Значение параметра крутки составляет  $n \leq 1,4$ , при котором исключен срыв потока от центральной оси горелки и образование зоны обратных токов в приосевой области.

Влияние завихрителей с параметром крутки  $n < 1,4$  на теплообмен в тупиковой жаровой трубе незначительно по сравнению с прямоточной организацией факела, поскольку в топках такого типа уже имеет место интенсификация конвективного теплообмена за счет турбулизации потока при развороте факела.

Важным выводом является то, что расчет доли рециркуляции и оценка её влияния на интенсивность теплоотвода от факела имеет основополагающее значение при научной проработке вопросов конструирования жаротрубных котлов.

**В четвертой главе** произведена систематизация полученных результатов в виде единого параметрического семейства динамических систем на основе математической абстракции графа (рис. 7). Вершинами графа представляются значения исследуемых параметров. В этом случае для связи каждой пары параметров служат ориентированные ребра (т.н. дуги) графа, которые математически описываются алгебраическими уравнениями с predetermined видом функций в правой части: ребра  $F-v''_t$ ,  $Q-v''_t$ ,  $Q-T_\phi$  и  $r-T_\phi$  описываются уравнениями теплообмена; ребра  $D_t-F$ ,  $L_t-F$  описываются формулами объема и площади поверхности геометрических фигур; ребра  $D_g-T_\phi$ ,  $n-D_r$  удовлетворительно описываются эмпирическими формулами других авторов; ребра  $D_g-D_r$ ,  $L_{\text{вых}}-D_r$ ,  $n-r$  удовлетворительно описываются аналитическими зависимостями, полученными в настоящей работе; для описания ребер  $L_{\text{вых}}-r$ ,  $D_g-r$  выведены уравнения приближенной методики расчета; связь  $T_\phi-L_\phi$  осуществляется подстановкой эффективной температуры факела в формулу для расчета скорости нормального распространения пламени по теории Я.Б. Зельдовича и Д.А. Франк-Каменецкого.



■ – конструктивные параметры:  $D_r$  – диаметр точки,  $L_r$  – длина цилиндрической части точки,  $D_r$  – диаметр канала горелки,  $L_{\text{вых}}$  – ширина выходного окна,  $n$  – параметр крутки горелки; ■ – режимный параметр:  $Q$  – тепловая мощность горелки; ■ – расчетные характеристики топочной среды:  $L_\phi$  – дальность факела горелки,  $T_\phi$  – температура в ядре горения,  $\gamma$  – доля рециркулирующих газов; ■ – критерии, позволяющие оценить эффективность работы камеры сгорания:  $u''_T$  – температура дымовых газов на выходе из точки (оценка удельного тепловосприятия камеры сгорания),  $\Delta p$  – аэродинамическое сопротивление точки,  $F$  – поверхность теплообмена (оценка металлоемкости); ⦿ – компонента сильной связности графа.

Рисунок 7 – Геометрическая реализация графа

Пусть количественное изменение значений параметров в отдельной вершине графа ведет к пересчету значений параметров в вершинах, соединенных с ней исходящими дугами по заданным функциональным зависимостям. Тогда операция пересчета значения параметра будет рекурсивно повторяться для всех смежных вершин по направлению дуг до тех пор, пока не изменится значение параметра в стоке графа (частный случай вершины с нулевым числом исходящих дуг).

В отечественной практике конструирования котлов для инженерных расчетов камеры сгорания к топочному процессу применяется теория подобия. Для конструктивных схем, применительно к которым подобие не соблюдается, предлагаются нижеследующий метод для конструирования.

1. В процессе проектирования ставится задача определения оптимальных геометрических и режимных параметров камеры сгорания, обеспечивающих эффективность работы котельной установки. Таким образом, конструктивная схема газового тракта жаротрубного котла является результатом решения многокритериальной задачи оптимизации.

2. Конструктивная схема представляется в виде параметрической модели, т.е. набора параметров и критериев. В процессе конструирования значения параметров редактируются с целью улучшения характеристик модели (критериев). Изменение какого-либо параметра приводит к изменению одного или нескольких критериев в соответствии с заданными функциональными зависимостями. Прямое изменение критериев без изменения параметров при этом исключено.

3. Оценка эффективности рассматриваемой конструктивной схемы производится её сравнением с прототипом или аналогом. В качестве способа оценки эффективности предлагается некоторая оценочная функция вида

$$E = \sum_{i=1}^N a_i \frac{\Delta x_i}{x_i},$$

где:  $N$  – кол-во критериев параметрической модели,  $x_i$  – значение  $i$ -ого критерия,  $\Delta x_i$  – изменение  $i$ -ого критерия по отношению к прототипу или аналогу (разность  $\Delta x_i$  может быть отрицательной при изменении критерия в сторону снижения эффективности работы установки),  $a_i$  – весовой коэффициент (задается, исходя из приоритетов и поставленных задач). Весовые коэффициенты должны отражать важность соответствующих частных критериев.

В качестве критериев оценки эффективности предложены 8 расчетных характеристик топочной среды:  $L_f$  – дальнобойность факела горелки,  $T_f$  – температура в ядре горения,  $r$  – доля рециркулирующих газов,  $v''_t$  – температура дымовых газов на выходе из топки (оценка удельного тепловосприятия камеры сгорания),  $\Delta p$  – аэродинамическое сопротивление устройства,  $F$  – поверхность теплообмена (оценка металлоемкости).

4. В случае, если конструктивная схема отличается от прототипа значением более чем одного параметра, оценку эффективности предлагается осуществлять по сумме расчетных значений оценочных функций, полученных в процессе оптимизации (поочередного изменения параметров по одному).

Использование предложенной оценочной функции решает проблему многокритериального выбора и делает возможной компьютерную реализацию эволюционного вычислительного алгоритма для оптимального комбинирования и вариаций параметров камер сгорания. Использование весовых коэффициентов при этом упрощает разработку компромиссных решений для задач оптимизации только по ключевым параметрам.

Эволюционный алгоритм для конструирования камер сгорания жаротрубных котлов на основе построенной динамической системы в общем виде выглядит следующим образом.

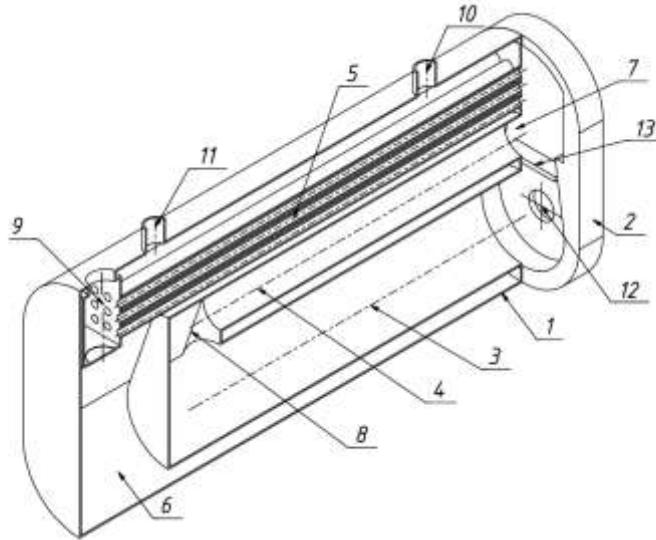
1. Задача формализуется таким образом, чтобы её решение могло быть представлено в виде: матрицы геометрических и режимных параметров (источников построенного графа). Затем генерируется некоторое множество конструктивных схем т.н. «начальной популяции».

2. Каждая конструктивная схема оценивается с применением приведенной выше оценочной функции, т.н. «функции приспособленности». В результате каждой конструктивной схеме соответствует определённое численное значение «функции приспособленности», которое определяет эффективность решения камерой сгорания, описываемой этой схемой, поставленных инженером приоритетных задач.

3. По рассчитанному значению «функции приспособленности» из множества конструктивных схем (т.н. «поколения») отбираются лучшие решения (производится т.н. «селекция»), на основе которых случайным образом формируются новые конструктивные схемы. Для которых также вычисляется

значение приспособленности, и затем производится отбор лучших решений в следующее поколение.

4. Этот набор действий итеративно повторяется несколько «поколений» до тех пор, пока не будет выполнен критерий остановки алгоритма: исчерпание числа поколений, отпущенных на эволюцию.



1 – корпус, 2 – крышка, 3 – камера сгорания, 4 – конвективный газоход, 5 – пучок дымогарных труб, 6 – водяная рубашка, 7 – канал рециркуляции, 8 – поворотная камера, 9 – сборный дымовой короб, 10 и 11 – патрубки для подвода и отвода воды, 12 – канал горелки, 13 – регулирующая заслонка.

Рисунок 8 – Трехмерное изображение конструктивной схемы камеры сгорания в продольном разрезе

На уровне изобретения разработана и защищена патентом усовершенствованная конструктивная схема (рис. 8), решающая следующие задачи:

- обеспечение условий для равномерного выгорания топлива при минимальном аэродинамическом сопротивлении,
- применение нового метода управления вихревыми структурами в топке жаротрубного котла, который позволяет управлять количеством дымовых газов, идущих на рециркуляцию, и тем самым регулировать температуру ядра горения и интенсивность турбулентности на входе в зону рециркуляции.

Метод управления вихревыми структурами в топке жаротрубного котла заключается в варьировании доли дымовых газов в рециркулирующем потоке путем изменения проходного сечения канала рециркуляции с помощью регулирующей заслонки. Рециркулирующий поток дымовых газов, направляясь в канал рециркуляции, контактирует с устьем факела, отдавая при этом за счет теплопроводности и диффузии часть тепла поступающей воздушно-топливной смеси. В результате появляется возможность интенсификации воспламенения и протекания реакции горения. Техническим результатом является регулировка температуры факела и дальнобойности факела. Увеличение доли рециркулирующего потока через канал рециркуляции приводит к росту турбулентной скорости реакции, что дополнительно снижает дальнобойность факела и позволяет уменьшить активный объем камеры сгорания. Техническим результатом является снижение металлоемкости устройства.



**В приложениях** приведены результаты вариантных численных исследований газодинамической структуры факела, чертежи объекта исследования, акты об использовании результатов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выявлены новые особенности газодинамики реверсивного факела:

- с ростом тепловосприятости экранирующей камеры сгорания жаротрубного котла поверхности нагрева значение максимума температур в реверсивном факеле понижается. Температура ядра реверсивного факела в зависимости от мощности горелки может меняться в широком диапазоне ( $\Delta T \sim 500$  °C) без значительного изменения его габаритов;

- определены граничные значения параметра крутки ( $n \geq 1,4$ ), при которых происходит срыв потока от центральной оси горелки и образование зоны обратных токов в приосевой области, что приводит к затягиванию пламени в конвективный пучок. Влияние завихрителей с параметром крутки  $n < 1,4$  на теплообмен в тупиковой жаровой трубе незначительно по сравнению с проточной организацией газодинамики, поскольку в топках такого типа уже имеет место интенсификация конвективного теплообмена за счет турбулизации потока при развороте факела. Наиболее благоприятные условия для равномерного выгорания топлива при минимальном аэродинамическом сопротивлении в топках с реверсивным факелом создаются при прямоточной подаче топлива;

- сопротивление жаровой трубы с реверсивным факелом определяется в основном местным сопротивлением на выходе из горелки и сопротивлением вихря зоны рециркуляции. Сопротивления разворота и трения по длине жаровой трубы незначительны. Для параметров крутки горелочной струи  $n \leq 0,9$  коэффициент аэродинамического сопротивления тупиковой топки с приемлемой точностью может приниматься равным 1,1 в широком диапазоне конструктивных характеристик.

2. Установлена взаимосвязь тепловых и аэродинамических параметров топочной среды, в рассмотренном диапазоне используемых на практике конструктивных и режимных характеристик топочного устройства, с систематизацией в виде единого параметрического семейства динамических систем.

3. Предложен метод для количественной оценки влияния локальных аэродинамических структур на интегральные характеристики производительности котла для решения задач конструирования камер сгорания жаротрубных котлов. Для компьютерной реализации предложенного метода разработан эволюционный вычислительный алгоритм.

б. Разработана и защищена патентом усовершенствованная конструктивная схема, в основе которой заложен новый метод управления вихревыми структурами в топке жаротрубного котла.

## ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

*Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК*

1. **Хаустов С.А.**, Заворин А.С., Фисенко Р.Н. Численное исследование процессов в жаротрубной топке с реверсивным факелом // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 4. – С. 43-47.

2. **Хаустов С.А.**, Заворин А.С. Численное исследование аэродинамики жаротрубной топки с реверсивным факелом // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 4. – С. 5-8.

3. **Хаустов С.А.**, Заворин А.С. Численное исследование аэродинамики топочной среды в жаротрубном котле типа «Турботерм» // Промышленная энергетика. – 2014. – № 1. – С. 11-14.

4. **Хаустов С.А.**, Заворин А.С. Дальнобойность факела в жаровых трубах котлов // Промышленная энергетика. – 2014. – № 10. – С. 16-20.

5. **Хаустов С.А.**, Заворин А.С. Аэродинамическая структура топочной среды в жаровых трубах с реверсивным факелом // Энергосбережение и водоподготовка. – 2014 – Т. 92 – № 6. – С. 63-67.

6. **Хаустов С.А.**, Заворин А.С., Савченко Е. К. Анализ конструктивной схемы камеры сгорания с управляемым переходом в реализации аэродинамики от проточной до реверсивной // Энергосбережение и водоподготовка. – 2015. – № 3 (95). – С. 38-44.

*Работы, проиндексированные в Scopus*

7. Zavorin A.S., **Khaustov S.A.**, Zakharushkin N.A. Computer simulation of processes in the dead-end furnace (Article number 012029) // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2014. – Vol. 66 – № 1. – p. 1-6.

8. Zavorin A.S., **Khaustov S.A.**, Sheykin V.A. Vortex combustion in paired fire tube furnace using a bypass channel // Mechanical Engineering, Automation and Control Systems: Proceedings of International Conference, Tomsk, October 16-18, 2014. - Tomsk: TPU Publishing House, 2014. – P. 1-4.

9. **Khaustov S.A.**, Zavorin A.S., Buvakov K.V., Zakharushkin N.A. Engineering method for thermal calculation of the vortex combustion in dead-end fire-tubes (Article number 01020) // MATEC Web of Conferences. – 2014. – Vol. 19. – P. 1-5.

10. Zavorin A.S., **Khaustov S.A.**, Zakharushkin N.A. Recirculation vortices of flue gases in fire-tube boiler furnace // Mechanical Engineering, Automation and Control Systems: Proceedings of International Conference, Tomsk, October 16-18, 2014. – Tomsk: TPU Publishing House, 2014 – P. 1-4.

11. **Khaustov S.A.**, Zavorin A.S., Buvakov K.V., Kudryashova L.D., Shchelkunova A.V. Computer simulation of vortex combustion processes in fire-tube boilers (Article number 01041) // EPJ Web of Conferences. – 2015. – Vol. 82. – P. 1-5.

12. **Khaustov S.A.**, Belousova Y.A. Researching the performance of dual-chamber fire-tube boiler furnace // MATEC Web of Conferences. – 2015. – Vol. 37. – P. 01028.

*Публикации в сборниках трудов конференций*

13. **Хаустов С.А.** Оптимизация конструкций жаротрубных котлов с целью повышения энергоэффективности // Тинчуринские чтения: материалы докладов VII Международной молодежной научной конференции, Казань, 25-27 Апреля 2012. – Казань: Изд-во КГЭУ, 2012 – Т. 2 – С. 122.

14. **Хаустов С.А.** Повышение энергоэффективности жаротрубных котлов // Энергосбережение в промышленности: материалы Всероссийской научно-практической конференции, Чебоксары, 11 Мая 2012. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2012 - С. 135-137.

15. Заворин А.С., **Хаустов С.А.** Численное моделирование теплофизических процессов в топках жаротрубных котлов // Теплофизика и энергетика. Конференция с международным участием "VIII Всероссийский семинар вузов по теплофизике и энергетике" 12-14 ноября 2013 г. – Екатеринбург: УРФУ, 2014 – С. 242-245.

16. **Хаустов С.А.**, Захарушкин Н.А. Аэродинамическое сопротивление тупиковых жаровых труб с реверсивным факелом // Современные техника и технологии: сборник трудов XX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 14-18 Апреля 2014. - Томск: ТПУ, 2014 – Т. 3. – С. 141-142.

17. **Хаустов С.А.**, Заворин А.С. Современные тенденции проектирования жаротрубных котлов // Вестник науки Сибири. – 2014 – № 2 (12). – С. 21-28.

18. **Хаустов С.А.**, Савченко Е.К., Заворин А.С. Горение газообразного топлива в камере с управляемой траекторией факела // Горение топлива: теория, эксперимент, приложения: тезисы докладов IX Всероссийской конференции с международным участием, Новосибирск, 16-18 Ноября 2015. - Новосибирск: Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 2015 – С. 136.

*Патенты и свидетельства о регистрации программы для ЭВМ*

1. Пат. 2566863 Россия. МПК F23C1/08, F23C9/00, F24H1/24. Устройство для сжигания жидкого и газообразного топлива / А.С. Заворин, **С.А. Хаустов**, Р.Б. Табакаев; заяв. 02.12.2014; опубл. 27.10.2015. – 7 с.: ил.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №23231231. TPU FuelMaster / **Хаустов Сергей Александрович**. – Дата поступления 24.10.2013. Дата регистрации 9.12.2013.