

На правах рукописи



Ахметшина Альфия Илдусовна

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ
ТВЕРДОТОПЛИВНОГО ВОДОГРЕЙНОГО КОТЛА С ЦЕЛЬЮ ЭКОНОМИИ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ

05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Казань – 2018

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева–КАИ» на кафедре «Специальные технологии в образовании».

Научный руководитель: д-р техн. наук, профессор **Павлов Григорий Иванович**

Официальные оппоненты: **Бульбович Роман Васильевич**, д-р техн. наук, профессор кафедры ракетно-космической техники и энергетических систем ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Левин Анатолий Алексеевич, к-т. техн. наук, заведующий лабораторией динамики парогенерирующих систем Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», г. Казань

Защита состоится «29» ноября 2018г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.082.02 созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» (420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, ауд- Д 225, тел/факс (843)562 43 30).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, КГЭУ, Ученому секретарю диссертационного совета Д 212.082.02

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского государственного энергетического университета и на официальном сайте КГЭУ <https://kgeu.ru/>

Автореферат разослан «4» октября 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.082.02
д-р техн. наук, доцент

Зверева Эльвира Рафиковна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время большинство паровых и водогрейных котлов, используемых в малой энергетике для теплоснабжения зданий, получения горячей воды и технологического пара эксплуатируются на товарных видах топлива: природном газе, мазуте, каменном угле. Стоимость таких видов топлива с каждым годом растет. В то же время на предприятиях российской железной дороги накоплено огромное количество старых шпал. Ежегодно около 14 миллионов шпал выводится из эксплуатации. Отслужившие свой срок шпалы согласно требованиям санитарных служб должны быть захоронены на специальных полигонах. В связи с переполненностью полигонов использованные деревянные шпалы складываются в местах, не предназначенных для этого, что в свою очередь негативно влияет на экологию. Причиной вредного воздействия деревянных шпал на окружающую среду являются токсичные вещества, которыми пропитаны шпалы. Эти вещества под атмосферным воздействием выделяются из старых шпал и создают фоновое загрязнение. В состав пропиточного материала входят нейтральные углеводороды с примесью фенола, нафталина, антрацена. Эти соединения, попав в воздух, способны вызвать тяжелые отравления у людей и появление онкологических заболеваний.

Существует несколько способов утилизации отработанных деревянных шпал, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки.

Наиболее перспективным по экономическим показателям является сжигание шпал с целью получения тепловой энергии. Исследованиями установлено, что теплотворная способность старых шпал существенно выше теплоты сгорания древесных топлив и составляет $Q_n = 16521$ кДж/кг. Использование шпал в качестве топлива ограничено отсутствием экологически безопасной и экономически выгодной технологии их сжигания. Попытки использования шпал в качестве топлива в обычных топках не привели к успеху. Причиной является выделение при сжигании шпал токсичных веществ, таких как ацетон, бутанол, фенолы, фенантроны. Условия горения в штатных топках не обеспечивают желаемую концентрацию вышеуказанных ингредиентов в дымовых газах. Повышение энергоэффективности твердотопливных водогрейных котлов путем сжигания товарных топлив и древесных отходов является актуальной задачей.

Цель работы

Повышение энергоэффективности твердотопливного водогрейного котла малой мощности за счет совершенствования тепловой схемы, позволяющей использовать химическую энергию древесных отходов.

Основные задачи:

1. Разработка расчетной схемы слоевой топки малой мощности с вихревым движением газовой смеси, определение исходных данных для численных исследований горения газовой смеси при вихревом движении в топочном пространстве.
2. Проведение численных исследований параметров реагирующей газовой смеси с целью их оптимизации при различных схемах истечения воздушных струй в зону горения.
3. Проведение численных исследований параметров вихревого воздушного потока в надколосниковом пространстве при различных схемах истечения воздушных струй.
4. Разработка огневого стенда для получения экспериментальных данных, проведение экспериментальных исследований, проверка сходимости результатов численных исследований с опытными данными.

5. Разработка энергоэффективной тепловой схемы твердотопливного промышленного водогрейного котла малой мощности, оценка его энергетической и экономической эффективности.

Научная новизна работы:

1. Разработана расчетная схема слоевой топки с вихревым движением реагирующей газовой смеси, определены исходные данные для расчета.

2. Получены результаты численных исследований параметров реагирующей газовой смеси при различных схемах подачи воздуха.

3. Получены результаты численных исследований влияния схем подачи воздуха на параметры и турбулентные характеристики вихревого потока в топке без горения.

4. Получены экспериментальные данные о влиянии схемы подачи воздуха на характеристики газовой смеси и на параметры воздушного потока в слоевой топке с вихревым движением газовой смеси.

5. Разработана ресурсосберегающая и энергоэффективная тепловая схема водогрейного котла с топкой-сателлитом.

Практическая ценность работы:

1. На основе результатов диссертационной работы сформулированы рекомендации по созданию слоевой топки с вихревым движением газовой смеси для ее эксплуатации в составе твердотопливного водогрейного котла КВУ-1000 в виде топки-сателлита.

2. Математическая модель для исследования параметров реагирующей газовой смеси с вихревым движением рекомендована для оптимизации процессов горения в топке водогрейной котельной, работающей на природном газе.

3. Огневой стенд и разработанные методики внедрены в учебный процесс для изучения дисциплин «Турбулентность и горение», «Теория горения и взрыва» в ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ».

Личный вклад автора

Автору работы принадлежат постановка задач, участие в проведении численных исследований, в разработке технической схемы огневого стенда, в проведении экспериментов, в анализе опытных и теоретических данных. Автором сформулированы выводы по диссертационной работе.

Достоверность результатов исследований подтверждается применением современных вычислительных средств и методов исследований, аттестованных измерительных приборов, сходимостью результатов численных исследований и экспериментальных данных, качественным совпадением полученных результатов с результатами исследований других авторов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Расчетная схема слоевой топки с вихревым движением реагирующей газовой смеси, исходные данные для численных исследований параметров реагирующей газовой смеси.

2. Результаты численных исследований влияния конструктивных схем подачи воздушных струй в топку на характеристики горения газовой смеси.

3. Результаты численных исследований влияния схем истечения воздушных струй на газодинамические параметры и турбулентные характеристики воздушного вихревого потока в топке.

4. Огневой стенд для экспериментальных исследований влияния схем подачи воздуха на характеристики горения газовой смеси и на параметры воздушного потока в топке с вихревым движением газовой смеси.

5. Экспериментальные данные о влиянии схем подачи воздуха на характеристики горения газовой смеси и на параметры воздушного потока в слоевой топке с вихревым движением газовой смеси.

6. Тепловая схема энергоэффективного и ресурсосберегающего водогрейного котла КВУ-1000 с топкой-сателлитом.

Диссертационное исследование соответствует паспорту специальности 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика, а именно пунктам: 2) оптимизация схем энергетических установок и систем для генерации и трансформации энергоносителей, основанных на принципах их комбинированного производства; 4) разработка новых конструкций теплопередающих и теплоиспользующих установок, обладающих улучшенными эксплуатационными и технико-экономическими характеристиками; 5) оптимизация параметров тепловых технологических процессов и разработка оптимальных схем установок, использующих тепло, с целью экономии энергетических ресурсов и улучшения качества продукции в технологических процессах; 6) разработка и совершенствование аппаратов, использующих тепло, и создание оптимальных тепловых систем для защиты окружающей среды; 7) разработка теоретических аспектов и методов интенсивного энергосбережения в тепловых технологических системах.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: Национальном конгрессе по энергетике (Казань, 2014 г.); X Международной молодежной научной конференции «Гинчуринские чтения» (Казань, 2015 г.); Международной молодежной научной конференции "XXI Туполевские чтения» (Казань, 2015 г.); X школе-семинаре молодых ученых и специалистов академика РАН В. Е. Алемасова «Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении» (Казань, 2016 г.); XV Всероссийской молодежной школе-конференции «Лобачевские чтения-2017» (Казань, 2016 г.); VI Республиканском молодежном форуме «Наш Татарстан» (Казань, 2016 г.); Международном симпозиуме «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение-2016» (Казань, 2016 г.); Всероссийской молодежной конференции «Региональные программы и проекты в области интеллектуальной собственности глазами молодежи» (Уфа, 2016 г.); Международном молодежном форуме «Будущее авиации и космонавтики за молодой Россией-2017» (г. Жуковский, 2017 г.); Всероссийской научной конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика», (Ялта, 2017 г.); II Международной научно-практической конференции «Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли» (Альметьевск, 2017 г.); Международной молодежной научной конференции «XXIII Туполевские чтения» (Казань, 2017 г.), 11-й Всероссийской научной конференции по горению и взрыву (Москва, 2018 г.).

Публикации

По результатам диссертационной работы опубликовано 15 печатных работ, в том числе 4 статьи в научных журналах из перечня, рекомендованного ВАК при Минобрнауки России.

Структура и объем работы

Диссертационная работа включает в себя введение, четыре главы, заключение, список литературы и приложения. Объем работы составляет 170 страниц, включая 100 рисунков и 12 таблиц. Список использованной литературы состоит из 134 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрывается актуальность темы диссертации, формулируются цели и задачи исследования, описываются научная новизна и практическая ценность работы, обосновывается достоверность результатов, кратко излагается содержание работы по главам.

В первой главе дан сравнительный анализ технико-экономических и экологических характеристик промышленных твердотопливных водогрейных котлов малой мощности, описано состояние вопроса исследований по оптимизации конструктивных схем топок таких котлов. Приведено сравнение конструктивных схем топок слоевого сжигания, вихревых топок и слоевых топок с организацией вихревого движения дымовых газов, используемых в водогрейных котлах малой мощности. Сформулированы выводы по главе.

Во второй главе приведены результаты численных исследований параметров реагирующей газовой смеси в слоевой топке с вихревым движением газов. Описана расчетная схема, приведены методика определения состава генераторных газов и математические модели, описывающие внутритопочные процессы с учетом горения газовой фазы в вихревой части топки и без учета горения. По результатам численных исследований предложена оптимальная схема подачи воздуха в топочное пространство, способствующая полноте сгорания газозвоздушной смеси.

Согласно расчетной схеме, вихревая топка (рисунок 1) имеет две зоны реагирования горючих веществ с воздухом. В первой зоне горение щепы шпал происходит в слое на колоснике при недостатке кислорода воздуха. Для этой зоны характерны такие сложные физико-химические процессы, как нагрев и термическое разложение древесины, пропиточных веществ, частичное сгорание газовой фазы и т.п. Эти явления происходят за счет тепла, выделяющегося при сжигании части газовой фазы и углей. Воздух в первую зону подводится в количестве, необходимом для горения небольшой части горючих газов. Далее газовая смесь (генераторные газы), состоящая из продуктов термического разложения старых шпал и продуктов сгорания определенной части этих продуктов, поступает во вторую зону, расположенную в надколосниковом пространстве. В эту зону на разных уровнях от колосника подводится вторичный воздух. Воздух подается в виде отдельных струй под разными углами к радиусу топки. Такая подача способствует формированию в топочном пространстве вихревых потоков с разными структурами (подвод вторичного воздуха под разными углами на рисунке 1 условно не показан). Изменение интенсивности закрутки потока должно определять физико-химические процессы в реакционной зоне и возможность обеспечения полноты сгорания реагирующих компонентов. Детальное моделирование физико-химического процесса горения старых шпал, протекающего в такой топке, не представляется возможным из-за его сложности. Целесообразно упростить расчетную модель, согласно которой первая зона топки является генератором горючих газов, состав которых постоянен. Такое допущение позволяет рассматривать вторую зону топки зоной гомогенной реакции горения.

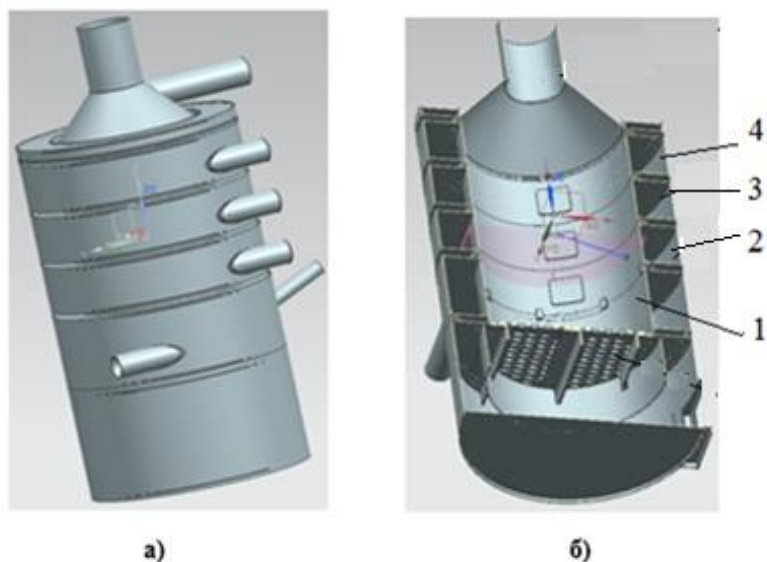


Рисунок 1. Геометрическая модель топки: а) – общий вид, б) – продольный разрез:
1 – камера газогенерации; 2, 3, 4 – воздушные секции

Моделируемым пространством являются следующие зоны: зона непосредственно над горячей щепой, лежащей на колосниковой решетке; три зоны подвода вторичного воздуха; зона выхода продуктов сгорания, включающая конусную и цилиндрическую часть топки.

Сечением подвода топливного газа (*in fuel*) является верхняя часть камеры газогенерации. В качестве топливного газа в рамках газофазной модели горения следует рассматривать газовые продукты термического разложения щепы древесины, характеристики которых будут приведены ниже.

Подвод воздуха в зону газификации осуществляется по трем секциям через сопла, оси которых по отношению к радиусу топки имеют разные углы. Секции взаимозаменяемы. Такая конструкция позволяет варьировать схемой подачи воздуха в зону реагирования горючих газов.

Для примера, на рисунке 2 приведена одна из схем подвода вторичного воздуха.

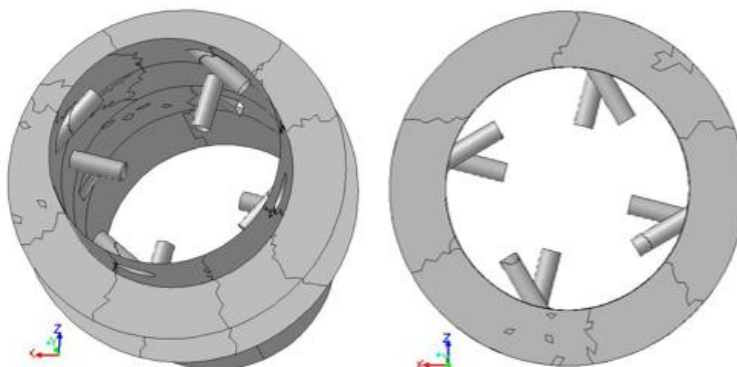


Рисунок 2. Конструктивная схема подвода вторичного воздуха в зону реагирования горючих газов

В качестве модели горения использована усовершенствованная модель ламинарных микропламен для не перемешанной смеси. Физические основы применения данной модели заключаются в раздельной подаче компонентов, которая приводит к тому, что процесс горения в значительной степени лимитируется смешением. Для предварительно не перемешанных

газовых смесей существует подход – моделирование, основанное на химическом равновесии, с предположением о равной скорости диффузии всех компонент реагирующей смеси. Исходя из того, что в любых химических процессах число атомов элементов сохраняется, концентрации элементов можно свести к одной переменной, называемой переменной смешения

$$\xi = \frac{z_i - z_{i1}}{z_{i1} - z_{i2}} \quad (1)$$

где: $Z_i = \sum \mu_{ij} w_j$ – массовая доля атома i ; μ_{ij} – массовая доля химического элемента i в молекуле компонента j (например, массовая доля С в молекуле CH_4); w_i – массовая доля компонента j ; индекс 1 означает поток окислителя; индекс 2 – поток горючего.

Суть усовершенствования модели ламинарных микропламен заключается в принятии допущения частичного химического равновесия, когда отдельные части химического процесса протекают с конечными скоростями, а все остальные бесконечно быстро. Этот подход эквивалентен представлению о турбулентном фронте пламени, как об ансамбле ламинарных микропламен. Параметры ламинарного пламени предварительно рассчитываются и сохраняются в виде таблицы, а затем ламинарное пламя внедряется в турбулентный поток с использованием статистических методов. Важной характеристикой в данной модели является скорость скалярной диссипации χ , которая по существу характеризует степень деформации фронта пламени. Скалярная скорость диссипации вычисляется из уравнения

$$\chi = 2D(\text{grad} \xi)^2 \quad (2)$$

Используя определенные по уравнениям (1) и (2) переменную смешения и скорость скалярной диссипации, определяют осредненные параметры – концентрации компонент, температуру и плотность:

$$\bar{\phi} = \iint \phi(\xi, \chi_{st}) P(\xi, \chi_{st}) d\xi d\chi_{st}, \quad (3)$$

$$\chi_{st} = \frac{C_\chi \varepsilon \bar{\xi}^{n^2}}{k} \quad (4)$$

Важное значение для правильного определения параметров процесса горения играет выбор модели турбулентности. Основываясь на известных результатах, в данной работе выбор был сделан в пользу модели RNG k - ε со стандартными пристеночными функциями.

В расчетах принимались следующие граничные условия.

Рассматриваются продукты термического разложения щепы известного состава и количества.

Общий расход утилизируемой щепы на номинальном режиме работы составляет 43 кг/час. Расходуется ≈ 41 кг/час = 0,012 кг/с.

Для проведения вычислительных экспериментов необходим состав генераторных газов. Его можно получить на основе термодинамического расчета. Исходными данными для расчета являются условная формула и полная энтальпия топлива, которые определяются по известной методике.

Для расчетных исследований из полученного состава с учетом корректировки по опытным данным были выбраны следующие компоненты (в мольных долях): $\text{N}_2 = 3,94$; $\text{CO} = 2,17$; $\text{CO}_2 = 1,7$; $\text{CH}_4 = 2,14$; $\text{H}_2 = 7,5$; $\text{H}_2\text{O} = 4,0$; $\text{CH}_3 = 3,38$; $\text{H}_2\text{S} = 4,0$; $\text{SO}_2 = 1,6$.

Далее по этим данным рассчитаны температура и состав продуктов сгорания. Расчеты проведены при давлении 103325 Па.

На выходе (сечение «out») из топки давление считали постоянным.

Параметры турбулентности на входе (in fuel, in air) задавались посредством гидравлического сопротивления и интенсивности турбулентности, которая была выбрана равной 10%.

На рисунке 3 приведены численные результаты расчетов статических температурных полей в топке при различных схемах подачи воздуха.

Сравнительный анализ температурных полей показывает, что теплонапряженность топочного пространства существенно зависит от интенсивности закрутки. Любопытно отметить, что чрезмерная закрутка реагирующей газовой смеси в вихревой части топки ухудшает условия горения горючих газов.

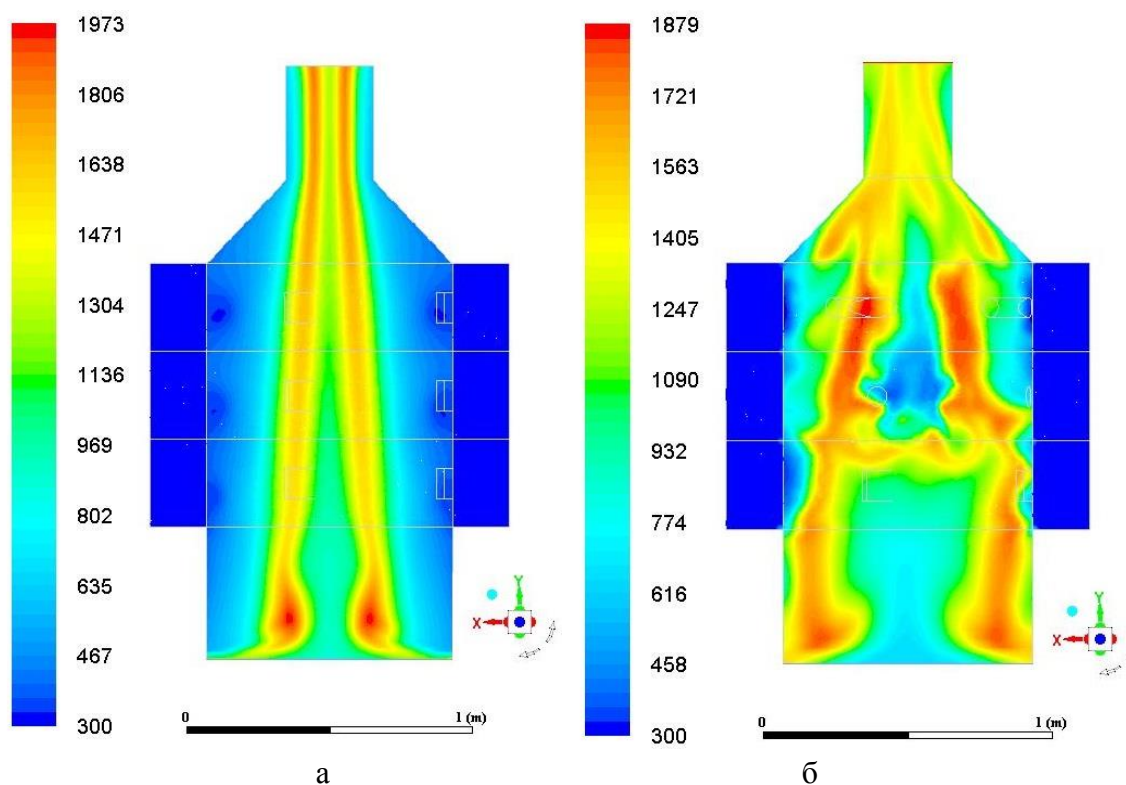


Рисунок 3. Статические температурные поля в топке при различных схемах подачи воздуха: а) воздушные сопла на всех насадках расположены тангенциально; б) углы наклона осей сопел нижнего насадка к радиусу топки составляет 90° , среднего – 0° , верхнего – 64°

На рисунке 4 а и б приведены расчетные данные по концентрации CO и CH₄ вдоль оси камеры.

Результаты расчетов концентраций горючих компонентов вдоль оси камеры также косвенно показывают, что горение в сильной степени зависит от схемы подвода воздуха в зону реагирования. Это отчетливо видно на графиках (рисунок 4а и 4б), согласно которым при подводе воздуха в зону горения по оптимальной схеме оксид углерода и метан выгорают гораздо раньше, чем при других схемах подачи воздуха.

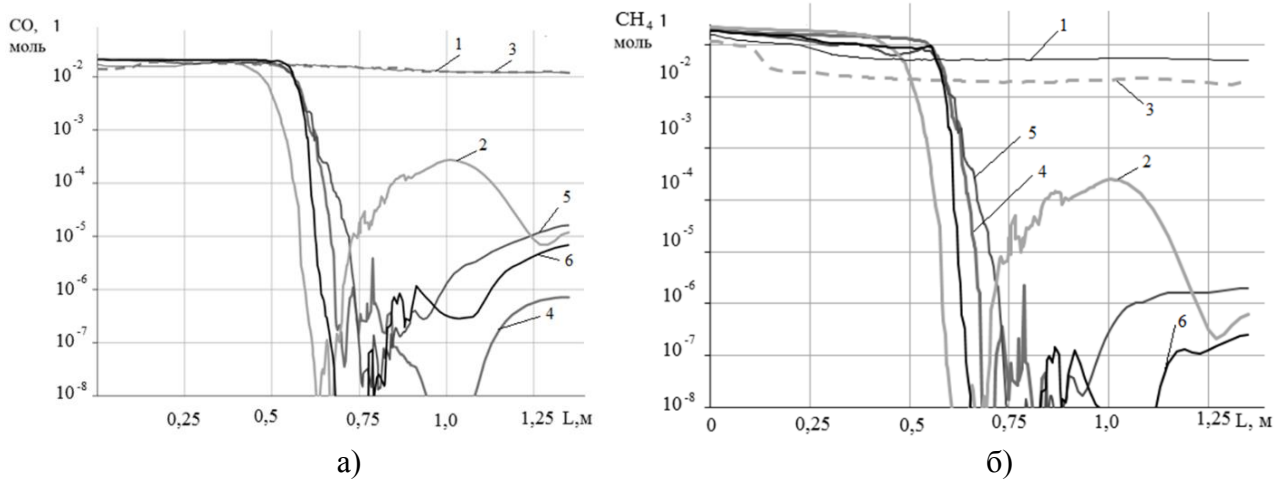


Рисунок 4. Концентрация CO и CH₄ вдоль оси камеры сгорания

С целью исследования структуры вихревого потока и влияния на нее направления истечения воздушных струй проводилась серия опытов на холодном воздухе. На рисунке 5 приведены диаграммы полного давления воздушного потока в топке при подаче воздуха по двум разным конструктивным схемам.

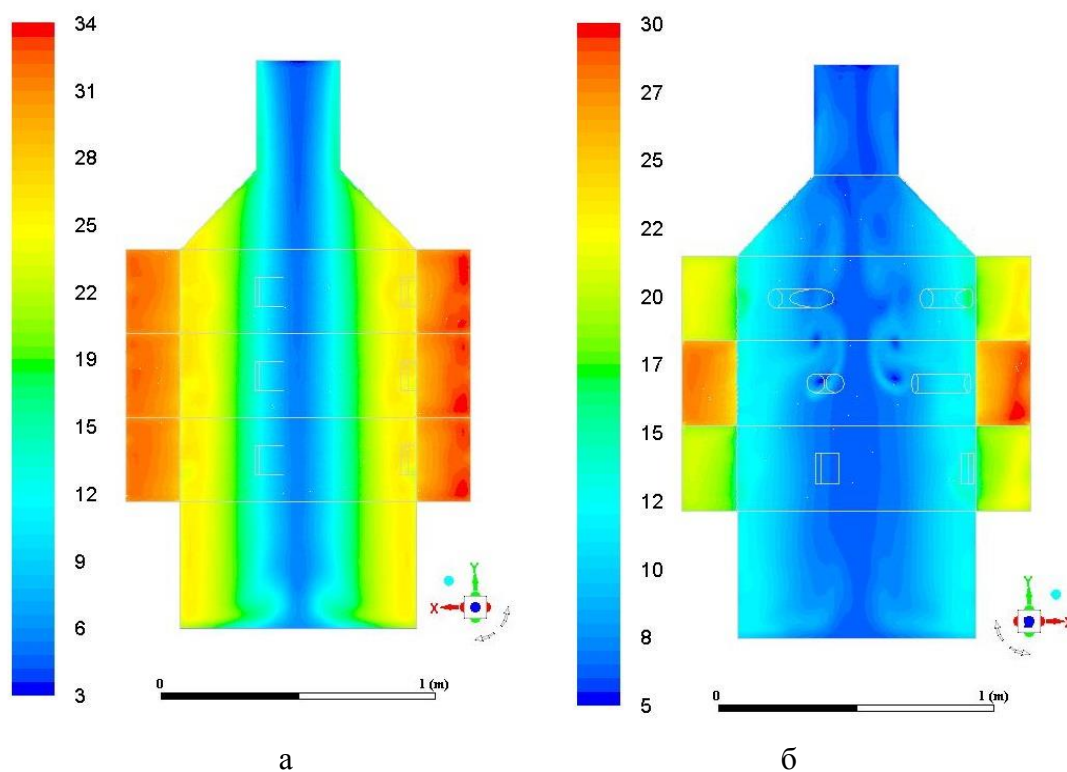


Рисунок 5. Диаграмма полного давления воздушного потока в топке при подаче воздуха в топку: а) воздушные сопла на всех насадках расположены тангенциально; б) углы наклона оси сопел нижнего насадка к радиусу топки составляют 90°, среднего – 0°, верхнего – 64°

Анализ вышеприведенных диаграмм свидетельствует о следующем: структура воздушного потока в топке однозначно зависит от схемы подачи воздуха. При тангенциальной подаче воздуха в центральной части камеры давление существенно ниже, чем в периферийной области. Формирование такой структуры газового потока в топке можно объяснить действием центробежных сил, возникающих при тангенциальном истечении воздушных струй в

топочное пространство. С изменением направления истечения воздушных струй изменяется и структура потока. Например, при истечении воздушных струй в вихревую часть топки под разными углами к радиусу в трех сечениях давление газового потока выравнивается. Комбинированием направления истечения воздушных струй можно управлять также и характеристиками турбулентности. Об этом свидетельствует анализ значений интенсивности турбулентности, полученных в поперечных сечениях топки (рисунки 6а и 6б). Из анализа диаграмм интенсивности турбулентности видно, что максимальная турбулизация вихревого потока в топке при тангенциальном истечении воздушных струй наблюдается в центральной части. Причем интенсивность турбулентности по мере приближения к выходу из топки увеличивается.

Результаты, приведенные на рисунке 6б как количественно, так и качественно отличаются от результатов, полученных для тангенциального истечения воздушных струй. Главное отличие заключается в низком градиенте изменения интенсивности турбулентности в поперечных сечениях топки.

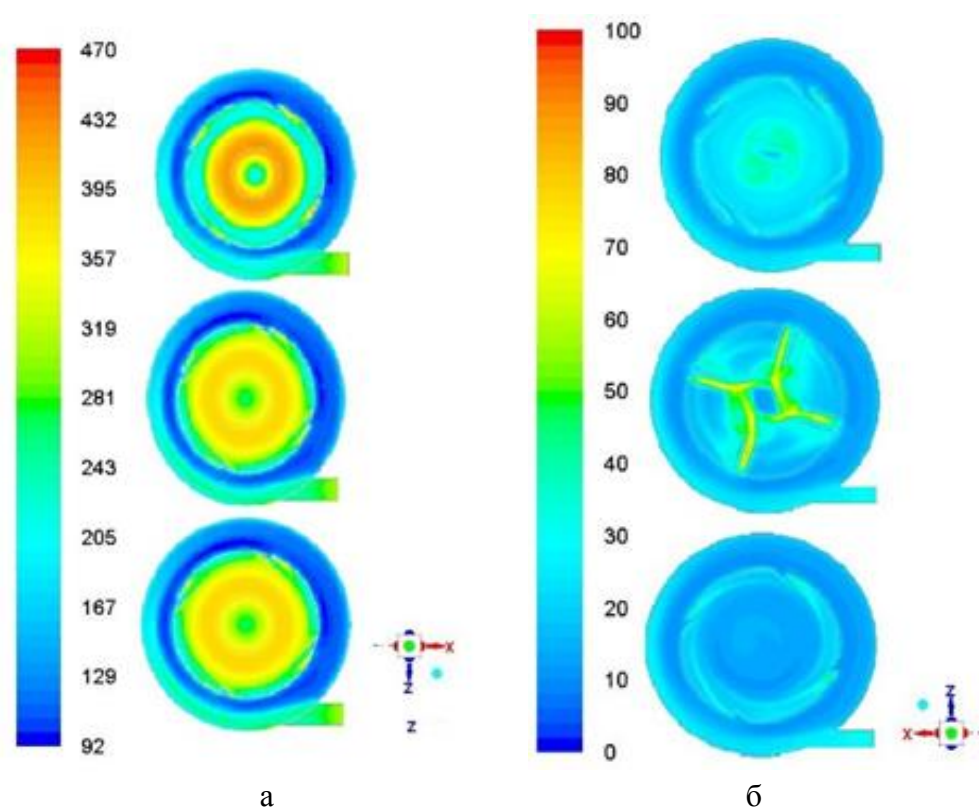


Рисунок 6. Диаграммы интенсивности турбулентности, полученные при:

- а) тангенциальном истечении воздушных струй в трех сечениях;
- б) истечении воздушных струй в топку под разными углами к радиусу в трех сечениях

На основе сравнительного анализа вышеприведенных расчетных данных можно прийти к важным практическим выводам:

1. Комбинированием направления истечения воздушных струй можно эффективно управлять газодинамическими параметрами и турбулентными характеристиками вихревого потока в топке заданной конструкции.
2. Из рассмотренных схем истечения воздушных струй в топочное пространство максимальные значения турбулентности достигаются при тангенциальной подаче воздуха.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям. Дано описание испытательного стенда, инструментальной базы, оценены погрешности измерений исследуемых параметров. В качестве объекта исследования использовалась модель слоевой топки с вихревым движением газовой фазы. Функциональная схема испытательного стенда приведена на рисунке 7.

Экспериментально подтверждено, что изменением направления истечения воздушных струй в вихревую часть топки можно управлять как газодинамическими, так и турбулентными характеристиками вихревого потока.

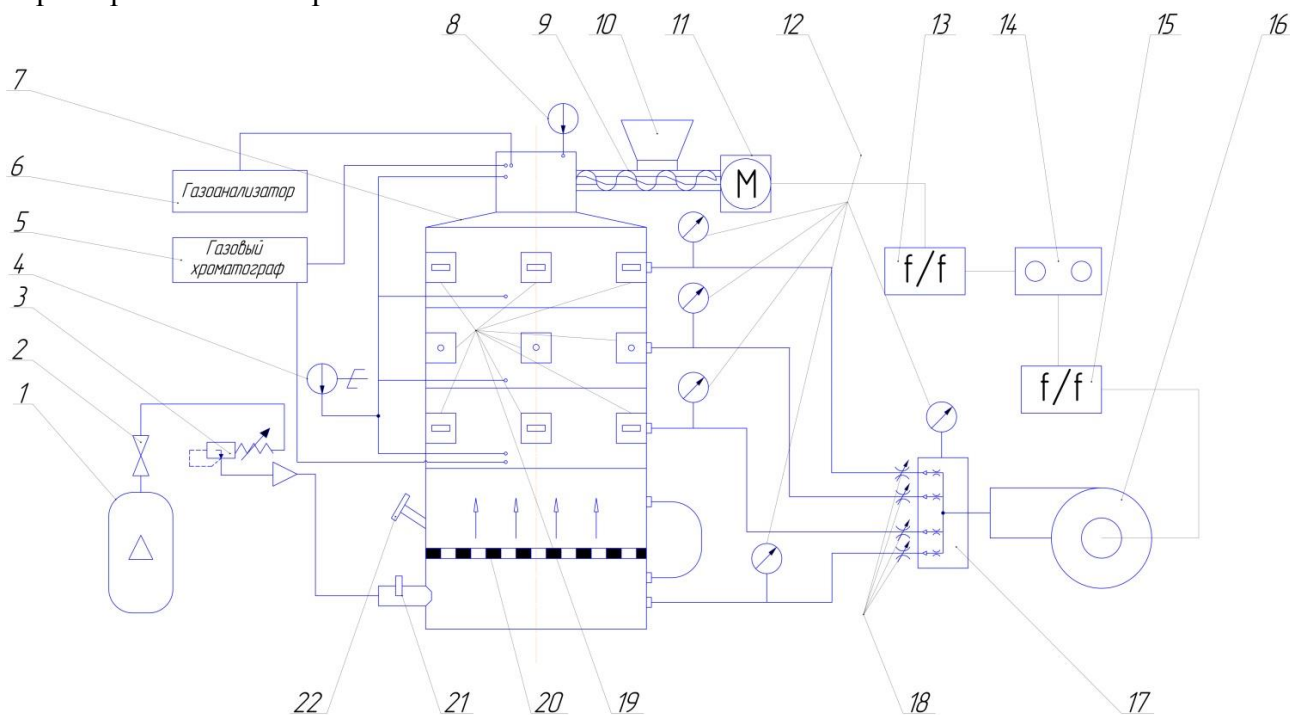


Рисунок 7. Функциональная схема огневого испытательного стенда

1 – баллон с пропаном, 2 – кран, 3 – редуктор, 4 – термометр электронный контактный «ТК – 5.09», 5 – газовый хроматограф «Focus (Thermo)», 6 – газоанализатор «Testo 340», 7 – модель слоевой топки с вихревым движением реагирующей смеси, 8 – термометр, 9 – шнек, 10 – питатель, 11 – электродвигатель, 12 – манометры, 13 – частотник питателя, 14 – пульт управления, 15 – частотник вентилятора, 16 – вентилятор, 17 – сумматор потоков (коллектор), 18 – заслонки, 19 – воздушные сопла различной конфигурации, 20 – колосниковая решетка, 21 – запальное устройство, 22 – смотровое окошко.

При тангенциальной подаче воздушных струй интенсивность турбулентности в вихревом потоке наибольшая. Результаты приведены на рисунке 8: а) воздушные сопла на всех насадках расположены тангенциально; б) углы наклона осей сопел нижнего насадка к радиусу топки составляют 90° , среднего насадка – 0° , верхнего насадка – 64° .

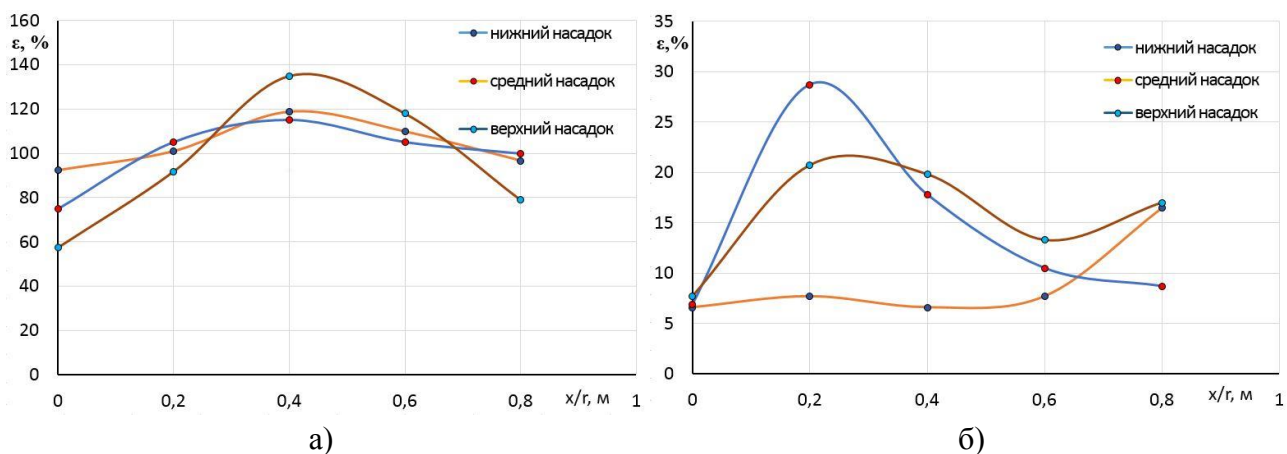


Рисунок 8. Значения интенсивности турбулентности в вихревой камере:

а) воздушные сопла на всех насадках расположены тангенциально; б) углы наклона осей сопел нижнего насадка к радиусу топки составляет 90° , среднего – 0° , верхнего – 64°

Из анализа графиков видно, что интенсивность турбулентности при тангенциальной подаче воздуха в топочное пространство существенно выше, чем во втором варианте. В третьей главе приведены также результаты огневых испытаний, которые проводились с целью определения состава генераторных газов, определения температурного поля в топке, концентрации вредных веществ в газовых выбросах. Установлено, что направление истечения воздушных струй влияет на полноту сгорания горючих компонентов. Имеется оптимальная схема подвода воздуха, обеспечивающая минимальную концентрацию вредных веществ в газовых выбросах, в том числе ароматических углеводородов, кроме устойчивых к температурной деструкции углеводородов из группы диоксинов. В таблице 1 приведено содержание некоторых веществ в дымовых газах в зависимости от схемы подвода воздуха.

Таблица 1. Содержание дымовых газов

Схема подвода воздуха	Компоненты газового потока			
	CO	NO	NO ₂	SO ₂
Схема № 1				
С (ppm)	770 ±129	145±29	97±21	31±16,2
Схема № 2				
С (ppm)	530±106	92±18,2	84±20	16±5,4
Схема № 3				
С(ppm)	339±67,8	78±15,6	43±8,6	11±2,2

Сходимость результатов численных исследований проверялась сравнением их с опытными данными. В качестве сравниваемого параметра использовалась температура газов, среднее значение которой можно определить опытным путем с достаточной точностью. На рисунке 9 приведены расчетные и измеренные значения температуры газов в топочном пространстве при тангенциальной подаче воздуха. Расхождение в значениях составляет от 20 до 35 %.

В четвертой главе рассмотрены вопросы совершенствования тепловой схемы твердотопливного водогрейного котла КВУ-1000 путем включения в его состав топкисателлита, представляющего собой слоевую топку с вихревым движением реагирующих газов. Сформулированы основные критерии выбора котла. Описана технология совместного сжигания отходов шпал и товарного углеводородного топлива в данном котле. Приведены

результаты расчета КПД усовершенствованного котла. Дана оценка энергетической и экономической эффективности работы усовершенствованного промышленного твердотопливного водогрейного котла малой мощности КВУ-1000.

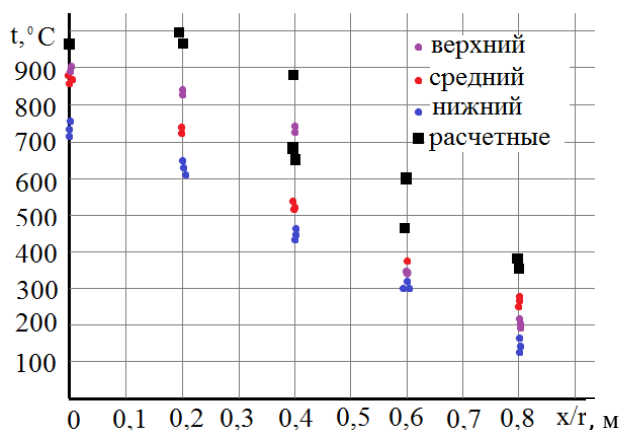


Рисунок 9. Расчетные и измеренные значения температуры газов в топочном пространстве при тангенциальной подаче воздуха

Определено, что концентрация CO и NO в дымовых газах топки-сателлита при сжигании старых шпал ниже, чем в серийно выпускаемых твердотопливных котлах. На основе полученных данных и результатов исследований других авторов дано обоснование экологически безопасной эксплуатации усовершенствованного твердотопливного котла КВУ-1000 при комплексном сжигании древесного топлива и отходов шпал. При этом за счет использования химической энергии старых шпал, выделяющейся в топке-сателлите, можно сэкономить до 400 т/г товарного древесного топлива, что повлечет за собой существенное сбережение энергетических ресурсов.

Расчет КПД усовершенствованного водогрейного котла проведен по формуле:

$$\eta = \left(0,8 \left(\frac{Q_1^k}{Q_{ri}^k}\right) + 0,2 \left(\frac{Q_1^c}{Q_{ri}^c}\right)\right) \cdot 100\% \quad (5)$$

Первый член уравнения является коэффициентом полезного действия базового котла на номинальном режиме и равен 80%. Второй член уравнения характеризует КПД топки-сателлита без учета потерь тепла с дымовыми газами. Эти потери учтены при расчете КПД базового котла.

При расчете КПД топки-сателлита учитывались следующие потери: от химической неполноты сгорания топлива; от механической неполноты сгорания топлива; потери с физическим теплом шлака; потери тепла в окружающую среду. Коэффициент полезного действия усовершенствованного водогрейного котла КВУ-1000 при номинальной производительности составляет 83%, что на три процента выше, чем у базового котла.

Оценка эколого-экономической эффективности технологии по критерию чистой приведенной стоимости показывает, что данная технология создает положительный денежный поток. Общественная эффективность составляет 3,28 млн. рублей.

Оценка эколого-экономической эффективности по критерию отношения выгоды/затраты показывает, что суммарные возможные выгоды почти в 1,5 раза превысят экономические потери. Налоговые поступления в бюджет оцениваются в 6,5 млн. рублей при ставке дисконтирования 10% в прогнозном периоде воздействия 5 лет.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы по диссертационной работе.

1. Разработана расчетная схема слоевой топки с вихревым движением реагирующей газовой смеси в надколосниковом пространстве. Определены исходные данные для расчета. Проведены численные исследования влияния направления истечения воздушных струй на внутритопочные процессы. Установлено, что варьированием направления истечения воздушных струй в зону реагирования газовой смеси можно оптимизировать конструктивную схему топки.

2. Разработана конструктивная модель исследуемой топки, проведены эксперименты по исследованию влияния угла наклона воздушных сопел на внутритопочные процессы, определены оптимальные конструктивные параметры. Замечено, что горючие компоненты в вихревом потоке лучше сгорают, когда воздушные струи в реагирующую зону подаются под разными углами к радиусу топки. Подтверждена сходимость результатов численных исследований и опытных данных: отклонения в значениях температур в топке не превышает 35%, в концентрациях вредных газов на выходе из топки – 30%.

3. Экспериментами установлено, что в газовой смеси в выходной части камеры газогенерации старых шпал содержатся высокотоксичные углеводородные соединения. При оптимальной схеме подвода воздуха в зону реагирования концентрация некоторых ароматических углеводородов в газовом выбросе снижается, кроме наиболее устойчивых к температурной деструкции углеводородов – диоксинов.

4. Предложена безопасная и ресурсосберегающая тепловая схема усовершенствованного промышленного водогрейного котла КВУ-1000 с использованием топки-сателлита, позволяющая утилизировать старые шпалы. Коэффициент полезного действия усовершенствованного котла КВУ-1000 на 3% выше, чем у базового и составляет 83% (на номинальном режиме работы котла). Оценка эколого-экономической эффективности технологии по критерию чистой приведенной стоимости показывает, что данная технология экономична и экологически безопасна. Эколого-экономическая эффективность по критерию отношения выгоды/затраты больше единицы, т.е. $1,42 > 1$, что свидетельствует об экологически эффективной технологии.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международных базах данных SCOPUS и Web of Science

1. Akhmetshina A.I. Gas dynamics of reactive gases in swirling-type furnace / A I Akhmetshina, G I Pavlov, A N Sabirzyanov and O A Tikhonov // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 824. № 092002.

2. Ахметшина А.И. О проблемах проектирования топок-сателлитов для экологически безопасного сжигания старых железнодорожных шпал / Г.И. Павлов, А.В. Кочергин, А.И. Ахметшина, Р.Р. Сиразиева // Экология и промышленность России. – 2016. – Т.20 – № 10. – С. 11-15.

Статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК по специальности диссертации

3. Ахметшина А.И. Разработка расчетной схемы камеры сгорания для сжигания щепы старых шпал/ Г.И. Павлов, А.И. Ахметшина, А.Н. Сабирзянов, О.А. Тихонов // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2018. – № 1-2 – С. 3-13.

4. Ахметшина А.И. Установление состава отработанных шпал / Г.И. Павлов, С.Ю. Гармонов, Р.Н. Исмаилова, М.В. Стремоухова, А.И. Галимова (Ахметшина), Р.В. Кондукторов // Вестник технологического университета. – 2016. – Т. 19. – № 12. – С. 41-44.

5. Ахметшина А.И. Экспериментально теоретические исследования газодинамических и турбулентных характеристик воздушного потока в слоевой топке с вихревым движением газовой смеси / А.И. Ахметшина, Г.И. Павлов, П.В. Накоряков // Вестник КГЭУ. – 2018. – Т. 10 №2 (38) 2018.

6. Ахметшина А.И. Экологическая оценка термической утилизации отработанных шпал / Г.И. Павлов, С.Ю. Гармонов, Р.Н. Исмаилова, М.В. Стремоухова, А.И. Галимова (Ахметшина) Р.В. Кондукторов // Вестник технологического университета. – 2016. – Т.19. – № 12. – С. 158-162.

Патенты

7. Пат. 171918 Рос. Федерация: МПК F23G 5/00, F23B 60/00. Устройство для сжигания дробленых древесных отходов / Г.И. Павлов, А.И. Ахметшина, А.Н. Сабирзянов, О.А. Тихонов, Р.Р. Сиразиева, М.В. Стремоухова; Заявитель и патентообладатель: ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ» (RU). – № 2017108018 заявл. 10.03.2017; опубл. 21.06.2017; бюл. № 18. – 12с.

8. Пат. 2640852 Рос. Федерация: МПК F23G 5/00, F23B 60/00. Устройство для сжигания дробленых древесных отходов / Г.И. Павлов, А.И. Ахметшина, А.Н. Сабирзянов, О.А. Тихонов, Р.Р. Сиразиева, М.В. Стремоухова; Заявитель и патентообладатель: ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ» (RU). – № 2017104203 заявл. 08.02.2017; опубл. 12.01.2018; бюл. № 2. – 12с.

9. Пат. 2539414 Рос. Федерация: МПК F23C 15/00. Устройство для сжигания твердого топлива в пульсирующем потоке / А.В. Кочергин, Г.И. Павлов. А.И. Ахметшина, Р.Ф. Шакуров, М.И. Валишев; Заявитель и патентообладатель: ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ» (RU). – № 2013100414/06 заявл. 09.01.2013; опубл. 20.01.2015; бюл. № 2. – 10с.

10. Пат. 2013100414 Рос. Федерация: МПК F23C 15/00. Устройство для сжигания твердого топлива в пульсирующем потоке / А.В. Кочергин, Г.И. Павлов. А.И. Ахметшина, Р.Ф. Шакуров, М.И. Валишев; Заявитель и патентообладатель: ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ» (RU). – № 2013100414/06 заявл. 09.01.2013; опубл. 20.07.2014; бюл. № 20. – 9 с.

Статьи в изданиях, включенных в РИНЦ

11. Ахметшина А.И. Разработка испытательного стенда для исследования вопросов смесеобразования горючих газов в воздушном потоке / Г.И. Павлов, С.В. Тихонов, Р.Р. Халиулин, А.И. Ахметшина, Д.А. Теляшов // Поиск эффективных решений в процессе создания и реализации научных разработок в Российской авиационной и ракетно-космической промышленности. – 2014. – С. 254-256.

12. Ахметшина А.И. Экспериментальное определение оптимальных условий горения древесных отходов на колоснике в топке-сателлите / Г.И. Павлов, А.И. Ахметшина, Р.Р. Сиразиева // Труды XVI Международного симпозиума «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение». – Казань, 2016. – С. 430 – 432.

13. Ахметшина А.И. Экспериментальное исследование поля скоростей в топке комбинированного типа при продувке холодным воздухом / А.И. Ахметшина // Материалы конференции «XXIII Туполевские чтения». – Казань, 2017. – Т.1. – С. 768-772.

Публикации в материалах докладов международных и всероссийских конференций

14. Ахметшина А.И. О перспективной технологии сжигания старых железнодорожных шпал в топках-сателлитах / А.И. Ахметшина, Р.Р. Сиразиева, А.Г. Павлов // Материалы докладов XI Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения». – 2016. – Т. 2.– С. 26.

15. Ахметшина А.И. Влияние схемы подачи вторичного воздуха на газодинамические параметры топки / А.И. Ахметшина, Г.И. Павлов // Материалы международного молодежного форума «Будущее авиации и космонавтики за молодой Россией-2017». – Рыбинск: РГАТУ имени П.А. Соловьева. – 2017. – С. 141-146.

16. Ахметшина А.И. Газодинамика реагирующих газов в вихревой топке / Тезисы докладов Всероссийской научной конференции с элементами школы молодых ученых «Теплофизика и физическая гидродинамика». – Новосибирск. – 2017. – С. 24.