

*На правах рукописи*

УДК 621.182.9



**ХУЖАЕВ Парвиз Саидгуфронвич**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ  
ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛОВ  
МАЛОЙ МОЩНОСТИ УСТАНОВКОЙ ПОДВИЖНОЙ  
КОЛОСНИКОВОЙ РЕШЕТКИ**

**05.23.03** - Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование  
воздуха, газоснабжение и освещение

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Душанбе - 2018

Работа выполнена в Таджикском техническом университете имени академика М.С. Осими Министерства образования и науки Республики Таджикистан

**Научный руководитель:** Доктор технических наук, доцент, доцент кафедры инженерных систем зданий и сооружений Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими  
**Сулейманов Абдусаттор Абдулахаевич**

**Официальные  
оппоненты:**

**Степанов Олег Андреевич**  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой “Промышленная теплоэнергетика” ФГБОУ ВПО Тюменского индустриального университета, г. Тюмень, Российской Федерации

**Мухиддиниён Пулод Мухиддин**  
(Мухиддинов Пулат Мухиддинович)  
кандидат технических наук, доцент, директор группы реализации проектов строительства энергетических сооружений при Президенте Республика Таджикистан, г. Душанбе.

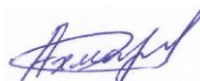
**Ведущая организация:** Физико-технический институт имени С. Умарова Академии наук Республики Таджикистан, г. Душанбе.

Защита состоится 1 мая 2018 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета 6D.KOA-016 при Таджикском техническом университете имени академика М.С. Осими по адресу: 734042, г. Душанбе, пр. академиков Раджабовых, 10А. E-mail: [dis.sia@mail.ru](mailto:dis.sia@mail.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими, [www.ttu.tj](http://www.ttu.tj)

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук



Рахмонов А.Д.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Приоритетным направлением в энергетике Республики Таджикистан в настоящее время является снижение удельных затрат на производство электрической и тепловой энергии за счёт применения энерго- и ресурсосберегающих технологий. Наибольший потенциал повышения энергетической эффективности находится в сфере совершенствования источников теплоснабжения. В крупных городах при наличии теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) доля теплоты, вырабатываемой водогрейными котлами, достигает 50%, а в поселках городского типа, сельской местности и промышленных предприятиях достигает 100%, так как для них автономные источники теплоты являются единственно возможным решением задачи теплоснабжения. Особенностью Республики Таджикистан является большой объём гидропотенциала и нехватка газа, нефти, что предопределяет первостепенное значение использования местных видов топлива (угля), как энергетического топлива, запасы которого позволяют обеспечить все население теплотой.

Для республики характерны небольшие поселения, что и предопределяет выбор автономных источников теплоснабжения – водогрейных котлов малой мощности 30-250 кВт, работающих на твёрдом топливе. Следует отметить, что уголь в Республике Таджикистан в основном бурый и каменный с большим содержанием золы 10-35%. На основании опыта эксплуатации котлов, используемых для сжигания углей с зольностью до 35% при неподвижной колосниковой решетке, не удастся осуществить полное сгорание топлива.

Применение существующих методов повышения эффективности сжигания высокосольного топлива, как показал опыт эксплуатации, не позволяет в полной мере реализовать все их достоинства в котельных агрегатах малой мощности.

Таким образом, разработка мероприятий, позволяющих повысить энергоэффективность водогрейного твердотопливного котла малой мощности, является **актуальной** задачей в области теплоснабжения как в части теоретических, так и экспериментальных исследований.

**Степень разработанности темы диссертации.** Работа основана на известных исследованиях в области теплогенерирующих установок К.Ф. Родатиса, А.Н. Полторецкого, В.М. Фокина, Е.Г. Волковыского, Н.Б. Либермана, Ю.Л. Гусева. Необходимо также отметить работы А.В. Вихрова и Л.К. Рамзина, в которых рассматриваются вопросы организации горения твёрдого топлива и особенности конструкции котельных агрегатов с топками слоевой конструкции.

В последнее время, особенно начиная с 90-х годов XX века, последовательно велись исследования касательно условий эффективного сжигания топлива различного состава без образования вредных выбросов в атмосферу. При этом основные исследования были нацелены на определение методов, а также механизмов управления и организации процессов горения, которые позволяют минимизировать значения выбросов вредных ингредиентов в атмосферу, что приведет к повышению КПД установок. К числу наиболее общих и эффективных методов расчёта теплового режима в ограниченном объёме, разработанных в Российской Федерации, относятся работы П.Н. Каменева, И.М. Михеева, С.Н. Шорина, В.Н. Богословского и др.

В то же время, в имеющихся публикациях практически не уделено внимание оптимизации режимов работы твёрдотопливных водогрейных котлов малой мощности при работе на угле с большим содержанием золы. Для этого необходимо выполнить математическое описание процессов горения топлива при изменении объёма топочного пространства, разработать конструкцию водогрейного котла с подвижной колосниковой решёткой и провести экспериментальные исследования сжигания высокозольного топлива на подвижной колосниковой решётке.

**Объект исследования:** водогрейный жаротрубный котёл малой мощности, работающий на твёрдом топливе.

**Предмет исследования:** котёл с созданием устройства для перемещения колосниковой решётки и изменения объёма топочного пространства.

**Целью исследования** является разработка нового подхода к формированию фронта пламени горения топлива за счёт изменения объёма топочного пространства, обеспечивающего высокоэффективную работу котла, снижение эксплуатационных и капитальных затрат котельных.

В работе достижение поставленной цели осуществляется решением нижеследующих **задач исследований:**

1. Провести анализ существующих способов сжигания твердого топлива в котлах малой мощности.

2. Создать конструкцию водогрейного твёрдотопливного котла с переменным объёмом топочного пространства и провести его экспериментальные исследования.

3. Разработать методику расчёта процессов сжигания твёрдого топлива в топке с переменным объёмом с учётом теплофизических свойств сжигаемого топлива.

4. Провести промышленные испытания водогрейного котла, работающего на различных видах твёрдого топлива и разработать методику регулирования процесса горения для достижения максимального КПД.

**Научная новизна** диссертационной работы заключена в следующем:

1. Разработана конструкция водогрейного котла с подвижной колосниковой решёткой, позволяющей регулировать объём топочного пространства.

2. Предложены полуэмпирические зависимости для расчёта конвективного теплообмена в трубном пучке водогрейного жаротрубного котла.

3. Разработана математическая модель управления режимами работы котла, применяемого для сжигания углей различной зольности.

**Практическая значимость исследования:**

1. Проведены экспериментальные исследования теплообмена трубного пучка жаротрубного водогрейного котла.

2. Получено уравнение для расчёта температуры горения топлива в топке котла с учётом положения колосниковой решётки, позволяющее оценить эффективность сгорания топлива.

3. Разработана математическая модель управления режимами работы котла для углей с различной зольностью.

4. В результате проведённых экспериментальных исследований установлено увеличение КПД котла с подвижной колосниковой решёткой на 3-5% по сравнению с серийными образцами.

**Методологической основой исследования** послужили исследования конвективного теплообмена и закономерностей, полученных А. Навье, Д. Стоксом, И. Ньютоном, Д. Бернулли, Г. Рихманом и др. Что касается теоретической базы, то для исследования были использованы научные и научно-практические труды, посвященные разработкам теплогенерирующих установок. С целью решения поставленных в работе задач исследования применены модернизированные методы в сочетании с классическими методами обработки информации с использованием программных и подпрограммных пакетов Microsoft office Excel и ANSYS CFX.

**Результаты исследований внедрены:**

- в АООТ «Таъминоти дехот» [«Сельское обеспечение»] в виде котла с многоходовым газоходом и улучшенной аэродинамикой, установленного и эксплуатируемого в отопительный период 2009-2011 гг. в системе отопления казармы и офицерского дома пограничной заставы «Ёл» Шурабадского района Хатлонской области Республики Таджикистан с экономическим эффектом около 7 тыс. сомони (1500 долл. США) за один отопительный сезон;

- в отоплении спецшколы-интерната с особым режимом Гиссарского района Республики Таджикистан с экономическим эффектом 607 кг угля или 303,4 сомони - 60,6 долл. США за отопительный сезон;

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Конструкция водогрейного твёрдотопливного котла малой мощности с подвижной колосниковой решеткой.

2. Результаты аналитических и экспериментальных исследований конвективного теплообмена в водогрейном жаротрубном котле.

3. Математическая модель управления режимами работы котла для сжигания углей с различной зольностью с целью повышения КПД котла.

**Степень достоверности результатов.** Достоверность выводов в диссертационной работе обеспечивается корректной постановкой и решением задач исследований: использованием сертифицированных и верифицированных в соответствии с действующими нормативными документами на территории Республики Таджикистан и Российской Федерации программных пакетов ANSYS CFX, реализующихся методом конечных элементов, численной реализацией поставленных и решенных задач исследования; обработкой информации посредством программы Microsoft office Excel; проведением и выполнением основных экспериментальных исследований посредством современных и модернизированных апробированных комплексов контрольно-измерительной цифровой системы; сравнением результатов аналитических и экспериментальных исследований; сопоставлением полученных авторских результатов с результатами других специалистов и исследователей.

**Личный вклад автора состоит в:** разработке конструкции водогрейного твёрдотопливного котла малой мощности с подвижной колосниковой решёткой (патент); проведении экспериментальных исследований конвективного пучка и уточнении расчётных соотношений для данной конструкции коэффициентов теплоотдачи при лучисто-конвективном теплообмене; разработке математической модели управления процессом горения топлива за счёт изменения положения колосниковой решетки с целью повышения КПД.

### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности.**

Отражённые в диссертации научные положения соответствуют следующим областям исследований специальности 05.23.03 - «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение», согласно номенклатуре специальностей научных работников «Технические науки»: п. 1 - Совершенствование, оптимизация и повышение надежности систем теплогазоснабжения, отопления, вентиляции и кондиционирования, методов их расчёта и проектирования; п. 2 - Технологические вопросы теплогазоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха; п. 3 - Создание и развитие эффективных методов расчёта и экспериментальных исследований систем теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения, освещения, защиты от шума.

**Апробация результатов диссертации:** основные положения работы и полученные результаты исследований докладывались и обсуждались на: республиканской научно-практической конференции (НПК), посвящённой 20-летию Государственной независимости Республики Таджикистан и 55-летию Таджикского технического университета им. академика М.С. Осими (г. Душанбе, 2011); международной НПК «Архитектурное образование и архитектура Таджикистана: 50 лет развития и совершенствования» (г. Душанбе, 2013); республиканской НПК «Наука и использование энергетического потенциала Таджикистана» (г.Курган-Тюбе, 2013); международной НПК «Архитектурное образование и архитектура Таджикистана: 50 лет развития и совершенствования» (г.Душанбе, 2013); Международной НПК «Современные тенденции в архитектуре, строительстве и образовании в Республике Таджикистан» (г.Душанбе, 2014); международной НПК «Современные тенденции в архитектуре, строительстве и образовании в Республике Таджикистан» (г.Душанбе, 2014); VII международной НПК «Перспективы развития науки и образования» (г.Душанбе, 2014); республиканской НПК «Рушди меъмори, сохтмон ва истехсоли масолеҳҳои сохтмони» [«Развитие архитектуры, строительства и производства строительных материалов»] (г.Худжанд, 2015); международной НПК «Актуальные проблемы и перспективы развития строительных конструкций: инновации, модернизация и энергоэффективность в строительстве» (г. Алма-Ата, 2015); международной НПК «Строительство, архитектура, энергоэффективность и экология» (г.Тюмень, 2016); международной НПК «Актуальные проблемы и перспективы развития строительных конструкций: инновации, модернизация и энергоэффективность в строительстве» (г. Алма-Ата: КазГАСА, 2016); международной НПК «Актуальные проблемы управления в различных сферах жизни общества» (г. Челябинск, 2017); республиканской научно-практической конференции (НПК) «Вода для жизни», посвящённой Международному десятилетию действия «Вода для устойчивого развития» (г. Душанбе 2017); XIX международной НПК «Проблемы управления речными бассейнами при освоении Сибири и Арктики в контексте глобального изменения климата планеты в XXI веке» (г. Тюмень, 2017).

**Публикации.** Основные результаты исследований опубликованы в 20 статьях, из них 6 статей - в изданиях, рекомендованных ВАК РТ и 1 малого патента Республики Таджикистан на изобретение.

**Объём и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, основных выводов, списка литературы и приложений. Текст диссертации изложен на 142 страницах, из них основной текст - на 129 страницах, включая 19 таблиц и 18 рисунков.

**Ключевые слова:** теплоснабжение, энергоэффективность, уголь, котёл, колосниковая решётка, теплообмен.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, показаны научная новизна и практическая значимость диссертации.

**В первой главе «Обзор литературных источников и современное состояние повышения эффективности сжигания низкосортного топлива»** рассмотрены: характеристики угольных месторождений Республики Таджикистан; современные способы сжигания угля в котлах малой мощности; особенности процессов горения твердого низкосортного топлива в топочном пространстве; условный КПД топки и определение тепловых потерь.

На рис. 1 приведены основные угольные месторождения Республики Таджикистан, а их основные теплофизические свойства представлены в табл. 1.



Рисунок 1 – Карта угольных месторождений  
Таблица 1 – Основные теплофизические свойства углей

№	Наименование месторождения	Теплота сгорания, кДж/кг	Влажность, %	Зольность, %	Выход летучих веществ, %
1.	Хакими	27017÷32573	5,2÷17,4	4,8 ÷ 19,7	26,8 ÷ 46,9
2.	Фан-ягноб	32260	0,35÷1,88	3,9 ÷ 24,5	23,1 ÷ 36,9
3.	Сайят	30919	4,9	32,3	32,4
4.	Зид ди	28085÷32175	3,4÷10,2	12,6 ÷ 33,7	4,9 ÷ 25,8
5.	Миёнаду	35026	1,1	11,1 ÷ 30	4,9 ÷ 25,8
6.	Равноу	31694	0,3÷9,6	6,3 ÷ 34,8	29,3 ÷ 38,3
7.	Назар-Айлок	35145	0,78÷4,66	1,2 ÷ 4,2	3,0 ÷ 5,0
8.	Шураб	27964	13,1	12,5	34,8

Рассмотрены существующие методы повышения эффективности сжигания твёрдого топлива в котлах, на основании чего установлена необходимость проведения исследований в области эффективного сжигания твёрдого топлива в котлах малой мощности, т.к. известные подходы к повышению эффективности сжигания твёрдого топлива пригодны, в основном, к мощным котлам тепловых электростанций или районных котельных.

Рассмотрены физико-химические процессы горения твёрдого топлива, влияющие на эффективность работы котла и КПД топки. Установлено, что конфигурация и вид топки, способ ее обслуживания, а также вид и свойства топлива в первую очередь влияют на химическую и механическую неполноту сгорания топлива. При этом потери со шлаками оказывают наибольшее влияние при сжигании многозольного топлива, а потери с уносами увеличиваются при сжигании топлива с высоким выходом летучих при малом объёме топочной камеры или увеличении коэффициента избытка воздуха в топке.

**Во второй главе «Экспериментальные исследования теплоотдачи на вертикальной поверхности газоотводной трубы»** рассмотрено следующее: стенд для исследования совместной конвекции у вертикальной поверхности газоотводной трубы; методика проведения экспериментальных исследований; методика обработки и применения полученных экспериментальных данных.

Исследование теплоотдачи от наружной поверхности газоотводящих труб к жидкости в условиях свободной конвекции проводилось в лабораторных условиях. Для изучения тепловых характеристик трубной системы водогрейного котла был изготовлен экспериментальный стенд, представленный на рис. 2.

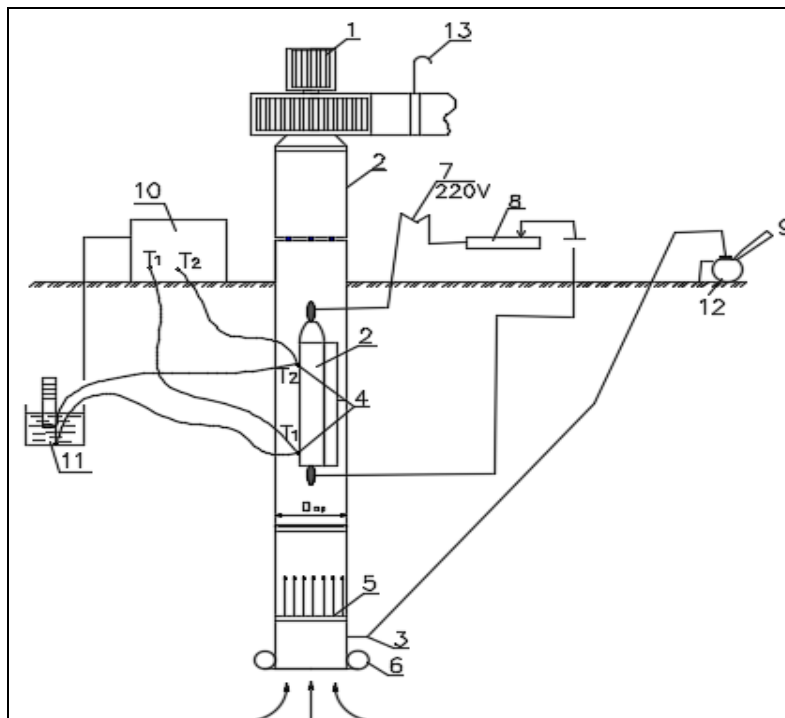


Рисунок 2 - Схема экспериментального стенда для исследования смешанной конвекции. 1 – вентилятор; 2 – испытываемая труба; 3 – штуцер статического давления; 4 – термопары; 5 - выравнивающая стенка; 6 - коллектор измерительный; 7 – выключатель; 8 – автотрансформатор (реостат); 9 – микроманометр; 10 – гальванометр; 11 - холодный спай; 12 – стол; 13 – регулирующий шибер.



Экспериментальный стенд (рис. 2) представляет собой отрезок цилиндрической трубы (2) (с параметрами:  $d = 25$  мм,  $l = 310$  мм), закреплённой с помощью теплоизолирующих вставок на скобке, которая шарнирно соединена со стойкой, измерительного коллектора (6), снабженного штуцером для отбора статического давления (3), микроманометром (9) и шибером (13) для регулировки количества воздуха, проходящего через испытательную трубу. Для стабилизации потока воздуха после коллектора (6) испытательная труба снабжена распределителем потока воздуха (5). Имитационное движение теплоносителя в трубном барабане котла, вызванное действием циркуляционного давления в системе водяного отопления, обеспечивается вентилятором (1).

Принципиальная электрическая схема экспериментального стенда представлена на рис. 3. Внутри испытательной трубы (1) смонтирован электрический нагревательный элемент (2) с питанием от сети переменного тока через автотрансформатор. Для измерения напряжения, протекающего через электрический нагреватель, предусмотрен гальванометр (10, рис. 2).

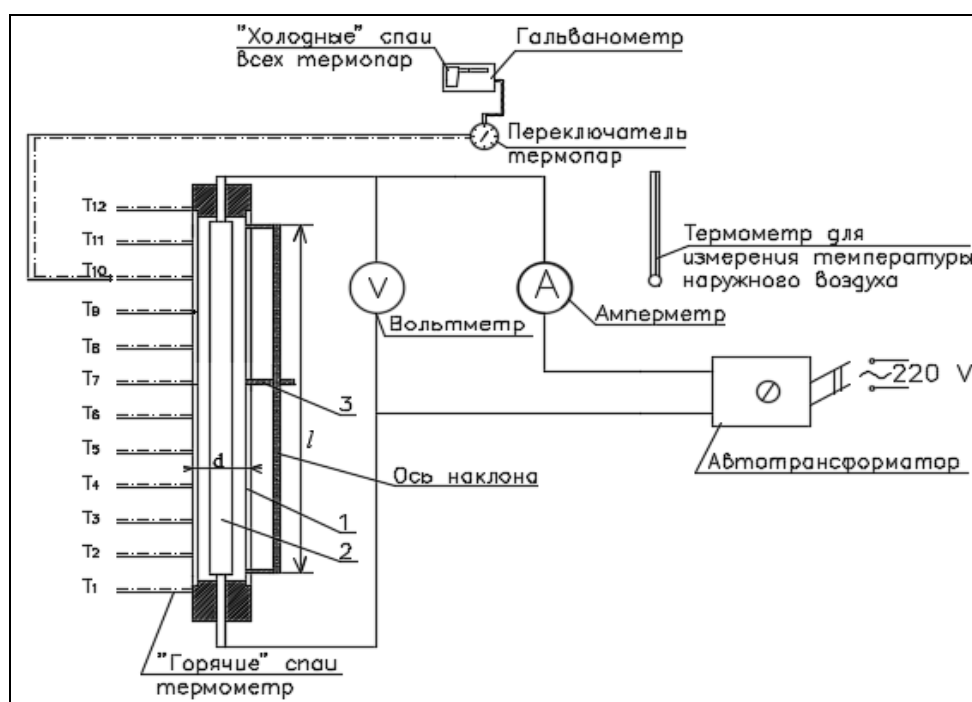


Рисунок 3 - Принципиальная электрическая схема экспериментального стенда  
1 – испытательная труба (цилиндр); 2 - электронагреватель; 3 - теплоизолятор;  
« $T_1 - T_{12}$ » - «горячие» спаи термопар.

Температура поверхности трубы измерялась десятью термопарами  $T_1 - T_{12}$ , «горячие» спаи которых равномерно заделаны на поверхности трубы и соединены с измерителем температуры «холодным» спаем посредством переключателя. Для определения потерь тепла в местах крепления трубы (через теплоизолятор) предназначены две термопары  $T_1 - T_{12}$ , горячие спаи которых установлены на наружной поверхности теплоизоляторов. «Холодные» спаи всех термопар размещены в блоке измерения температур, соединенного с переключателем термопар. Температура воздуха, окружающего установку, измерялась ртутным термометром.

Опыты проводились для трёх случаев: горизонтальной трубы ( $\varphi = 0^\circ$ ) вертикальной трубы ( $\varphi = 90^\circ$ ) и наклонной трубы ( $0 < \varphi < 90^\circ$ ).

Согласно правилу Макса-Адамса при смешанном теплообмене в расчёте принимается большее из частных значений коэффициента теплообмена как при свободной, так и при вынужденной конвекции. Правило применимо при лобовом обтекании поверхности. В случае, когда вынужденное движение направлено вдоль поверхности, величина коэффициента конвективного теплообмена зависит от скорости теплоносителя около поверхности, т.е. учитывается подвижность потока в трубном пространстве, вызванным циркуляционным давлением в системе отопления.

Значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha_{оп}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К) на основании опытных данных определялось по формуле:

$$\alpha_{оп} = (Q - Q_{пот}) / ((t_{cp} - t_в)F), \quad (1)$$

где  $F = \pi dl$  – величина теплоотдающей поверхности трубы, м<sup>2</sup>.

Величина расчётного коэффициента теплоотдачи  $\alpha_p$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К) рассчитывалась как сумма конвективного ( $\alpha_k$ ) и лучистого ( $\alpha_l$ ) коэффициентов:

$$\alpha_p = \alpha_k + \alpha_l \quad (2)$$

Коэффициент лучистой теплоотдачи определялся:

$$\alpha = 5,67 \cdot \varepsilon \cdot ((T_{cp}/100)^4 - (T_в/100)^4) / (T_{cp} - T_в), \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  - степень черноты поверхности трубы.

Значение коэффициента теплопередачи определено на основании критериального уравнения:

$$\alpha_k = Nu \cdot (\lambda/d), \quad (4)$$

где  $\lambda$  - коэффициент теплоотдачи воздуха, Вт/(м·К);  $d$  - диаметр трубы, м;  $Nu$  – критерий Нуссельта.

В зависимости от режима (ламинарный, переходный, турбулентный) величина критерия Нуссельта определяется критериальным уравнением:

$$Nu = C \cdot Ra^n \quad (5)$$

где  $Ra$  – критерий Релея.

В результате обработки экспериментальных данных были установлены коэффициенты, входящие в уравнение (5):  $C=0,56$ ;  $m=0,247$ .

Таким образом, получено критериальное уравнение для расчёта коэффициента теплоотдачи в газоотводящем тракте котла:

$$Nu = 0,56 \cdot Ra^{0,247} \quad (6)$$

Погрешность проведенных экспериментальных исследований значений коэффициентов теплоотдачи совпадает с результатами, полученными рядом авторов, и не превышает 1%.

**В третьей главе «Теоретические и экспериментальные исследования теплоотдачи в твёрдотопливном котле с переменным объёмом топки»** рассмотрено следующее: процессы теплопередачи в топочной камере переменного объема; распределение температуры продуктов сгорания по ходу движения в газоходах котла; особенности изменения температуры продуктов сгорания по ходу движения в газоходах котла с переменным объёмом топки.

Установлено, что при сжигании пылевидного топлива с легкоплавкой золой первоочередной задачей является снижение температуры продуктов сгорания на входе в газоходы, т.к. зола топлива, увлекаемая в газоходы, налипает на поверхности нагрева, приводит к сужению живого сечения прохода продуктов сгорания и уменьшению коэффициента теплопроводности.

При регулировании положения колосниковой решетки в топке происходит изменение эффективной толщины излучающего слоя:

$$S = 3,6 \cdot V_T / F_{CT}, \quad (7)$$

где  $V_T$  - объём топочной камеры, м<sup>3</sup>,  $F_{CT}$  - площадь поверхности стен топки, м<sup>2</sup>.

Для управления процессами горения твёрдого топлива за счёт изменения положения колосниковой решётки в топке необходимо придерживаться следующих зависимостей определения температуры газов на выходе из топки коэффициента теплоотдачи излучением:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_T'' = \frac{T_T}{M \left( \frac{5,7 \cdot 10^{-11} \xi H_{\text{л}} a_T T_T^3}{\varphi B_p V c_p} \right)^{0,6} + 1} - 273 \\ \varepsilon_T = \frac{\varepsilon_{\phi} + (1 - \varepsilon_{\phi}) R / F_{CT}}{1 - (1 - \varepsilon_{\phi})(1 - \psi_{CP})(1 - R / F_{CT})} \\ \varepsilon_{\phi} = 1 - \exp(-kpS) \end{array} \right. \quad (8)$$

где  $T_T''$  - температура газов на выходе из топки, К;  $T_T$  - абсолютная теоретическая температура горения в топке, К;  $M=0,52$  - расчётный коэффициент, зависящий от относительного местоположения максимума температуры в слоевой топке;  $\xi=0,7$  - условный коэффициент загрязнения лучевоспринимающих поверхностей, выполненных из гладкотрубных экранов при сжигании угля;  $a_T$  - степень черноты топки;  $H_{\text{л}}$  - площадь лучевоспринимающей поверхности нагрева, м<sup>2</sup>;  $\varphi$  - коэффициент сохранения тепла;  $B_p$  - расчётный расход топлива, кг/с;  $V c_p$  - средняя суммарная теплоёмкость продуктов сгорания топлива в интервале температур  $T_T - T_T''$  кДж/(кг·К),  $\varepsilon_T$  - степень черноты топки;  $\varepsilon_{\phi}$  - степень черноты факела;  $R$  - площадь зеркала горения, м<sup>2</sup>;  $\psi_{CP}$  - коэффициент тепловой эффективности экранов, рассчитываемый  $\psi_{CP} = H_{\text{л}} \cdot \xi / (F_{CT} - R)$ ;  $k$  - коэффициент ослабления лучей трёхатомными газами, золовыми и коксовыми частицами, 1/(м·МПа);  $p$  - абсолютное давление газов в топке, МПа.

Представленная зависимость (7) позволяет определять температуру продуктов сгорания перед входом в газоходы котла в зависимости от положения колосниковой решётки в топке с целью предотвращения плавления золы и налипания её на стенках.

Для определения количества переданного теплоносителю тепла в жаровых трубах водогрейного котла сформулирована и решена задача о закономерностях изменения температуры продуктов сгорания, движущихся в газоходах.

Процесс передачи теплоты при движении продуктов сгорания в газоотводящей трубе принят аналогично решению, предложенному В. Г. Шуховым, по распределению температуры при движении нефти по трубопроводу, уложенному в грунт:

$$t(x) = t_c - (t_0 - t_c) \cdot e^{-\frac{\pi k d}{M c_p}} \quad (9)$$

где  $M$  - массовый расход продуктов сгорания, кг/с;  $C$  - массовая теплоёмкость продуктов сгорания, кДж/(кг·°С);  $t(x)$  - значение температуры продуктов

сгорания в точке с координатой  $x$ , °C;  $t_c$  – средняя температура теплоносителя, °C;  $d_3$  – внутренний диаметр трубы, в м.

Величина коэффициента теплоотдачи определяется по уравнению с учётом того, что термическое сопротивление стенки незначительно:

$$K_c = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{вн}} + \frac{1}{\alpha_n}} \quad (10)$$

где  $\alpha_{вн}$  – коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности газоотводящей трубы,  $\alpha_{вн} = \alpha_{кв} + \alpha_{лв}$ ;  $\alpha_n$  – коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности газоотводящей трубы.

Значение коэффициента теплоотдачи на наружной поверхности трубы определялось по критериальному уравнению:

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,43} \quad (11)$$

где  $Re$  – критерий Рейнольдса;  $Pr$  – критерий Прандтля.

Значение конвективной составляющей коэффициента теплоотдачи при продольном омывании поверхности нагрева (внутренней поверхности газоотводящих труб) определялось:

$$\alpha_{кв} = 0,023 \frac{\lambda}{d_3} \left( \frac{\omega d_3}{\nu} \right)^{0,8} Pr^{0,4} c_t c_b \quad (12)$$

где  $Pr$  – критерий Прандтля (величина критерия физических свойств для дымовых газов среднего состава);  $d_3$  – внутренний диаметр труб, м,  $c_t = 1,06$  – поправка при охлаждении газов, зависящая от температуры потока и стенки,  $c_b$  – поправка на относительную длину,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности при средней температуре потока продуктов сгорания, ккал/м·ч·°C;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости продуктов сгорания при средней температуре потока, м<sup>2</sup>/сек.

Значение коэффициента лучистого теплообмена со стороны горячих продуктов сгорания  $\alpha_{лв}$  можно определить также на основании зависимости:

$$\alpha_{лв} = \frac{q_l}{t_r - t_{ст}} \quad (13)$$

Значение плотности теплового потока  $q_l$ , передаваемого от газа поверхности топочного пространства, определено по уравнению Стефана – Больцмана:

$$q_l = C_0 \frac{\varepsilon_c + 1}{2} \left[ \varepsilon_r \left( \frac{T_r}{100} \right)^4 - \varepsilon_{г.с} \left( \frac{T_c}{100} \right)^4 \right] \quad (14)$$

где  $T_r$  – температура продуктов сгорания, T °K;  $T_c$  – температура поверхности стенки, T °K;  $\varepsilon_c$  – степень черноты тепловоспринимающей поверхности;  $\varepsilon_r$  – степень черноты газа;  $\varepsilon_{г.с}$  – степень черноты газа при температуре поверхности стенки.

Следует учесть, что при изменении положения подвижной колосниковой решетки степень черноты меняется. Принимаем, что изменение приведенной степени черноты происходит по закону:

$$\varepsilon_r = a + b\bar{t} + c\bar{t}^2 \quad (15)$$

Степень черноты дымовых газов, представляющих в основном углекислый газ и водяной пар, определяется:

$$\varepsilon_z = \varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O} \quad (16)$$

Учитывается, что при снижении температуры дымовых газов максимум излучения сдвигается по закону Вина в сторону коротких длин волн, это приводит к изменению количества передаваемой теплоты. За расчётную температуру принимается относительная температура топки  $\bar{t} = t/t_m$ , т. е. соотношение фактической в данной точке к средней, тогда относительная степень черноты газов имеет вид:

$$\bar{\varepsilon}_z = \frac{\varepsilon_z t}{\varepsilon_z t_m} \quad (17)$$

Коэффициенты полинома в уравнении (15) определены, исходя из известных граничных условий (при максимальной температуре газов в топке равной 1500°C и температуре газов на выходе из топки равной 300°C):

$$\text{при } \bar{t} = 0 \quad d\bar{\varepsilon}_z = 0 \quad b = 0; \quad \text{при } \bar{t} = 0 \quad \bar{\varepsilon}_z = 1 \quad a = 0; \quad \text{при } \bar{t} = 1 \quad \bar{\varepsilon}_z = 0,45 \quad c = 0,55$$

Тогда распределение степени черноты газов в топочной камере будет:

$$\bar{\varepsilon}_z = 1 - 0,55\bar{t}^2 \quad (18)$$

На рис. 4 приведена графически зависимость (18) и экспериментальные данные, приведённые в справочной литературе. Погрешность расчёта степени черноты дымовых газов по предложенной зависимости не превышает 5%, что достаточно для практических расчётов.

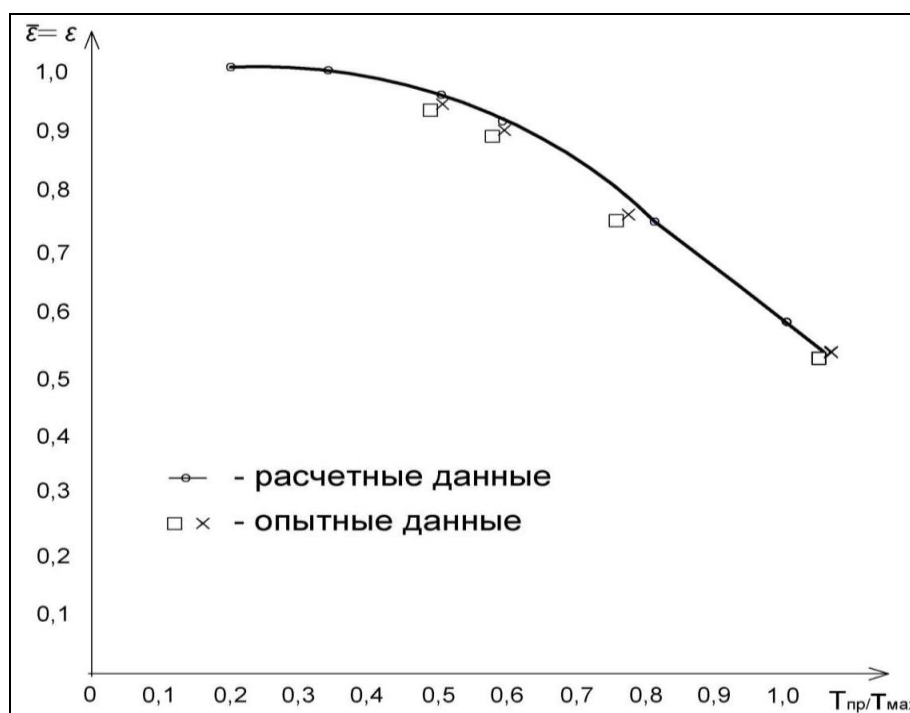


Рисунок 4 – Зависимость изменения степени черноты газов в топочной камере в зависимости от температуры.

При регулировании объёма топочного пространства лучистый теплообмен предложено определять зависимостью:

$$\begin{aligned} q_{л} &= \frac{1}{2} (\varepsilon_c + 1) C_o \left[ \varepsilon_r \left( \frac{T_r}{100} \right)^4 - \varepsilon_{r.c} \left( \frac{T_c}{100} \right)^4 \right] = \\ &= \frac{1}{2} (\varepsilon_c + 1) C_o \bar{h}_r^{0,5} \left[ \varepsilon_r \left( \frac{T_r}{100} \right)^4 - 0,19 \left( \frac{T_c}{100} \right)^4 \right] \end{aligned} \quad (19)$$

В уравнении (19) степень черноты газа при температуре поверхности стенки для инженерных расчётов с точностью до 5% предлагается определять по уравнению: 
$$\varepsilon_{г.с} = \left[ \varepsilon_{CO_2} \left( \frac{T_r}{T_c} \right)^{0,65} + 0,0208 \left( \frac{1773}{T_r} \right)^{0,6} \right] = 0,19 \cdot \left( \frac{1773}{T_r} \right) \quad (20)$$

Изменение степени черноты газа при температуре поверхности стенки в топке при изменении объёма топочного пространства представлено на рис. 5.

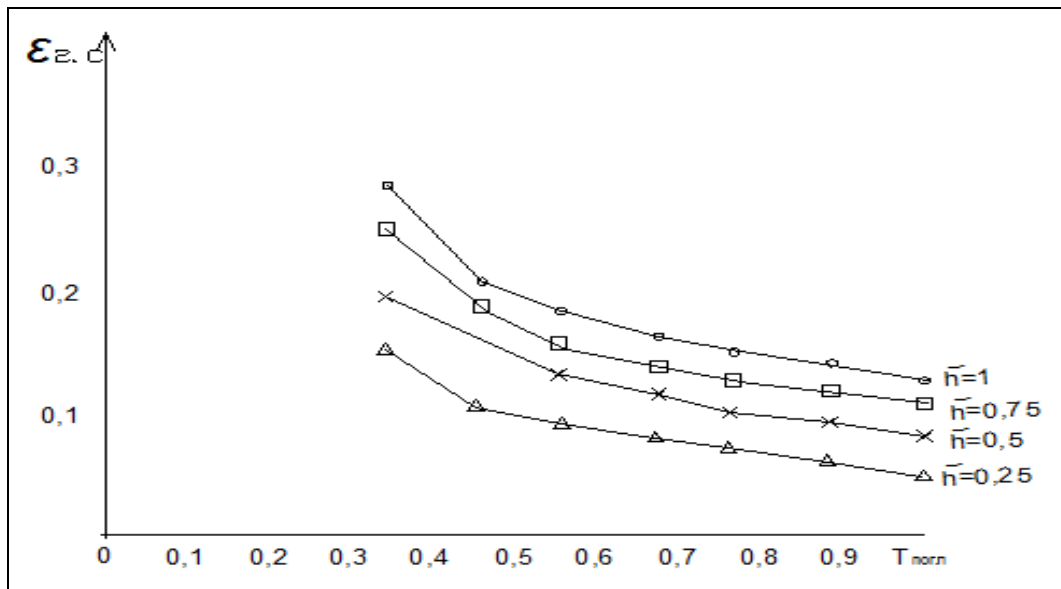


Рисунок 5 - Степень черноты газа при температуре поверхности стенки в топке при изменении объёма топочного пространства.

На рис. 6 представлено изменение степени черноты дымовых газов в топке в зависимости от температуры сгорания и расположения колосниковой решётки.

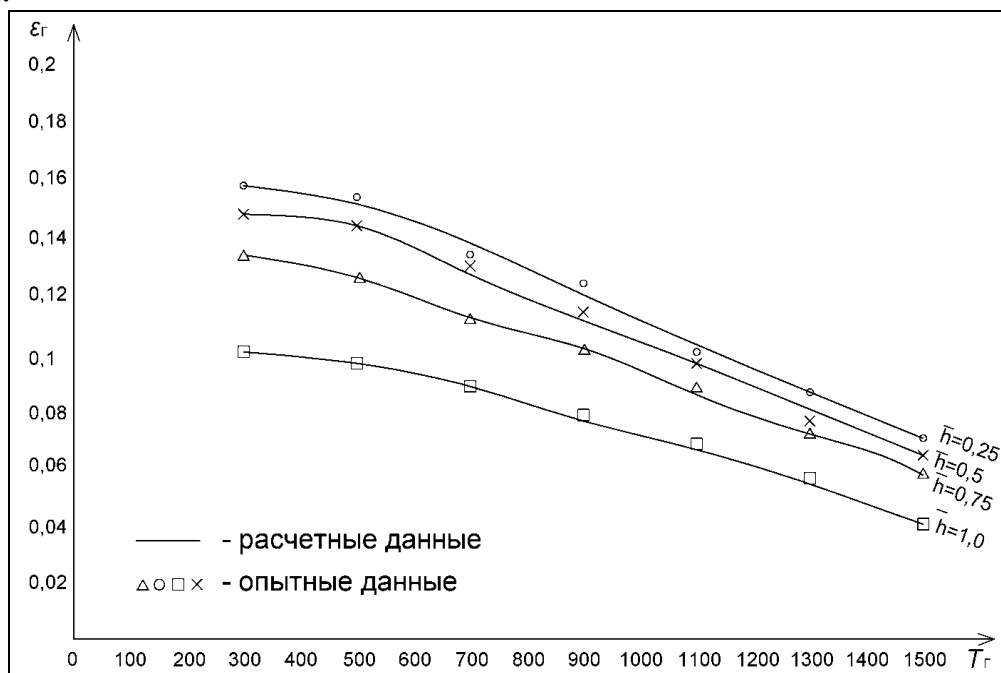


Рисунок 6 - Изменение степени черноты дымовых газов в топке в зависимости от температуры сгорания и расположения колосниковой решётки.

**В четвертой главе «Разработка конструкции и результаты эксплуатационных испытаний твердотопливного водогрейного котла с переменным объемом топки»** рассмотрены: конструкция механизма перемещения колосниковой решётки в топке котла; промышленные испытания твёрдотопливного водогрейного котла с переменным объёмом топки; эффективность твёрдотопливных водогрейных котлов малой мощности с переменным объёмом топки при сжигании различных видов угля.

Конструкция котла разработана с учётом проведенных исследований, исходя из показателя эффективности полноты сгорания топлива в топке нормируемого тепловым напряжением топочного пространства и зеркала горения:

$$\frac{Q}{V_m} = \frac{B Q_n^p}{V_m} \quad (21)$$

где  $V_m$  — активный объём топочной камеры, м<sup>3</sup>;  $B$  — часовой расход топлива, кг/ч;  $Q_n^p$  — низшая теплота сгорания топлива кДж/кг.

В сконструированном котле сжигаемое топливо горит в слое, находящемся на колосниковой решётке, в котором протекают все фазы горения и называемым зеркалом горения, интенсивность работы которого характеризуется видимым тепловым напряжением зеркала горения.

$$\frac{Q}{R} = \frac{B Q_n^p}{R} \quad (22)$$

где  $R$  — площадь зеркала горения, м<sup>2</sup>.

На основании проведённых исследований с учётом опыта эксплуатации для оптимизации процесса сжигания низкосортных углей необходимо:

- с целью полного сгорания топлива минимизировать величину теплового напряжения топочного объёма;
- для сжигания летучих веществ твёрдого топлива задействовать больший объём топки;
- для сжигания коксового остатка твёрдого топлива задействовать меньший объём топки;
- с целью минимизации потерь теплоты от механического недожога вследствие уноса из пределов топки мелких, не успевших сгореть частиц топлива, уменьшать величину теплового напряжения зеркала горения.

С целью оптимизации процесса сжигания низкосортных углей, добываемых на угольных месторождениях Республики Таджикистан, или работы котла на различных видах поставляемого топлива разработана конструкция водогрейного жаротрубного секционного твёрдотопливного котла малой мощности с регулируемой высотой положения колосниковой решётки (изменяемым объёмом топочной камеры), рис. 7.

Конструкция топки с подвижной колосниковой решёткой для водогрейного жаротрубного твёрдотопливного котла малой мощности приведена на рис. 8. Производственные испытания водогрейного котла проводились в здании заставы пограничной службы, включающей в себя офицерский дом (четыре двухкомнатные квартиры) и казармы.

В опытных образцах регулировка высоты положения колосниковой решётки, подача топлива на колосниковую решётку и разгрузка шлака выполнялись вручную. Каждая партия топлива перед загрузкой взвешивалась. Качество горения топлива оценивалось по цвету горящего факела и анализу продуктов сгорания.

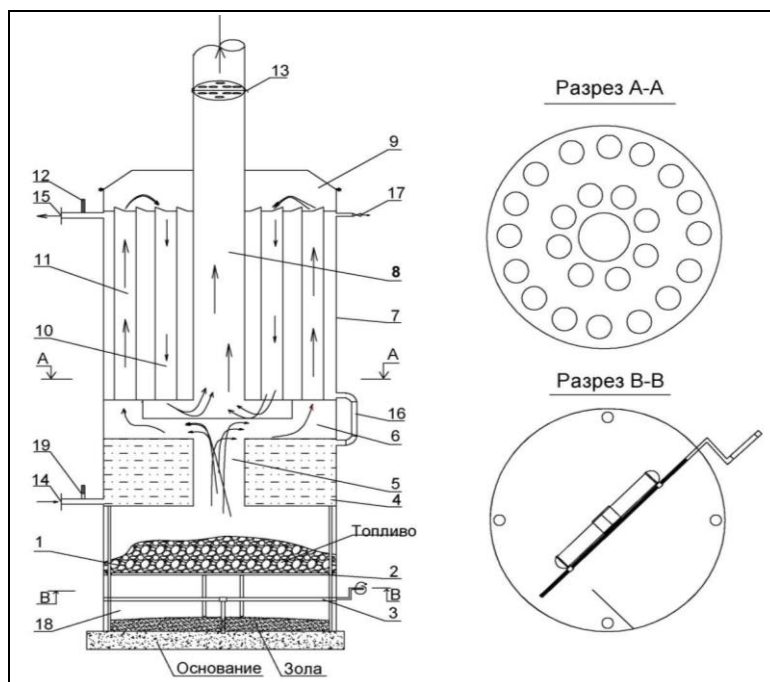


Рисунок 7 – Схема водогрейного секционного твёрдотопливного котла.

- 1 - топка; 2 - подвижная колосниковая решетка; 3 - подъёмный механизм;  
 4 - лучевоспринимающая поверхность (дополнительный барабан);  
 5 - переходная газовая труба; 6 - нижняя газораспределительная камера отводная;  
 7 - основной барабан котла; 8 - центральная газоотводная труба;  
 9 - верхняя газораспределительная камера; 10 - газоотводные трубы с нисходящими потокам;  
 11 - газоотводные трубы с восходящими потокам;  
 12 - термометр; 13 - дымоход с шибером; 14 - патрубок входа холодной воды;  
 15 – патрубок выхода нагретой воды; 16 - переходной патрубок;  
 17 - патрубок выпуска воздуха; 18 - зольник; 19 - термометр.

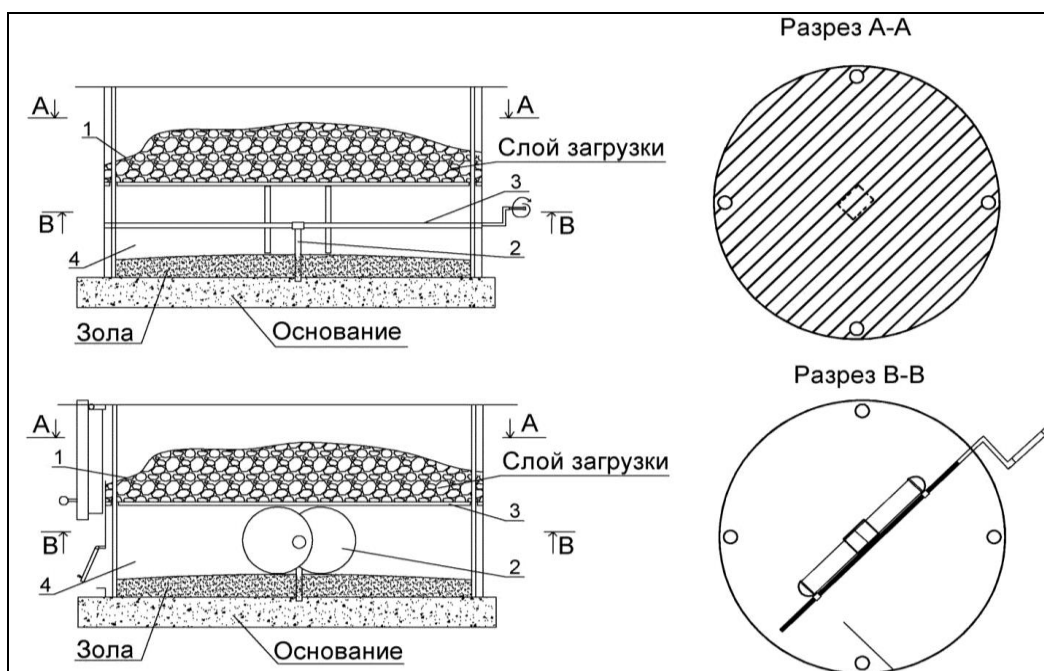


Рисунок 8 – Конструкция топки для котла с переменным объёмом топки, оснащенной подвижной колосниковой решёткой. 1 – топка с загруженным слоем топлива; 3 – механизм регулирования высоты положения колосниковой решётки; 4 - подвижная колосниковая решётка.



Котел был оснащен термометрами для измерения температуры теплоносителя на входе и выходе из котла. Положение колосниковой решётки регулировалось вручную, а местоположение устанавливалось с помощью нанесённых меток. Температура продуктов сгорания топлива в топке и на выходе из топки осуществлялась проверенным сертифицированным многофункциональным измерительным прибором Testo 435-1. Расход теплоносителя рассчитывался на основании показаний расходомера и разности температур теплоносителя.

Регулирование температуры горения топлива в топке водогрейного отопительного котла осуществлялось изменением положения колосниковой решетки в топке.

По результатам изменения положения колосниковой решётки в топке замерялась температура продуктов сгорания в топке и по газоходам котла.

Опытный материал, представленный на рис. 9 и 10, использовался для проверки разработанных автором моделей управления процессом горения топлива за счёт изменения положения колосниковой решётки с целью повышения КПД котла.

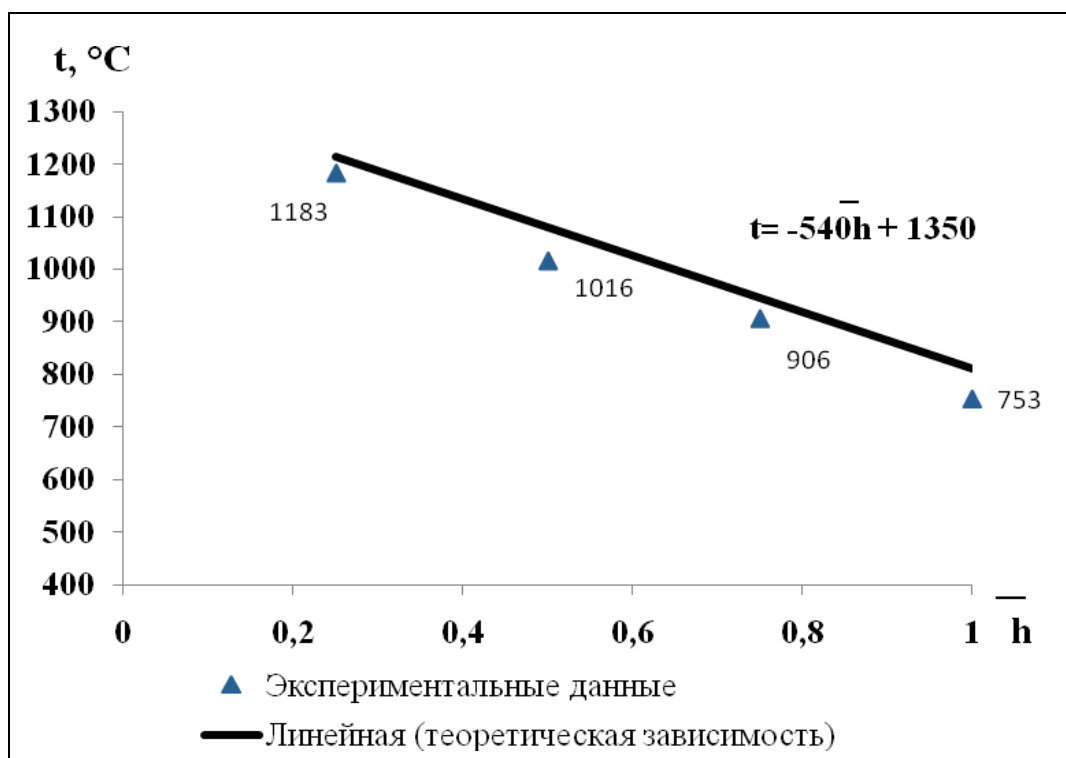


Рисунок 9 – Зависимость изменения температуры газов на выходе из топки от относительного положения колосниковой решётки.

На основании проведенных экспериментальных и теоретических исследований, представленных на рис. 9, зависимость для определения температуры продуктов сгорания на входе в газоходы котла будет иметь вид:

$$t = 1350 - 540\bar{h} \quad (23)$$

где  $\bar{h}$  - относительное положение колосниковой решетки в топке.

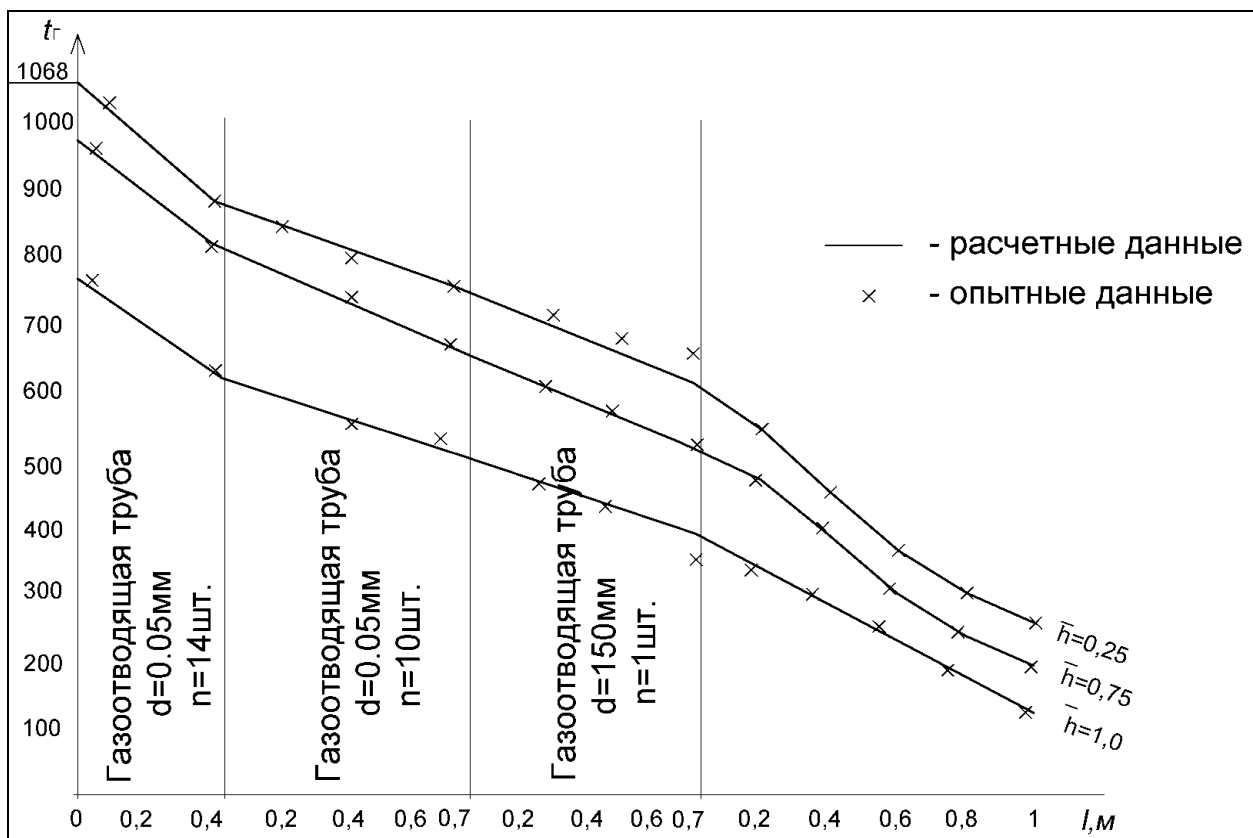


Рисунок 10 - График изменения температуры продуктов горения по ходу движения газов в котле.

В процессе энергетического и эксергетического анализа эффективности эксплуатации твёрдотопливных водогрейных котлов малой мощности установкой подвижной колосниковой решётки было установлено, что переменный объём топочного пространства способствует снижению расхода топлива, а также способствует дожиганию летучих газов и несгоревших пылевидных фракций угля.

В результате исследования установлено, что значение эксергетического КПД составляет 88,9%. При этом определены потери теплоты с уходящими газами, они составили 8,76%; потери тепла с механическим недожогом составили 17,37%; получена расчётная зависимость для определения КПД котельного агрегата от производительности. КПД данного котельного агрегата составил 79-81%.

Таким образом, проводимый термодинамический анализ позволяет подробно и разносторонне исследовать энергетические превращения как в самой системе и её частях, так и её взаимодействие с окружающей средой [4]. Результаты анализа тепловых процессов всегда выражаются в виде баланса.

Проведенные исследования привели к следующим результатам:

- обоснована максимальная эффективность работы при наличии изменения топочного пространства при сжигании угля различных месторождений, что оказывает положительное влияние на условия сжигания различных характеристик твёрдых топлив.

- показано, что конструкция водогрейного котла с подвижной колосниковой решёткой, позволяющей регулировать объём топочного пространства, обеспечивает снижение коэффициента избытка воздуха в уходящих газах за котлом, а также снижение уровня содержания кислорода ( $O_2$ ).

- уменьшение и увеличение объёма топочного пространства способствует поддержанию необходимого рационального температурного режима в топочном пространстве, что приводит к сокращению выбросов оксидов азота на 20-25%.

Отклонения расчётных значений с фактическими показателями, полученными в результате теплотехнических испытаний, варьируются в пределах от 5% до 10%, на основании чего предложенная методика расчёта и регулирования процессов сгорания топлива за счёт изменения объёма топочного пространства признана адекватной.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализ топливно-энергетического сектора Республики Таджикистан показал, что наибольшее распространение в республике получили индивидуальные водогрейные котлы малой мощности, работающие на местном топливе (уголь, кизяк, дрова). Сгорание угля с большим содержанием золы (до 35%) при повышении температуры горения в топке приводит её к плавлению, обволакиванию несгоревших частичек углерода топлива, унося их в провал вместе со шлаками, что приводит к снижению КПД топки. При этом существующие методы повышения эффективности работы котлов на низкосортном топливе пригодны для достаточно мощных котлов тепловых электростанций или районных котельных.

2. Изготовлен экспериментальный стенд и проведены лабораторные исследования свободной конвекции у нагретой стальной трубы по аналогии с жаротрубным водогрейным котлом. Предложена, с погрешностью не более 10%, эмпирическая зависимость определения коэффициента теплоотдачи от вертикальной нагретой трубы к жидкости при свободной конвекции.

3. Предложена зависимость для определения в любой точке газохода температуры движущихся продуктов сгорания, позволяющая выполнить моделирование процессов теплопереноса в котле, обеспечить наиболее эффективный теплообмен и продлить срок службы поверхностей нагрева. Разработана методика расчёта процессов сжигания твёрдого топлива в топке с переменным объёмом с учётом теплофизических свойств топлива.

4. Разработана и запатентована конструкция водогрейного твёрдотопливного котла с переменным объёмом топочного пространства за счёт изменения положения колосниковой решётки. Проведены промышленные испытания водогрейного котла, работающего на различных видах твёрдого топлива и режимах работы.

5. В результате установки разработанной конструкции водогрейного котла мощностью 50 кВт, установленного в здании заставы пограничной службы, по отношению к ранее установленным существующим котлам идентичной мощности экономическая эффективность составила около 7 тыс. сомони (1500 долл. США) за один отопительный сезон.

**Основные результаты работы опубликованы в следующих изданиях.  
В изданиях, рекомендованных ВАК РТ**

1. Сулейманов, А.А. О продолжительности отопительного периода [Текст] / А.А. Сулейманов, П.С. Хужаев, М.М. Поччоев // Вестник Таджикского национального университета. – Душанбе, 2014. - №1/1(126). – С.86-99.

2. Сулейманов, А.А. Твердотопливный теплогенератор [Текст] / А.А. Сулейманов, П.С. Хужаев, М.М. Поччоев // Вестник Таджикского национального университета. – Душанбе, 2014. - №1/1(126). – С.100-104.

3. Хужаев, П.С. Теплоотдача от вертикальной нагретой трубы к жидкости при свободной конвекции [Электронный ресурс] / П.С. Хужаев, А.А. Сулейманов // Инженерный Вестник Дона, №3 (2015) [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3148](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3148).

4. Хужаев, П.С. Пассивная система отопления жилого здания [Текст] / П.С. Хужаев, А.А. Сулейманов, М.М. Поччоев, З.А. Сулейманов // Вестник Таджикского технического университета. – Душанбе, 2015. - №2(30). – С.98-102.

5. Хужаев, П.С. Снижение энергопотребления здания путем применения теплоизоляционных материалов [Текст] / П.С. Хужаев, А.А. Сулейманов, М.М. Поччоев, З.А. Сулейманов // Вестник Таджикского технического университета. – Душанбе, 2015. - №2(30). – С.122-127.

6. Хужаев, П.С. Воздуховод равномерной раздачи постоянного статического давления [Текст] / П.С. Хужаев, З.А. Сулейманов, Н.А. Сулейманова, М.М. Поччоев // Вестник Таджикского технического университета. – Душанбе, 2015. - №4(32). – С.151-156.

**В патенте**

7. Хужаев П.С., Сулейманов З.А., Поччоев М.М., Сулейманова Н.А. Твердотопливный водогрейный котел с переменной объемной тепловой напряженностью топки // Малый патент Республики Таджикистан (РТ), №ТJ 776 от 24.06.2016г.

**В прочих изданиях**

8. Хужаев, П.С. «Линеаризация теплофизических свойств продуктов сгорания топлива от температуры» [Текст] / П.С. Хужаев, Ш. Аланазаров // Материалы Респуб. научно-практической конф., посв. 20-летию Государственной независимости Респ. Таджикистан и 55-летию Таджикского технического университета им. академика М.С. Осими. – Душанбе, 2011. – С.451-456.

9. Хужаев, П.С. Характеристики углей некоторых месторождений республики Таджикистан [Текст] / П.С. Хужаев, С.М. Назаров // Материалы междунар. научно-практической конф. «Архитектурное образование и архитектура Таджикистана: 50 лет развития и совершенствования». – Душанбе, 2013. – С.194-199.

10. Хужаев, П.С. Аэродинамика воздушного потока, набегающего на твердую нагретую поверхность [Текст] / П.С. Хужаев // Материалы респуб. научно-практической конф. «Наука и использование энергетического потенциала Таджикистана». - Курган-тюбе, 2013. –С.126-129.

11. Хужаев, П.С. Водогрейный котел малой мощности [Текст] / П.С. Хужаев П.С., А.А. Сулейманов // Материалы междунар. научно-практической конф. «Архитектурное образование и архитектура Таджикистана: 50 лет развития и совершенствования». – Душанбе, 2013. –С.231-236.

12. Хужаев, П.С. Аналитическое решение и программный комплекс по разработке компьютерных моделей задач для ламинарного динамического и теплового пограничных слоев [Текст] / П.С. Хужаев, Ш.А. Бозоров, Б.К. Нурматов, Т.Р. Холмуратов // Материалы междунар. научно-практической конф. «Современные тенденции в архитектуре, строительстве и образовании в Республике Таджикистан». – Душанбе, 2014. – С.89-94.
13. Хужаев, П.С. Экспериментальный метод определения теплофизических характеристик веществ на основе теоретического метода решения обратной задачи теплопроводности [Текст] / П.С. Хужаев, Р.Х. Саидов, М.Д. Пирмадов, Р.Ф. Джураев // Материалы междунар. научно-практической конф. «Современные тенденции в архитектуре, строительстве и образовании в Республике Таджикистан». – Душанбе, 2014. – С.178-183.
14. Хужаев, П.С. Характеристики вертикального жаротрубного котла при сжигании различных видов угля [Текст] / П.С. Хужаев // Вестник КГУСТА им. Н. Исанова. - Бишкек, 2014. - №4(16). – С.90-94.
15. Хужаев, П.С. Исследование твердотопливного отопительного котла для теплоснабжения индивидуального объекта [Текст] / П.С. Хужаев, М.М. Поччоев, З.А. Сулейманов // Материалы VII междунар. научно-практической конф. «Перспективы развития науки и образования». – Душанбе, 2014. – С.122-125.
16. Хужаев, П.С. Исследование твердотопливного отопительного котла сжигания различных видов угля [Текст] / П.С. Хужаев, М.М. Поччоев // Материалы респуб. научно-практической конф. «Развитие архитектуры, строительства и производства строительных материалов». – Худжанд, 2015. – С.191-196.
17. Хужаев, П.С. Регулирование теплового режима топок для эффективного сжигания различных топлив / П.С. Хужаев, М.М. Поччоев // Материалы междунар. научно-практической конф. «Актуальные проблемы и перспективы развития строительных конструкций: инновации, модернизация и энергоэффективность в строительстве. – Алматы, 2015. – С.149-153.
18. Хужаев, П.С. Лучистый теплообмен в топочном пространстве с переменным объемом [Текст] / П.С. Хужаев, А.А. Сулейманов // Материалы междунар. научно-практической конф. «Строительство, архитектура, энергоэффективность и экология». – Тюмень, 2016. – С. 132-138.
19. Хужаев, П.С. Характеристики водогрейного котла с переменным объемом топки при сжигание различных видов угля [Текст] / П.С. Хужаев, А.А. Сулейманов // Материалы междунар. научно-практической конф. «Строительства, архитектуры, энергоэффективность и экология». – Тюмень, 2016. – С. 138-144.
20. Хужаев, П.С. Воздуховод равномерной раздачи воздуха [Электронный ресурс] / П.С. Хужаев, Ибрагимов А.З., Тагойбеков Ш.С. // Материалы 3-й Междунар. научно-практической конф. «Актуальные вопросы науки и практики XXI в.» (Россия, г. Нижневартовск, 27-30 ноября 2016г.): Режим доступа <http://www.konferenc.com/huzhaev-ibragimov-tagoibekov>.
21. Хужаев, П.С. Пассивная система отопления жилого здания [Электронный ресурс] / П.С. Хужаев, Поччоев М.М., Сулейманова Н.А. // Материалы 3-й Междунар. научно-практической кон. «Актуальные вопросы науки и практики XXI в.» (Россия, г. Нижневартовск, 27-30 ноября 2016г.): Режим доступа <http://www.konferenc.com/huzhaev-pochoev-suleymanov>.

## РЕЗЮМЕ

**диссертации Хужаева Парвиза Сайгуфроновича «Повышение энергоэффективности твёрдотопливных водогрейных котлов малой мощности установкой подвижной колосниковой решетки», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение**

**Ключевые слова:** теплоснабжение, энергоэффективность, уголь, котёл, колосниковая решетка, теплообмен.

**Объект исследования:** Водогрейный жаротрубный котел малой мощности, работающий на твердом топливе и имеющий устройство для перемещения колосниковой решетки и изменения объёма топочного пространства.

**Цель работы:** Разработка нового подхода к формированию фронта пламени горения топлива за счёт изменения объёма топочного пространства, обеспечивающего высокоэффективную работу котла, снижение эксплуатационных и капитальных затрат котельных.

**Методы исследования:** Современные подходы, физико-химические, физико-технические и теплофизические методы исследования, широко апробированные в теплоснабжении и теплоэнергетике, были применены в настоящей работе для получения достоверных и обоснованных результатов. Все использованные методы имеют высокую точность и воспроизводимость эксперимента. Обработка информации выполнена с помощью программного пакета Microsoft Office Excel и ANSYS CFX.

**Полученные результаты и их новизна:** Разработана конструкция водонагревательного котла с подвижной колосниковой решеткой, позволяющей регулировать объём топочного пространства; предложены полуэмпирические зависимости для расчёта конвективного теплообмена в трубном пучке водогрейного жаротрубного котла; разработана математическая модель управления режимами работы котла, применяемого для сжигания углей различной зольности.

**Практическая значимость исследования:** Проведены экспериментальные исследования теплообмена трубного пучка жаротрубного водогрейного котла; получено уравнение для расчёта температуры горения топлива в топке котла с учётом положения колосниковой решетки, позволяющее оценить эффективность сгорания топлива; разработана математическая модель управления режимами работы котла для углей с различной зольностью; в результате проведённых экспериментальных исследований установлено увеличение КПД котла с подвижной колосниковой решеткой на 3-5% по сравнению с серийными образцами.

**Использование метода:** Разработанная конструкция водогрейного твердотопливного котла малой мощности с подвижной колосниковой решеткой (Малый патент РТ №ТJ 776) используется в научных и учебных процессах на факультете строительства и архитектуры ТТУ им. акад. М.С. Осими по дисциплинам «Теплогенерирующие установки», «Отопление и вентиляции», «Охрана окружающей среды». Полученные результаты полезны инженерам-строителям по теплогазоснабжению, вентиляции и кондиционированию воздуха.

**Область применения:** теплоэнергетика, теплогазоснабжение и вентиляция, теплофизика, теплотехника, теплогенерирующие установки и др.

## ШАРҲИ МУХТАСАР

**ба диссертацияи Хучаев Парвиз Сайдғуфроневич «Афзунгардонии энергосамаранокии дегҳои обгармкунии иқтидорашон хурд бо сӯзишвории саҳт ва насби панҷараи ҳаракаткунандаи ҳавозавӣ», барои дарёфти дараҷаи илмӣ номзади илмҳои техникӣ бо ихтисоси 05.23.03 – Гармиаъминкунӣ, ҳавотозакунӣ, мӯътадилсозии ҳаво, газтаъминкунӣ ва равшанидиҳӣ»**

**Калидвожаҳо:** гармиаъминкунӣ, энергосамаранокӣ, ангишт, дегхона, панҷараи ҳавозавӣ, гармиолоиш.

**Объекти таҳқиқотӣ:** деги обгармкунии кубуртафсонии иқтидораш хурд, ки бо сӯзишвории саҳт кор карда, дорои таҷҳизотест ҷиҳати ҳаракати панҷараи ҳавозавӣ ва тағйирёбии ҳаҷми фазои оташдон.

**Мақсади кор:** коркарди роҳҳои нав, ҷиҳати ташаккулёбии раванди машъали сӯзиши сӯзишворӣ аз ҳисоби тағйир додани ҳаҷми фазои оташдон, ки кори баландсамараи дегро таъмин мекунад, коҳиш намудани хароҷотҳои асосӣ ва истифодавии дегхонаҳо мебошад.

**Усулҳои таҳқиқот:** Дар рисола ҷиҳати дарёфти натиҷаҳои боэътимод ва асоснокшуда, усулҳои муосир ва ба тариқи васеъ тасвибгардидаи соҳаи гармиаъминкунӣ ва теплоэнергетика - усулҳои физико-химиявӣ, физико-техникӣ ва теплофизикии таҳқиқоти саҳеҳияташон баланд ва аз ҷиҳати эксперименталӣ зиёдтакроршаванда, инчунин усулҳои коркарди маълумот бо истифода аз банди барномавии Microsoft Office Excel ва ANSYS CFX, истифода шуданд.

**Натиҷаҳои бадастомада ва навгонии онҳо:** конструксияи деги обгармкунӣ бо панҷараи ҳаракаткунандаи ҳавозавӣ, ҷиҳати танзими ҳаҷми фазои гармшавӣ коркард шудааст; вобастагии нимэмпирикӣ барои ҳисоби гармиолоишии конвективӣ дар дастаи кубурҳои деги обгармкунии гармқубурӣ пешниҳод гаштааст; модели математикии идораи танзими кори деге, ки барои сӯзиши ангиштҳои хокистарнокиашон мухталиф истифода мешаванд, коркард шудааст.

**Аҳамияти амалии таҳқиқот:** таҳқиқоти эксперименталии гармиолоишии дастаи кубурҳои деги обгармкунии гармқубурӣ, гузаронида шуд; муодилаи ҳисоби ҳарорати сӯзиши сӯзишворӣ дар оташдони дег бо назардошти ҳолати панҷараи ҳавозавӣ, ҷиҳати арзёбии сӯзиши сӯзишворӣ, ба тасвиб расид; модели математикии идораи танзими кори дег барои сӯзиши ангиштҳои хокистарнокиашон мухталиф коркард шудааст; дар натиҷаи таҳқиқотҳои гузаронидашудаи эксперименталӣ, баланд бардоштани ККФ-и дег бо панҷараи ҳаракаткунандаи ҳавозавӣ ба 3-5% нисбат ба намунаҳои маҷмаавӣ муқаррар гардид.

**Дараҷаи истифодабарӣ:** конструксияи коркардшудаи деги обгармкунии камтавоно бо сӯзишвории саҳт ва панҷараи ҳаракаткунандаи ҳавозавӣ (Патенти хурди ҚТ № ТҶ 776) дар равандҳои илмӣ ва таълимӣ дар факултети соҳтмон ва меъмории ДТТ ба номи академик М.С. Осимӣ аз рӯи фанҳои «Таҷҳизотҳои гармидиҳанда», «Гармкунӣ ва вентилятсия», «Ҳифзи муҳити зист» мавриди истифода қарор дорад.

**Соҳаи истифодабарӣ:** теплоэнергетика, газугармиаъминкунӣ ва вентилятсия, теплофизика, теплотехника, таҷҳизотҳои гармидиҳӣ ва ғ

## ABSTRACT

of the dissertation **Khujaev Parviz Saigufronovich "Increasing energy efficiency of low-capacity hot-water boilers with solid fuel by installing moving fire-grate"**, submitted for the degree of Candidate of Technical Sciences in specialty **05.23.03 – «Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply and lighting»**

**Keywords:** heat supply, energy efficiency, coal, boiler, fire-grate, heat transfer.

**Subject of the study:** Hot-water fire-tube boiler of low capacity working on solid fuel with a special device for moving the grate thus changing volume of combustion chamber.

**Purpose of the study:** To develop new approach which can help to form the better flame front due to change of combustion chamber volume, by thus increasing efficiency of boilers and reducing operating and capital costs for boiler-houses.

**Methodology:** Modern approaches, physico-chemical, physical-technical and thermal-physical investigation methods widely applied in heat supply and heat power engineering have been used in the present study for obtaining reliable and valid results. All methods used are highly accurate and easily repeatable in course of experiment. Data and information was processing with the help of Microsoft Office Excel and ANSYS CFX software.

**Obtained result and new aspect:** New variant of hot-water boiler with moving fire-grate allowing regulating combustion chamber volume was designed; semiempirical dependences for calculation of convective heat transfer in a tube bundle of hot-water fire-tube boiler were proposed; mathematical model to control operating modes of boiler used for burning coals with different ash content was developed.

**Practical significance of the study:** Experimental investigation of heat transfer in tube bundle of hot-water fire-tube boiler was done; equation for fuel temperature in combustion chamber of the boiler taking into account position of the grate was calculated allowing estimating fuel burning efficiency; mathematical model to control operating modes of boiler used for burning coals with different ash content was developed; increase of efficiency of the boiler with moving fire-grate by 3-5% compare to standard serial models was registered during experimental studies.

**Use of the technique:** The proposed design of low-capacity hot-water boiler with moving fire-grate (Small Patent No. TJ-776) is used at the Faculty of Construction and Architecture of the Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi in scientific studies and in course of teaching a number of disciplines, such as "Heat generating plants", "Heating and ventilation", "Environmental protection". Results of the study are also useful for civil engineers and specialists in heat and gas supply, ventilation and air conditioning.

**Application:** heat power engineering, heat and gas supply, ventilation, thermal physics, heat engineering, heat generating plants, etc.

Подписано в печать «26» «01» 2018 г. Формат 60×84/16.  
Бумага офсетная. Гарнитура литературная. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 2,0. Тираж 100 экз.

---

Издательство ТТУ имени академика М.С.Осими Душанбе 2018г.