

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-ВОСТОЧНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМ. М.К. АММОСОВА»

На правах рукописи



СЛОБОДЧИКОВ ЕГОР ГАВРИЛЬЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ КОТЛОВ
МАЛОЙ МОЩНОСТИ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА**

Специальность: 2.1.3 – Теплоснабжение, вентиляция,
кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук, доцент
Иванов Виктор Наумович

Белгород 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВОК В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ СЕВЕРА.....	13
1.1 Анализ состояния коммунального комплекса и применения систем тепловой генерации в Республике Саха (Якутия).....	13
1.2 Классификация теплогенерирующих установок для автономных систем теплоснабжения.....	18
1.3 Тенденции повышения эффективности автономных теплогенераторов на твердом топливе в России и за рубежом.....	24
1.4 Автономные системы тепловой генерации на твердом топливе, используемые в условиях Якутии.....	31
1.5 Основные положения для расчета теплообмена излучением в слоевых топках твердотопливных котлов.....	39
1.6 Выводы.....	41
2 ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ТОПОЧНОЙ КАМЕРЫ И ДЫМОХОДНОЙ СИСТЕМЫ ТВЕРДОТОПЛИВНОГО КОТЛА.....	44
2.1 Изучение работы твердотопливных котлоагрегатов в условиях Севера.....	44
2.2 Особенности процессов горения в слоевых топках теплогенераторов малой мощности.....	60
2.3 Анализ работы дымоходной системы в условиях влияния низких температур в твердотопливных котлоагрегатах.....	71
2.4 Выводы.....	79
3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В МОДИФИЦИРОВАННОЙ ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ	81

3.1 Устройство для интенсификации процессов горения в топках твердотопливных котлоагрегатов.....	81
3.2 Компьютерное моделирование движения потоков в топочной камере.....	85
3.3 Исходные данные.....	86
3.4 Сводные результаты численного моделирования и экспериментальных данных слоевой топочной камеры при позонном горении.....	90
3.5 Результаты численного моделирования модифицированной конструкции топочной камеры при позонном горении.....	95
3.6 Выводы.....	107
4 НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В МОДИФИЦИРОВАННОЙ ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ В ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ СЕВЕРА.....	109
4.1 Описание экспериментальной установки.....	109
4.2 Результаты натурных экспериментальных исследований топочной камеры с экранированием при условиях низких температур.....	117
4.3 Выводы.....	124
5 МЕТОДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ТОПОЧНОЙ КАМЕРЫ. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ.....	126
5.1 Методы регулирования.....	126
5.2 Промышленное внедрение экрана-ограничителя топочной камеры.....	132
5.3 Техничко-экономическое обоснование.....	134
5.4 Сравнительный анализ применения автономных теплогенераторов для теплоснабжения населенных пунктов.....	138
5.5 Выводы.....	142
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	144
СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ.....	147
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	148
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	167

Приложение А. Патент РФ №187524 «Универсальный отопительный аппарат верхнего и нижнего горения».....	167
Приложение Б. Патент РФ №218229 «Отопительный аппарат верхнего и нижнего горения с модифицированной топочной камерой».....	168
Приложение В. Акт о внедрении материалов диссертационной работы в производственную организацию.....	169
Приложение Г. Акт о внедрении материалов диссертационной работы в проектную организацию.....	170
Приложение Д. Акт о внедрении материалов диссертационной работы в орган государственной власти.....	171
Приложение Е. Акт о внедрении материалов диссертационной работы в учебный процесс.....	172
Приложение Ж. Результаты измерений показателей теплопроизводительности котлоагрегатов с типовой топочной камерой и с экраном-ограничителем.....	173
Приложение З. Значения температуры горения в топке на завершающий период измерений типовой топочной камеры.....	175
Приложение И. Значения температуры горения в топке на завершающий период измерений с экраном-ограничителем.....	176
Приложение К. Результаты измерений температур уходящих газов на выходе из топки: типовой и с экранированием.....	177
Приложение Л. Значения средних температур уходящих газов на разных участках дымохода, на завершающий период горения топки	178

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Особенностью Арктической зоны РФ являются экстремальные природно-климатические условия, малая плотность населения и низкий уровень обеспеченности инженерной инфраструктурой. Согласно принятой Стратегии развития Арктической зоны (утвержден Указом Президента РФ от 26.10.2020 года №645) в целях социально-экономического роста предусматривается увеличение объемов жилищного строительства и инженерной инфраструктуры в труднодоступных регионах с учетом природно-климатических особенностей Крайнего Севера. Одним из направлений является развитие энергетической инфраструктуры с использованием теплогенераторов с повышенной эффективностью.

В настоящее время в России наблюдается тенденция устойчивого роста объемов строительства индивидуальных жилых домов. Действующие программы социальной и финансовой поддержки, в том числе внедрение льготной ипотеки, выделение земель под строительство способствуют активному вводу жилых площадей в сельской местности. В Республике Саха (Якутия) свыше сорока тысяч малоэтажных жилых домов не обеспечены централизованными источниками отопления и газификацией. В связи с географическими и транспортно-логистическими трудностями подключение жилых зданий к источникам энергоснабжения является затруднительным и несет большие бюджетные затраты. Вследствие этого, возрастает спрос на автономные источники тепловой генерации с использованием местного топлива, одной из основных задач является повышение эффективности и эксплуатационной надежности теплогенерирующих установок. В последние годы в регионе наиболее широко эксплуатируются твердотопливные котлы различных конструкций и типов. Как показывает практика, одной из причин снижения эксплуатационных качеств и возникновения аварийных случаев в твердотопливных котлах является образование кислотного конденсата и сажи на элементах конструкций. Данные процессы, связаны с процессами горения, конструктивными особенностями топок, влиянием низких температур

наружного воздуха и другими факторами. Таким образом, вопросы повышения эффективности теплогенерирующих установок, а также исключения их аварийных остановок в климатических условиях севера являются современными и актуальными.

Степень разработанности темы исследования. Фундаментальными основами работы стали исследования по работе теплогенерирующих установок в трудах М.М. Щеголева, Ю.Л. Гусева, Н.В. Кузнецова, К.Ф. Роддатиса, И.З. Аронова, В.М. Фокина, Г.Н. Делягина, В.И. Лебедева, А.Н. Воликова и др.; работы, направленные на изучение вопросов повышения эффективности и надежности работы автономных систем теплоснабжения малой мощности П.А. Хаванова, А.М. Ицковича, В.Е. Удовенко, Е.Х. Китайцевой, В.М. Полонского и других авторов. Теплофизические основы и использование рациональных систем отопления рассмотрены в работах В.Н. Богословского, А.Н. Сканави, Л.М. Махова и других. В последнее время вопросами эффективности работы теплогенераторов и систем отопления занимались О.Н. Зайцев, А.Г. Кочев, методы интенсификации теплообменных процессов рассматривались Л.А. Кущевым, А.Г. Лаптевым, вопросы энергоэффективности инженерных систем В.Г. Гагариным, Ю.А. Табунщиковым, О.Д. Самариным.

Также были рассмотрены результаты научных трудов многих других авторов, чьи работы посвящены вопросам повышения эффективности работы котельных установок, совершенствования оборудования систем тепловой генерации и проблемам энергосбережения в инженерных коммуникациях в целом.

Объект исследования – твердотопливные теплогенерирующие установки малой мощности с принципом «верхнего горения» и их дымоходные системы для отвода продуктов сгорания.

Предмет исследования – процессы горения в топочной камере твердотопливного котла в условиях низких температур.

Цель работы: Повышение эффективности работы твердотопливных теплогенераторов малой мощности (до 100 кВт) за счет интенсификации процесса сжигания в топке и в дымоходной системе в условиях низких температур.

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

1. Изучить состояние коммунального комплекса на предмет применения и развития систем и оборудования для тепловой генерации в Республике Саха (Якутия).
2. Выполнить анализ работы котельных агрегатов, используемых в отопительных системах, и определить возможные направления для повышения эффективности их работы.
3. Разработать комплексное аналитическое выражение для подбора высоты теплоизоляции дымохода в условиях низких температур.
4. Предложить усовершенствованную конструкцию теплогенератора для повышения эффективности горения топлива, увеличения надежности теплоснабжения и безопасности эксплуатации.
5. Выполнить аналитические и численные исследования предложенной усовершенствованной конструкции теплогенератора.
6. Подтвердить результаты теоретических и численных исследований усовершенствованной конструкции теплогенератора и дымоходной системы натурными экспериментальными исследованиями.
7. Обосновать и подтвердить экономическую эффективность внедрения оригинальной конструкции теплогенератора для промышленного применения в условиях Республики Саха (Якутия).

Научная новизна исследования заключается в достижении следующих результатов:

1. Получено аналитическое решение уравнения теплового баланса уходящих продуктов сгорания в дымоходной системе, выражаемых температурой оголовка трубы, в зависимости от характеристик

теплоизоляционного материала, высоты изоляции и температуры наружного воздуха.

2. В результате численного моделирования потоковых процессов внутри топочной камеры с различными характеристиками конструкции экрана-ограничителя выявлено, что эффективное снижение температуры дымовых газов на выходе из топки и увеличение теплоотдачи в подогревательный контур происходит за счет уменьшения скорости продуктов сгорания. Исходя из этого, предложен подход к подбору рациональной конструкции экрана-ограничителя для эффективной работы котлоагрегатов в условиях низких температур.

3. Установлены зависимости температуры уходящих продуктов сгорания от высоты положения и площади экранирования топочной камеры, анализ которых показал, что стабилизация процесса горения происходит за счет увеличения степени экранирования зеркала горения топки и подбора оптимальной высоты экрана-ограничителя над плоскостью максимальных температур. Теоретически обоснована конструкция экрана-ограничителя, который изменяя активный объем топочной камеры повышает эффективность теплогенерирующей установки.

Теоретическая значимость работы Теоретическая значимость диссертационной работы состоит в:

1. Дополнении подходов к уточнению параметров уравнения теплового баланса для расчета высоты изолированного участка дымоходной системы в условиях низких температур.

2. Разработке численной модели потоковых процессов продуктов сгорания внутри топочной камеры.

3. Установлении зависимостей температуры уходящих продуктов сгорания от высоты положения и площади экранирования топочной камеры.

Практическая значимость диссертационного исследования состоит в:

1. Разработана конструкция экрана-ограничителя топочной камеры для повышения температуры горения в зоне максимального тепловыделения

за счет ограничения активного объема топки и отражения тепловых лучей на слой топлива, что способствует более полному сгоранию топлива. Конструкция защищена патентом РФ № 218229 опубл. 17.05.2023 «Отопительный аппарат верхнего и нижнего горения с модифицированной топочной камерой».

2. Предложена методика инженерного подбора рациональной конструкции экрана-ограничителя для эффективной работы котлоагрегатов с различной тепловой мощностью, повышающего эффективность горения топлива при увеличении количества избыточного воздуха.

3. Результаты натурных исследований работы используются при проведении лабораторных, практических и лекционных занятий для бакалавров направления 08.03.01 «Строительство», направленности «Теплогазоснабжение и вентиляция» и магистров направления 08.04.01 «Строительство» направленности «Энергосбережение и энергоэффективность в зданиях», обучающихся в Инженерно-техническом институте СВФУ им. М.К. Аммосова.

4. Практические результаты диссертационной работы используются при проектировании систем тепловой генерации на ООО «Техэнерго» и внедрены в производственный процесс завода котельного оборудования ООО «ЯКЗ» (ТОР «Якутия») г. Якутск.

Методология и методы исследования: использованы современные численные методы исследования течений и теплопередачи с использованием постпроцессорных элементов FloEFD, математического моделирования, решения дифференциальных и интегральных уравнений. Применены специализированные программные комплексы и разработанные программы для ЭВМ.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК: 2.1.3 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение: п. 6. «Теоретические и экспериментальные исследования теплофизических свойств

рабочих тел теплотехнических устройств, повышение их надежности и эффективности. Разработка и исследование методов преобразования в работу низкопотенциальной теплоты, повышение ее потенциала в тепловых машинах, теплотехнические установки на их основе, методы расчета. Исследование процессов сжигания топлива и образования вредных веществ»; п.5 «Разработка и развитие экспериментальных методов исследований, анализа и обработки экспериментальных данных, процессов в системах теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения и освещения, охраны воздушного бассейна, защиты от шума, зданий и сооружений», п. 4. «Разработка математических моделей, методов, алгоритмов и компьютерных программ, использование численных методов, с проверкой их адекватности, для расчета, конструирования и проектирования систем теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения и освещения, охраны воздушного бассейна, защиты от шума зданий и сооружений, повышения их надежности и эффективности».

Положения, выносимые на защиту.

1. Результаты расчета уравнения теплового баланса уходящих продуктов сгорания в дымоходной системе в зависимости от характеристик теплоизоляционного материала, высоты изоляции и температуры наружного воздуха.
2. Результаты численного моделирования потоковых процессов продуктов сгорания внутри топочной камеры с различными характеристиками конструкции экрана-ограничителя.
3. Методика инженерного подбора рациональной конструкции экрана-ограничителя для эффективной работы котлоагрегатов в условиях низких температур.
4. Зависимости температуры уходящих продуктов сгорания от высоты положения и площади экранирования топочной камеры.

5. Теоретически обоснованная конструкция экрана-ограничителя, который, изменяя активный объем топочной камеры, повышает эффективность теплогенерирующей установки.

Достоверность результатов обоснована использованием современных методов численного моделирования, подтверждается согласованием вычислительных результатов, натурных экспериментов и данных других авторов.

Апробация работы: результаты диссертационного исследования апробированы на следующих научных мероприятиях: IV Всероссийская научно-практическая конференция (Якутск, СВФУ им. М.К. Аммосова, 2016), XX Юбилейная всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов (Нерюнгри, СВФУ им. М.К. Аммосова, 2019), Международная мультидисциплинарная конференция по промышленному инжинирингу и современным технологиям «FarEastCon» (г. Владивосток, ДВФУ, 2020), II Международная научно-практическая конференция «Арктические исследования: от экстенсивного освоения к комплексному развитию» (Архангельск, САФУ им. М.В. Ломоносова, 2020), II Международная научная конференция «BuildInTech BIT 2021. Инновации и технологии в строительстве» (Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова 2021), научно-методические семинары кафедры теплогазоснабжения и вентиляции БГТУ им. В.Г. Шухова, СВФУ им. М.К. Аммосова.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 14 научных работ, из которых 4 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, 2 статьи в научных изданиях, индексируемых в базе данных Scopus, 2 патента на полезную модель.

Личный вклад автора состоит в формулировании цели и постановке задач диссертационных исследований, проведении литературного обзора, выборе объектов и методов исследований, разработке теоретических положений работы, проведении численных и натурных экспериментов,

обработке экспериментальных данных, анализе и обобщении полученных результатов, подготовке и публикации материалов работы.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка литературы из 159 наименований, изложена на 178 страницах, содержит 75 рисунков, 18 таблиц.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВОК В КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ СЕВЕРА

1.1 Анализ состояния коммунального комплекса и применения систем тепловой генерации в Республике Саха (Якутия)

Якутия является самым крупным регионом Российской Федерации, при этом плотность населения составляет всего 0,31 чел./м². Более 40% территории находится за Северным полярным кругом, характеризуется многообразием природных условий и ресурсов. Климатические особенности Республики Саха (Якутия) требуют повышенной надежности от инженерных систем энергообеспечения. В среднем на территории Якутии продолжительность отопительного сезона составляет 8-9 месяцев в году, а в арктической зоне круглогодично. Сложность энергообеспечения населенных пунктов обусловлены большой территорией и удаленностью населенных пунктов – расстояния, между которыми в отдаленных районах достигают 600-700 км. До настоящего времени Якутия является одним из самых изолированных и труднодоступных регионов мира в транспортном отношении: 90% территории не имеет круглогодичного транспортного сообщения. Республика Саха (Якутия) включает в себя 36 муниципальных районов и 2 городских округа, широко применяются централизованные и автономные источники тепла, на различных видах топлива.

Коммунальный сектор является одной из самых энергоемких отраслей экономики РС(Я). В системе теплоснабжения в настоящее время функционируют около 288 организаций - поставщиков тепловой энергии, из них 255 (88,5%) частной формы собственности, 33 (11,5%) государственной и муниципальной формы собственности. На рисунке 1.1 приведен график изменения количества централизованных котельных по годам на различных видах топлива, составленный согласно данным Территориального органа ФСГС по РС (Я).

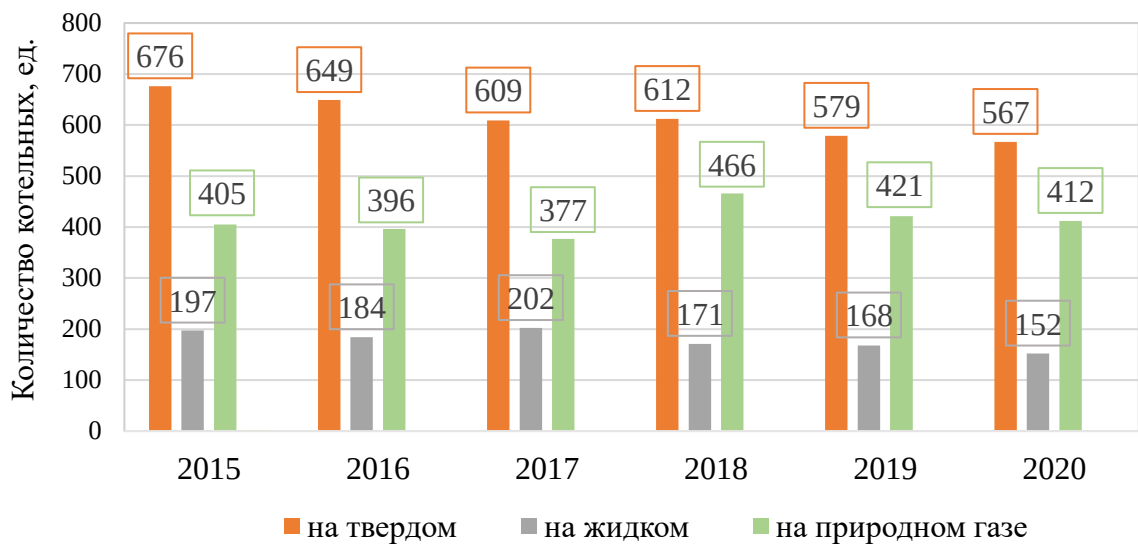


Рисунок 1.1 – Динамика изменения количества котельных в РС (Я) по годам

Крупнейшими поставщиками тепловой энергии являются государственное унитарное предприятие "Жилищно-коммунальное хозяйство Республики Саха (Якутия)", акционерное общество "Теплоэнергосервис", публичное акционерное общество "Якутскэнерго", акционерное общество "Сахаэнерго", которые имеют разветвленную сеть филиалов в муниципальных образованиях республики. Общее количество централизованных котельных в 2020 г. составило 1160 единиц. При этом согласно [1, 2], фактическое состояние коммунального хозяйства России находится на низком уровне, потери тепловой энергии в сфере ЖКХ составляют до 30% тепловой энергии. Современное неудовлетворительное состояние централизованных систем коммунального комплекса в стране носит комплексный и глобальный характер [3, 4]. Средний износ объектов коммунальной инфраструктуры в Республике составляет 51,8%, по Арктической зоне 59,8%. Протяженность инженерных сетей коммунального назначения в РС (Я) составляет 4,6 тыс. км. Средний износ по Республике составляет 56,9%, а в Арктической зоне 58,6%. Значительный износ коммунальной инфраструктуры приводит к увеличению потерь коммунальных ресурсов: доля утечек воды в 2018 году составила 28,1%, доля потерь тепловой энергии - 21,4%. Эти проблемы, ведущие к росту рисков аварийности, взаимосвязаны и имеют схожие причины: сохраняющийся рост морально-технического износа объектов коммунальной

инфраструктуры, что приводит к превышению темпов старения жилищно-коммунального комплекса над темпами его реновации и модернизации [5-8]. Высокий уровень износа основных фондов в коммунальном секторе усиливается необеспеченностью финансовыми ресурсами [9]. Из-за очагового характера заселения территорий с низкой плотностью населения и проживания сельского населения преимущественно по местам исторического обитания строительство крупных объектов теплогенерации и инфраструктуры невозможна или нецелесообразна с экономической точки зрения.

Еще одной объективной причиной низкого роста жилищно-коммунальных услуг в республике является сезонная ограниченность и неразвитость транспортной инфраструктуры, в первую очередь, системы топливоснабжения [10]. В силу влияния климатических факторов затраты тепловой энергии на отопление зданий в 2 раза больше, чем в среднем по Российской Федерации и соответственно, экономически обоснованные тарифы на коммунальные услуги значительно превышают их среднероссийский уровень. Согласно данным [11, 12, 13] тарифных решений теплоснабжающих компаний на рисунке 1.2 приведен сравнительный график стоимости 1 Гкал тепловой энергии для населения в Арктической, Центральной и Южной зоне РС (Я).



Рисунок 1.2 – Стоимость 1 Гкал тепловой энергии централизованного теплоснабжения

Из графика видно, что показатели стоимости энергии варьируются в широком диапазоне цен в зависимости от месторасположения населенного пункта. Удаленность населенных пунктов от основных транспортных артерий и месторождений энергоносителей, влияет на цену перевозки котельного топлива и соответственно на себестоимость получения энергии.

Согласно [14] разница между установленным экономически обоснованным тарифом и льготными тарифами для населения возмещается за счет государственного бюджета РС (Я). Для сравнения рассчитана (таблица 1.1) себестоимость выработки 1 Гкал тепловой энергии с использованием различных видов генерации и топлива. Стоимость рассчитана в соответствии с действующими средними тарифами и транспортными расходами для условий Центральной Якутии.

Таблица 1.1 – Стоимость производства 1 Гкал тепловой энергии из различных источников генерации (автономные, централизованные и другие источники)

№	Источник генерации тепловой энергии	Стоимость 1 Гкал, руб.
1	Бурый уголь Кангаласского месторождения	891,9
2	Природный газ (Средневилюйское месторождение)	460,0
3	Дрова: лиственница, влажностью 60%	968,2
4	Центральное отопление (среднее значение)	7796,6
5	Электроотопление (однотавочный, не льготный)	4628,7

Доля жилищного фонда, отапливаемого из различных источников теплоснабжения (централизованное, газовое, электроотопление), составляет 78,2%, оставшаяся часть (21,8%) отапливается за счет автономных источников на твердом топливе. Отапливаемые из централизованных источников жилые дома составляют всего 45,7% от общего количества индивидуального жилья. На сегодняшний день около 41 тыс. индивидуальных жилых домов площадью 3 399 тыс. м² остаются не подключенными к централизованным источникам

теплоснабжения [10]. Большая часть данного жилфонда расположена в труднодоступных и удаленных местностях, в том числе в Арктической и субарктической зоне, где невозможно и нерентабельно провести газификацию или строительство крупных объектов тепловой генерации. Уровень газификации в сельской местности РС (Я) в общем объеме жилфонда остается низкой, и составляет порядка 25%. На рисунке 1.3 приведен график удельного веса общей площади жилищного фонда в сельской местности республики, оборудованного различными видами инженерного обеспечения.

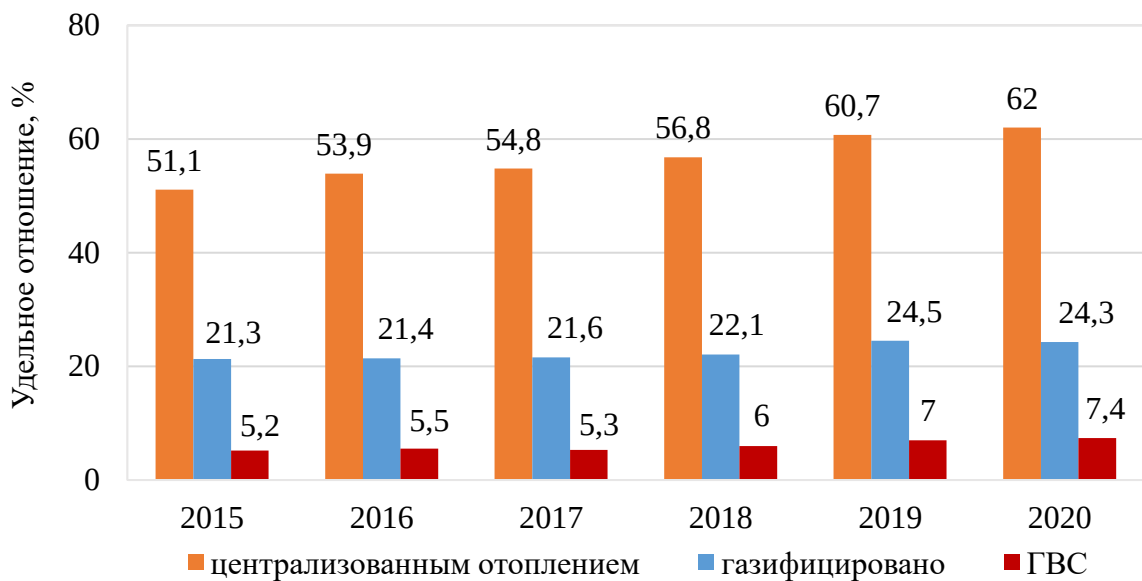


Рисунок 1.3 - График удельного веса общей площади жилфонда в сельской местности, оборудованного видами благоустройства

Согласно действующему Своду правил [15], при разработке схем теплоснабжения расчетные тепловые нагрузки для населенных пунктов определяются по плотности размещения тепловых нагрузок и согласно генеральному плану застройки. В Якутии с учетом перспективного развития инженерных систем разработано зонирование территории по источникам теплоснабжения [16]. Для каждой категории населенных пунктов выработаны предложения по перспективному развитию существующей схемы теплоснабжения, а также альтернативному варианту развития. В основном, предлагаются 3 варианта развития событий: первое - использование централизованных источников с генерацией и распределением энергии;

второе - переход на автономные источники, в том числе за счет использования современных твердотопливных котлов и третье - использование комбинированного теплоснабжения. На территориях, расположенных вне радиуса эффективного действия централизованного теплоснабжения и где нерентабельно проведение газификации, определен механизм развития систем автономного теплоснабжения с использованием современных твердотопливных котлов с принципом длительного горения.

Развитие теплоснабжения децентрализованных районов намечается по направлению внедрения автономных систем, базирующихся на выработке тепловой энергии на современных теплогенераторах, обеспечивающих надежность теплоснабжения. Надежность является одним из важнейших факторов поддержания теплового режима зданий в условиях Севера [17], при этом наибольшее значение имеет минимизация отказов, простота замены расходных деталей и обеспечение длительных сроков службы котельного оборудования.

1.2 Классификация теплогенерирующих установок для автономных систем теплоснабжения

Сложные климатические условия на большей части территории России требуют создания комфортных условий проживания человека и его деятельности [18]. Здания со всеми инженерными коммуникациями являются энергетической системой, зависящей от физических процессов, происходящих во всех ее элементах. Совокупность данных процессов, характеризующих уровень комфортности помещений формирует тепловой и воздушный режим здания [19]. Согласно данным [21], теплоснабжение около 80% городского фонда России осуществляется от централизованных источников, остальные 20% производятся децентрализованными источниками, в том числе 18% - автономными и индивидуальными источниками тепла. В настоящее время в мире происходит непрерывный рост цен на энергоносители и повышаются

тарифы на выработку энергии [20, 22, 23]. Ведущим трендом развития энергетики в Европе и в России является широкое использование энергосберегающих технологий, в том числе с применением альтернативных источников энергии и местного топлива [24, 25]. В Европейских странах проводится целенаправленная политика поддержки «зеленого» строительства и повышения энергоэффективности зданий, разработаны меры государственного регулирования [20, 26, 27]. В России принят ряд нормативно-правовых актов, регулирующих политику [28] в сфере эффективного использования энергии, разработаны методы внедрения современных технологий. С ростом темпов индивидуального жилищного строительства в последнее время широкое распространение получают современные автономные источники теплоснабжения [29]. Стоит отметить, что вопросы внедрения современных систем теплогенерации в малоэтажном жилищном строительстве и обеспечение комфортных условий проживания человека отражены и в Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации [30].

Согласно [31] «автономное теплоснабжение» - это система, состоящая из источника тепловой энергии и потребителя (систем отопления, гвс, вентиляции и технологического снабжения зданий). Преимуществами автономного отопления являются сокращение сроков монтажа, уменьшение капитальных затрат и исключение потерь теплоносителя, возможность местного регулирования и др. Источником теплоты автономных систем является котельная установка. Водогрейным котлом (котлоагрегатом) называют устройство, снабженное топочной камерой, где за счет лучеиспускания при горении топлива происходит подогрев теплоносителя [32, 33]. Согласно [34, 35] разработаны различные конструктивные решения для отопительных аппаратов, и их можно классифицировать по следующим признакам:

- *по назначению*: отопительные, отопительно-производственные для технологического теплоснабжения и производственных нужд;

- *по размещению*: отдельно стоящие, пристроенные и крышные;
- *по виду энергоносителя*: паровые и водогрейные;
- *по виду сжигаемого топлива*: на твердом, жидком и на газообразном топливе;
- *по типу системы теплоснабжения*: с закрытой и открытой системой;
- *в зависимости от схемы теплоснабжения*: местные, оборудованные водогрейными котлами с нагревом воды до температуры не более 115 °С или паровыми котлами с рабочим давлением до 70 кПа; групповые, обеспечивающие теплотой несколько групп зданий, жилые кварталы или микрорайоны; районные, для теплоснабжения крупных жилых массивов.

Водогрейные и паровые котлоагрегаты можно классифицируются:

- *по способу организации теплоносителя (движения воды и пароводяной смеси)*: с гравитационной и принудительной циркуляцией;
- *по виду теплоносителя* разделяются на водогрейные и паровые. Основными показателями водогрейного котла являются его тепловая мощность и температура теплоносителя в системе, а основными показателями парового котла является паропроизводительность, давление и температура пара;
- *по применяемому материалу*: чугунные с небольшой производительностью до 1,0 МВт и котловой стали, которые производятся в заводских условиях. Также существуют топки выполненные из других материалов (из меди, нержавеющей стали и др.), мощностью до 100 кВт;
- *по мощности* различают: малой мощности до 3,5 МВт, средней мощности – от 3,5 до 60 МВт и большой мощности – свыше 60 МВт.

Стальные котлы, в свою очередь, подразделяются:

- *на цилиндрические*, с простейшим барабаном большого диаметра;
- *на жаротрубные*, где часть продуктов сгорания находится в трубной части, а подогреваемая среда расположена в полости котла. Жаротрубные котлы, делят по количеству ходов продуктов сгорания, в России применяются 2- и 3-ходовые котлы;

- *с дымогарными трубками*, где жаровые трубы заменены системой труб мелкого диаметра, что придает большую компактность и снижает массу затрачиваемого металла;

- *водотрубные котлы*, где подогреваемая среда находится в трубной части, а продукты сгорания омывают трубную поверхность. Различают несколько видов конструкций в зависимости от компоновки труб.

Одними из самых распространенных котлоагрегатов являются котлы со слоевым способом сжигания, использующие твердое топливо (уголь, сланцы, древесину, торф, некоторые виды биотоплива) [36].

В настоящее время на рынке представлено разнообразное количество твердотопливных котлоагрегатов малой мощности, используемых для отопления зданий. Мощность котла подбирается в соответствии с тепловыми потерями помещений с учетом других присоединенных нагрузок. Для определения мощности теплогенерирующей установки выполняется тепловой расчет [37, 38]. По основным конструктивным особенностям их можно классифицировать:

- *традиционные котлы с нижним горением* простейшей конструкции с открытой камерой сгорания, основным элементом котла является теплообменник, который обеспечивает передачу теплоносителю тепловой энергии. Преимуществом является отсутствие электроники, систем автоматизации и управления, недостатками являются низкие показатели по длительности горения, малые объемы топочного пространства;

- *пиролизные котлы* производят тепловую энергию, сжигая твердое топливо. Пиролизный котел имеет более высокий КПД при меньшем объеме сжигаемой древесины. Процесс горения проходит по 3 фазам: сушка – дегазация – сгорание, с полным окислением горючих газов. Преимуществом является низкое потребление топлива и высокая эффективность, недостатки связаны с обеспечением требований безопасности, высокой стоимостью и обязательным обучением персонала;

- *котлы длительного (верхнего) горения*, характеризуются, тем, что топочное пространство позволяет загружать за одну растопку большее количество топлива и поддерживать горение на более длительный срок по сравнению с традиционными котлами. Преимуществом является длительность горения по сравнению с котлами нижнего горения, особенностью является то, что горение в топке происходит сверху-вниз с постепенным уменьшением высоты слоя, возможность автоматизации горения, недостатками являются высокая материалоемкость, высокая степень конденсации на низкотемпературных поверхностях;

- *пеллетные котлы*, в качестве топлива применяются специальные топливные гранулы из древесных отходов деревообрабатывающей промышленности. Данный котел снабжен накопительным бункером и автоматической дозированной подачей топлива, благодаря которому обеспечивается эффективность и длительность горения [34, 39]. Преимуществом данных установок является возможность автоматизации процесса горения, недостатками является высокая стоимость оборудования и отсутствие топлива.

Отечественная и зарубежная промышленность организовала производство котлов на твердом топливе как для слоевого сжигания углей и дров в немеханизированных топках, так и на базе зарубежных разработок – механизированных пеллетных котлов [40]. Твердотопливные котлы выпускают чешские фирмы Atmos, Dakon, Оpor и Viadrus, немецкая Olymp, финская Jama, российские Liepsnele и Stropuva. Комбинированные котлы есть в ассортименте шведской фирмы СТС, чешской Dakon, турецкой Demir Dokum, испанской Rosa, финской Jama. Хорошо известны и российские котлы «Пламя» и «ЗИОСАБ».

В таблице 1.2 показаны технические характеристики наиболее распространенных твердотопливных котлов, используемых в индивидуальном домостроении.

**Таблица 1.2 - Технические характеристики твердотопливных котлов
малой мощности**

№	Классификация	Нижнего горения		Пиролизные	Длительного (верхнего) горения		Пеллетные
	Тип и марка котла	Uragan	Куппер Практик	Atmos серия CS	Liepsnele Arctic U	Stropuva S	Zota Pellet S
1	Мощность(min-max), кВт	10-20	8-22	10-48	10-40	8-40	15-130
2	КПД, %	75-76	-	81-88	До 91	До 85	До 90
3	Отапливаемая площадь, м ²	100-200	40-220	40-500	50-400	50-400	-
4	Максимальная температура теплоносителя на выходе, °С	95	95	100	100	95	90
5	Рабочая температура теплоносителя, °С	60-80	60-80	80-90	70-80	65-85	75
6	Минимальная температура оборотной воды на входе в котел, °С	65	60	65	60	60	60
7	Предел протока теплоносителя, л/ч	-	-	-	250-1000	960	700-6200
8	Рабочее давление в системе, кПа	250	200	250	150	150	300
9	Объем водяного теплообменника, л	23-39	25-58	45-105	34-58	41-58	96-430
10	Объем топки, л	22-45	18-47	65-150	180-420	163-406	84-240
11	Диаметр дымохода, мм	150-200	115-150	152	160-180	160-200	150-300
12	Предписанная тяга дымовой трубы, Па	-	-	20-28	-	-	18-40
13	Количество контуров	1	1	1	1	1	1
14	Вес, кг	90-130	64-125	298-504	200-350	205-358	333-1024
15	Используемое топливо	Каменный уголь, дрова	Уголь, дрова, топливные брикеты	Бурый уголь, дрова, и их брикеты	Уголь, дрова, топливные брикеты		Пеллеты древесные и из лузги

1.3 Тенденции повышения эффективности автономных теплогенераторов на твердом топливе в России и за рубежом

Повышение надежности и экономичности систем теплоснабжения зависит от работы теплогенерирующих установок, рационально спроектированной тепловой схемы котельной, широкого внедрения энергоэффективных технологий, рационального использования топлива, тепловой и электрической энергии [41, 42]. Интенсивность потребления тепловой энергии зависит от тепловой защиты и микроклимата здания: температуры внутреннего воздуха, скорости движения и относительной влажности воздуха [43, 44]. Сочетание этих параметров микроклимата, при которых обеспечивается нормальная жизнедеятельность человека называют комфортными или оптимальными условиями [45]. Теоретические основы и инженерные методы обеспечения микроклимата помещений рассмотрены и изложены в трудах В.Н. Богословского, А.Н. Сканава, Е.Г. Малявиной, Ю.А. Табунщикова, О.Д. Самарина и др. [46-55].

Теплогенерирующие установки являются основой системы выработки тепловой энергии [56]. При исследовании проблем, связанных с эффективностью использования тепловой энергии приоритет, отдается технологиям, которые способствуют повышению качества микроклимата [57, 58]. Их эффективность определяет затраты на выпуск продукции и рентабельность отпуска теплоты потребителям коммунальных услуг [59]. Качественная работа всей системы теплоснабжения зависит от проработанности и опытных испытаний проектных решений с учетом особенностей окружающей среды [60-62].

При выборе теплогенерирующей установки для отопления здания необходимым условием являются показатели мощности, назначения и вида потребляемого топлива. В зависимости от данных факторов определяются конструктивные и технологические особенности котлоагрегата. Тепловая

производительность теплогенератора выбирается в соответствии с суммарной тепловой мощностью, которая необходима для обогрева помещений.

Основными проблемами при эксплуатации твердотопливных котлов малой мощности и их дымоходных систем является работа теплогенераторов в нештатном режиме при высоких перепадах наружных температур, отсутствие защиты от кислотного конденсата и низких температур обратной воды, применение низкосортного и сернистого топлива, отсутствие оптимальных режимов горения и низкая тепловая эффективность.

Основными способами повышения эффективности работы твердотопливных котлоагрегатов и их дымоходных систем являются:

- повышение надежности конструктивных элементов и оборудования;
- увеличение КПД и тепловой производительности;
- поддержание оптимального режима работы с минимизацией процессов образования конденсата и загрязнения сажей;
- увеличение длительности горения, в том числе топлива с низкой теплотворной способностью;
- обеспечение продолжительных сроков эксплуатации и простоты в обслуживании, чистке и замене расходных материалов.

В этой связи, эффективность и надежность работы твердотопливных теплогенераторов можно повысить за счет модернизации следующих систем и элементов:

- топливоподачи – за счет автоматизации подачи топлива мелких фракций с использованием накопительных бункеров и применения подвижных механизированных колосников;
- подготовки топлива – путем повышения теплотворной способности за счет брикетирования и сушки;
- автоматизации процессов горения – устройства контроля за расходом воздуха для регулирования параметров горения и теплопроизводительности с применением тягодутьевых устройств;

- защиты от низкотемпературной коррозии – путем минимизации влияния избыточного воздуха и снижения потерь с уходящими газами в топке за счет использования сводов и отражателей;

- утилизации теплоты уходящих продуктов сгорания - путем развития конвективных поверхностей на газоходах котла.

Для постановки цели и задач исследования проведен литературный обзор исследований по повышению эффективности твердотопливных котлоагрегатов.

Работы зарубежных авторов, в основном, посвящены изучению способов получения тепловой энергии различными видами топлива в теплогенерирующих установках. Ряд исследований, посвящен изучению различных способов повышения эффективности работы котлов.

Можно отметить исследования, проведенные Janusz A. Lasek и др. из Института химической переработки угля (Польша), в которых выполнен анализ сезонной энергоэффективности отопления помещений индивидуальными котлами на угольном топливе и с использованием биомассы. Установлено, что снижение КПД котлов связано с потерями тепла с уходящими продуктами сгорания в размере 3–9%, что обусловлено влиянием избыточного воздуха и тяги в дымоходной системе [63]. В работе Viktor Stenberg и др. (Швеция) в качестве факторов, снижающих коэффициент теплопередачи в топке, рассматриваются сезонность работы и загрязнение поверхности котла [64]. Однако выводы, полученные по результатам указанных работ, не представляется возможным распространить для условий северо-восточной части России, так как натурные исследования проведены в условиях европейского климата.

В исследовании Oguzhan Erbas (Машиностроительный факультет Университета г. Кютахья, Турция) в целях повышения КПД котла выполнена оценка применения вторичного воздуха на всем пространстве топочного объема для поддержания высокой температуры горения в слое топлива [65].

Представленные результаты работ не учитывают возникающие потери тепла на подогрев подаваемого воздуха и в окружающую среду.

Наибольший интерес представляют исследования, связанные с управлением процессами горения за счет контроля избыточного воздуха в топке, выполненные Gianluca Carosciutti и др. (Университет Пизы, Италия) [66] и Yanhong Wang и др. (Северо-восточный университет электроэнергетики, Цзинь, Китай) [67]. В качестве механизмов регулирования процесса горения котла использованы методы анализа состава дымовых газов и моделирование с учетом частичных тепловых нагрузок, но при этом данные работы проведены при небольших перепадах температур наружного воздуха.

В работе д.т.н., профессора Ж. Цэен-Ойдов из Государственного университета науки и технологии Монголии изложены и уточнена методика испытания котельных установок. Даны анализ погрешностей и оценки точности результатов испытаний. Описаны особенности испытаний и наладки основных элементов котла, процессов коррозии поверхностей нагрева [68]. Предлагаемые методы натурных испытаний, применяемое оборудование и верификация данных коррелируются с существующими методиками испытаний отечественных исследователей.

В России описание работы котельных установок и общие характеристики автономного теплоснабжения изложены и рассмотрены в работах М.М. Щеголева, Ю.Л. Гусева, Г.Н. Делягина, П.А. Хаванова, В.Е. Удовенко и др.

Изучением и описанием процессов горения в топочных устройствах занимался д.т.н., профессор Кнорре Г.Ф., специалист в области теории горения. В работах выявлено, что из-за неоднородности слоя и наличия прогаров в простейших ручных слоевых топках твердотопливных котлов образуется избыточный воздух, снижающий эффективную работу. Для решения проблемы предложено переходить на более толстые слои топлива для развития газификационных процессов, а зону основного горения

организовывать над слоем топлива в активном объеме топки за счет введения вторичного воздуха прямым дутьем [69]. При этом возникают сложности поддержания необходимой толщины слоя зависящий от сорта, влажности топлива, контроля температуры вторичного воздуха, газообразования и удаления образующихся шлаков, что усложняет конструкцию и эксплуатацию котлоагрегата.

Наибольший интерес вызывают работы, проведенные в ФГБОУ ВО "Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет", где направлением повышения эффективности работы теплогенераторов и исследованием процессов и конструкций топочных камер теплогенераторов малой мощности активно занимался д.т.н., профессором Хаванов П.А. В работах изучен рост тепловых напряжений в топке котлов различной конструкции, обуславливающие высокие требования к качеству теплоносителя и гидравлическим условиям эксплуатации. Установлено, что в топках с увеличенным объемом мероприятия по увеличению степени экранирования положительно влияют на процессы горения [70].

Работы по повышению эффективности слоевых топок за счет возврата золы проведены в ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» к.т.н., доцентом С.Д. Горшениным и др. Предлагается применение горизонтального механизированного поворотного экрана и бункера сбора золы с возвратным механизмом для дожигания [71].

В решении вопросов повышения эффективности работы слоевых топок с низкосортным топливом можно отметить работы Ицковича А.М. предложившего применять горизонтальные поворотные колосники [72], Перескоковой С.А. и др. (Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова») предложивших охлаждение механизированных колосников со

специфической формой шурующих пластин, позволяющее производить двухступенчатое сжигание топлива [73].

Также применение подвижной колосниковой решетки при сжигании различных видов твердого топлива исследовано в работе к.т.н. доцента Белкина А.П., Хужаева П.С. в ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет». Предложенная конструкция позволяет регулировать объем топочного пространства в зависимости от свойств и количества сжигаемого топлива, тем самым позволяет повысить эффективность сжигания топлива за счет исключения налипания золы на стенки газоходов котла [74].

В качестве недостатков указанных выше решений [71-74] можно отметить увеличение себестоимости, габаритов и усложнение эксплуатации котельной установки, что нецелесообразно для теплогенераторов малой мощности, применяемых для теплоснабжения индивидуальных зданий. При этом для повышения эффективности работы слоевых топок индивидуальных котлов, наиболее подходящим решением является применение экранов и отражателей, имеющих небольшие размеры и не усложняющие конструкцию агрегата в целом.

В работах [75, 76, 77] д.т.н., доцента Зиганшина М.Г. и др. (ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет») представлены результаты численного моделирования процессов сжигания различных видов топлива в топках теплогенераторов. Полученные результаты наглядно показывают зависимость протекающих в топочной камере процессов от конструктивных особенностей топок. Следует отметить, что предлагаемые методы моделирования с высокой степенью достоверности можно использовать для проведения опытно-конструкторских разработок и для совершенствования конструкций теплогенераторов.

В ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» над совершенствованием энергосберегающих технологий и конструкций отопительно-коммунальных котельных малой мощности работал д.т.н., профессор Воликов А.Н. В работах рассмотрены

направления повышения эффективности теплогенерирующих установок и рентабельность отпуска теплоты потребителям. Одними из направлений развития конструкций теплогенераторов отмечены: 1) преимущественное использование местного доступного топлива; 2) внедрение автоматизации управления процессами, в том числе расходом воздуха; 3) минимальные удельные затраты при модернизации установок и при производстве тепловой энергии [78].

В работе В.Е. Удовенко, Е.Х. Китайцевой, К.Е. Паргунькина уделено внимание общим вопросам автономного теплоснабжения, котельного и дополнительного оборудования, рекомендации по их эксплуатации. Содержатся подробный обобщенный зарубежный опыт на основе европейских стандартов по проектированию тепловой защиты дымоходов, а также приведены основы аэродинамического и теплового расчёта систем удаления продуктов сгорания [79].

В работе д.э.н., профессора Любимовой Н.Г. рассмотрены различные способы автономного теплоснабжения в децентрализованных районах, где выявлены их основные преимущества и недостатки. Представлены характеристики основных современных твердотопливных котлов малой мощности [80].

В ходе проведенного литературного обзора и на основе рассмотренных исследований установлено, что существуют различные технологии повышения эффективности работы котлоагрегатов в зависимости от развития технических решений, экономических требований, развития топливоснабжения и других факторов. При этом в рассматриваемых выше работах не решается задача повышения эффективности котлов малой мощности в условиях продолжительного действия низких температур наружного воздуха (ниже -30°C). При наличии избытка воздуха в топочной камере в таких условиях усиливаются процессы конденсатообразования, снижающие надежность работы всей системы теплоснабжения. Одним из важных направлений повышения эффективности работы котлоагрегата в

условиях низких температур является регулирование воздушного объема топки с минимизацией влияния избыточного воздуха.

С учетом вышеизложенного, целью диссертационной работы является повышение эффективности работы твердотопливных теплогенераторов малой мощности за счет интенсификации процесса сжигания в топке и в дымоходной системе в условиях низких температур.

1.4 Автономные системы тепловой генерации на твердом топливе, используемые в условиях Якутии

С начала 2010-х годов в Якутии активно начали внедряться твердотопливные котлы длительного горения, использующие принцип верхнего воспламенения топлива, когда горение осуществляется в вертикальной цилиндрической топке сверху-вниз. Котлы предназначены для обогрева индивидуальных жилых, бытовых и малых производственных помещений. Заявленная производителями тепловая мощность составляет 10-40 кВт. Согласно [81], в котлах данной конструкции топливом служит бурый и каменный уголь, торф, дрова и брикеты. В настоящее время в РС (Я) эксплуатируется свыше 2500 единиц таких котлов, преимуществами является длительность горения, возможность автоматизации и энергонезависимой схемы подключения [82, 83]. Конструкция состоит из вертикальных стальных цилиндров, образующих водяную рубашку. Особенности конструкции являются наличие камеры подогрева воздуха, загрузка высокого слоя топлива на весь объем топочного пространства, основная подача воздуха осуществляется с верхней части через стальной телескопический трубопровод с распределителем воздуха и вторичная с нижней стороны через колосниковую решетку. Объем топлива в котле при одной закладке составляет 30-50 кг в зависимости от мощности.

Вместе с тем, опыт эксплуатации данных котлов показал, что перечисленные котлы наряду с преимуществами имеют и ряд недостатков,

сказывающихся на их эксплуатации: неудобство контроля работы механического регулятора подачи воздуха, недостаточная подача первичного воздуха через распределитель воздуха, не позволяющая эффективно поддерживать горение, отсутствие отдельного закрытого золоборника, снижающая безопасность применения. С целью улучшения тепловых показателей, а также надежности, безопасности и экономичности, нами совместно с специалистами ООО «ЯКЗ» были предложены усовершенствования конструкции твердотопливного котла «Liepsnele Arctic» (рисунок 1.4), на которые был получен патент РФ № 187524, опубл. 11.03.2019 [84].



Рисунок 1.4 – Модернизированный твердотопливный котел марки «Liepsnele Arctic» с тепловой мощностью 20 кВт

Основными отличиями от аналогов являются универсальный распределитель воздуха с более эффективным распределением воздуха для горения топлива, отдельная зольная камера с выносным контейнером для удаления золы.

Предлагаемое конструктивное решение относится к теплоэнергетике, а именно к конструкции водогрейных котлов, предназначенных для выработки теплоносителя в систему отопления и горячего водоснабжения. На рисунке 1.5 показан общий передний вид котла с разрезом по вертикальной оси.

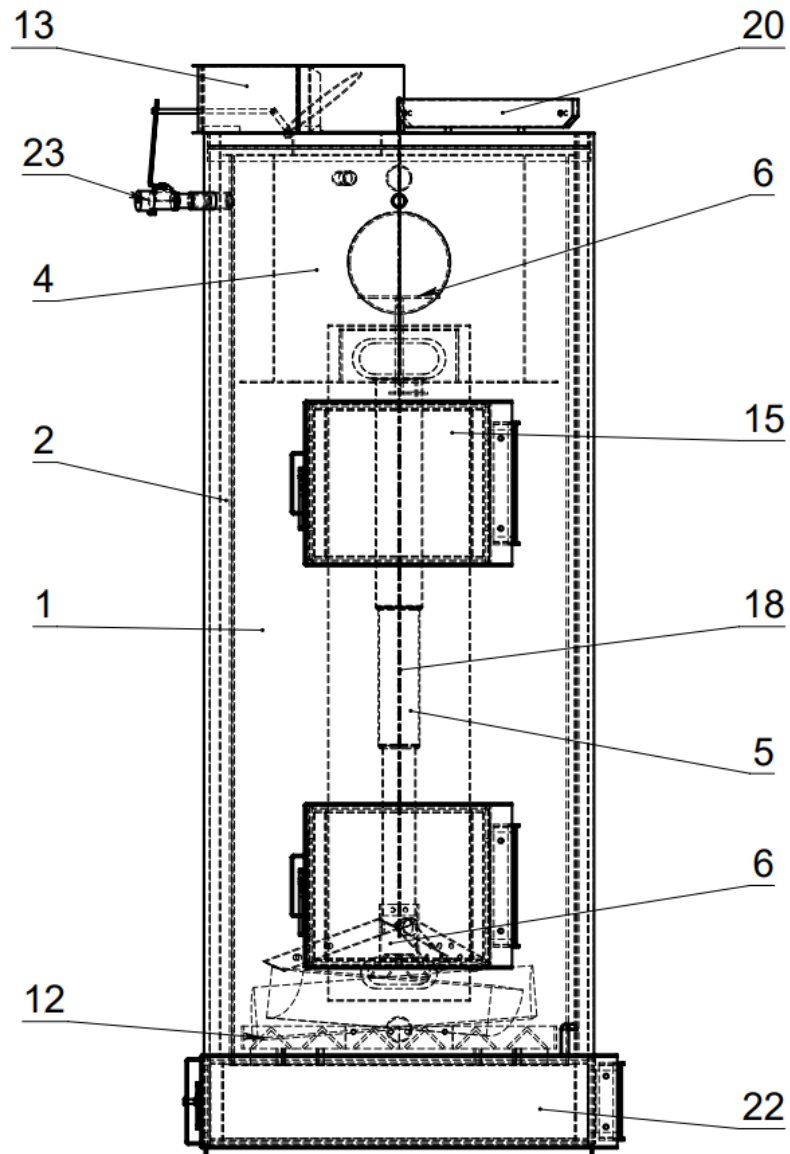


Рисунок 1.5 – Общий передний вид котла с разрезом по вертикальной оси

На рисунке 1.6 показан общий боковой вид котла с разрезом по вертикальной оси.

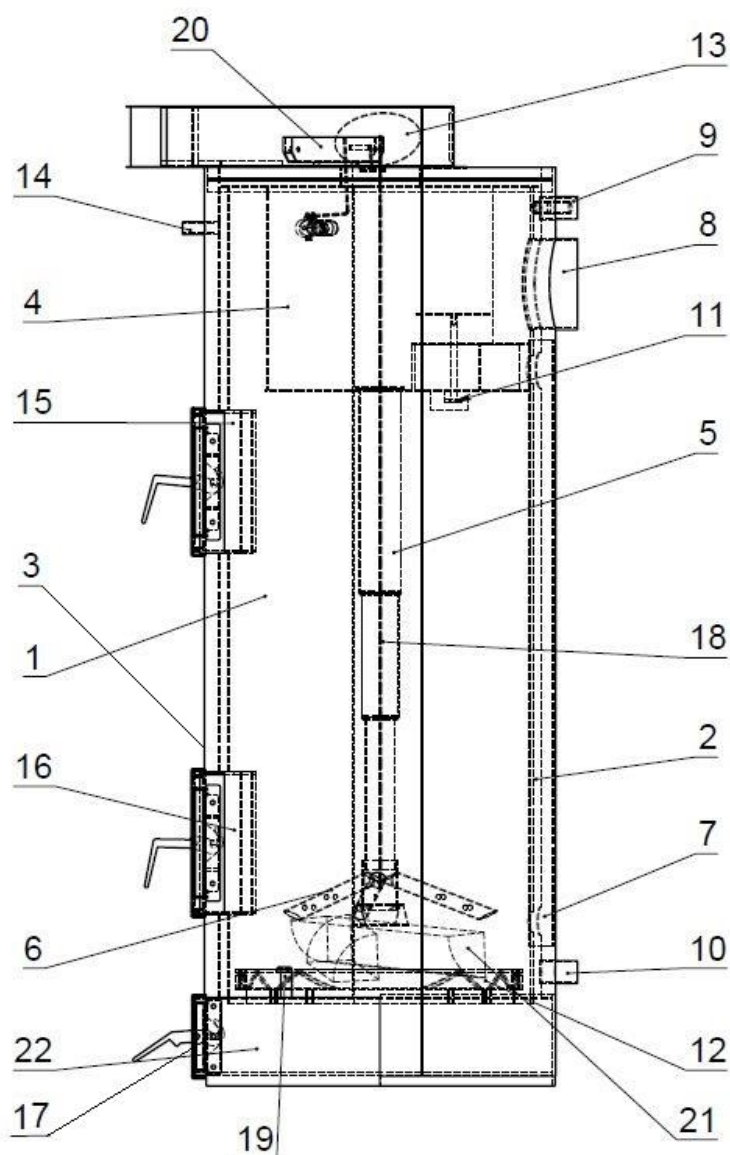


Рисунок 1.6 – Общий боковой вид котла с разрезом по вертикальной оси

Котлоагрегат имеет топочную камеру 1, выполненную в виде вертикального стального цилиндра. Топочная камера состоит из двух стальных цилиндров, образующих подогревательный контур 2 для обогрева теплоносителя, и наружную обшивку 3 с защитной теплоизолированной изоляцией. Котел имеет камеру предварительного нагрева воздуха 4, соединенную с телескопической трубой с царгами 5, в наконечнике которой установлен распределитель воздуха 6 с тремя подающими трубками, имеющими сопловые отверстия и одной центральной подающей трубой с двумя пластинами, посредством которых поступает воздух в зону горения в

верхней части слоя топлива. С камерой нагрева воздуха 4 соединен канал подачи вторичного воздуха 7. Камера 4 оснащена заслонкой 11 для подачи потока воздуха по каналу 7, которая поступает в топочную камеру с нижней стороны камеры 4 через отверстия в неподвижной колосниковой решетке.

Корпус имеет раструб для дымоходной трубы 8, имеются муфта подающей линии 9 и муфта обратной линии системы отопления 10. Котел оснащен колосниковой решеткой 12. Отопительный аппарат оснащен заслонкой 13 подачи воздуха в топочную камеру с механическим регулированием, также может быть подключен электрический вентилятор для поддува воздуха с автоматическим регулированием.

В верхней части наружной стенки котла имеется муфта 14, для установки контактного термометра. В стенке корпуса котла имеются два проема состоящие из герметичных стальных дверей 15 и 16 предназначенных для загрузки топлива. В нижней части корпуса имеется зольная камера 17 для удаления золы.

Отопительный аппарат оснащен тросом 18, часть его длины находится снаружи корпуса, конец троса соединен с телескопической трубой. На внешней стенке аппарата трос 18 фиксируется крючком 19, регулирование троса 18 осуществляется роликовым механизмом 20. Отопительный аппарат загружается твердым топливом 21 – дрова, уголь, брикеты, пеллеты, древесные отходы.

В нижней части корпуса аппарата выполнена зольная камера с контейнером для сбора золы 22 (рисунок 1.7). Зольная камера 22 представляет собой герметичную камеру для сбора золы и отходов сгорания топлива. Для удобства удаления золы устройство снабжено выносным контейнером 29. В корпусе зольной камеры 22 выполнен проем 17 с герметично закрывающейся дверцей 30 для удаления золы. Для запираания дверцы 30 используется замок 31 и петля 32. Корпус зольной камеры 22 выполняет функцию днища отопительного аппарата.

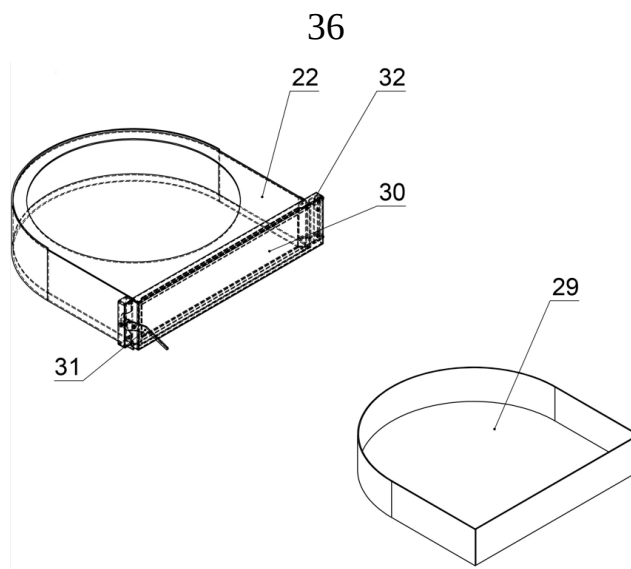


Рисунок 1.7 – Зольная камера

Универсальный распределитель воздуха 6 состоит из трех трубок 24 вторичной подачи воздуха, ориентированными под углом 30^0 к стенке камеры сгорания 1 и одной центральной подающей трубы 25 для первичной подачи воздуха, ориентированной в нижнюю часть камеры сгорания 1 (рисунок 1.8).

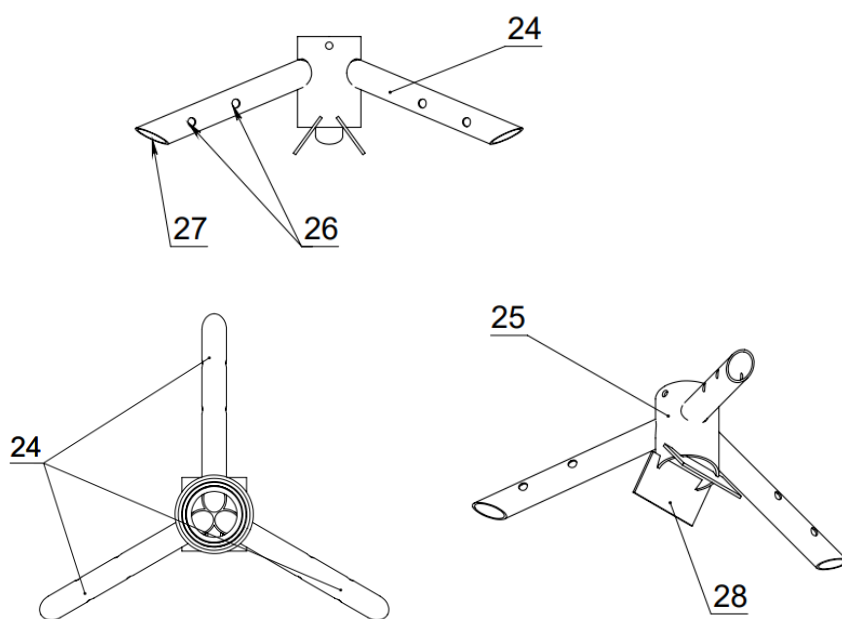


Рисунок 1.8 – Универсальный распределитель воздуха

Трубки 24 для эффективного распределения воздуха имеют дополнительные отверстия 26 в количестве двух на каждую трубку и основное сопло 27. Распределение воздуха в трубке 24 через основное сопло 27

составляет 80%, через дополнительные отверстия 26 составляет 20%. Центральная подающая труба 25 состоит из двух пластин, представляющих собой перевернутый конус 28 для эффективного распределения воздуха. Распределение воздуха в трубках составляет: через трубу 25 - 60%, через трубки 24 - 40%.

В верхней части наружной стенки аппарата выполнено отверстие с муфтой для установки механического регулятора тяги с внутренним термостатическим элементом 23 (рисунок 1.5). Механический регулятор тяги 23 состоит из регулятора тяги котла 33, рычага 34 и заслонки подачи воздуха 35 (рисунок 1.9).

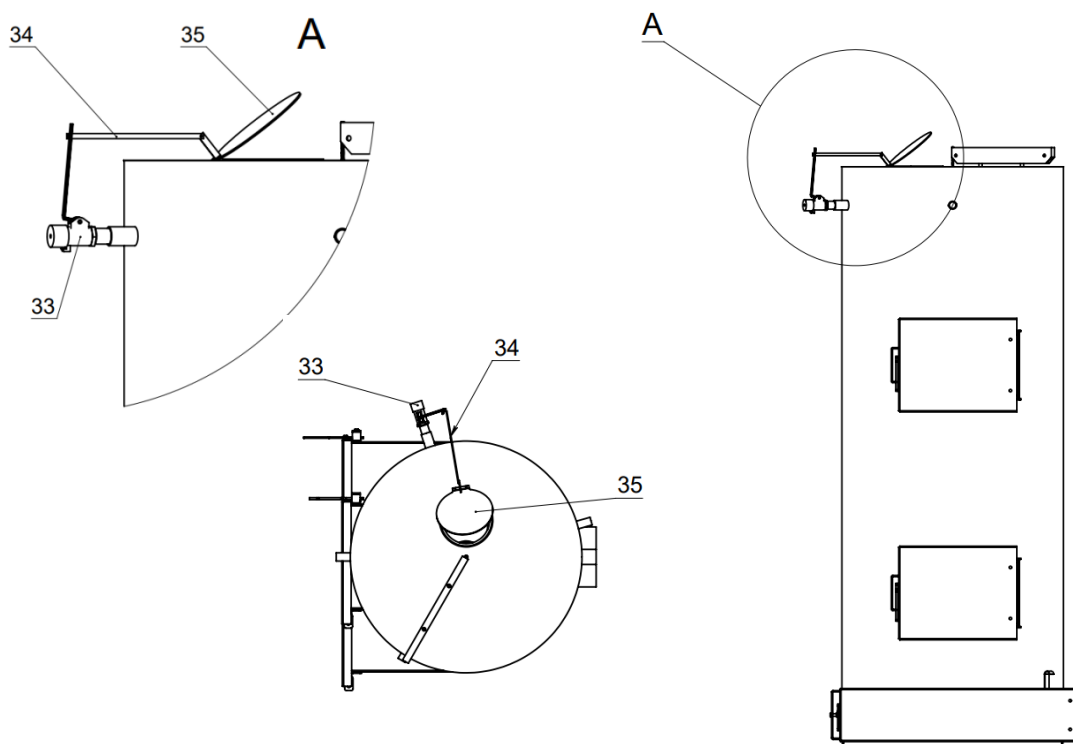


Рисунок 1.9 – Механический регулятор тяги

Работа котла осуществляется следующим образом: для работы котла с принципом «верхнего» горения в камеру 1 через дверцы 15 и 16 загружают топливо 21 и поджигают. Кольцо металлического троса 18 снимают с крючка 19 и поднимают вверх, таким образом, распределитель воздуха 6 опускается на топливо 21. Дверцы 15 и 16 закрывают. Открывают механическую заслонку 13 и нагнетают воздух в камеру нагрева 4. Из камеры нагрева 4 воздух

распределяется на 2 потока - верхний и нижний в пропорциях: 65 - 70% через распределитель 6 и 30 - 45% через трубу 7. Нагретый в камере 4 воздух стремится вниз по телескопической трубе к распределителю 6, обеспечивая зону горения кислородом сверху. Распределитель 6 на телескопической трубе опускается вниз по мере прогорания топлива 21, обеспечивая горение только в верхней зоне. Нижний поток воздуха, проходя по трубе 7 в полости камеры 1, сильно нагревается и, попадая под колосники 12, устремляется вверх, по пути высушивая топливо 21 и обеспечивая зону горения кислородом. Таким образом производится топливо просушивается, нагревается. Вывод продуктов горения происходит через отверстие дымохода 8. После того как аппарат набирает рабочую температуру в ручном режиме регулируют сечение механической заслонки 13.

Регулирование степени горения топлива и нагрева теплоносителя производится внутренним термостатом регулятора 33 опусканием рычага 34 вниз, когда температура в камере сгорания превысит установленную на шкале, закрывают заслонку 35, тем самым уменьшая подачу воздуха. В случае снижения температуры в камере сгорания рычаг 34 будет подниматься, и приоткрывать металлическую заслонку 35.

В случае внезапного отключения электропитания или сбоя в работе циркуляционного насоса в системе отопления дома, в целях предотвращения закипания котла и его повреждения, аппарат оснащен металлической заслонкой 35. При нагревании металлического корпуса аппарата, термостат регулятора тяги 33 опускает рычаг 34 перекрывая металлической заслонкой 35 доступ воздуха в аппарат. Температура теплоносителя внутри корпуса аппарата регулируется регулятором тяги 33.

Предполагалось, что предложенная конструкция аппарата будет более надежной и безопасной в эксплуатации, а также экономичной в генерации тепловой энергии.

1.5 Основные положения для расчета теплообмена излучением в слоевых топках твердотопливных котлов

Передача тепла в топке от продуктов сгорания к воде котла происходит, в основном, за счет лучеиспускания. Тепло передается через лучевоспринимающую поверхность топки. Различают две основные температуры продуктов сгорания в топке: теоретическая ϑ_a и вторая (меньшая по величине) при входе в первый газоход ϑ_1 . Снижение температуры в топке от теоретической до ϑ_1' получается из-за передачи тепла к лучевоспринимающей поверхности котла. Тепло, выделившееся при горении топлива, передается через стенки поверхностей нагрева котельного агрегата теплоносителю. В топке процесс нагрева теплоносителя происходит за счет лучеиспускания от факела и продуктов сгорания, а в слоевых топках — еще и от накаливаемого слоя торящего топлива, через лучевоспринимающие поверхности. Из топочной камеры нагретые дымовые газы поступают в газоходы котла, где за счет конвективных процессов производится передача тепла к поверхностям нагрева.

Расчет теплообмена в топочных устройствах основывается на: связи количества переданной теплоты, теоретической температуры горения с критерием Больцмана Bo , силой поглощения kps , геометрическими безразмерными характеристиками — степенью экранирования и отношением площади зеркала горения к сумме лучевоспринимающих поверхностей.

Исходной для расчета теплообмена в топке является формула, предложенная [85]:

$$\theta_{T_{ад}}'' = T_T'' / T_{ад} = \frac{Bo^{0,6}}{M \cdot a_T^{0,6} + Bo^{0,6}}, \quad (1.1)$$

где $T_{ад}$ — абсолютная теоретическая температура горения; Bo — критерий Больцмана; a_T — степень черноты топки.

Данная формула связывает безразмерную температуру газов на выходе из топочной камеры (θ_T'') с критерием Больцмана. Критерий Больцмана представляет собой характеристическое число, контролирующее соотношение между конвективным переносом теплоты и излучением абсолютно черного тела при температуре рассматриваемого элементарного объема, которое излучается при теоретической температуре по закону Стефана-Больцмана и передается поверхности нагрева. В окончательном виде формула примет вид:

$$Bo = \frac{\varphi \cdot B_p \cdot (V_{\Gamma} \cdot c_{cp})}{\sigma_0 \cdot \Psi \cdot F_{ст} \cdot T_{ад}^3}, \quad (1.2)$$

где φ – коэффициент сохранения тепла, учитывающий потерю тепла в окружающую среду;

B_p – расход топлива в кг/ч;

$V_{\Gamma} \cdot c_{cp}$ – средняя суммарная теплоемкость продуктов сгорания 1 кг топлива;

Ψ – средний коэффициент тепловой эффективности экранов;

$F_{ст}$ – лучевоспринимающая поверхность топки, равная площади топки, м²;

$\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-11}$ кВт/(м²·К⁴) – коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Подставляя данные значения в формулу (1.1), получаем расчетную формулу для определения температуры газов на выходе из топки θ_T' при заданной лучевоспринимающей поверхности:

$$T_T'' = \frac{T_a}{M \cdot \left(\frac{5,67 \cdot 10^{-11} \cdot \Psi_{cp} \cdot F_{ст} \cdot a_T \cdot T_{ад}^3}{\varphi \cdot B_p \cdot (V_{\Gamma} \cdot c_{cp})} \right)^{0,6} + 1} - 273^\circ \text{C}, \quad (1.3)$$

Из этой же формулы при заданном значении θ_T' определяется лучевоспринимающая поверхность топки котла:

$$F_{ст} = \frac{B_p \cdot Q_{л}}{5,67 \cdot 10^{-11} \cdot M \cdot \Psi_{cp} \cdot a_T \cdot T_T'' \cdot T_{ад}^3} \cdot \sqrt[3]{\frac{1}{M^2} \cdot \left(\frac{T_{ад}}{T_T''} - 1 \right)^2}, \quad (1.4)$$

где $Q_{л}$ – количество тепла, переданное топке за счет лучеиспускания, Мдж/кг;

a_T – степень черноты топочной камеры котла;

M – коэффициент, учитывающий геометрический характер распределения температур по высоте топочной камеры.

Расчетный коэффициент M зависит от относительной высоты положения максимума температуры топочных газов x_T , которая характеризует температурное поле топки и также учитывает полноту тепловыделения при сжигании твердого топлива в слое. При слоевом сжигании твердого топлива формула расчета коэффициента M будет выглядеть:

$$M = 0,59 - 0,5 \cdot x_T \quad (1.5)$$

где $x_T = h_1 / h_2$, при h_1 – расстояние от нижней плоскости топки до плоскости максимальных температур топочных газов;

h_2 – расстояние от нижней плоскости топки до середины выходного окна топки.

При слоевом сжигании топлива во внешних топках, если температура ν'_1 (T''_T) получается низкой, над слоем горящего топлива рекомендуются перекинуть своды или отражатели. Сводами называются элементы, ограничивающие и разделяющие зону непосредственного горения и зону догорания топлива в топке котла. Сводь изменяют интенсивность падения температуры горения топлива. Тем самым, улучшаются условия горения, температура над слоем повышается.

Правильно сконструированная и хорошо работающая топка должна характеризоваться минимальным присутствием избыточного воздуха, возможно полным сгоранием топлива (высоким коэффициентом полезного действия) и максимально возможной передачей тепла излучением.

1.6 Выводы

1. Коммунальный сектор Северных регионов характеризуется высокой себестоимостью производства тепловой энергии и значительным уровнем износа централизованных теплогенераторов, что обусловлено климатическими условиями эксплуатации, транспортной недоступностью,

низким радиусом эффективного теплоснабжения и другими факторами. При нарастающих объемах индивидуального жилищного строительства перспективным направлением развития является применение современных автономных котлоагрегатов на местном топливе.

2. В ходе проведенного анализа литературных источников установлено, что имеются различные технологии и методы повышения эффективности работы котлоагрегатов. При этом в рассмотренных работах не решены задачи по повышению эффективности теплогенераторов в условиях низких температур наружного воздуха. Целью диссертационной работы является повышение эффективности работы твердотопливных теплогенераторов малой мощности за счет интенсификации процесса сжигания в топке и в дымоходной системе в условиях низких температур. Поставлены следующие задачи:

1) Изучить состояние коммунального комплекса и развитие систем тепловой генерации в Республике Саха (Якутия).

2) Выполнить анализ работы котельных агрегатов, определить возможные направления повышения эффективности.

3) Разработать комплексное аналитическое выражение для подбора высоты теплоизоляции дымохода в условиях низких температур.

4) Предложить усовершенствованную конструкцию теплогенератора для повышения эффективности его работы.

5) Выполнить аналитические и численные исследования предложенной усовершенствованной конструкции теплогенератора.

6) Подтвердить результаты теоретических и численных исследований усовершенствованной конструкции теплогенератора и дымоходной системы натурными исследованиями.

7) Обосновать и подтвердить экономическую эффективность промышленного внедрения оригинальной конструкции теплогенератора.

3. На основании опыта эксплуатации автономных котлоагрегатов, применяющихся в условиях Якутии, предложена усовершенствованная

конструкция, позволяющая повысить эффективность горения топлива, увеличить надежность теплоснабжения и безопасность эксплуатации.

4. Представлены и рассмотрены основные положения для расчета теплообмена излучением в слоевых топках твердотопливных котлов, позволяющие приступить к разработке теоретических основ расчета предложенной усовершенствованной конструкции.

2 ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ТОПОЧНОЙ КАМЕРЫ И ДЫМОХОДНОЙ СИСТЕМЫ ТВЕРДОТОПЛИВНОГО КОТЛА

2.1 Изучение работы твердотопливных котлоагрегатов в условиях Севера

Ориентировочно почти 1/4 часть суши Земного шара относятся к территориям с холодным климатом. В России такие территории составляют примерно 11 млн. м², почти 2/3 страны использует тепловую энергию для отопления [86]. В Якутии самым холодным месяцем является январь с низкой ветровой нагрузкой, а самый жаркий месяц приходится на июль, характеризующийся высокими температурами [87, 88]. Сведения о климатических параметрах района строительства и условиях эксплуатации зданий являются одними из наиболее важных составляющих, учитываемых при решении задач теплового обеспечения и в расчетах тепловой нагрузки системы отопления [52, 89].

При подборе котельного оборудования и проектировании инженерных систем зданий следует учитывать климатические особенности регионов на территории РФ [90, 91, 92]. В процессе эксплуатации инженерных систем в климатических условиях Севера к ним предъявляются повышенные требования по надежности и бесперебойности работы.

Основные климатические данные населенных пунктов России и Якутии приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Параметры наружного воздуха населенных пунктов
России

Населенный пункт	$t_{нр}, ^\circ\text{C}$	$t_{min}, ^\circ\text{C}$	$t_{max}, ^\circ\text{C}$	$v_{ср}, \text{м/с}$	Отопительный период ($t_n \leq 8 ^\circ\text{C}$)	
					$t_{он}, ^\circ\text{C}$	z, сутки
г. Москва	-25	-43	38	2	-2,2	205
г. Санкт-Петербург	-24	-36	37	2,5	-1,3	213
г. Сочи	-2	-13	39	3,5	6,6	94
г. Архангельск	-33	-45	34	2,9	-4,5	250

г. Новосибирск	-37	-50	37	3,6	-8,1	222
г. Красноярск	-37	-53	38	2,5	-6,5	235
г. Владивосток	-22	-31	34	6,6	-4,3	199
г. Якутск	-52	-64	38	1,5	-20,9	252
с. Оленек	-55	-63	36	2,4	-18,7	287
г. Верхоянск	-58	-68	37	1,1	-24,9	272
п. Оймякон	-59	-68	35	0,9	-25,3	276
п. Жиганск	-52	-60	35	3,3	-19,8	275
г. Алдан	-41	-51	35	1,9	-13,6	263
пгт. Томмот	-50	-60	38	0,9	-17,3	259

Примечание: $t_{нр}$ - температура воздуха наиболее холодной пятидневки, обеспеченностью 0,92, °C; t_{min} - абсолютная минимальная температура воздуха, °C; t_{max} - абсолютная максимальная температура воздуха, °C; v_{cp} - средняя скорость ветра за отопительный период, м/с; $t_{от}$ - средняя температура воздуха за отопительный период, °C; z - продолжительность отопительного периода, сут.

Одной из характерных особенностей климата Якутии является большая годовая амплитуда температур, которая составляет от 50-127 °C. [60, 93]. В теплый период года в Якутии характерен интенсивный рост суточных температур, с началом весеннего периода времени и его резкое падение в осенний период. Небольшие высоты Солнца и короткие зимние дни приводят к малому приходу тепла от солнечной радиации в холодный период года. Также по общей облачности преобладают пасмурные дни с вероятностью наступления в пределах 45-75% в течение года [94]. Интенсивность солнечной радиации изменяется в широких пределах в зависимости от географического положения и времени года [95].

Резко континентальный климат Якутии проявляется в больших годовых колебаниях температуры и относительно малом количестве выпадающих осадков, обуславливается низкими расчетными температурами, малыми скоростями ветра.

Холодный период характеризуется числом градусо-суток отопительного периода (ГСОП) [96, 97, 98]:

$$ГСОП = (t_{вн} - t_{он}) * z \quad (2.1)$$

где $ГСОП$ – градусо-сутки отопительного периода ($^{\circ}\text{C} * \text{сут}$);
 $t_{вн}$ – расчетная температура внутреннего воздуха, $^{\circ}\text{C}$; $t_{он}$ – средняя температура за отопительный период, $^{\circ}\text{C}$; z – количество суток отопительного периода, ед.

Теплообеспечение и тепловая защита зданий зимой симметричны изменениям температур и длительности отопительного периода. Значения $ГСОП$ характеризуют суровость региона, без их учета невозможно проводить сопоставление уровня энергоэффективности зданий и выбор строительных технологий, применяемых в разных климатических районах [99]. В [100, 101] выполнен сравнительный расчет $ГСОП$ различных европейских и других стран. Рассчитанные результаты $ГСОП$ для городов России и Европы с населенными пунктами Якутии показаны на рисунке 2.1.

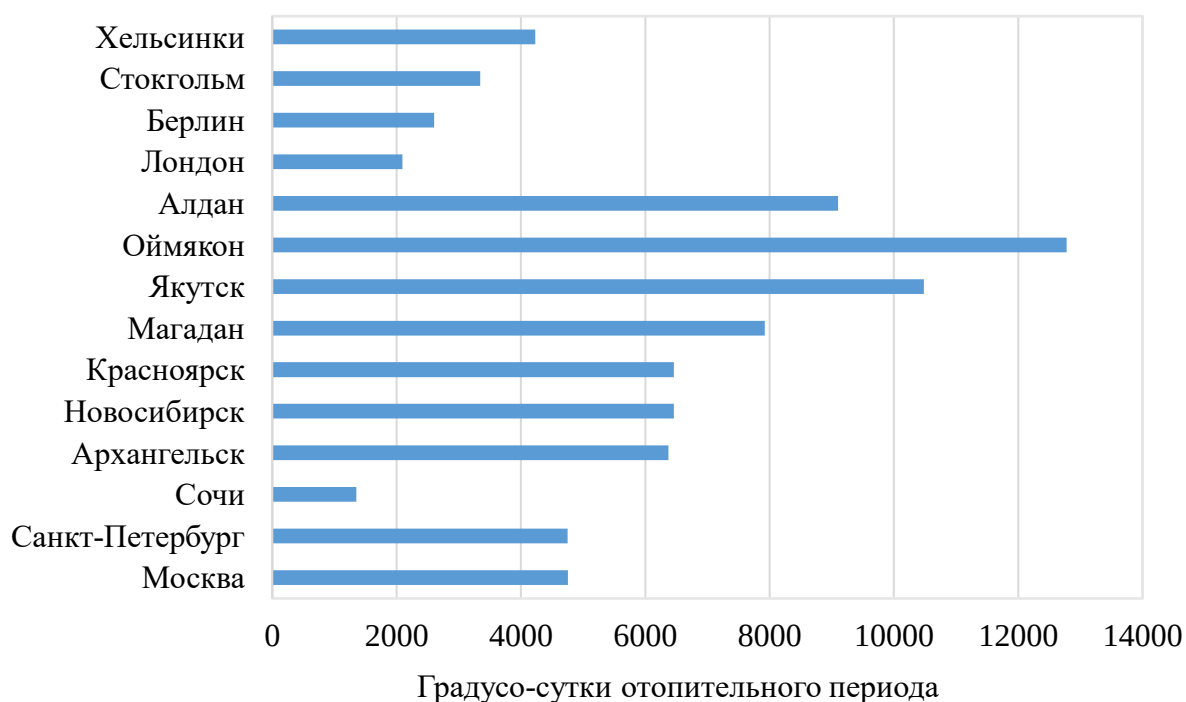


Рисунок 2.1 – Градусо-сутки отопительного периода ($ГСОП$) для различных городов России и стран Европы

Как видно из рисунка 2.1, значения $ГСОП$ для городов, расположенных в средней полосе и в северной части России существенно превосходят значения для городов Европы, при этом для Республики Саха (Якутия)

превышает значения ГСОП городов России, а городов Европы в 2-3 раза и составляет 8000-12000. От значений градусо-суток зависит расход тепловой энергии на отопление зданий за отопительный период [102]. С увеличением показателей ГСОП растет количество вырабатываемой тепловой энергии и сроки работы котлоагрегата, соответственно увеличивается риск аварийных случаев в теплоснабжении. В холодных регионах предъявляются высокие требования к надежности теплового оборудования.

Одной из характерных особенностей климата является большая годовая амплитуда температур. Отличие климатических условий в г. Якутске наглядно проявляются при сравнении с климатом центральной России на примере г. Москвы, на рисунке 2.2.

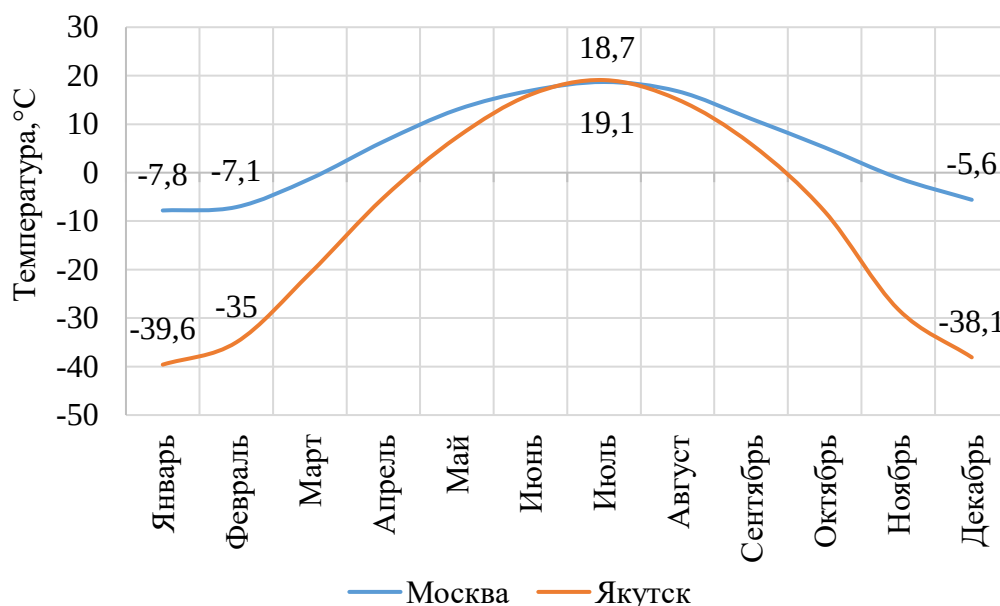


Рисунок 2.2 – График распределения средней месячной температуры для г. Москвы и г. Якутска

В Центральной Якутии на протяжении всего теплого периода часто наблюдаются заморозки, вызывающие понижение температуры ниже 0°C [94]. Исходя из этих факторов, мощность и количество котлов необходимо выбирать таким образом, чтобы в отопительный период автономные котельные имели нагрузки с учетом номинальной тепловой мощности [37].

Тепловые нагрузки для расчета и выбора оборудования автономных теплогенераторов определяют для трех режимов: максимального – при

температуре наружного воздуха в наиболее холодную пятидневку с обеспеченностью 0,92, среднего при средней температуре наружного воздуха в наиболее холодный месяц и в теплый период года [38, 103]. Расчет мощности теплогенератора должен производиться так, чтобы обеспечивать требуемые тепловые условия в обслуживаемой зоне в течение всего отопительного периода [46]. Нагрузка системы отопления определяется климатическими условиями, что обосновывает использование методов качественного регулирования с графиком регулирования 95-70 °С, 80-60 °С, 60-40 °С при постоянном расходе. Также широкое потребление приобретает способы количественного регулирования с применением современных термостатических элементов и оборудования в системе отопления. Как показывает практика [104, 105], при проектировании и монтаже систем тепловой генерации часто подбор количества и мощности котлоагрегатов осуществляется только по максимальному зимнему режиму и по температуре наиболее холодной пятидневки, без расчета других режимов работы в межсезонье. При этом не учитываются уменьшение тепловой нагрузки в периоды резких перепадов наружной температуры воздуха характерных в резко-континентальной климатической зоне. На рисунке 2.3 представлен график расчетных тепловых нагрузок для котлоагрегата мощностью 40 кВт для отопительного периода г. Якутска продолжительностью 252 дня [35, 94].

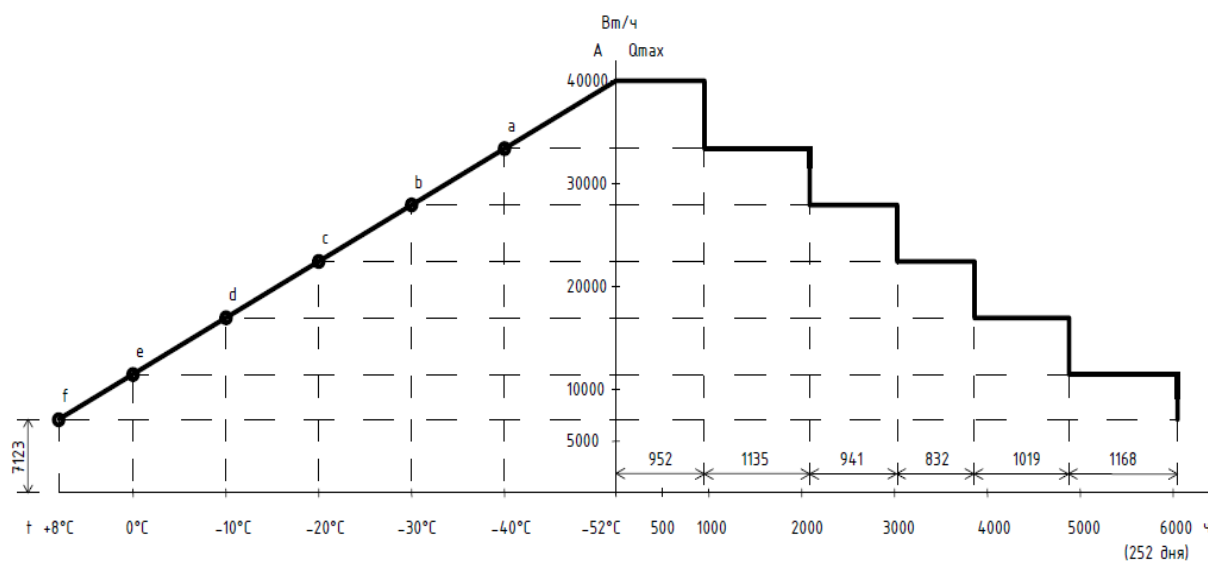


Рисунок 2.3 – График расхода тепла отопительной котельной для г. Якутска

Как видно из графика в периоды повышения температуры наружного воздуха уменьшается тепловая нагрузка и соответственно возникают ситуации неправильного регулирования отпуска тепловой энергии (частичная нагрузка), приводящие к нерациональному использованию топлива и перетапливанию помещений. В таких режимах эксплуатации не обеспечивается защита котлоагрегата от низких температур воды в обратной линии, приводящие к гидравлической неустойчивости всей системы, что может привести к интенсификации низкотемпературной коррозии, отложениям накипи [104]. Технические решения при проектировании и устройстве тепловых схем должны учитывать характеристики используемого топлива, типы и виды котлоагрегатов, состояние теплоносителя, условия потребления ГВС, особенности систем отопления и др. [106, 107, 108]. Данные технические решения необходимо обосновывать, с проведением анализа условий работы, обеспечения надежности и защиты оборудования от нерасчетных режимов эксплуатации [109, 110].

В теплогенератор вместе с твердым топливом поступают различные минеральные примеси, которые частично выводятся из агрегата в виде шлака и твердых частиц летучей мелкодисперсной золы через дымоходную систему. Процесс загрязнения топочных камер твердотопливных котлов выражается в виде осаждения частиц золы на поверхностях нагрева. Данные отложения ухудшают лучистый и конвективный теплообмен, прогрессирующие отложения в виде шлакования поверхностей приводят к аварийной остановке котлоагрегата. Наиболее интенсивно данные процессы протекают при наличии в топке полувосстановительной среды, снижающей температуру плавкости золы по сравнению с температурами для окислительной среды. Отложения, образующиеся на наружных поверхностях нагрева при сжигании твердого топлива, подразделяются на: плотные, рыхлые и сыпучие. [111]. По результатам натурных наблюдений в зимнее время эксплуатация твердотопливных котлов длительного «верхнего» горения сопровождается процессами сажеобразования с забиванием отверстий для отвода продуктов

сгорания, с последующим проникновением дымовых газов в жилые помещения. На рисунке 2.4 показан процесс образования сплавленных золовых отложений на внутренней поверхности твердотопливного котла с верхним способом горения. Формирование связанных отложений протекает под действием не только аэродинамических, но и химических процессов, способных к неограниченному росту с течением времени.

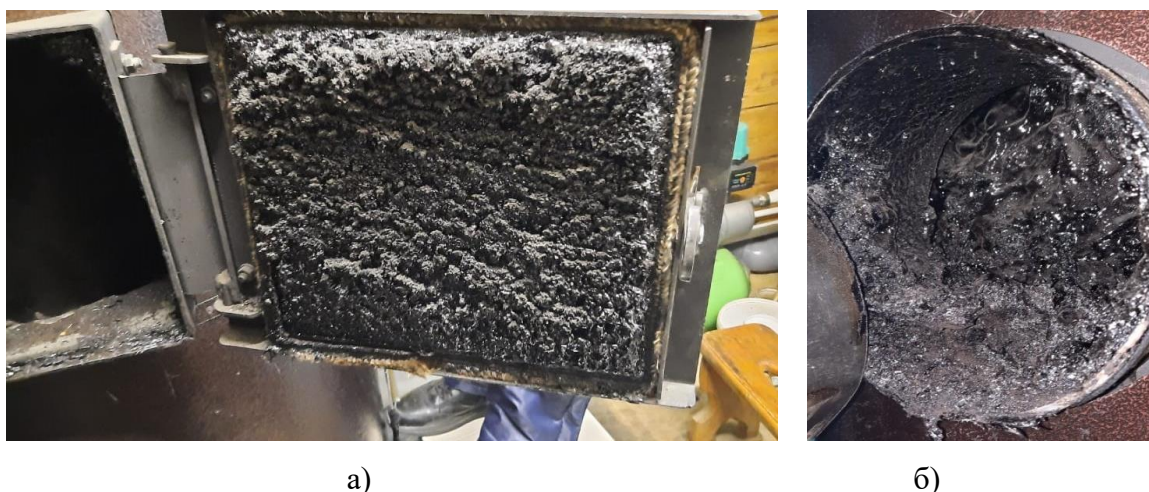


Рисунок 2.4 – Процессы сажеобразования при эксплуатации твердотопливного котла «верхнего» горения: а) на поверхности топки, б) в полости дымохода

Шлакование на высокотемпературных поверхностях вызывает при эксплуатации котлоагрегатов особые трудности, предотвращение и снижение интенсивности отложений являются актуальными. Основными факторами, определяющими образование отложений, являются: состав топлива, температура сжигания топлива, процессы горения, температура дымовых газов и др. [109].

В Якутии дымовые трубы котлоагрегатов эксплуатируются в сложных климатических условиях при больших перепадах наружной температуры. Загрязнение внешних поверхностей нагрева при омывании их дымовыми газами происходит при работе теплогенераторов на твердом топливе и зависит от протекающих в топке процессов. Основными компонентами продуктов сгорания в дымоходах являются оксиды углерода и азота, водяной пар, диоксид серы, а также твердые частицы золы. Негативное влияние дымовых

газов на металлические элементы дымоходных систем и топочных камер проявляется в виде проявления кислотной коррозии (рисунок 2.5).



а)



б)

Рисунок 2.5 – Образование и обмерзание кислотных конденсатов на поверхности дымоходов твердотопливных котлов в зимнее время: а) на дровяном топливе, б) на угольном топливе

Кислотная коррозия возникает из-за процессов конденсации частиц серной кислоты на низкотемпературных поверхностях котельных установок. Коррозионное воздействие зависит от температуры, скорости, сернистости продуктов сгорания, режима работы котла и др. факторов. При содержании серы в топливе более 3 %, может образоваться конденсат серной кислоты концентрацией до 80 %. Также при повышенных скоростях дымовых газов коррозия увеличивается вследствие повышения статического давления и массообмена между газами и стенкой дымохода [109, 112]. Основным недостатком при эксплуатации дымовых труб является низкая тепловая защита при больших перепадах наружных температур в отопительный сезон в регионах Севера. Также при уменьшении тепловой нагрузки в переходный период, дымовые трубы, подвергаются дополнительному воздействию

кислотной коррозии из-за уменьшения объемов дымовых газов и понижения их температуры из-за процессов протекающих в топочной камере.

Согласно [113] одним из основных причин отказов отечественных котлоагрегатов является коррозия и износ металлических частей, составляющий 23%, от общего числа отказов. Распределение аварийных отказов приведено на рисунке 2.6.

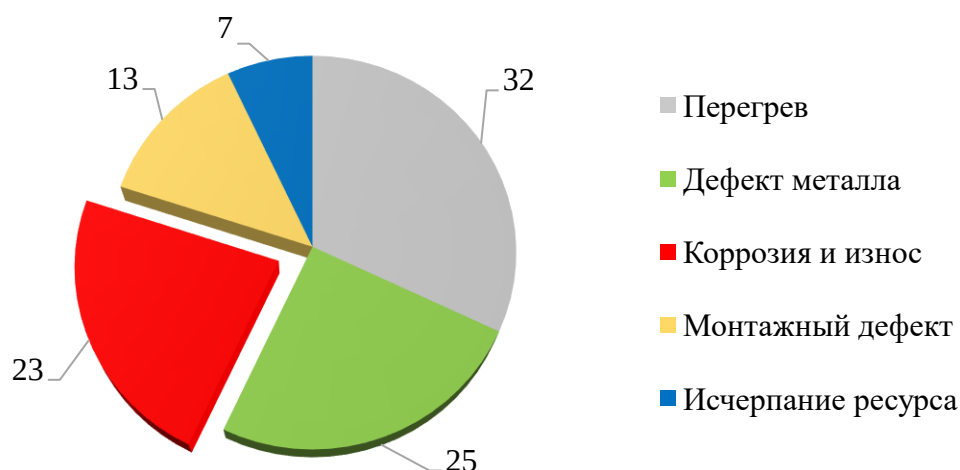


Рисунок 2.6 – Распределение аварийных остановок отечественных ТЭС

По данным ООО «Якутский котловый завод» наиболее частые сбои в работе и случаи аварийных остановок, эксплуатируемых пользователями в РС (Я) котлов, происходят в зимний и переходный период, из них 70% случаев из-за дефектов металлических поверхностей топочной камеры и дымохода, вследствие коррозии из-за влияния кислотного конденсата, 30% случаев связаны с процессами сажеобразования. Все эти процессы негативно сказываются на эксплуатации котлоагрегатов, снижают надежность теплоснабжения во время отопительного сезона и приводят к аварийным ситуациям. Одним из факторов их возникновения являются низкие параметры температуры горения топлива и продуктов сгорания.

В целях определения параметров работы топки были проведены натурные измерения режимов горения теплогенераторов с верхним горением котла марки «Липснеле Арктик», выпускаемых на заводе ООО «Якутский котловый завод» [84], с паспортной мощностью 40 кВт. Схема расположения

и установки измерительных приборов и оборудования показана на рисунке 2.7.

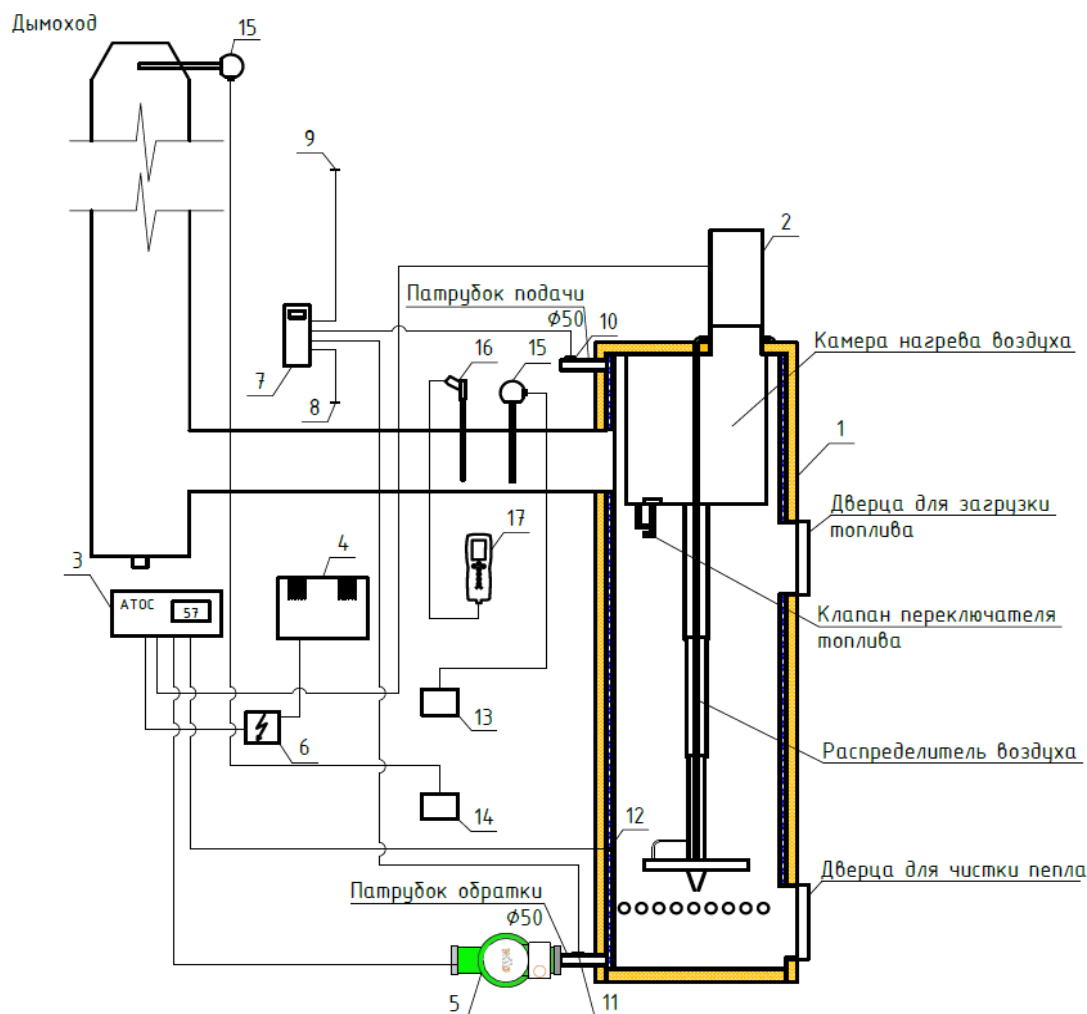


Рисунок 2.7 – Схема проведения натурных измерений работы твердотопливных теплогенераторов, где: 1 – твердотопливный котел; 2 – вентилятор поддува воздуха WPA 120; 3 – контроллер автоматики TAL RT-22; 4 – теплоинформатор Terposom GSM; 5 – циркуляционный насос; 6 – блок питания; 7 – 4-х канальный измеритель температуры Center 309; 8 – датчик температуры внутреннего воздуха; 9 – датчик температуры наружного воздуха; 10 – датчик температуры подающей линии; 11 – датчик температуры обратной линии; 12 – термостат контроллера котла; 13, 14 – 1-канальные измерители EClerk-M-K; 15 – датчики температуры дымовых газов; 16 – зонд отбора проб дымовых газов и измерения тяги котла; 17 – газоанализатор Testo 340

Испытания проведены во время отопительного сезона в 2022 году в г. Якутске [114]. Основными измеряемыми параметрами являлись температуры горения топлива, продуктов сгорания, теплоносителя и теплопроизводительность котлоагрегата. Данные фиксировались специализированными измерительными устройствами. Растопка производилась на дровах из лиственных пород дерева и на буром угле

Кангаласского месторождения. Испытания производились в естественных условиях при температуре наружного воздуха в диапазоне -30 до -40 °С, что характеризует отопительный период.

Изменения параметров котлоагрегата в зависимости от массы дровяного топлива в топке, представленные на рисунках 2.8 и 2.9, показывают увеличение продолжительности горения на 10-44% в режиме механического регулирования.

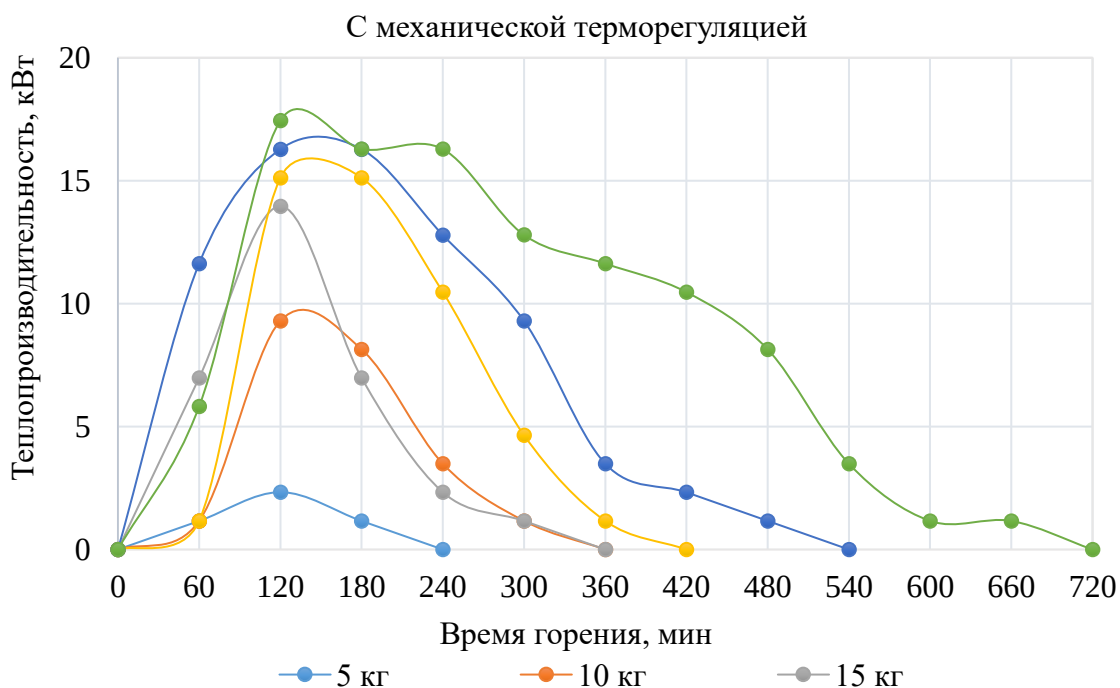


Рисунок 2.8 – Часовая теплопроизводительность котла при различной массе дровяного топлива в режиме механического регулирования количества воздуха

Установлено увеличение часовой производительности тепловой энергии в режиме автоподдува более чем, на 50-55% по сравнению с механическим регулированием, что обусловлено увеличением количества воздуха в топке, ускоряющего окислительные процессы.

Низкая часовая теплопроизводительность котла в режиме механического регулирования обусловлена недостатком воздуха, участвующего в горении и поддержании диффузионно-кинетического режима с увеличением времени горения. При этом показатели суммарной тепловой производительности в обоих режимах при массе топлива 15-43 кг имеют между собой минимальные отклонения, составляющие 6-7%.

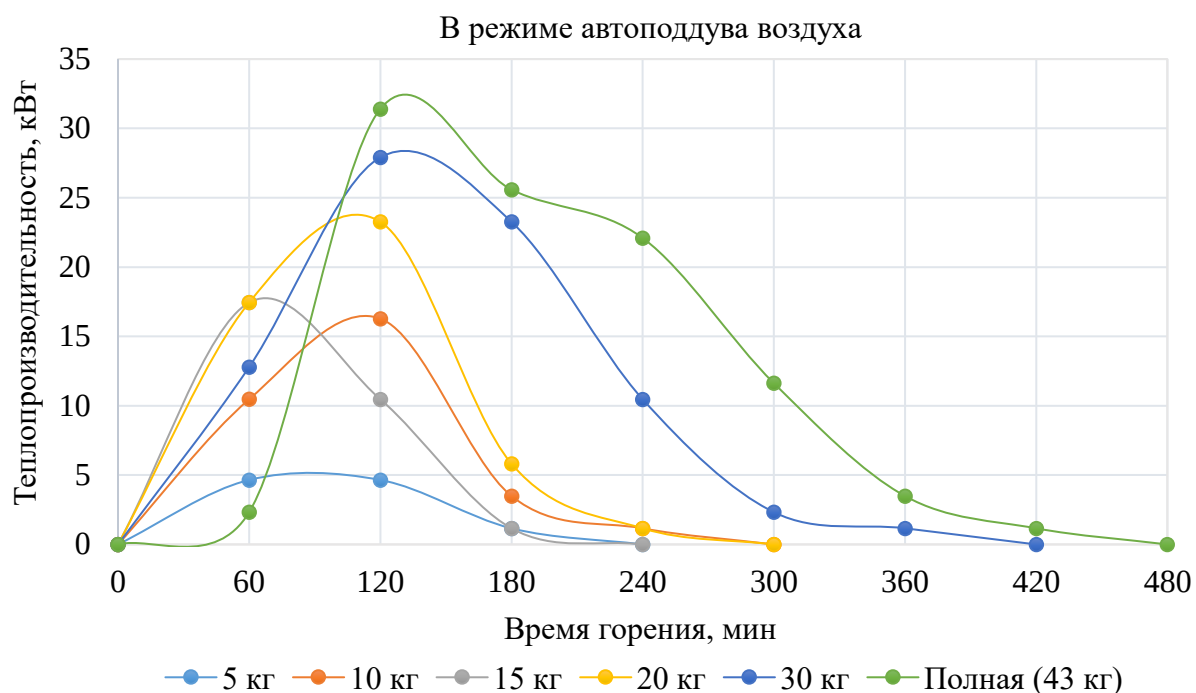


Рисунок 2.9 – Часовая теплопроизводительность котла при различной массе дровяного топлива в режиме автоподдува воздуха

Показатели суммарной тепловой производительности при количестве топлива 5-10-15 кг, что составляет 11-23-35% от общей массы, при сравнении с полной растопкой (43 кг) составляют в режиме механической терморегуляции: 5 кг – 4,44%, 10 кг – 22,2%, 15 кг – 30%, в режиме автоподдува воздуха: 5 кг – 10,7%, 10 кг – 26,75%, 15 кг – 29,75%. Установлено, что сжигание малых объемов топлива (5-15 кг) в слоевой топке котлоагрегата данной конструкции не позволяет получить необходимое количество тепловой энергии для теплоснабжения помещений и обеспечить длительность горения.

Для обеспечения нормальной работы топочной камеры котлоагрегата требуется безостановочная подача воздуха в топку, в целях обеспечения необходимой скорости движения продуктов сгорания [112, 115]. В ходе эксплуатации котлоагрегатов многие пользователи переходят на установку автоматизированных систем подачи воздуха для горения топлива в целях получения высоких параметров тепловой производительности. Использование режима автоподдува в зимнее время является необходимым условием для

компенсации тепловых потерь здания и достижения паспортных характеристик котла при использовании низкосортного топлива.

Измерение параметров работы топки котла и его дымоходной системы в режиме автоподдува в зимнее время ($t_n = -40,0 \dots -33,0$ °С) показало, что в «рабочем» режиме температура горения составляет 500,0-900,0 °С, с переменным горением и ослабеванием при срабатывании терморегулятора (рисунки 2.10-2.11).

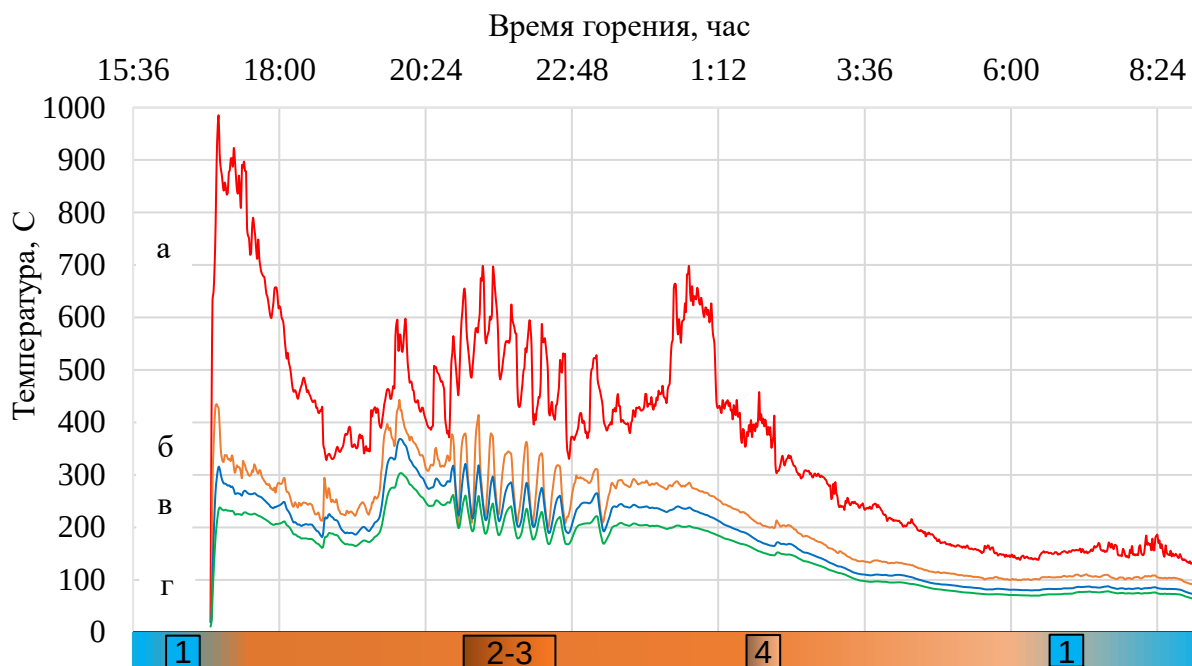


Рисунок 2.10 – Процесс горения котла на 1 закладке бурого угля, где:

а) температура горения в топке, на месте подачи воздуха, °С, б) температура дымовых газов на выходе с топки котла, °С, в) температура дымовых газов в середине дымохода, $h=3,5$ м, °С, г) температура дымовых газов в устье дымохода, $h=7,0$ м, °С

Зоны процесса горения в зависимости от показателей температуры горения разделены на зоны растопки, возгорания и горения топлива, начала затухания по мере выгорания и отсутствия горения. Зоны процессов указаны в следующем порядке (для всех графиков): 1 – горения нет, укладка топлива, вынос шлака; 2 – начало растопки, возгорание; 3 – горение; 4 – начало процесса затухания. Зоны отсутствия горения топлива определялись по температуре пирогенного разложения сложных органических соединений равной 100 °С [116].

Как видно из рисунков 2.10-2.11, изменение показателей температуры дымовых газов напрямую зависит от температуры горения топлива в топочной камере котлоагрегата. Колебания показателей вызваны работой вентилятора поддува воздуха в камеру сгорания, который срабатывает при понижении температуры теплоносителя подающей линии $t_n < 60^\circ\text{C}$.



Рисунок 2.11 – Процесс горения котла на 1 закладке дровяного топлива, где:
а) температура горения в топке, на месте подачи воздуха, $^\circ\text{C}$, б) температура дымовых газов на выходе с топки котла, $^\circ\text{C}$, в) температура дымовых газов в середине дымохода, $h=3,5$ м, $^\circ\text{C}$, г) температура дымовых газов в устье дымохода, $h=7,0$ м, $^\circ\text{C}$

На графиках видно, что с началом процесса затухания 4 показатели температур продуктов сгорания в верхней части дымохода приближаются к точке образования конденсата. В этот же период начинается снижение тепловой эффективности топочной камеры, показанный на рисунках 2.12-2.13. Длительность процесса затухания 4 от начала понижения температуры горения до полного выгорания топлива составляет в среднем 3-4 часа для бурого угля, 1,5-2 часа для дровяного топлива.



Рисунок 2.12 – Процесс горения котла на 1 закладке бурого угля, где:
а) тепловая производительность котла, кВт, б) температура горения топлива, °C



Рисунок 2.13 – Процесс горения котла на 1 закладке дровяного топлива, где:
а) тепловая производительность котла, кВт, б) температура горения топлива, °C

В период указанного процесса ухудшается тепловая работа топки котлоагрегата и снижается температура подающей линии системы отопления здания, что отражается на микроклимате помещений (рисунки 2.14-2.15).

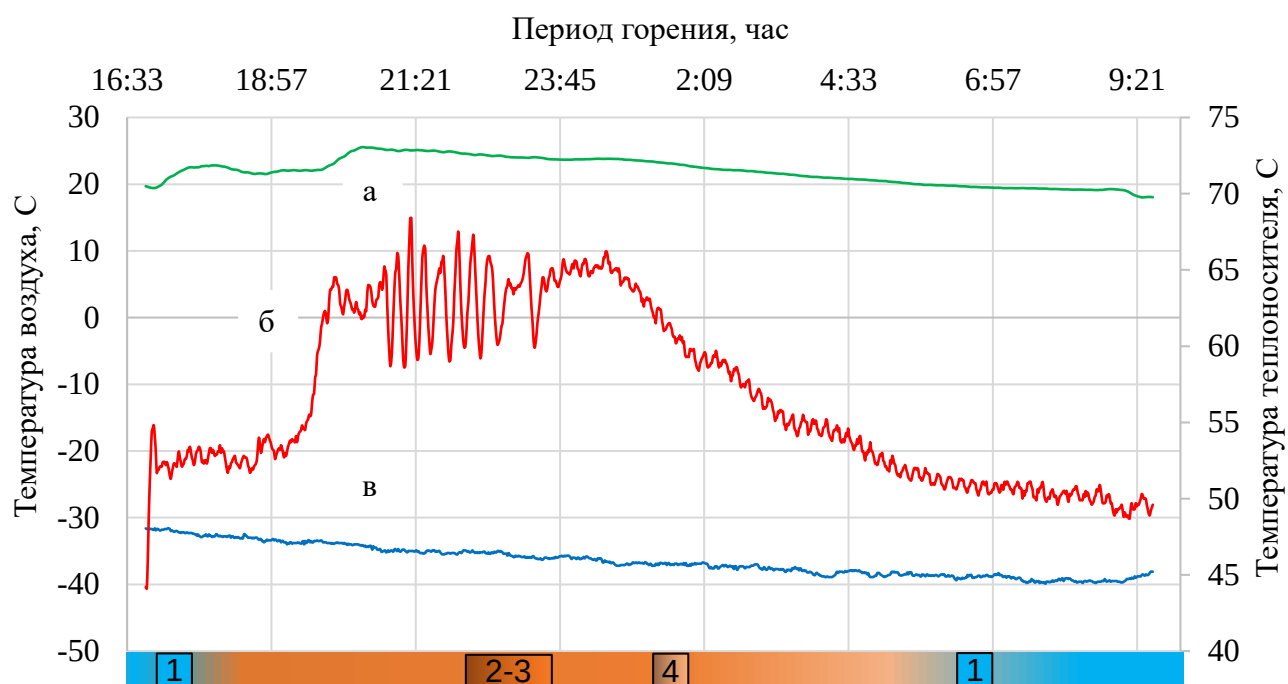


Рисунок 2.14 – Процесс горения котла на 1 закладке бурого угля, где: а) температура внутреннего воздуха в отапливаемом помещении, °C, б) температура теплоносителя на подающей линии системы отопления, °C, в) температура наружного воздуха, °C



Рисунок 2.15 – Процесс горения котла на 1 закладке дровяного топлива, где: а) температура внутреннего воздуха в отапливаемом помещении, °C, б) температура теплоносителя на подающей линии системы отопления, °C, в) температура наружного воздуха, °C

Проведенные измерения показывают, что по мере прогорания и шлакования топлива с уменьшением толщины слоя в топке (в среднем ниже 25% от общего объема) начинается процесс затухания с понижением показателей температуры горения. Установлено, что из-за конструктивных особенностей топочной камеры с верхним воспламенением, в процессе горения по мере прогорания слоя топлива увеличивается объем воздушного пространства топки.

При нерегулируемой тяге через колосниковую решетку в конце сквозь образовавшийся низкий слой топлива в свободное пространство топки начинает поступать не вступивший в реакцию воздух. Образование избыточного воздуха увеличивает объем топочных газов и потери тепла с уходящими газами, при этом снижая температуру горения и тепловую эффективность топочной камеры. При переходе работы топки котла в процесс затухания с повышенными коэффициентами избытка воздуха снижается надежность теплоснабжения и увеличивается риск аварийной остановки. Описанные явления приводят к усилению образования кислотного конденсата на низкотемпературных поверхностях дымоходной трубы и его последующему попаданию в топочное пространство, что в дальнейшем снижает надежность работы котлоагрегата.

2.2 Особенности процессов горения в слоевых топках теплогенераторов малой мощности

В зависимости от теплоэнергетических свойств твердое топливо подразделяют на энергетическое и местное. К местным относят топливо с низкой теплотворной способностью (древесина, бурый уголь, торф и т.д.). В Якутии в качестве местного твердого топлива применяется древесина в виде лиственницы и бурый уголь. Занятость лесами территории Якутии составляет 47,4%, причем, лесистость разных территорий различна. Общая площадь земель лесного фонда Республики Саха (Якутия) около 249 млн. га, больше

всего лиственничных лесов – 90,5% площади основных лесообразующих пород и 77,6% от всей покрытой лесной растительностью площади республики [117]. Теплотворная способность древесины в большей степени зависит от влажности, с увеличением которой ее теплотворная способность понижается. Рабочая теплотворная способность может быть определена по эмпирической формуле [118] для воздушно-сухой древесины (рисунок 2.16):

$$Q_c^p = 4370 - 50 \cdot W \quad (2.1)$$

и для сплавной древесины:

$$Q_c^p = 3870 - 50 \cdot W \quad (2.2)$$

где W —относительная влажность древесины, %.

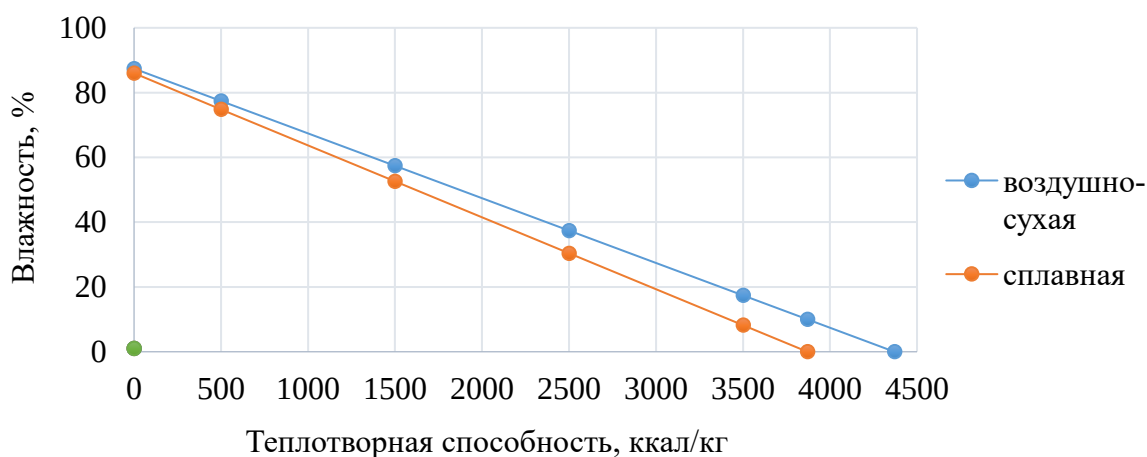


Рисунок 2.16 – Диаграмма для определения теплотворной способности древесины различной влажности

Как видно из рисунка 2.16 теплотворная способность древесины со средней влажностью 45% остается низкой. Таким образом целесообразнее использовать в качестве топлива в котлоагрегатах бурый или каменный уголь, которые за счет более высокой теплотворной способности обеспечивают более высокий КПД, интенсивность и длительность горения. Угольная промышленность занимает существенное место в отраслевой структуре Якутии. Преимуществом угольного топлива является географическая распространенность месторождений и возможность завоза угля в Арктические районы навигацией. Наиболее распространенные бурые угли Кангаласского месторождения относятся к среднеюрскому периоду, являются типично

гумусовыми, преимущественно витринитовыми, блестящими и плотными. По ГОСТ-25543 относятся к классу 04 (категория 0) и подгруппе 2БВ группы 2Б. [119].

Температура точки росы продуктов сгорания зависит от характеристик сжигаемого топлива, его сернистости, коэффициента избытка воздуха. Определение температуры точки росы дымовых газов, для выбранного вида бурого угля, производилось с использованием расчетов, согласно [111]:

$$t_p = t_k + \frac{\beta \cdot \sqrt[3]{S_{np}}}{1,05^{4,19} \cdot \alpha_{yn} \cdot A_{np}}, ^\circ\text{C} \quad (2.3)$$

где t_k – температура водяных паров 50-60 °С; S_{np} , A_{np} – приведенное содержание серы и золы в топливе, кг % / ккал; α_{yn} – доля золы топлива в уносе; β – коэффициент, зависящий от избытка воздуха в топке и при $\alpha_m=1,2$ равный 195, при $\alpha_m=1,5$ равный 208.

В таблице 2.2. представлены характеристики применяемого бурого угля с рассчитанным значением температуры точки росы дымовых газов.

Таблица 2.2 – Характеристики бурого угля Кангаласского месторождения

Параметр	Обозначение	Значение
Состав топлива, %	W^p	30,0
	A^p	14,8
	S_{op+k}	0,4
	C^p	71,4
	H^p	5,5
	N^p	0,8
	O^p	21,9
Теплота сгорания топлива, ккал/кг (МДж/кг)	Q_n^p	3535 ккал/кг (14,8 МДж/кг)
Температура точки росы дымовых газов	t_p	125

Процессы горения подразделяются на гомогенные и гетерогенные. Гомогенным называется процесс горения, который происходит в однородной по агрегатному состоянию массе, т. е. горение смеси газообразного топлива с воздухом и смеси паров жидкого топлива с воздухом. Гетерогенным называется процесс горения, при котором горючее вещество и окислитель

находятся в различных агрегатных состояниях, куда относится горение твердого топлива.

Тепло выделенное в процессе горения частично расходуется на нагрев дымовых газов, горючего вещества, а также в виде тепловых потерь в окружающую среду. Температурой горения называется значение до которой нагреваются продукты горения [120]. В работах [121, 122] изучены зависимости скорости протекания процесса горения от его температуры. В теории горения топлива различают калориметрическую, теоретическую и действительную температуры [69, 123].

Теоретическая температура - это значение температуры, которая получилась бы в случае сгорания топлива при полном отсутствии теплообменных процессов.

Калориметрическая температура максимальная температура, которая рассчитывается аналогично теоретической, но без учета диссоциации продуктов сгорания H_2O и CO_2 . В [124] приведены аналитические формулы для расчета горения топлива. Калориметрическую температуру горения топлива можно определить из уравнения теплового баланса горения 1 кг твердого топлива:

$$Q_H^p + V_B^0 C_B t_B \alpha + C_m t_m = V_D^0 \alpha t_K C_D, \quad (2.4)$$

где: Q_H^p - низшая теплотворность топлива, кДж/кг; V_B^0 - теоретический расход воздуха на горение 1 кг, м³/кг; C_B - теплоемкость воздуха, кДж/(кг·°C); t_B - температура воздуха на горение топлива, °C; C_m - теплоемкость топлива, кДж/(кг·°C); t_m - температура топлива, поступающего на горение, °C; V_D^0 - теоретическое количество продуктов горения от сжигания 1кг топлива, м³/кг; C_D - теплоемкость дымовых газов.

В таблице 2.3 показаны результаты расчета калориметрической температуры при различных параметрах температуры воздуха и коэффициента избытка воздуха.

Повышенные значения коэффициента избытка воздуха возникают при значительных объемах воздуха, не вступившего в реакцию.

Таблица 2.3 - Калориметрическая температура горения в зависимости от коэффициента избытка воздуха и его температуры, подаваемого в топку

α	Температура воздуха, °С					
	0	5	10	15	20	25
1	1112	1121	1129	1137	1145	1153
1,05	1082	1091	1100	1108	1117	1126
1,1	1063	1072	1082	1091	1100	1110
1,2	969	979	989	999	1010	1020
1,4	856	869	881	893	905	917
1,5	830	843	857	871	884	898
2	527	542	558	573	588	604
2,5	375	393	410	427	444	461
3	362	385	409	433	456	480

Из таблицы 2.3 видно, что с повышением коэффициента избытка воздуха в топке параметры калориметрической температуры начинают уменьшаться. Увеличение коэффициента избытка воздуха на 0,1 понижает калориметрическую температуру до 50 °С. Из этого следует, что эффективная работа топки котла будет достигаться при сохранении минимальных значений коэффициента избытка воздуха.

Общее уравнение теплового баланса котельного агрегата, считая на 1 кг сжигаемого топлива, выражается следующим неравенством:

$$Q_p^p = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6, \text{ кДж/кг} \quad (2.5)$$

где Q_p^p - располагаемое тепло, Q_1 , - полезно использованная теплота в котле в виде пара или горячей воды, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, Q_6 – потери теплоты с уходящими газами, из-за химической и механической неполноты сгорания (потери в провале, шлаках и уносе), передаваемой в окружающую среду всеми элементами котла, физической теплотой, удаляемой из топки с золой и шлаками.

Потери с уходящими газами зависят от совершенства котлоагрегата и лишь частично зависят от топки, и во многом зависят от проработанности

пространства топки (экранирование) и поверхностей нагрева по газходам (конвективные поверхности, экономайзеры). Для составления эффективности работы топочной камеры принято пользоваться условным коэффициентом полезного действия, %:

$$\eta_t = 100 - (q_3 + q_4 + q_5^t + q_6). \quad (2.6)$$

Из данного уравнения теплового баланса котлоагрегата можно выделить потери от химической и механической неполноты сжигания, полностью зависящие от способа сжигания топлива, конструктивных характеристик топки, условий его эксплуатации.

Механические потери от неполноты сжигания состоят из трех частей:

$$q_4 = 100 \cdot Q_4 / Q_p^p = q_4^{yh} + q_4^{np} + q_4^{shl}), \text{ кДж/кг} \quad (2.7)$$

где q_4^{yh} - потери с уносом топлива, q_4^{np} - потери из-за провала топлива через колосниковую решетку, q_4^{shl} - потери со шлаком при его удалении.

Тепловые потери, которые возникают в топке q_3, q_4, q_5, q_6 и снижают тепловыделение в ней, в том числе сокращая величину калориметрической и теоретической температуры горения.

Как известно, основные элементы современного автономного котлоагрегата – это топка, котел, воздухоподогреватель, а также тягодутьевые и подпиточные устройства, оборудование подачи топлива и золоудаления [125, 126]. Топливо, сгорая в топке, вступает в химическую реакцию с кислородом воздуха, образуя горячие газы, которые двигаясь по газходам котла охлаждаются и выбрасываются наружу. Твердое топливо сжигается в слоевых топках, в топках с кипящим слоем, в факельных и циклонных топках. Процесс горения в слоевой топке подразделяется на 2 зоны: окислительную кислородную, где имеется свободный кислород и восстановительную, где реагируют CO_2 и С. Максимальное значение температуры в слое соответствует наибольшей концентрации CO_2 .

Под понятием «слоевая топка» обычно подразумевается колосниковая решетка, поддерживающая слой топлива, чтобы через него проходил

требующийся для горения воздух, и топочное пространство над слоем, в котором горят горючие летучие вещества. Во многих агрегатах большая часть тепла передается излучением. В топке источниками излучения являются слой топлива, факел, несветящиеся газы и огнеупорные стенки.

Рассматриваемая типовая топка исследуемого котла представляет собой стальной вертикальный цилиндр, где отсутствует экранирование. Топливо загружается вручную до заполнения топочного пространства, укладывается на неподвижную стальную колосниковую решетку, которая удерживает весь слой топлива в камере. С верхней стороны топка ограничена поверхностью нагрева котла и распределителем воздуха, с боковых сторон цилиндрической стальной стенкой подогревательного контура. Из-за сжигания топлива в толстом слое без периодических загрузок нового топлива шлак долгое время остается в колосниковой решетке, что способствует его лучшему выжиганию, уменьшая потери $q_4^{\text{шл}}$. Данные потери являются незначительными и их можно не рассматривать. Наиболее существенными являются потери за счет уноса топлива, особенно при большом количестве мелочи. С увеличением коэффициента избытка воздуха пропорционально возрастает и его скорость через слой топлива, что ведет к увеличению потерь уносом.

Первичный (основной) воздух, подается в топку исследуемого котла за счет тяги, создаваемой разрежением или посредством вентиляторного дутья с верхней части котла, через телескопическую трубу с распределителем. Вторичный воздух поступает через воздушный канал в нижнюю часть топки и подается снизу колосниковой решетки, ограничивающей топочное пространство. Регулирование скорости и объемов дутья при этом не производится. Основными стадиями работы загруженной топки и подавателей воздуха является верхнее зажигание холодного топлива с последующим его прогревом за счет передачи теплоты от газов и воздуха верхнему слою. Излучение факела и тепловыделение в топочной камере при этом будут расти постепенно по мере воспламенения топлива и образования летучих веществ и продуктов сгорания.

Используя явления, описанные диаграммой профессора К.В. Кирша [36] при горении топлива в слоевой топке между двумя загрузками топлива, считая, что тяга не регулируется в координатах «время – количество воздуха», возможно изобразить ход процесса горения исследуемой топочной камеры при изменении толщины слоя топлива по мере его прогорания (см. рис. 2.17).

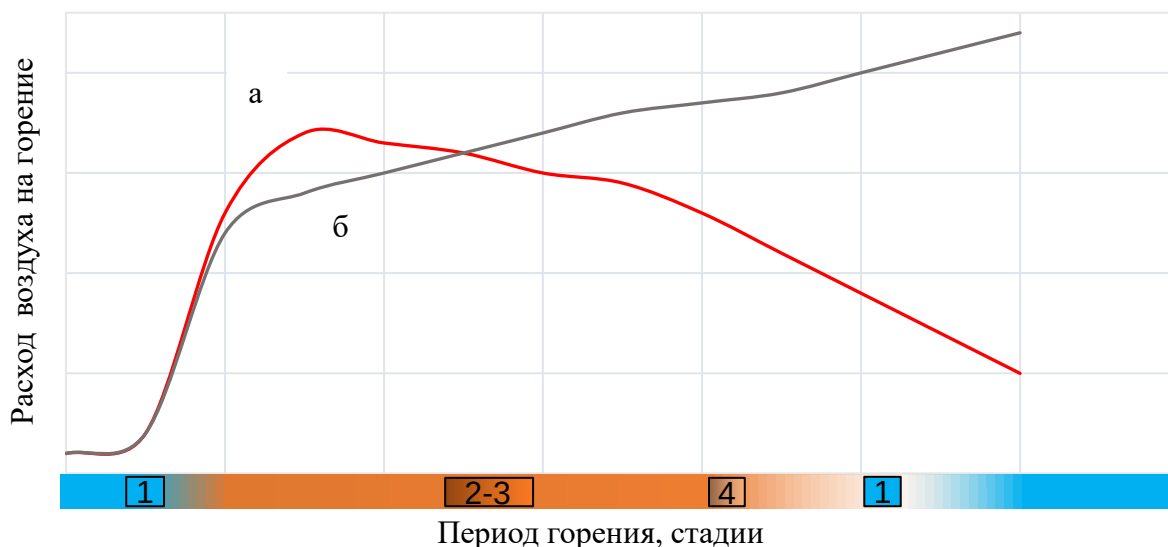


Рисунок 2.17 – Изменение расхода воздуха при 1 загрузке топлива в топке с неподвижной колосниковой решеткой, где: а – действительное количество воздуха для горения, б – общее (фактическое) количество воздуха, проходящее через топку

На графиках видно, что в начале процесса горения потребность воздуха для горения будет наибольшая, что отражено повышением действительного расхода воздуха на графике (красным цветом). В середине процесса горения на участке пересечения кривых наблюдается наилучшая работа топки без чрезмерного избытка воздуха с полным сгоранием. Далее по мере прогорания слоя топлива происходит его утончение, снижается сопротивление и увеличивается количество неиспользованного воздуха. В действительности в данной зоне необходимо уменьшать потребность в воздухе. Если не уменьшить подачу воздуха за счет программного авторегулирования, то в слой будет поступать избыточное количество воздуха, ведущее к снижению производительности топки. Установлено, что в котлах с верхним горением при снижении толщины слоя топлива процесс горения происходит не в оптимальном режиме. К концу периода до загрузки новой порции топлива при

утопченном слое топлива горение происходит с большим избытком воздуха, тем самым увеличивая потери от уноса топлива q_4^{yh} .

Одним из основных значений для проведения поверочного и конструктивного расчета котлоагрегатов в целях определения температуры газов на выходе из топки T''_T (формула 1.3) и лучевоспринимающей поверхности нагрева $F_{ст}$ (формула 1.4) является коэффициент M , зависящий от относительной высоты расположения зон топочных газов, для слоевых топок:

$$M = 0,59 - 0,5 \cdot \left(\frac{h_1}{h_2} \right), \quad (2.8)$$

где при h_1 — расстояние от нижней плоскости топки до плоскости максимальных температур топочных газов, м; h_2 — расстояние от нижней плоскости топки до середины выходного окна топки, м.

Для исследуемого котла с верхним горением плоскость максимальных температур будет постепенно перемещаться вниз до колосниковой решетки по мере прогорания, когда периодическое забрасывание топки не производится. С учетом этих условий при $h_1=h_T$ расчет средней высоты от нижней плоскости топки до плоскости максимальных температур топочных газов будет выглядеть:

$$h_T = \frac{\sum (n_1 \cdot B_1 \cdot h_1 + n_2 \cdot B_2 \cdot h_2 + \dots)}{n_1 \cdot B_1 + n_2 \cdot B_2 + \dots}, \quad (2.9)$$

где $B_1, B_2, \dots$ — расход топлива, соответственно на каждом уровне распределителя; $n_1, n_2, \dots$ — количество распределителей; $h_1, h_2, \dots$ — высота расположения распределителя воздуха, м.

С использованием формулы 2.9 и технических данных универсальных твердотопливных котлов марки Liepsnele Arctic рассчитан средний коэффициент M при условии неизменности расхода B по высоте топки, таблица 2.4.

Таблица 2.4 - Размеры топки и среднее значение коэффициента M

№	Марка котла	Высота от пода топки до низа камеры подогрева воздуха, м	h_2 , м	Количество распределителей, ед.	h_t , м	Средний коэффициент М
1	Liepsnele Arctic U10	1,0	1,14	1	0,40	0,415
2	Liepsnele Arctic U20	1,2	1,34	1	0,50	0,4
3	Liepsnele Arctic U40	1,36	1,71	1	0,53	0,43

С использованием технических характеристик топочных камер твердотопливных котлов марки Liepsnele Arctic получен график зависимости относительной высоты положения максимума температуры продуктов сгорания в топке при различном уровне расположения топлива в период горения, показанный на рисунке 2.18.

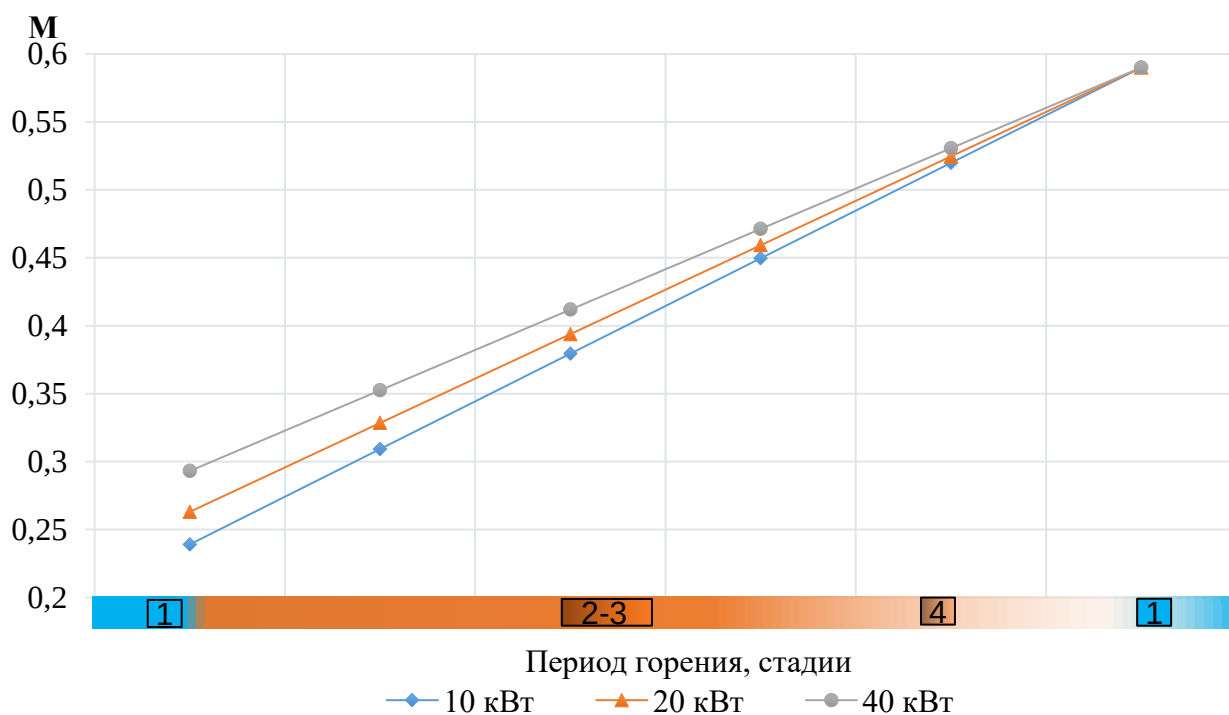


Рисунок 2.18 – Значение М в зависимости от степени прогорания топлива в топке для котлов верхнего горения, мощностью 10, 20 и 40 кВт

Суммарную энергию излучения в топке оценивают по степени черноты топки a_t , которая влияет на теплоту и теплообмен. Степень черноты для слоевых топок определяется по формуле:

$$a_{\tau} = \frac{a_{\phi} + (1 - a_{\phi}) \cdot \rho}{1 - (1 - a_{\phi}) \cdot (1 - \psi_{\text{ср}}) \cdot (1 - \rho)}, \quad (2.10)$$

где ρ – относительная площадь зеркала горения, $\psi_{\text{ср}}$ – средний коэффициент тепловой эффективности экранов, a_{ϕ} – эффективная степень черноты факела.

Как видно, для определения степени черноты топки необходимо определить эффективную степень черноты факела по формуле:

$$a_{\phi} = 1 - e^{-R \cdot P \cdot S_{\tau}} \quad (2.11)$$

где R – коэффициент ослабления лучей топочной средой, $1/(m \cdot \text{МПа})$, P – давление в топке, принимаемое для котлов, работающих без наддува, равным 0,1 МПа, S_{τ} – эффективная толщина излучаемого слоя, зависящая от отношения активного объема топки к площади стенок топки, м.

С учетом геометрических параметров, рассматриваемых котлоагрегатов с различной тепловой мощностью, разработан график зависимости эффективной степени черноты факела a_{ϕ} от степени прогорания топлива в топке, рисунок 2.19.

Анализ полученного графика показывает, что основной причиной, вызывающей увеличение безразмерного значения a_{ϕ} , является рост активного объема топочной камеры. При заданной лучевоспринимающей поверхности нагрева топки, когда выполняется условие $F_{\text{ст}} = \text{const}$, чем больше будет значение эффективной степени черноты факела и выше коэффициент M , чем ниже будет тепловыделение в топке. При работе котлоагрегата в толстом слое топлива и отсутствии транзитного воздуха, направляющегося через слой в топочное пространство, развиваются более высокие температуры горения и, тем самым, увеличивается тепловыделение. По мере прогорания и уменьшения слоя топлива в топке увеличивается количество избыточного воздуха, проходящего через слой.

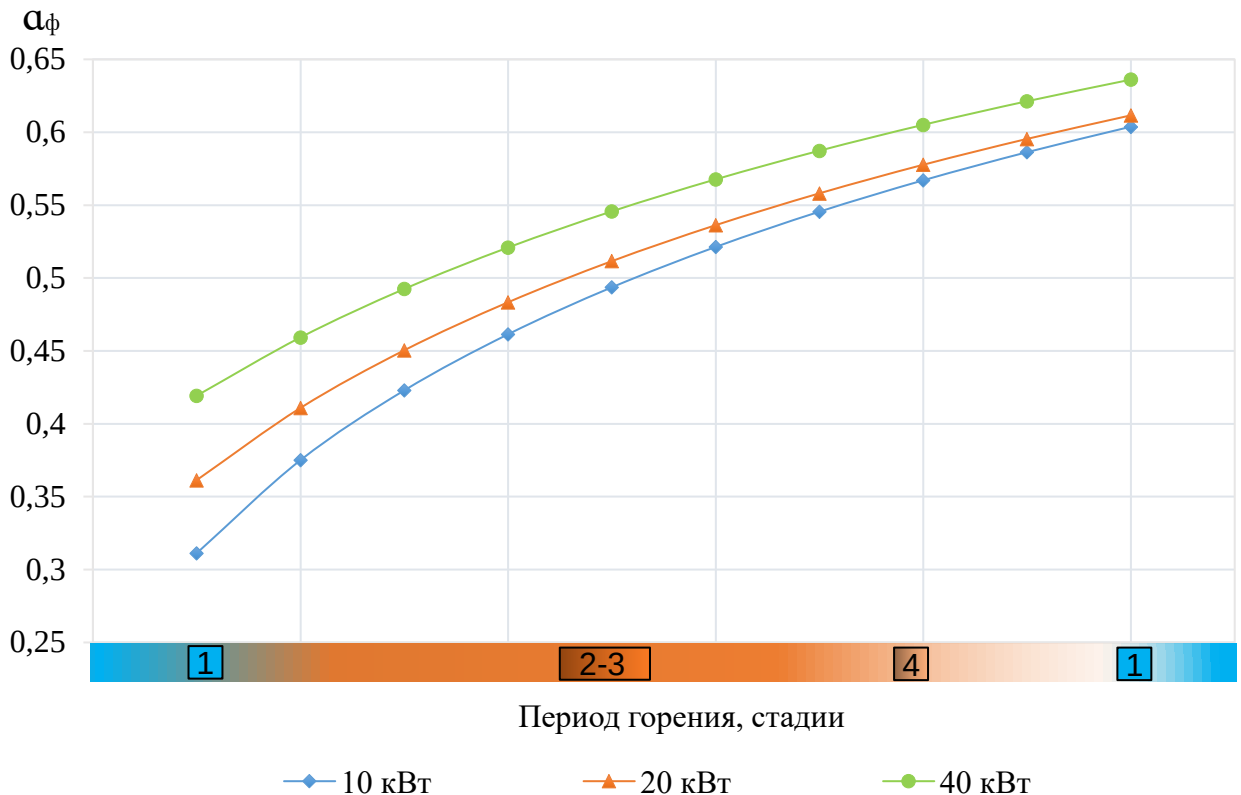


Рисунок 2.19 – Значения эффективной степени черноты факела в зависимости от периода горения топлива для котлов с верхним горением, мощностью 10, 20 и 40 кВт

В целях минимизации присутствия избыточного воздуха в топке, снижения потерь от неполного сгорания применяются своды или экраны, которые обратно отражая тепловые лучи на слой топлива, способствуют интенсификации процесса горения, выжиганию топливной мелочи и повышению температуры горения.

На основании сделанного предположения нами было предложен вариант усовершенствования топки котлоагрегата рассматриваемой конструкции.

2.3 Анализ работы дымоходной системы в условиях влияния низких температур в твердотопливных котлоагрегатах

Проведенное исследование работы твердотопливных теплогенераторов показывает, что одним из условий надежной и безаварийной эксплуатации в зимнее время является исключение или снижение количества

конденсатообразования на низкотемпературных поверхностях [127]. Температура уходящих газов зависит от множества факторов: от конструктивных особенностей топочной камеры, характеристик топлива, развития хвостовых поверхностей, особенностей отопительной системы и климатических условий эксплуатации.

В целях обеспечения надежной работы дымоходной системы произведен анализ движения дымовых газов по дымоходной трубе для защиты от процессов низкотемпературной коррозии. За основу анализа рассмотрена методика расчета теплообмена продуктов сгорания [128]. В произвольном сечении уравнение теплового баланса уходящих продуктов сгорания в дымоходе в пределах элемента dy можно сформулировать в виде:

$$dQ_{\Gamma} = dQ_H, \quad (2.12)$$

где dQ_{Γ} – изменение теплосодержания продуктов сгорания, Вт на участке dy , соответствующее изменению их температуры на dt , °C; dQ_H – изменение теплового потока, Вт, на участке dy , передаваемого через конструкцию дымоходной системы в окружающую среду.

$$dQ_{\Gamma} = -G_{\Gamma} \cdot c_{\Gamma} \cdot dt, \quad (2.13)$$

где G_{Γ} – расход продуктов сгорания, кг/с; c_{Γ} – теплоемкость продуктов сгорания, Дж/(кг·°C); «-» - означает понижение температуры продуктов сгорания по ходу их движения в трубе дымохода.

$$dQ_H = k_l \cdot \pi \cdot (t - t_H) \cdot dy, \quad (2.14)$$

где k_l – линейный коэффициент теплопередачи от продуктов сгорания через цилиндрическую стенку дымовой трубы, Вт/(м·K); t – температура уходящих газов на участке dy , °C; t_H – температура наружного воздуха, °C.

Согласно уравнению теплового баланса (2.10) получаем следующее:

$$-G_{\Gamma} \cdot c_{\Gamma} \cdot dt = k_l \cdot \pi \cdot (t - t_H) \cdot dy, \quad (2.15)$$

После интегрирования:

$$\int_{t_{\Gamma}^{\text{очн}}}^{t_{\Gamma}} \frac{dt}{t - t_H} = -\frac{k_l \pi}{G_{\Gamma} c_{\Gamma}} \int_0^y dy$$

уравнение принимает следующий вид:

$$\frac{k_l \cdot \pi}{G_{\Gamma} \cdot c_{\Gamma}} y = -\left[\ln|t_{\Gamma} - t_H| - \ln(t_{\Gamma}^{\text{очн}} - t_H) \right], \quad (2.16)$$

где $t_{\Gamma}^{\text{очн}}$ – температура продуктов сгорания в основании дымовой трубы, °C.

Температура продуктов сгорания на выбранном участке дымовой трубы будет иметь вид:

$$t_{\Gamma} = t_H + (t_{\Gamma}^{\text{очн}} - t_H) \cdot \exp\left(-\frac{k_l \pi y}{G_{\Gamma} c_{\Gamma}}\right). \quad (2.17)$$

С помощью представленного уравнения возможно рассчитать температуру продуктов сгорания в любом сечении дымоходной системы.

Основными принятыми дымоходными системами, применяемыми в твердотопливных котлах малой мощности (до 40 кВт), служат трубы металлические, представляющие собой конструкцию «труба в трубе», где имеется внутренний дымоотводящий одинарный ствол меньшего диаметра и внешний защитный кожух, с теплоизоляцией. По высоте дымовая труба выполняется составной из царг (секций) с внешним диаметром 300-500 мм., в верхней части предусматривается оголовок. Конструкция оголовка не должна затруднять выход дымовых газов при любых погодных условиях.

Теплоизоляционный слой защищает дымоход от быстрого остывания и способствует быстрому прогреву, предотвращая образование конденсата [129, 130]. Наиболее слабой зоной в дымоходной системе котлов с верхним горением является оголовок (устье), где будет наименьшая температура на поверхности (рисунок 2.20) [131]. Основными факторами, влияющими на уменьшение температур внутренней поверхности дымохода и уходящих газов, являются: 1) расчетная наружная температура воздуха в районе строительства в диапазоне -40...-50 °C; 2) особенности процесса горения в топках котлов

верхнего горения с большим коэффициентом избытка воздуха, снижающие температуру уходящих газов в завершающей стадии.



Рисунок 2.20 – Дымоходная система твердотопливного котла с верхним горением с неизолированным оголовком

При конструировании и эксплуатации дымовых труб для обеспечения надежности работы котлоагрегатов в северных климатических условиях, появляется необходимость рационального подбора толщины, высоты и материала тепловой изоляции в зависимости от района строительства котельной. Расчет проводится для номинальных нагрузок теплогенераторов, на каждом расчетном топливе и при номинальной температуре питательной воды [85, 132].

Схема теплообмена продуктов сгорания теплоизолированной секции дымовой трубы и элемента оголовка (устья) представлена на рисунке 2.21.

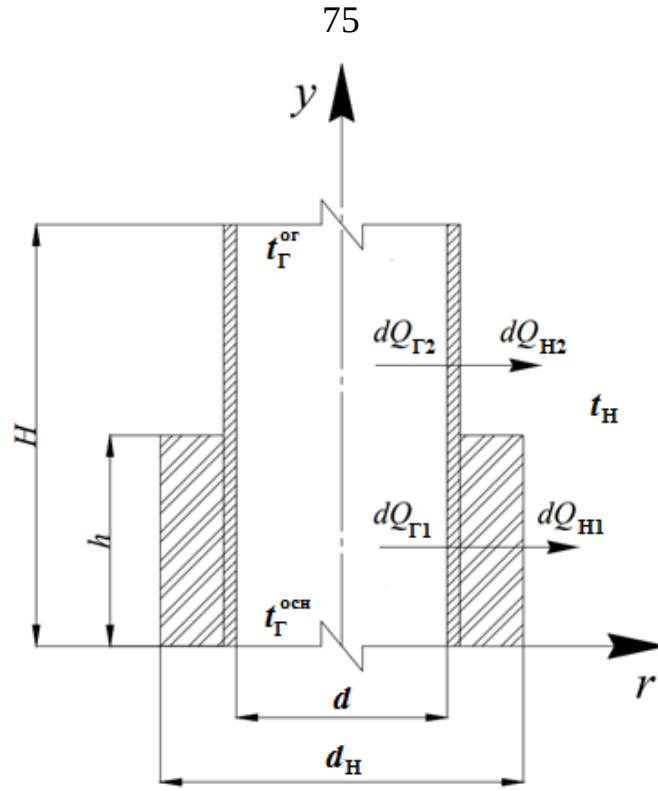


Рисунок 2.21 – Расчетная схема теплообмена уходящих газов в котлах с верхним горением

Проинтегрировав уравнение теплового баланса (2.15) по высоте от 0 до H при соответствующем перепаде температур от $t_{\Gamma}^{\text{осн}}$ до $t_{\Gamma}^{\text{ог}}$, получим следующие зависимости:

$$-\frac{\pi}{G_{\Gamma}c_{\Gamma}} \int_0^H k_l dy = \int_{t_{\Gamma}^{\text{осн}}}^{t_{\Gamma}^{\text{ог}}} \frac{dt}{t - t_{\text{Н}}},$$

$$\frac{\pi}{G_{\Gamma}c_{\Gamma}} \left(\int_0^h k_1 dy + \int_h^H k_2 dy \right) = -\ln |t - t_{\text{Н}}| \Big|_{t_{\Gamma}^{\text{осн}}}^{t_{\Gamma}^{\text{ог}}},$$

$$\frac{\pi}{G_{\Gamma}c_{\Gamma}} (k_1 h + k_2 H - k_2 h) = -\ln \left| \frac{t_{\Gamma}^{\text{ог}} - t_{\text{Н}}}{t_{\Gamma}^{\text{осн}} - t_{\text{Н}}} \right|.$$

Из последнего уравнения следует выражение для определения высоты тепловой изоляции дымовой трубы, с учетом вида материала изоляции в зависимости от расчетной температуры наружного воздуха:

$$h = \frac{1}{k_2 - k_1} \left(k_2 H + \frac{G_{\Gamma}c_{\Gamma}}{\pi} \ln \left| \frac{t_{\Gamma}^{\text{ог}} - t_{\text{Н}}}{t_{\Gamma}^{\text{осн}} - t_{\text{Н}}} \right| \right). \quad (2.18)$$

После ряда преобразований формула для определения температуры продуктов сгорания на участке оголовка (устья) дымовой трубы будет иметь вид:

$$t_{\Gamma}^{ог} = (t_{\Gamma}^{осн} - t_{\text{н}}) \exp \left(\pi \frac{h(k_2 - k_1) - k_2 H}{G_{\Gamma} c_{\Gamma}} \right) + t_{\text{н}}, \quad (2.19)$$

где G_{Γ} – расход продуктов сгорания, кг/с; c_{Γ} – теплоемкость продуктов сгорания, Дж/(кг·°C); k – линейный коэффициент теплопередачи от продуктов сгорания через цилиндрическую стенку дымовой трубы в наружный воздух, Вт/(м·K); $t_{\Gamma}^{осн}$ – температура продуктов сгорания в основании дымовой трубы, °C; $t_{\Gamma}^{ог}$ – температура на оголовке (устье) дымовой трубы, °C; H – высота дымовой трубы, м; h – теплоизолированной части дымовой трубы. Индекс «1» – указывает на теплоизолированный участок дымовой трубы; индекс «2» – указывает на не изолированный участок дымовой трубы.

На основе полученных зависимостей и на основе расчетов, представленных в [79, 87, 98, 133, 134, 135], разработана номограмма подбора рациональной высоты теплоизолированного участка дымоходной системы в зависимости от тепловой мощности котлоагрегата, температуры наружного воздуха, представленная на рисунке 2.22.

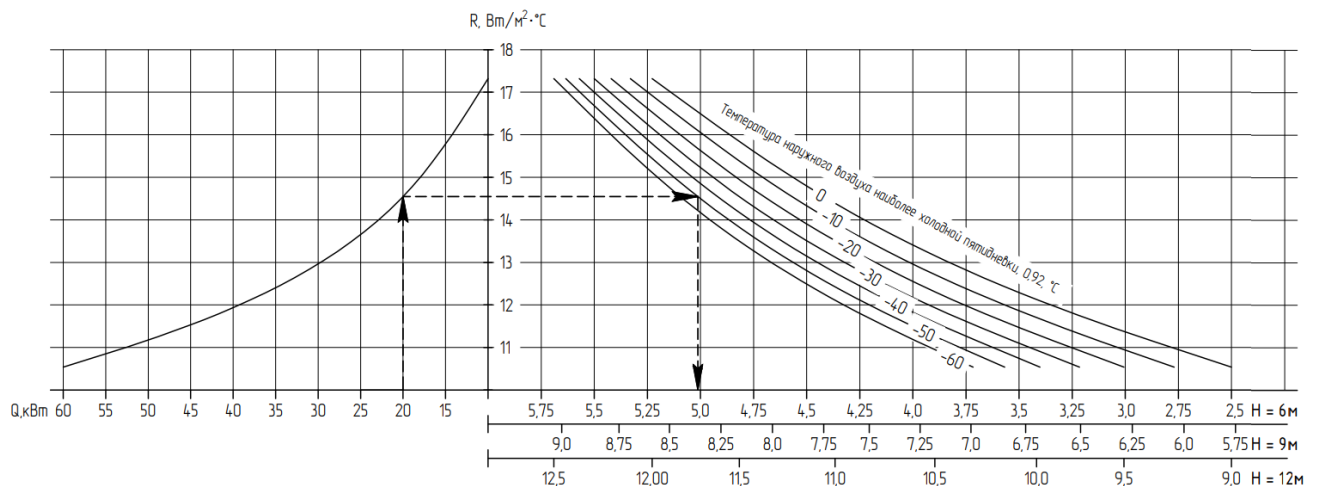


Рисунок 2.22 – Номограмма подбора рациональной высоты теплоизолированного участка дымохода с металлическим стволом при естественной тяге $v=6\text{ м/с}$, $t_{\Gamma}^{осн}=150\text{ °C}$ (минераловатный утеплитель марки 40, $\delta=100\text{ мм}$, $\lambda=0,041\text{ Вт/м}^2\cdot\text{°C}$)

Приведенная номограмма позволяет подобрать высоту теплоизоляции металлического ствола дымохода в зависимости от мощности котлоагрегата и параметров наружного воздуха в районе строительства. При увеличении тепловой мощности теплогенератора высота теплоизолированного участка дымохода снижается, за счет большего расхода дымовых газов. Понижение температуры наружного воздуха повышает соотношение теплоизолированных участков с на 5% до 20% в зависимости от мощности котла. В результате использования эффективных материалов с высокими теплозащитными характеристиками поддерживается безопасный температурный режим в полости дымохода, снижается вероятность образования кислотного конденсата.

В целях верификации полученных теоретических зависимостей выполнено сравнение экспериментальных данных температуры продуктов сгорания на оголовке дымоходной системы с результатами аналитического выражения и с результатами, полученными с помощью численного метода вычислительной гидрогазодинамики (CFD) в программном комплексе Solidworks Flow Simulation, представленная на рисунке 2.23.

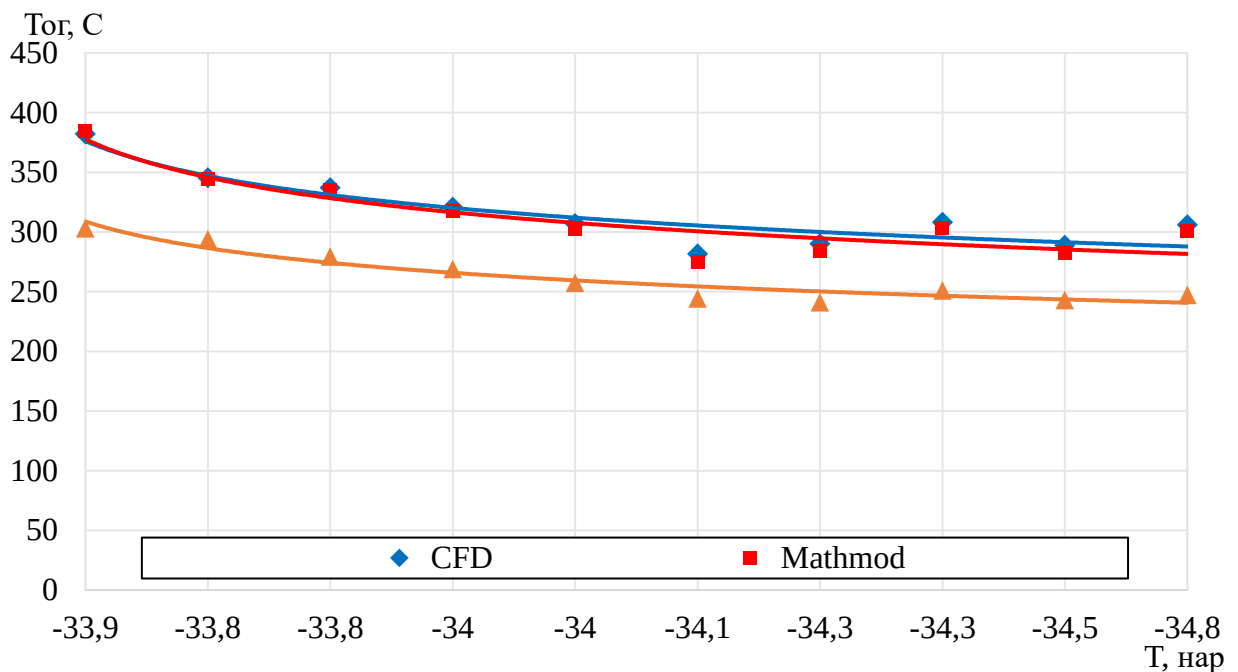


Рисунок 2.23 – Сравнение экспериментальных данных с результатами аналитического выражения и с методом компьютерной гидрогазодинамики (CFD)

Из сравнения на рисунке 2.23 видно, что связь между экспериментальными данными с численными результатами высока, во всех методах наблюдается, в зависимости от температуры наружного воздуха, по мере его понижения, снижается температура на оголовке дымовой трубы, при этом разница экспериментальных значений с методом CFD и с аналитическим выражением формулы 2.17 составляют 15% и 14% соответственно. Полученная большая разница в результатах натурных измерений объясняются зависимостью натурных значений от влияния множественных факторов: силы ветра, размеров и влажности угольного топлива, загрязнения газоходов и тепловых потерь в конвективных поверхностях.

Сравнительный анализ полученных результатов производился при помощи различных критериев, которые представлены в таблице 2.5. Полученные расчеты в сравнении с экспериментом хорошо коррелируются, теснота связи данных оценивается по r критерию Пирсона, является высокой (от 0,9 до 1). Всего выбрано 10 точек, высокие значения r получены при использовании обоих методов.

Таблица 2.5 – Сравнение различных критериев

Метод расчета	Количество точек сравнения	Коэффициент корреляции Пирсона, r	Критерий Стьюдента t	Критерий Фишера F
Mathmod	10	0,964	3,9	2,001
CFD	10	0,964	4,4	2,010

По критерию достоверности Стьюдента t , который оценивает средние значения сравниваемых величин, также можно заключить о достоверности результатов обоих методов, где значение t находится в зоне значимости, однако по критерию адекватности Фишера F , расчеты с помощью математической модели имеют меньший разброс.

2.4 Выводы

1. Рассмотрены особенности эксплуатации систем тепловой генерации в населенных пунктах Республики Саха (Якутия), для которых характерна большая годовая амплитуда температур, которая составляет от 50-127°C. Установлено, что в периоды повышения температуры наружного воздуха уменьшается тепловая нагрузка и соответственно возникают ситуации неправильного регулирования отпуска тепловой энергии, приводящие к нерациональному использованию топлива и перетапливанию помещений.

2. Изучены аспекты работы твердотопливных котлов в условиях Севера. Проанализированы наиболее частые сбои в работе и случаи аварийных остановок котлов в Республике Саха (Якутия). В зимний и переходный период 70% случаев образование и обмерзание конденсата, 30% - это случаи сажеобразования. Данные отложения ухудшают лучистый и конвективный теплообмен, прогрессирующая коррозия поверхностей приводят к аварийной остановке котлоагрегата.

3. Проведены натурные измерения режимов работы теплогенераторов с верхним горением котла марки «Липснеле Арктик». Установлено, что при постепенном уменьшении слоя топлива и переходе работы топки котла в процесс затухания с повышенными коэффициентами избытка воздуха снижается надежность теплоснабжения и увеличивается риск аварийной остановки. Описанные явления приводят к усилению образования кислотного конденсата на низкотемпературных поверхностях дымоходной трубы и его последующему попаданию в топочное пространство, что в дальнейшем снижает надежность работы котлоагрегата.

4. Изучены теоретические аспекты процесса горения в слоевых топках малой мощности. Составлен тепловой баланс твердотопливного котельного агрегата, с учетом потерь с продуктами сгорания и потерь тепла от неполноты сжигания, которые связаны со способами сжигания топлива, конструктивными характеристиками топочных камер и др. На основании

технических данных универсальных твердотопливных котлов марки Liepsnele Arctic рассчитан средний коэффициент M при условии неизменности расхода по высоте топки. Получены зависимости относительной высоты положения максимума температуры продуктов сгорания в топке при различном уровне расположения топлива в период горения и зависимости эффективной степени черноты факела от степени прогорания топлива в топке. Предложен вариант усовершенствования топки котлоагрегата рассматриваемой конструкции.

5. Выполнен анализ работы дымоходной системы в условиях влияния низких температур в твердотопливных котлоагрегатах и на основе уравнения теплового баланса разработано аналитическое выражение, позволяющая подобрать высоту теплоизоляции металлического ствола дымохода в зависимости от мощности котлоагрегата и параметров наружного воздуха в районе строительства. При условии применения эффективных изоляционных материалов будет поддерживаться безопасный температурный режим в полости дымохода, со снижением вероятности образования кислотного конденсата.

3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В МОДИФИЦИРОВАННОЙ ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ

3.1 Устройство для интенсификации процессов горения в топках твердотопливных котлоагрегатов

В твердотопливных котлах малой мощности с верхним способом горения не предусматриваются мероприятия по развитию лучеотражающих поверхностей. Во время работы топочной камеры котлоагрегата при снижении толщины слоя топлива и увеличении активного объема топочной камеры возникают процессы, увеличивающие количество избыточного воздуха. Избыточный воздух, увеличивая объем топочных газов, частично нагревается и снижает тепловую эффективность котла, тем самым снижая температуру продуктов сгорания и увеличивая расход топлива. Одновременно, на данной стадии горения повышается вероятность конденсатообразования на низкотемпературных поверхностях дымоходной системы и ускоряется образование сажи на поверхности топочной камеры. В результате, при эксплуатации данных типов котлов возрастает риск аварийных остановок, сокращается срок службы котлоагрегата и снижается надежность теплоснабжения зданий в зимнее время.

В целях повышения эффективности работы топочной камеры и увеличения надежности эксплуатации котлоагрегата, приведенного на рисунке 3.1, предложено усовершенствование конструкции твердотопливного котла «Liesnele Arctic» путем экранирования топки с ограничением объема топочного пространства (рисунок 3.1), на которые получен патент РФ № 218229, опубл. 17.05.2023 [136]. Работа отопительного аппарата (рисунок 3.1) осуществляется следующим образом.

До загрузки топлива в топочную камеру 1 с телескопической трубы 6 снимают распределитель воздуха 5, после чего, на определенной высоте посредством шпинта, вставляемого в установочное отверстие экрана, на трубе 6 фиксируют экран-ограничитель 21 объема топки.

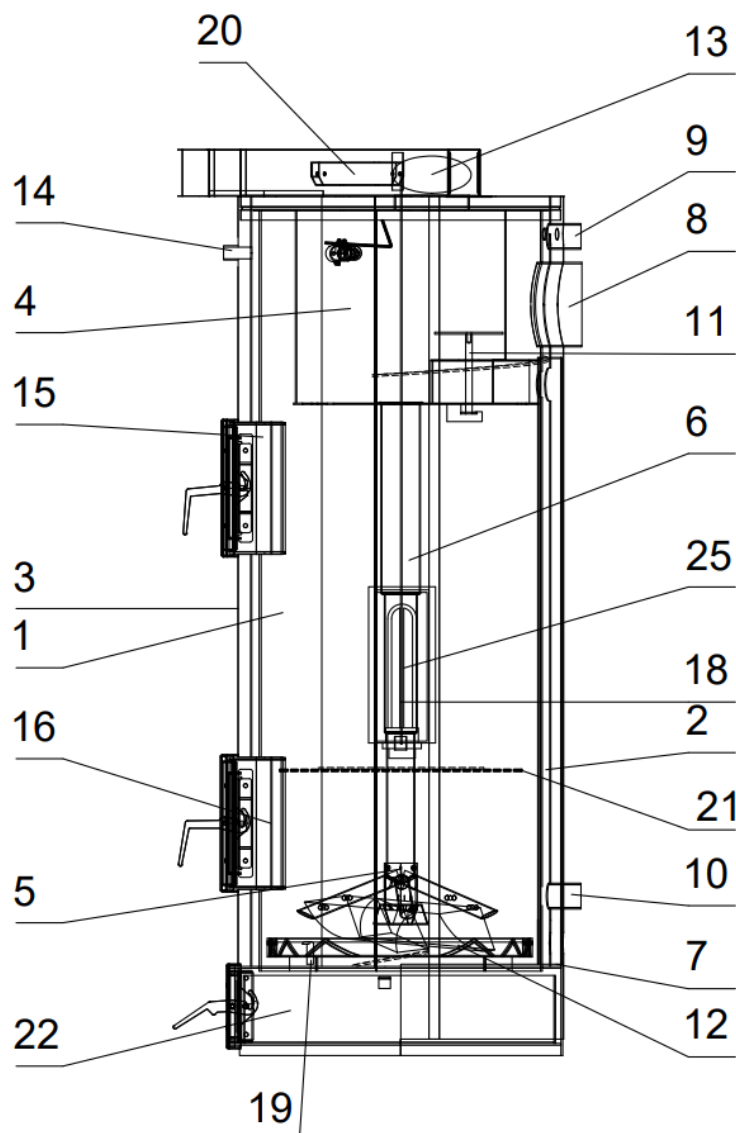


Рисунок 3.1 – Общий боковой вид отопительного аппарата с разрезом по вертикальной оси

Далее на трубу 6 вновь устанавливают распределитель воздуха 5. В топочную камеру 1 через дверцу 15 и 16 наполняют топочную камеру топливом и производят розжиг. Кольцо троса 18 снимают с крючка 19, отпуская вверх, трубы с царгами и распределителем воздуха 6 опускается на поверхность слоя топлива под собственным весом. Дверцы 15 и 16 плотно закрываются и открывается заслонка 13 для подачи воздуха в камеру нагрева 4, откуда воздух распределяется на 2 потока - верхний и нижний, в примерных пропорциях: 65-70% через распределитель 5 и 30-35% через трубу 7. Нагретый в камере 4 воздух стремится вниз по телескопической трубе 6 к распределителю 5, обеспечивая верхний слой топлива кислородом для

горения. Распределитель 5 на телескопической трубе с царгами 6 по мере прогорания топлива и образования кокса и шлака, плавно отпускается вниз, обеспечивая горение в верхней части слоя. Нижний поток воздуха, проходя по каналу 7 в полости топочной камеры 1, подается снизу неподвижного стального колосника 12, устремляется в верхнюю часть слоя, по пути высушивая топливо.

Устройство, приведенное на рисунке 3.2, предназначено для повышения температуры горения в зоне максимального тепловыделения за счет отражения тепловых лучей на слой топлива, что будет способствовать лучшему выжиганию мелочи и снижения влияния избыточного воздуха присутствующего в топочной камере.

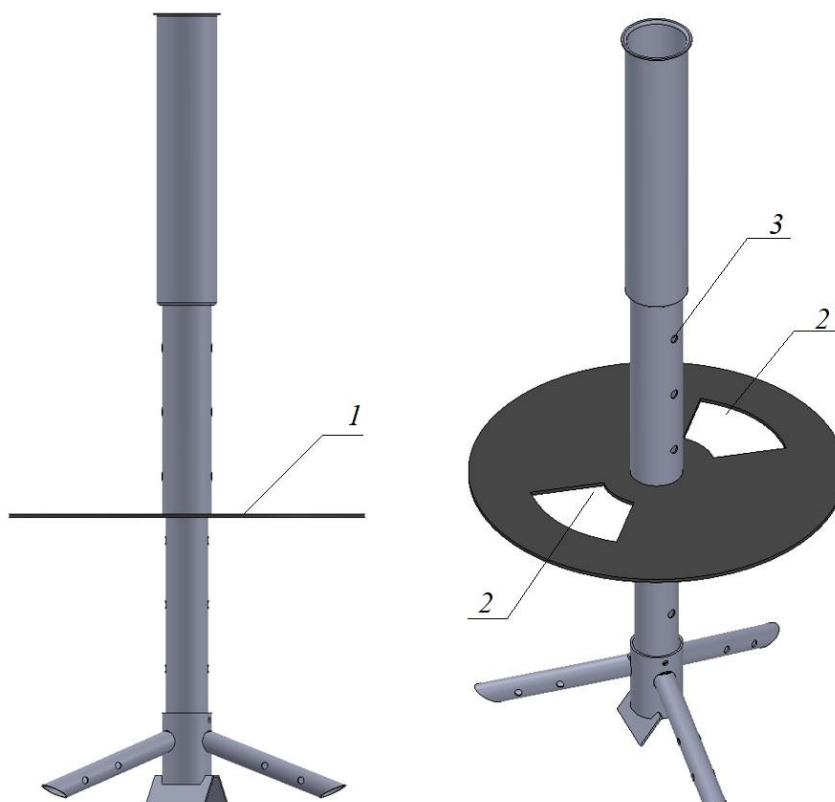


Рисунок 3.2 – Общий вид распределителя воздуха с экраном-ограничителем активного объема топки, где: 1 – экран-ограничитель; 2 – шиберные заслонки; 2 – установочные отверстия экрана.

Экран-ограничитель объема активной топки устанавливается на телескопическую трубу и снабжен двумя шиберными заслонками для увеличения доступа воздуха в начальной стадии розжига топлива, далее по

мере образования кокса они вручную закрываются. Площадь заслонок в открытом состоянии может составить до 25 % от общей площади экрана. Диаметр установочного отверстия диска экрана соответствует наружному диаметру средней секции телескопической трубы. Для установки устройство экрана подводят к телескопическому трубопроводу со снятым распределителем, надевают и свободно фиксируют снизу диска специальным шплинтом, который вставляется в установочное отверстие 3, выбранное на секции трубы. При этом, диск экрана-ограничителя имеет возможность свободного поворота вокруг своей оси, что необходимо для обеспечения доступа оператора котлоагрегата к заслонкам. Экран-ограничитель путем уменьшения поперечного сечения и высоты топочной камеры снижает скорость прохождения продуктов сгорания топлива в дымоход, тем самым, способствуя большей теплоотдаче тепловой энергии подогревательному контуру от нагретых продуктов сгорания. Предложенное устройство используется для поддержания горения при увеличении активного объема топочной камеры в процессе прогорания и уменьшения толщины слоя топлива.

Отопительный аппарат характеризуется тем, что внутренние геометрические параметры топочной камеры можно изменять, меняя высоту фиксации экрана-ограничителя активного объема топки на телескопической трубе, в зависимости от вида, состава и увлажненности твердого топлива для более эффективного горения.

Данный способ использования отражателей используется в промышленных слоевых топках горизонтально-водотрубных котлов, где, если температура на выходе из топочной камеры получается низкой, таким образом повышают температуры в зоне горения. Рассматриваемый способ также нашел применение в подвижных цепных колосниковых решетках, где производится верхнее воспламенение топлива.

Предлагаемый экран-ограничитель активного объема топки служит для интенсификации процесса горения твердого топлива с целью повышения

эффективности горения, а также для повышения надежности и безаварийности работы котлоагрегата на пиковых режимах теплообеспечения при низких температурах. При повышении температуры горения в топочной камере снижается процесс загрязнения внутренней поверхности топки и газоходов золовыми отложениями и увеличивается их тепловосприятие. Процесс повышения температуры горения сопровождается увеличением температуры уходящих газов, что в свою очередь препятствует процессам конденсатообразования на низкотемпературных поверхностях и оголовниках дымоходной системы.

Таким образом, устройство с экраном-ограничителем активного объема топки позволяет поддерживать высокую температуру горения в топке, повысить эффективность горения и обеспечить надежную и безаварийную работу твердотопливного котла малой мощности.

3.2 Компьютерное моделирование движения потоков в топочной камере

CFD-моделирование (Computational Fluid Dynamics) — вычислительная гидрогазодинамика, программный комплекс, включающий совокупность физических, математических и численных методов, предназначенных для вычисления характеристик потоковых процессов жидкостей и газов. Данное моделирование представляет современное направление систем автоматизации инженерных расчётов (CAE). CFD-моделирование возможно выполнить в широком круге программных комплексов, таких как ANSYS Fluent, ANSYS CFX, Autodesk Simulation CFD, Comsol Multiphysics, SolidWorks Flow Simulation (FloEFD) и других. Преимуществом CFD-моделирования является возможность визуализировать цветовым полем градиента любые параметры потоков жидкостей и газов в исследуемом объекте: их распределение, скорость, температуру, давление.

С использованием данного программного комплекса возможно до начала работ по технологическому проектированию или прототипированию

оценить работоспособность и эффективность предлагаемых технических решений и нововведений с учетом влияния внешних факторов, проверить теоретические и экспериментальные расчеты, рассмотреть и рассчитать различные подходы, концепции.

Вычислительный анализ был выполнен с использованием программного комплекса Solidworks Flow Simulation (FloEFD). С помощью данной программы изучаются течения сред и процессы теплопередачи в инженерных системах. Большое количество постпроцессорных элементов в системе FloEFD позволяют исследовать подробным образом характер распределения разных параметров внутри конструкции. Таким образом, позволяя визуализировать течение исследуемых процессов в аппаратах в зависимости от задаваемых условий. Анализ позволяет инженерам-конструкторам и проектировщикам находить оптимальные конструктивные решения [137].

Для проведения численных расчетов использовалось программное обеспечение версии 2017 года, в котором применяется метод конечных объемов (FVM). Это программное обеспечение позволяет определять температуры и потоки, которые изучаются впоследствии: движение воздуха и потоков газовых сред внутри аппаратов; сопротивление потоку, зависящее от шероховатости поверхностей стенок; устойчивость нестационарных потоков жидкости; анализ конвекции для гравитационного потока; анализ ламинарного и турбулентного течения; эффекты теплопередачи [138]. Применяемый инструмент поддерживает ламинарные, переходные и турбулентные потоки [139].

3.3 Исходные данные

Численное моделирование производилось на основе существующего котла Liepsnele Arctic 40U. Для проведения численных расчетов разработана цилиндрическая модель топочной камеры твердотопливного котлоагрегата со следующими характеристиками: диаметр камеры $D = 300$ мм, высота камеры

от пода котла $H = 1520$ мм, диаметр дымохода $d = 180$ мм, имеется подогревательный контур, состоящий из стальных листов. Граничные условия для составления модели были заданы на основе результатов, полученных в ходе натурного исследования.

Расчет моделей производился при одинаковых граничных условиях, представленных на рисунке 3.3, которые приняты согласно определенным значениям в разделе 2.1:

- давление окружающей среды в дымоходном отверстии $P_{\text{атм}} = 101325$ Па;
- скорость воздушного потока на входе через отверстие в колосниковой решетке $v = 0,5$ м/с;
- источник тепловой энергии для имитации слоя топлива внутри топочной камеры, Вт.

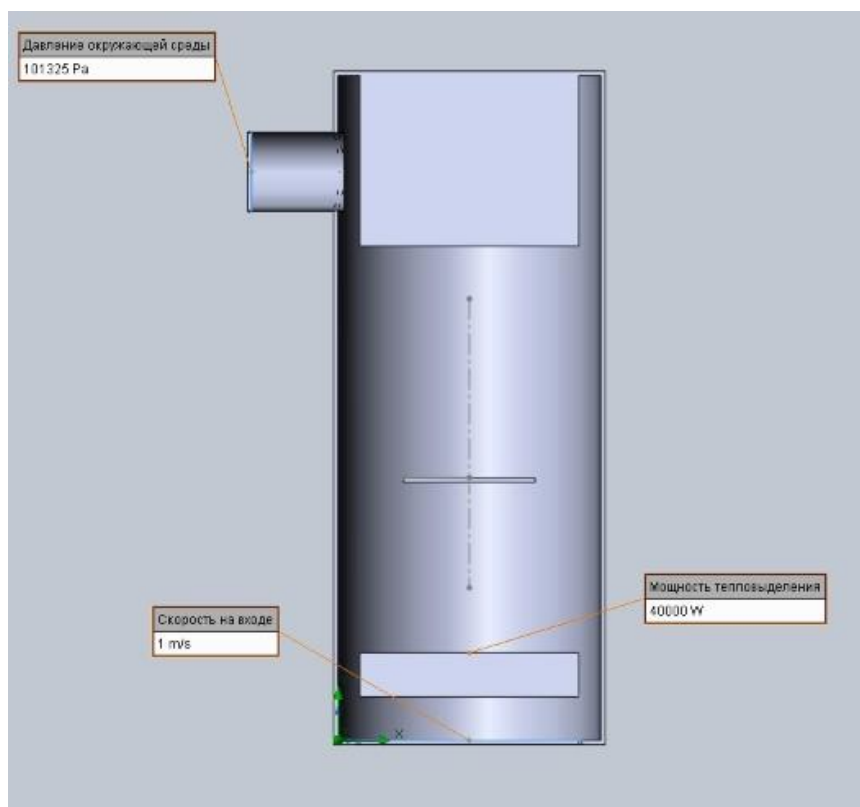


Рисунок 3.3 – Общий вид модели топочной камеры котлоагрегата с нанесенными граничными условиями

Схема общих настроек заданной модели топочной камеры с теплопроводностью в твердых телах представлена на рисунке 3.4.

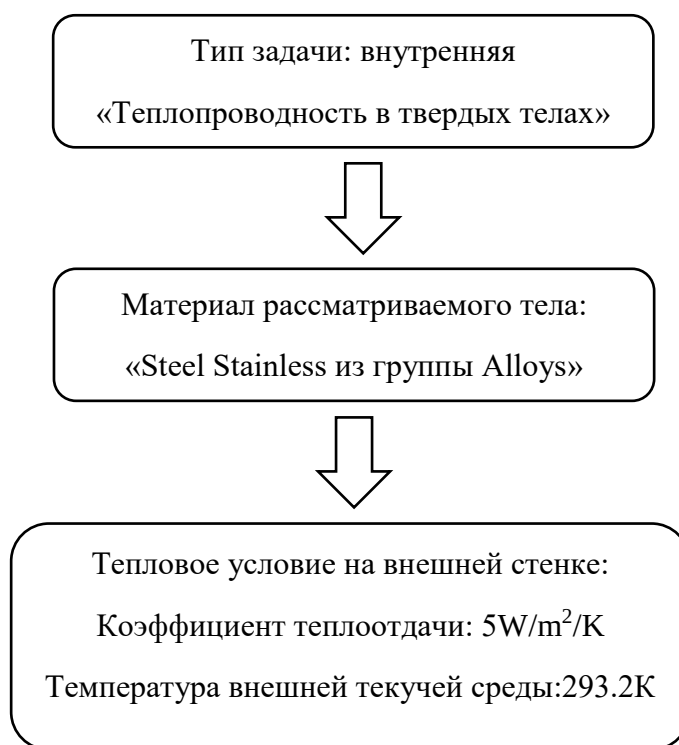


Рисунок 3.4 – Схема общих настроек численного исследования

В модели в качестве текучей среды используется воздух. Внутренняя и внешние стенки котла выполнены из нержавеющей стали, поэтому выбран материал «Steel Stainless» из группы Alloys. Для того, чтобы задать условия теплопередачи от текучей среды к стенкам топочной камеры, в качестве условия заданы характерная температура текучей среды и коэффициент теплоотдачи.

Проверка на сеточную сходимость для обеспечения точности численной модели, показанной на рисунке 3.5, заключается в поэтапном измельчении расчетной сетки сначала во всей области, затем уменьшающимися регионами к области наибольшего изменения исследуемых характеристик.

При построении расчетной сетки требуется большее ее разрешение в пограничном слое, поскольку основное изменение давления и скорости, происходят в пристеночной области и от правильности ее моделирования зависит правильность расчетов сопротивления

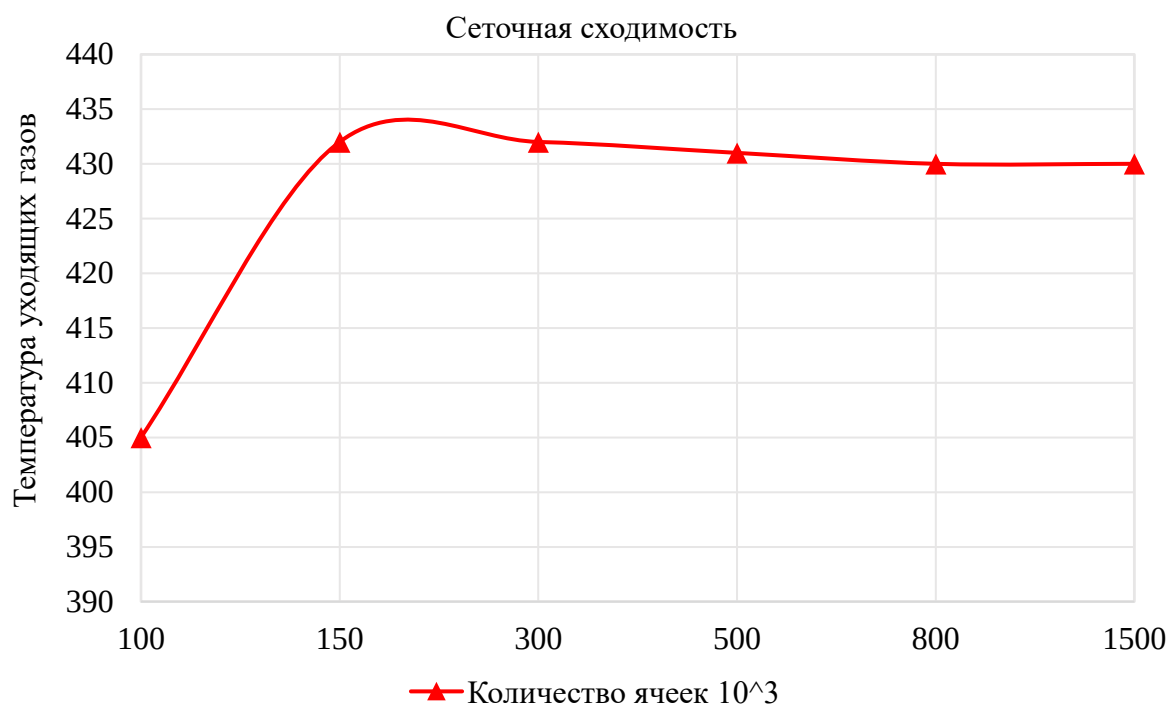


Рисунок 3.5 – График сеточной сходимости

Сетка прямоугольной формы, адаптивная, состоит из базовых ячеек, некоторые из них могут быть раздроблены на части. Базовые ячейки задаются тремя наборами плоскостей, соответствующим трем осям декартовой системы координат. В общем случае расстояние между плоскостями в этих наборах может быть различным. При дроблении ячейка разбивается на 8 равных ячеек путем деления пополам по осям X, Y и Z. Каждая из этих ячеек также может быть подроблена аналогичным образом и т. д. [140]. Поскольку грани расчетных ячеек не аппроксимируют соприкасающиеся с текучей средой поверхности твердых тел, то для разрешения расчетной сеткой относительно небольших геометрических особенностей этих поверхностей (участков повышенной криволинейности, выступов, впадин, отверстий, поверхностей тонких тел, окруженных текучей средой, и т. п.) используются процедуры соответствующего локального дробления ячеек сетки около этих участков поверхностей до начала расчета. Так, каждая ячейка базовой сетки, пересеченная поверхностью твердого тела на границе с текучей средой, делится на 8 одинаковых, геометрически ей подобных ячеек меньшего размера.

Для разрешения областей с большими градиентами физических параметров текучей среды или температуры твердого тела используются процедуры дробления ячеек сетки как до начала расчета, так и во время расчета. Настройки глобальной сетки применяются ко всей расчетной области. Глобальная сетка по умолчанию определяется настройками, заданными в автоматическом режиме, для данного исследования уровень дробления задается параметром «Уровень начальной сетки», этим параметром определяется число ячеек и процедура разрешения узких каналов модели по умолчанию, чем выше уровень, тем более мелкими будут ячейки [141].

Из рисунка 3.5 видно, что максимальная температура уходящих газов $t_{\max}$ изменяется со следующей итерацией на 30 °С при количестве ячеек 150,0 тыс. ед. Таким образом, результаты зависят от количества ячеек в расчетной сетке, и разница составляет в пределах погрешности 6,5%. Поскольку в рассматриваемой модели имеются узкие пространства, например, расстояние между источником тепла и стенкой топочной камеры, при дальнейшем дроблении и увеличении количества ячеек до 1500,0 тыс. ед., принятая расчетная сетка имеет расхождения с прошлой итерацией 0,3%, что свидетельствует о достоверности принятой расчетной сетки.

3.4 Сводные результаты численного моделирования и экспериментальных данных слоевой топочной камеры при позонном горении

В целях сопоставления и проверки расчетных теоретических и смоделированных вычислительных данных с натурными экспериментальными данными выполнен сводный анализ, представленный в виде графика на рисунке 3.6.

Измерения экспериментальных параметров производились на испытательном стенде, представленном на рисунке 2.7, данные фиксировались специализированными измерительными устройствами.

Подача воздуха осуществлялась через вентиляторное дутье с постоянным режимом, скоростью и расходом. Контроль работы вентилятора осуществлялся контроллером, в зависимости от теплопотребления отопительной системы. Испытания производились в естественных условиях при температуре наружного воздуха в диапазоне -30 до -40 °С, растопка производилась на буром угле Кангаласского месторождения.

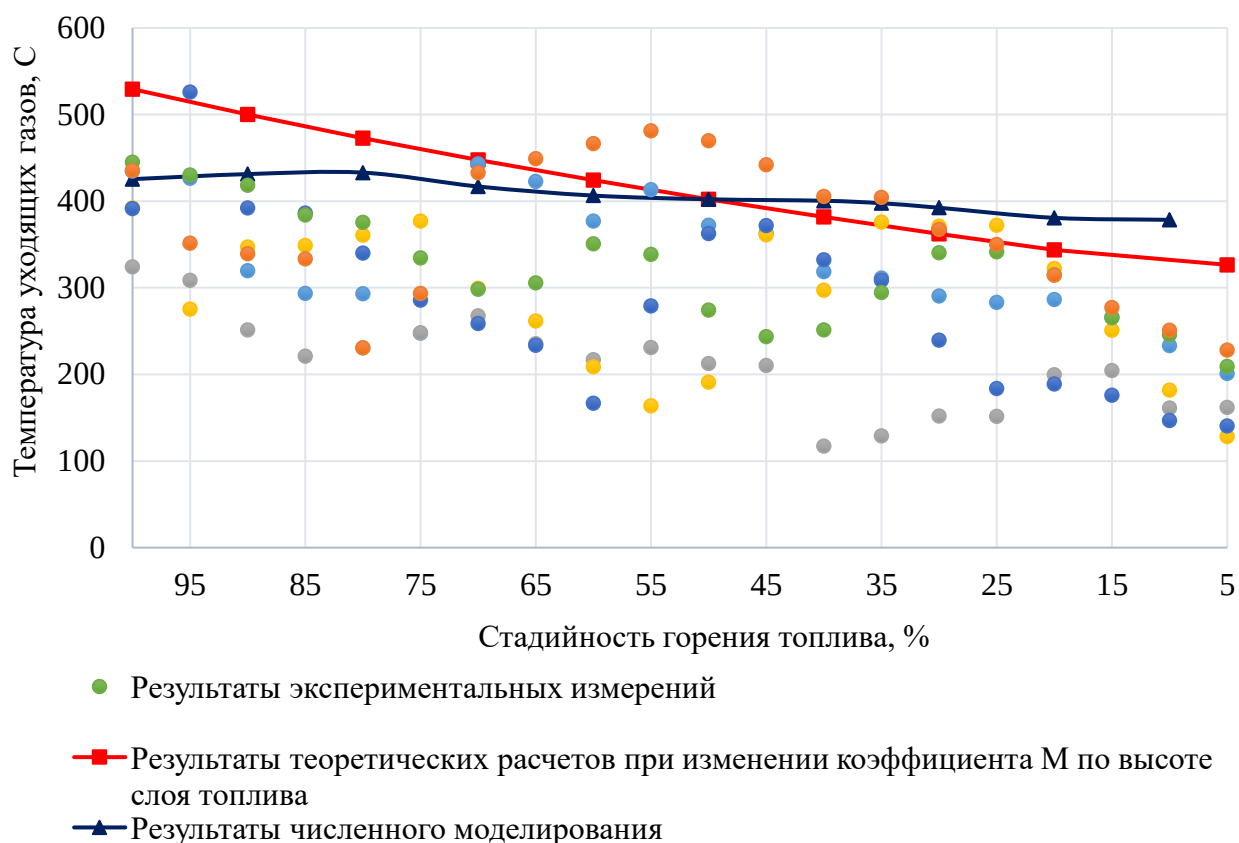


Рисунок 3.6 – Сводные результаты значений температуры уходящих газов, полученные с использованием различных методов

Результаты анализа показывают, что с уменьшением толщины слоя топлива на завершающей стадии горения, температура дымовых газов во всех рассмотренных случаях снижается, что может быть объяснено уменьшением толщины слоя и влиянием активного объема топки. Наиболее резкое снижение показателей наблюдается при натурных измерениях, что может быть обусловлено особенностями укладки и характеристиками топлива в слое.

Также относительно более низкие результаты экспериментальных данных обусловлены тем, что из-за конструктивных особенностей топки отбор

параметров уходящих газов производился на выходе из котлоагрегата в его дымоходной системе, где не учитывалось влияние конвективных поверхностей нагрева, снижающих его температуру.

В обработке результатов анализа натуральных данных приняты наиболее максимальные температуры дымовых газов, возникшие в определенный временный период по условным стадиям горения слоя топлива при единовременной растопке котла.

В основе расчета теоретической температуры уходящих газов на выходе из топки используется формула 1.3. Используя исходные данные по характеристикам используемого топлива, расчетных значений объемов и энтальпий продуктов сгорания, теплового баланса и существующих справочных данных по характеристикам приближенных слоевых топочных устройств с ручным забросом топлива, получаем теоретические значения температуры газов на выходе из топки при заданной постоянной лучевоспринимающей поверхности и с учетом изменения относительной высоты положения максимума температуры топочных газов коэффициента M .

При проведении теоретических расчетов расчетный расход топлива V_p условно принят постоянным, определение расхода выполнено на основании фактической тепловой мощности котлоагрегата $N_k=22,3$ кВт, вычисленного значения КПД $\eta_k=49,7\%$ и располагаемой теплоты используемого топлива. Расчет коэффициента, учитывающего снижение эффективности экранов за счет их загрязнения $\Psi_{ср}$, принят с учетом используемого топлива по рекомендациям [85, 142].

Полученные данные с указанием основных факторных значений сведены в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты теоретического расчета температуры дымовых газов на выходе из топки при изменении коэффициента М

Наименование	Стадийность горения по слою топлива, %									
	100	90	80	70	60	50	40	30	20	5
$T_{расч}, ^\circ C$	529,3	499,9	472,9	447,7	424,3	402,3	381,6	362,2	343,8	326,5
a_t	0,62	0,65	0,68	0,70	0,72	0,73	0,75	0,76	0,77	0,78
a_{ϕ}	0,42	0,46	0,49	0,52	0,55	0,57	0,59	0,61	0,62	0,64
$S_t, м^2$	0,13	0,17	0,21	0,25	0,29	0,33	0,37	0,40	0,44	0,48
$V_{акт}, м^3$	0,10	0,13	0,16	0,18	0,21	0,24	0,27	0,30	0,32	0,35
$E_{ст}, м^2$	2,65									
h_t	1,30									
$T_{теор}, К$	673									
$T_{adiaб}, К$	1098									
$B_p, кг/с$	0,003									
$\Psi_{ср}$	0,6									
М	0,29	0,32	0,36	0,39	0,42	0,45	0,48	0,51	0,54	0,57

В ходе анализа полученных результатов численного моделирования рассматриваемой топочной камеры, представленной на рисунках 3.7-3.9, выявлено, что с увеличением расстояния от плоскости максимальных температур до плоскости дымохода котлоагрегата, по мере прогорания слоя топлива вниз, поток дымовых газов по стенкам подогревательного контура распределяется неравномерно, в большем объеме концентрируясь в середине и в верхней части топки.

На рисунках 3.8 и 3.9 наблюдается увеличение скорости дымовых газов с низкой теплоотдачей на стенки подогревательного контура, вследствие неполного контакта и омывания.

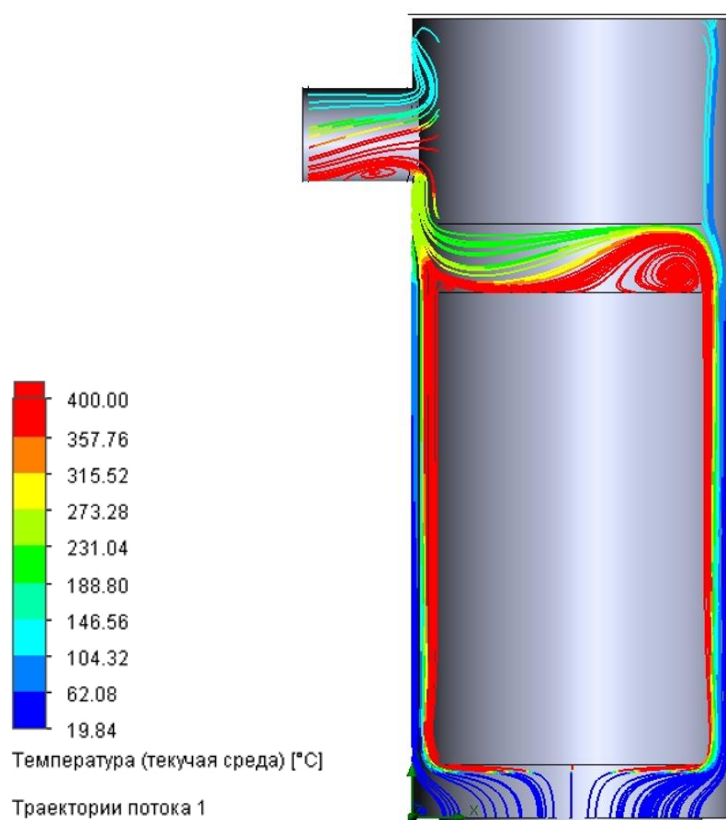


Рисунок 3.7 – Распределение потоков дымовых газов в начальной стадии горения

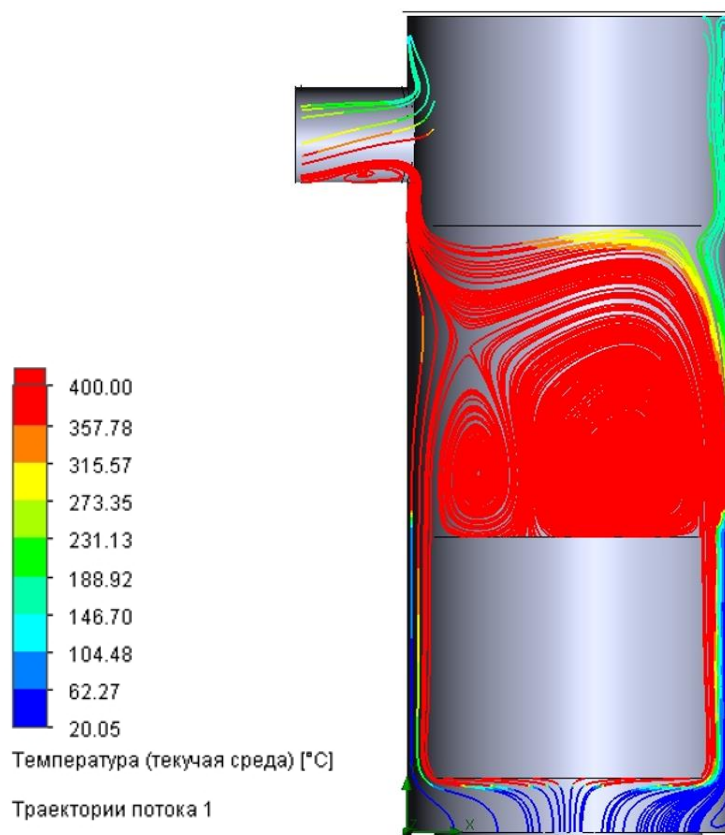


Рисунок 3.8 – Распределение потоков дымовых газов в середине горения

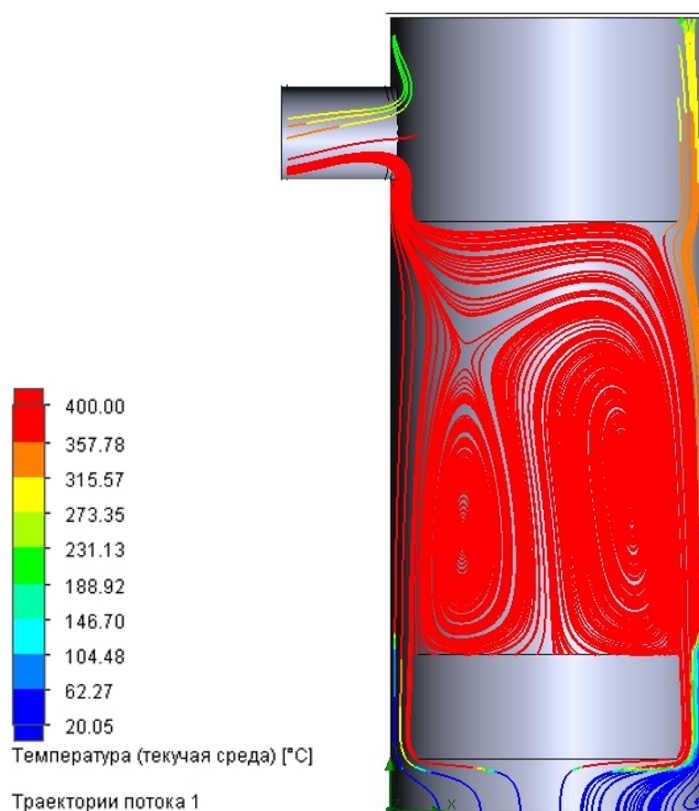


Рисунок 3.9 – Распределение потоков дымовых газов в завершающей стадии горения

3.5 Результаты численного моделирования модифицированной конструкции топочной камеры при позонном горении

Численное моделирование усовершенствованной конструкции топочной камеры с позонным горением выполнено с учетом следующих факторов:

- поверхность зеркала горения топочной камеры принята прямо пропорционально площади вертикального слоя топлива и колосниковой решетки;
- топочная камера со слоем топлива ограничена с боковой плоскости гладкими стенками цилиндрической топки;
- топочная камера ограничена в нижней плоскости по поверхности неподвижной колосниковой решетки и в верхней плоскости по установленной вертикальной поверхности экрана-ограничителя объема топки.

Определение наиболее рациональной конструкции проводилось на основании выбранных типоразмеров экрана-ограничителя топочной камеры в зависимости от сечения зеркала горения котлоагрегата.

Расчетные характеристики величины экранирования и принятых высот представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Расчетные данные

№	Степень экранирования ограничителя в зависимости от радиуса зеркала горения R	Диаметр экрана, м	Высота установки экрана (расстояние от плоскости максимальных температур до плоскости экрана), м
1	$\frac{5}{6}R$	0,5	$h_2 = 0,5; 0,4; 0,3; 0,2$
2	$\frac{2}{3}R$	0,4	
3	$\frac{1}{2}R$	0,3	

В рассматриваемой модели зоны горения (максимальных температур в топке) разделены по высоте слоя топлива, имитирующими его уменьшение по мере прогорания и представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Характеристика технических параметров топочной камеры и предлагаемого экрана-ограничителя

При $h_2=0,5$ м		При $h_2=0,4$ м		При $h_2=0,3$ м		При $h_2=0,2$ м	
Высота слоя топлива h_1 , м	Высота экрана над слоем топлива, м	Высота слоя топлива h_1 , м	Высота экрана над слоем топлива, м	Высота слоя топлива h_1 , м	Высота экрана над слоем топлива, м	Высота слоя топлива h_1 , м	Высота экрана над слоем топлива, м
0,6	1,1	0,7	1,1	0,8	1,1	0,9	1,1
0,3	0,8	0,35	0,75	0,4	0,7	0,45	0,65
0,2	0,7	0,2	0,6	0,2	0,5	0,2	0,4
0,1	0,6	0,1	0,5	0,1	0,4	0,1	0,3

В качестве факторов, влияющих на процесс прохождения тепловых потоков, рассмотрена динамика уменьшения толщины слоя топлива и изменение области, ограничивающей активный объем топочной камеры по зонам максимального тепловыделения и площадью ограждений топки.

Анализируя полученные данные при $h_2=0,5$ м на рисунках 3.10 и 3.11, при величине экранирования $D=0,4$ м и $D=0,3$ м топочной камеры, полученные показатели температуры уходящих газов находятся в диапазоне 423,2 - 375,8 °С. Показатели температуры уходящих газов при величине экранирования $D=0,5$ м имеют значения в диапазоне 391,8 - 370,5 °С, ниже на 0,92-7,4%, что свидетельствует о более высокой теплоотдаче в подогревательный контур котлоагрегата.

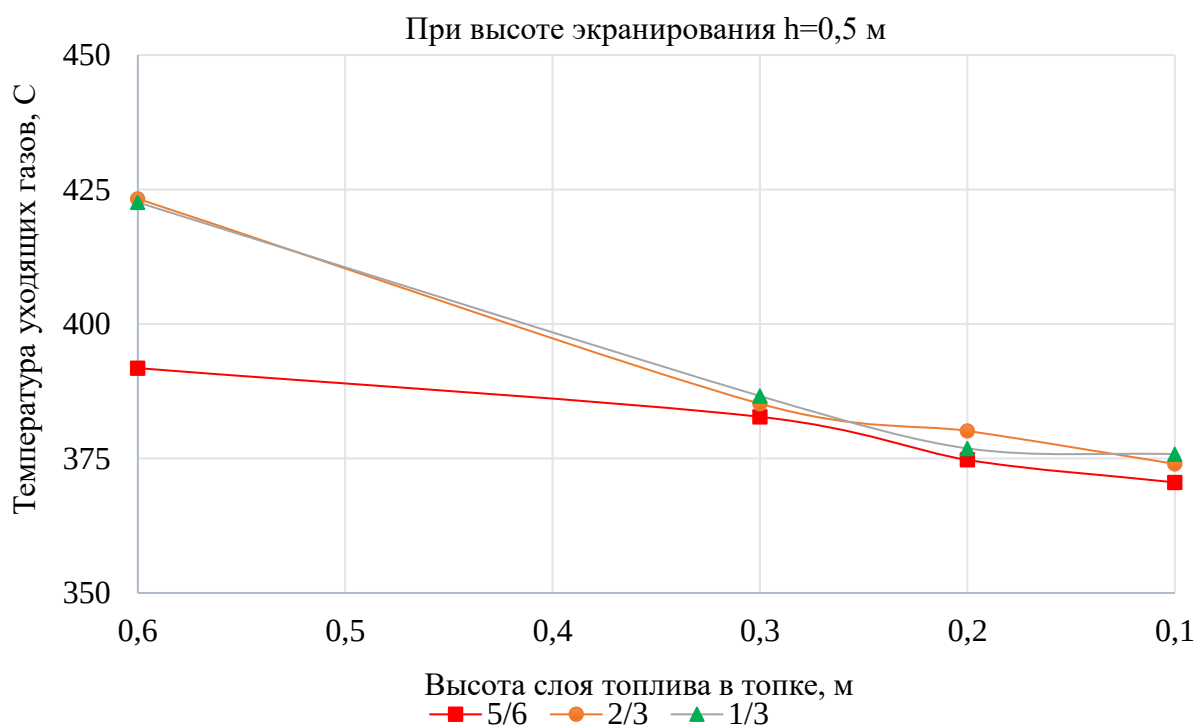


Рисунок 3.10 – Показатели температуры уходящих газов при $h_2=0,5$ м в топке при различной величине экранирования

Наиболее высокая разница температур выявлена с началом горения до середины слоя топлива $h_T=50\%$, далее все три значения по величине экранирования расположены в одинаковом температурном диапазоне. Дымовые газы, идущие через ограниченную экраном полость, значительно теряют на них скорость и снижают свою температуру и объем, обмениваясь теплом со стенками топочной камеры. Уменьшение объема уходящих газов, заметно при увеличении коэффициента теплоотдачи внутри топки с уменьшением толщины топлива.

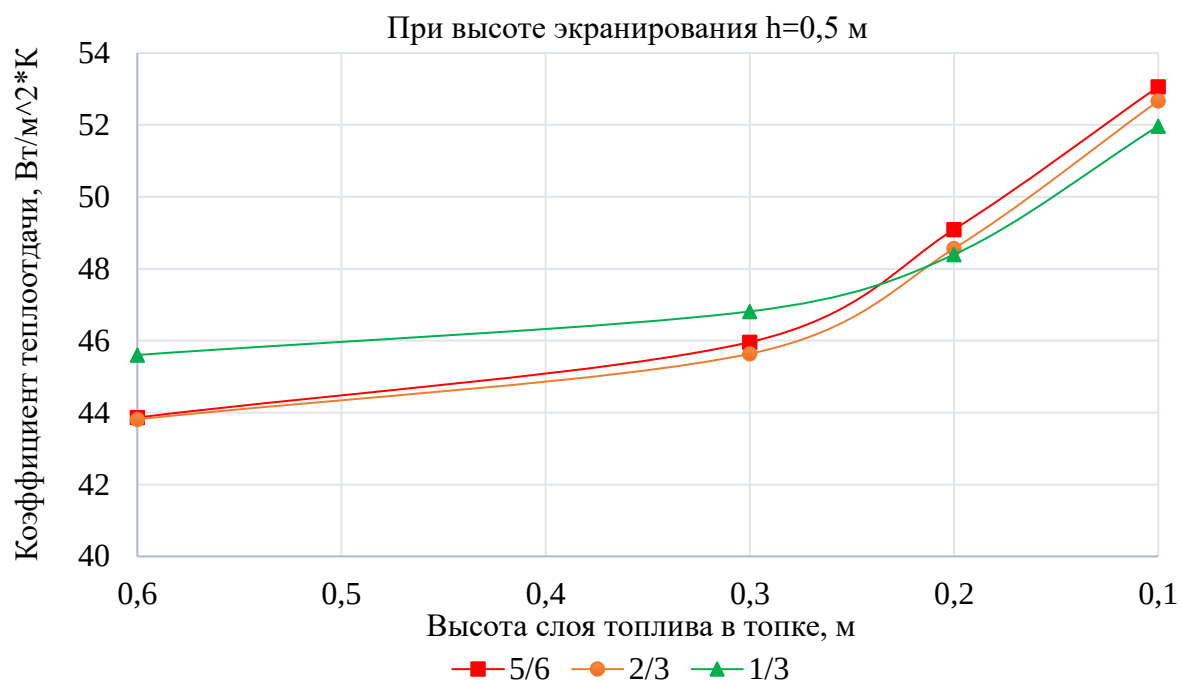


Рисунок 3.11– Показатели коэффициента теплоотдачи стенки топки при $h_2=0,5$ м в топке при различной величине экранирования

Полученные данные на рисунках 3.12 и 3.13 при $h_2=0,4$ м, при величине экранирования $D=0,4$ м и $D=0,3$ м топочной камеры показывают, что температуры уходящих газов находятся в диапазоне $429,9 - 378,4$ °С. Показатели температуры уходящих газов при величине экранирования $D=0,5$ м имеют значения в диапазоне $409,3 - 373,7$ °С, ниже на $0,64-4,8\%$, что меньше показателей при $h_2=0,5$ м. При условии $h_t=0,35$ м, составляющую 50% от общего объема условного топлива, наблюдается одинаковое значение показателей температуры всех трех степеней экранирования, с последующим снижением всех значений, как и в предыдущем случае.

Можно сделать выводы, что эффективность теплообмена изменилась в меньшую сторону с уменьшением высоты установки экрана-ограничителя с $0,5$ до $0,4$ м, при этом дымовые газы, идущие через наиболее ограниченную экраном полость, также больше снижают свою температуру, обмениваясь теплотой со стенками топочной камеры.

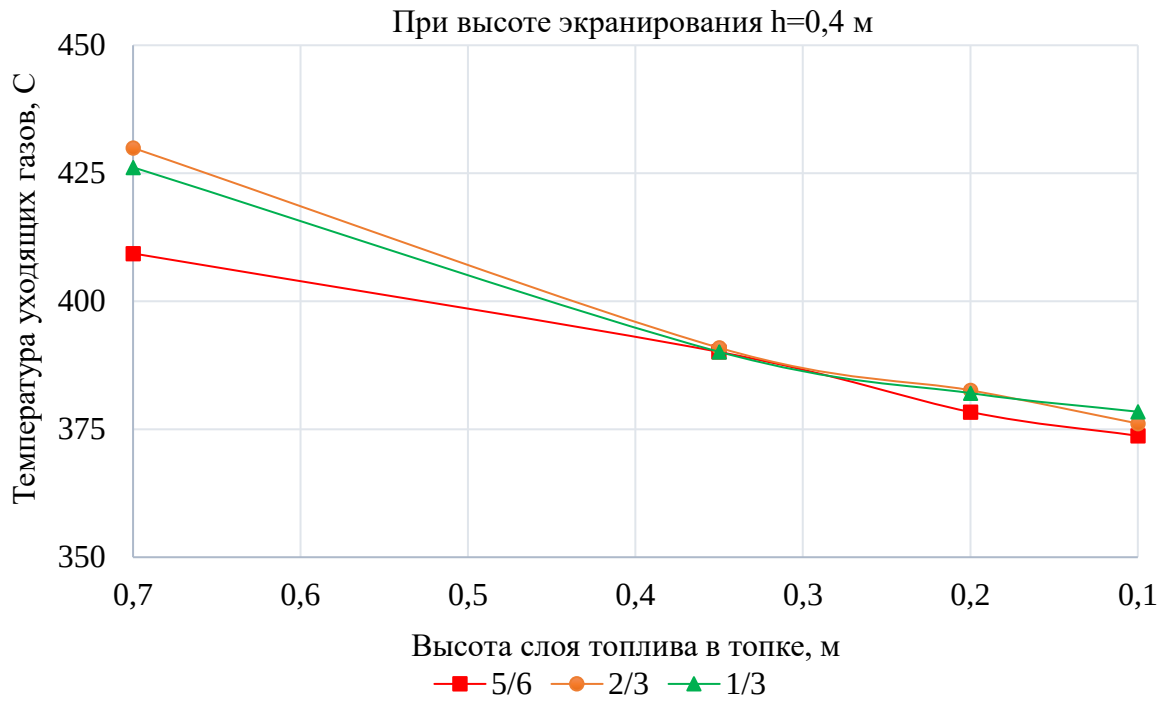


Рисунок 3.12 – Показатели температуры уходящих газов при $h_2=0,4$ м в топке при различной величине экранирования

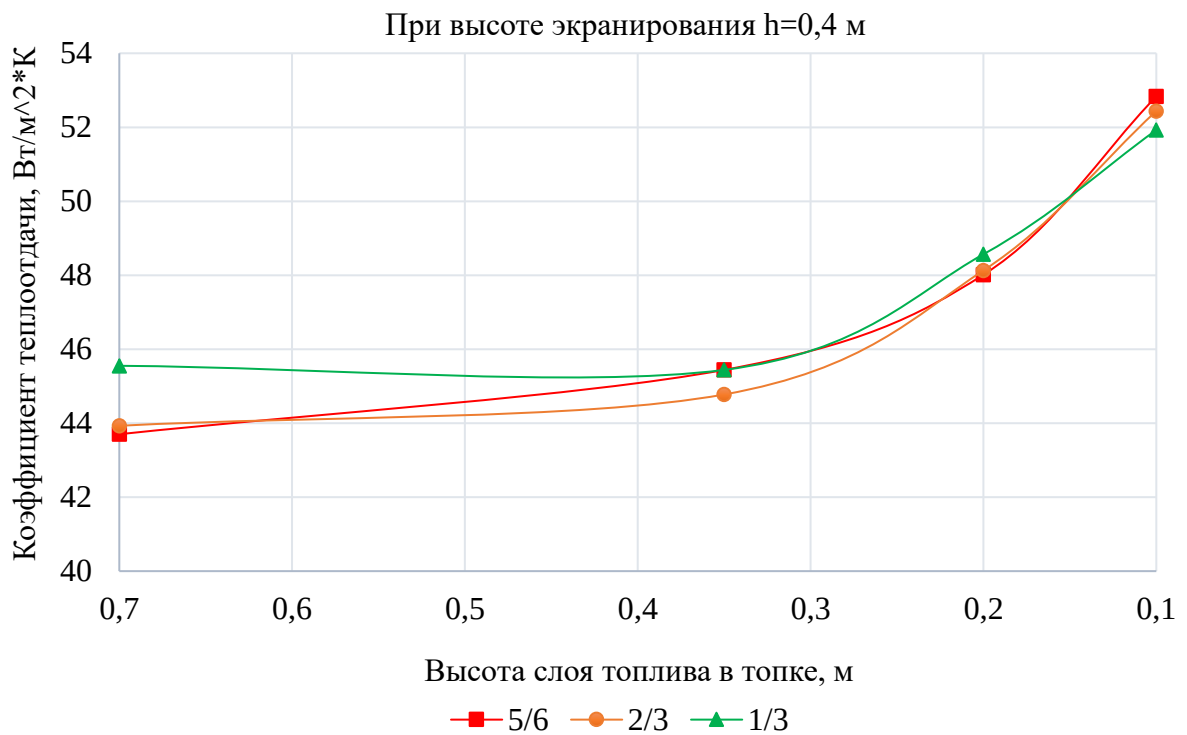


Рисунок 3.13 – Показатели коэффициента теплоотдачи стенки топки при $h_2=0,4$ м в топке при различной величине экранирования

Анализируя полученные данные при $h_2=0,3$ м на рисунке 3.14 и 3.15, устанавливаем, что наиболее низкие значения температур уходящих газов

получены при величине экранирования $D=0,5$ м. При величине экранирования $D=0,4$ м и $D=0,3$ м топочной камеры полученные показатели температуры уходящих газов находятся в диапазоне $423,0 - 402,9 - 383,8 - 369,9$ °С и $411,9 - 404,4 - 385,6 - 379,3$ °С соответственно.

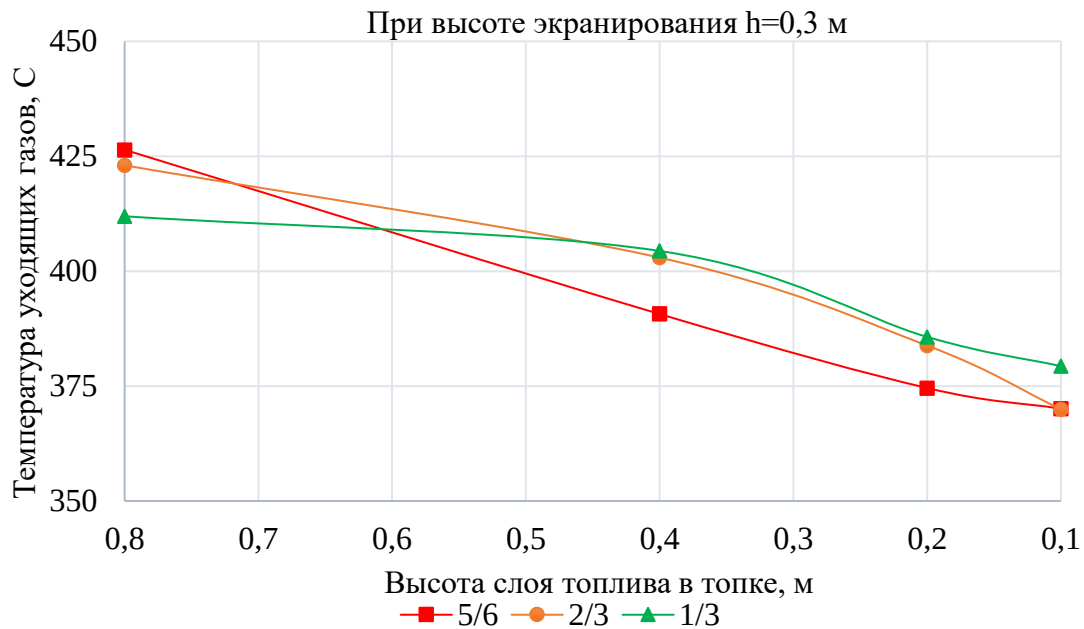


Рисунок 3.14 – Показатели температуры уходящих газов при $h_2=0,3$ м в топке при различной величине экранирования

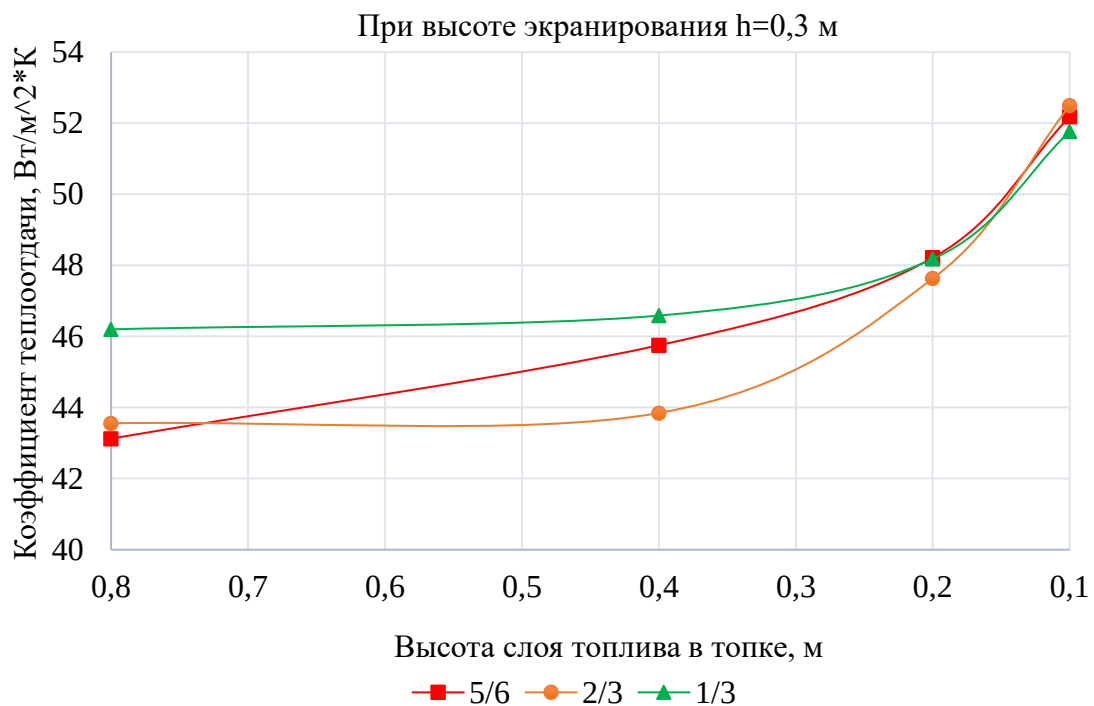


Рисунок 3.15 – Показатели коэффициента теплоотдачи стенки топки при $h_2=0,3$ м в топке при различной величине экранирования

Показатели температуры уходящих газов при величине экранирования $D=0,5$ м имеют значения в диапазоне 426,4 - 390,6 - 374,6 - 370,0 °С. Установлено, что при условии $h_T=0,4$ м, составляющую 50% от общего объема условного топлива, наблюдается снижение показателей температуры уходящих газов при наибольшем экранировании $D=0,5$ м. Эффективность теплообмена также, как и в предыдущих результатах моделирования получилась ниже при наибольшем ограничении экрана.

Показатели температуры уходящих газов при $h_2=0,2$ м, на рисунке 3.16 и 3.17, при величине экранирования $D=0,5$ м, $D=0,4$ м и $D=0,3$ м находятся в диапазоне 420,2 - 373,5 °С, 415,8 - 375,0 и 412,0 - 374,0 °С соответственно.

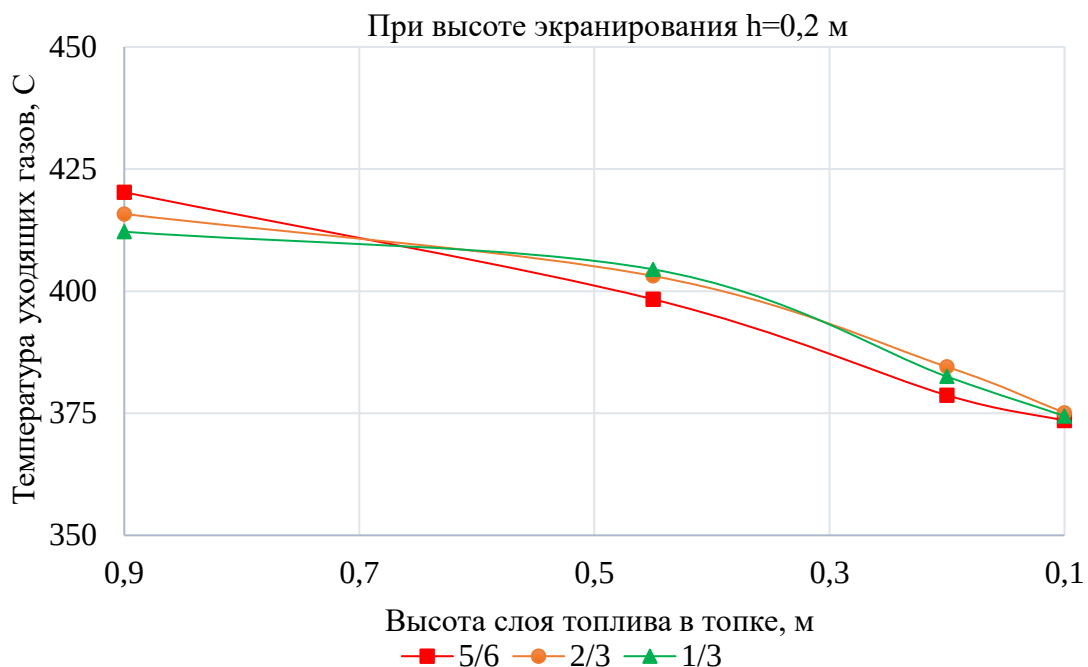


Рисунок 3.16 – Показатели температуры уходящих газов при $h_2=0,2$ м в топке при различной величине экранирования

В целом все полученные показатели по величине экранирования расположены в одинаковом температурном диапазоне, без характерных перепадов, снижение температур по толщине слоя топлива происходит более равномерно, чем при условии $h_2=0,3-0,5$ м.

Анализ всех полученных результатов показывает низкую эффективность технических решений с уменьшением высоты расположения экрана-ограничителя в топочной камере по отношению к слою топлива.

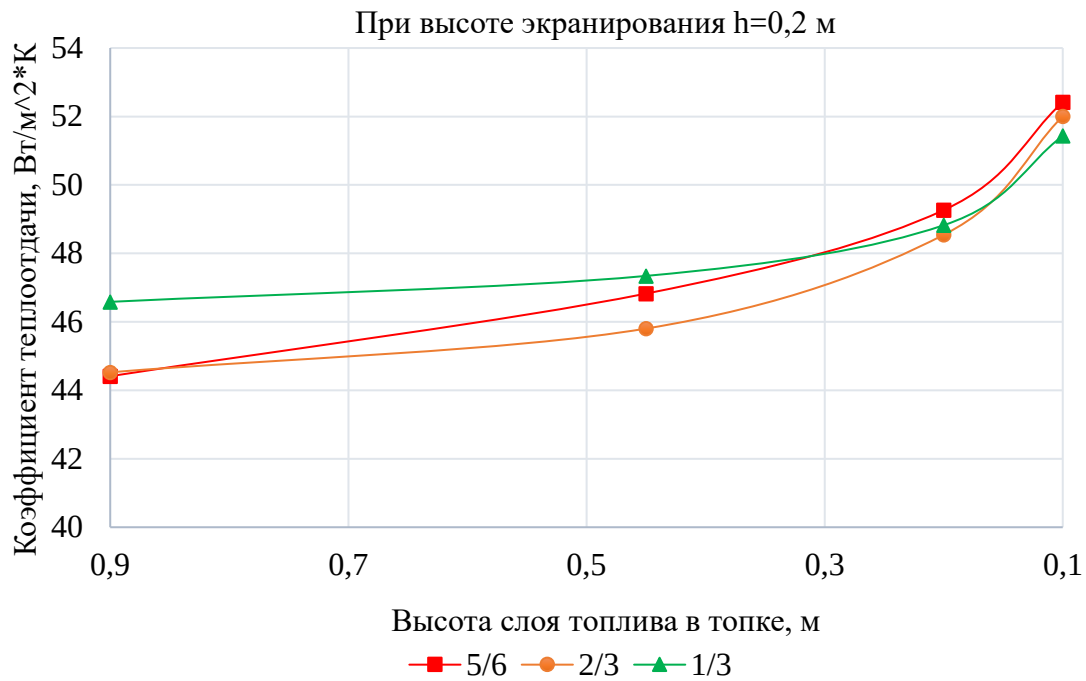


Рисунок 3.17 – Показатели коэффициента теплоотдачи стенки топки при $h_2=0,2$ м в топке при различной величине экранирования

В ходе выполненного анализа данных численного моделирования работы топочной камеры с применением различных экранов-ограничителей наиболее эффективным и предпочтительным для применения является величина экранирования ограничителя $D=0,5$ м, который наиболее эффективен за счет большего покрытия площади зеркала горения топки, способствует снижению скорости и увеличению теплоотдачи дымовых газов за счет омывания поверхностей нагрева.

На рисунке 3.18 приведен сравнительный график показателей температуры уходящих газов при различной высоте расположения экрана ($D=0,5$ м) от плоскости максимальных температур до плоскости экрана.

Как видно из представленных на рисунке 3.18 графиков, наиболее предпочтительными вариантами являются расположение экрана на высотах $h_2=0,5$ м и $h_2=0,4$ м., обладающие наиболее низкими показателями в указанных температурных диапазонах, соответственно с более высокой теплоотдачей в подогревательный контур котла.

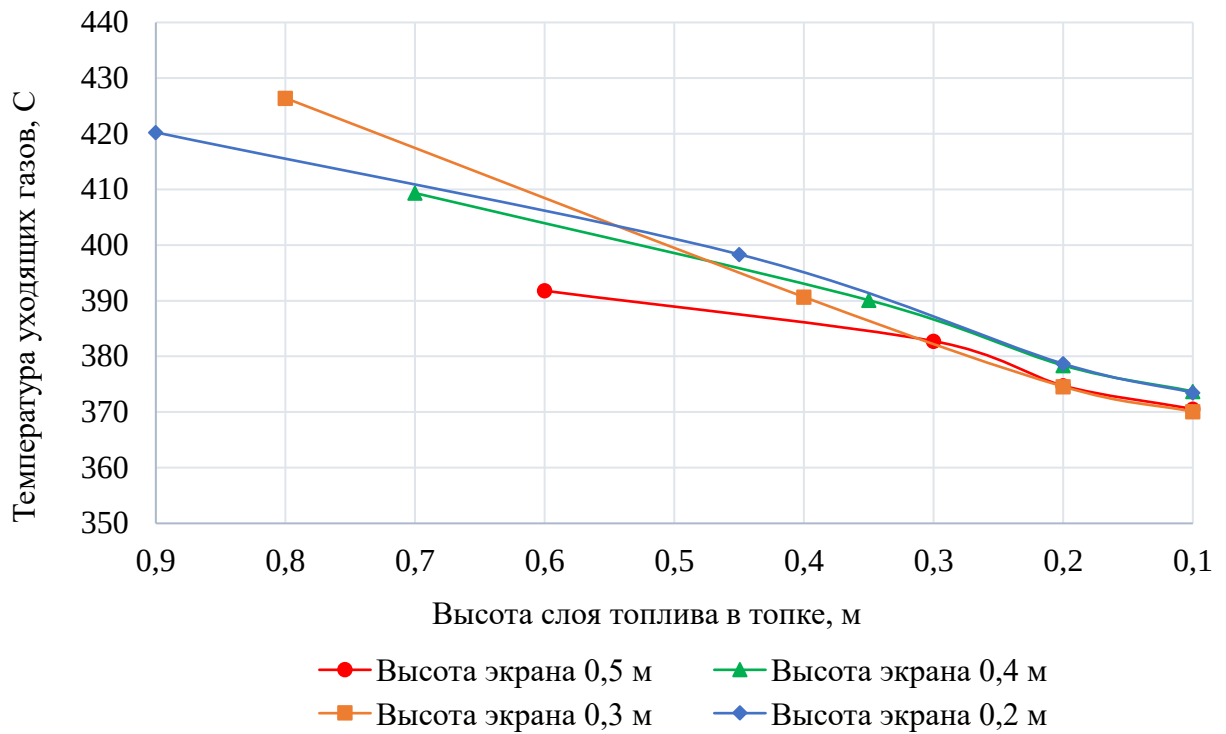


Рисунок 3.18 – Показатели температуры уходящих газов при различных $h_2=0,5-0,2$ м, $D=0,5$ м

Снижение показателей температуры уходящих газов на завершающих стадиях горения обусловлено уменьшением заданной тепловой нагрузки, имитирующим прогорание слоя топлива.

Визуализация характера распределения потоков дымовых газов и температуры текучей среды в зависимости от величины экранирования при различных изменениях высоты слоя топлива h_1 и высоты установки экрана (расстояние от плоскости максимальных температур до плоскости экрана) h_2 , представлены на рисунках 3.19-3.24.

На рисунках 3.19-3.20 видно эффективное снижение температуры и скорости дымовых газов на выходе из топки при применении величины экранирования $5/6$, связанное с большей площадью контактирования продуктов сгорания со стенками подогревательного контура. На рисунках 3.21-3.22 видно, что при заданной величине экранирования $5/6$ и низкой высоте расположения экрана над плоскостью максимальных температур, показатели температуры и скорости дымовых газов остаются высокими, что может быть обусловлено нехваткой свободного пространства между

указанными плоскостями, что снижает эффективность омывания продуктами сгорания поверхностей нагрева.

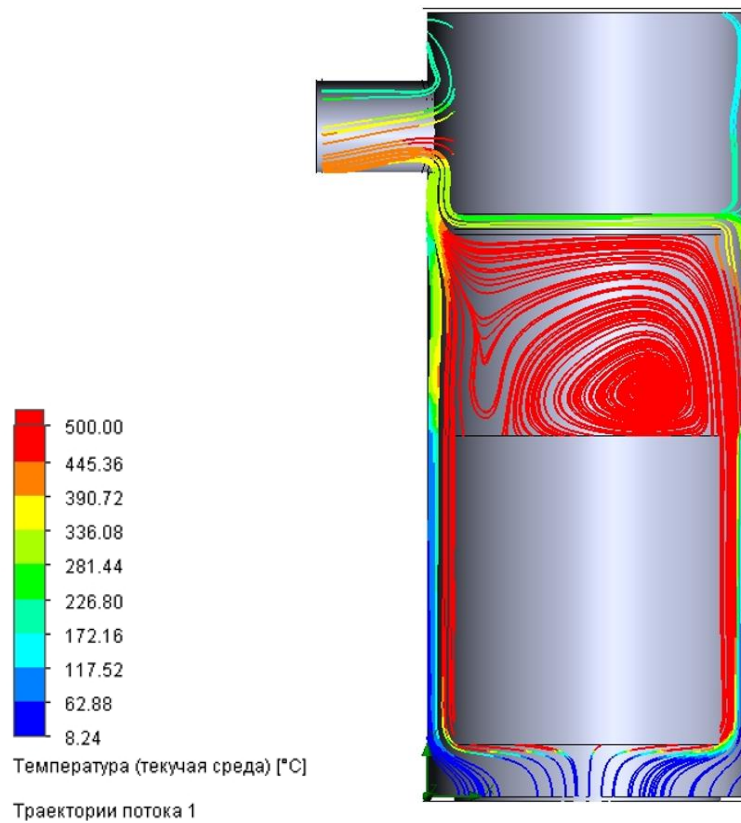


Рисунок 3.19 – Распределение потоков дымовых газов при величине экранирования 5/6 при высоте $h_1=0,6$ м и $h_2=0,5$ м

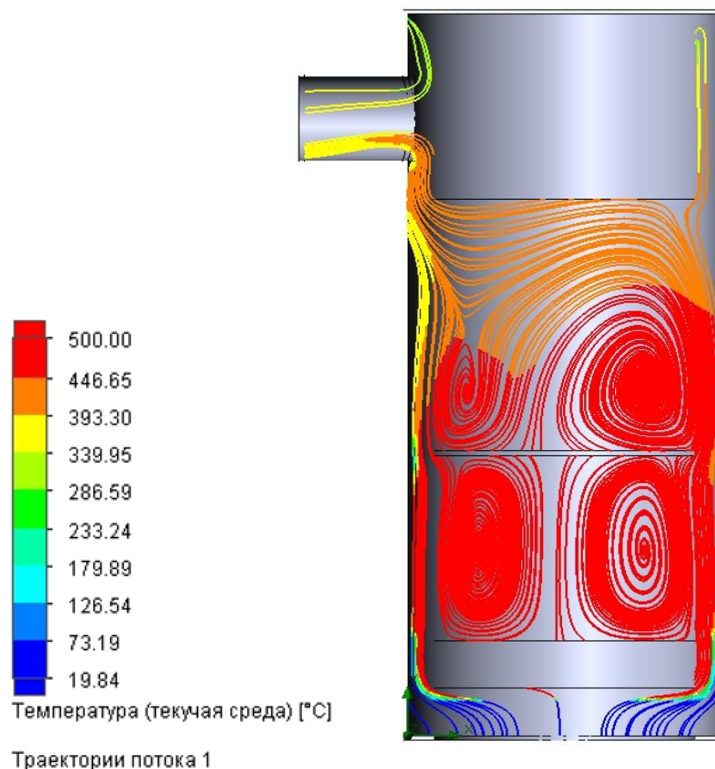


Рисунок 3.20 – Распределение потоков дымовых газов при величине экранирования 5/6 при высоте $h_1=0,1$ м и $h_2=0,5$ м

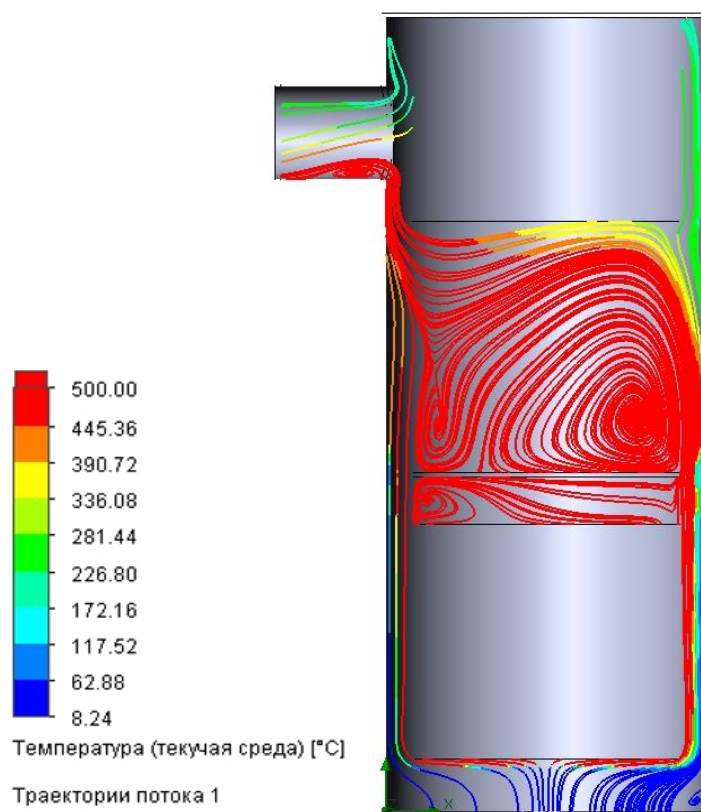


Рисунок 3.21 – Распределение потоков дымовых газов при величине экранирования 5/6 при высоте $h_1=0,45$ м и $h_2=0,2$ м

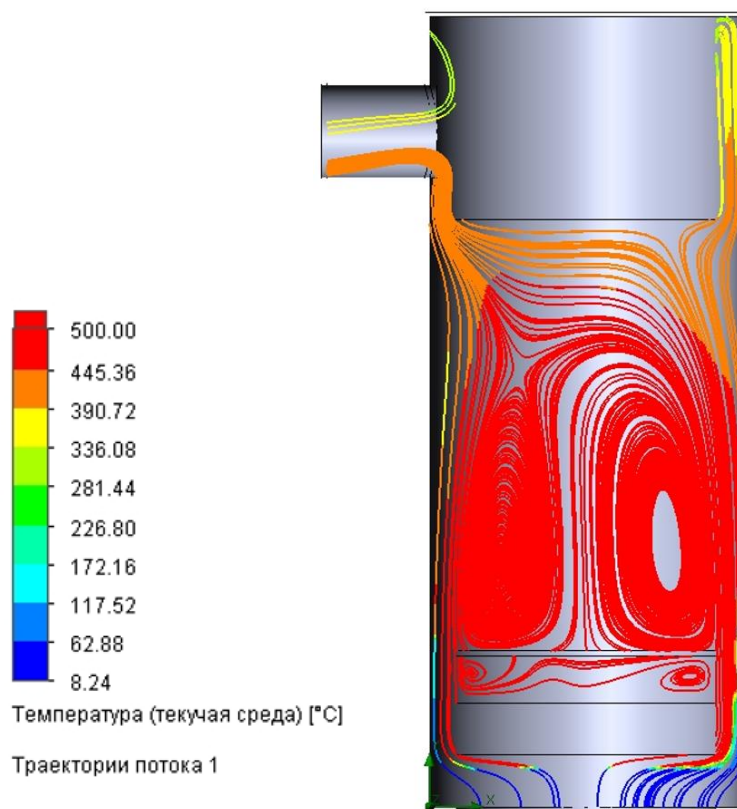


Рисунок 3.22 – Распределение потоков дымовых газов при величине экранирования 5/6 при высоте $h_1=0,1$ м и $h_2=0,2$ м

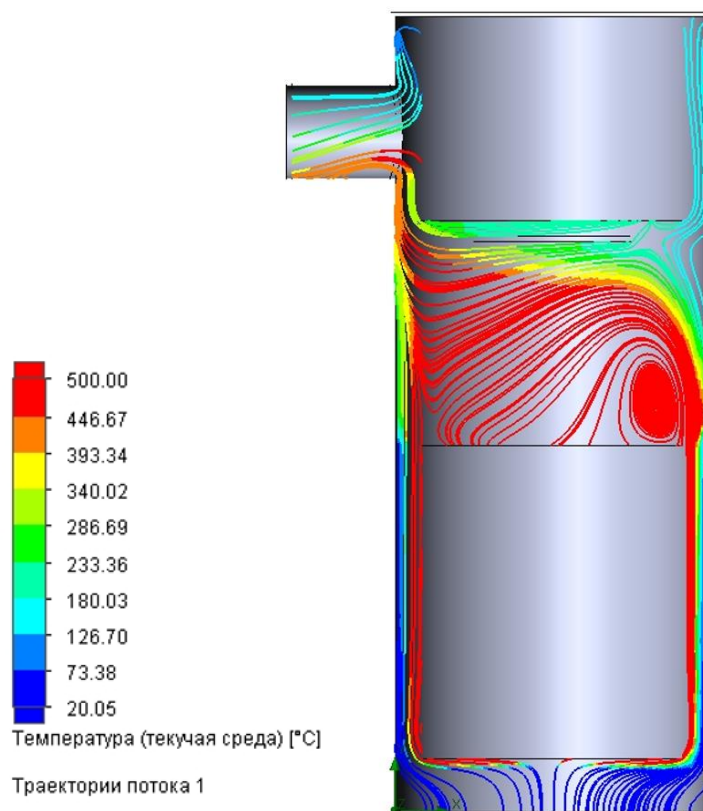


Рисунок 3.23 – Распределение потоков дымовых газов при величине экранирования $2/3$ на начальной стадии горения

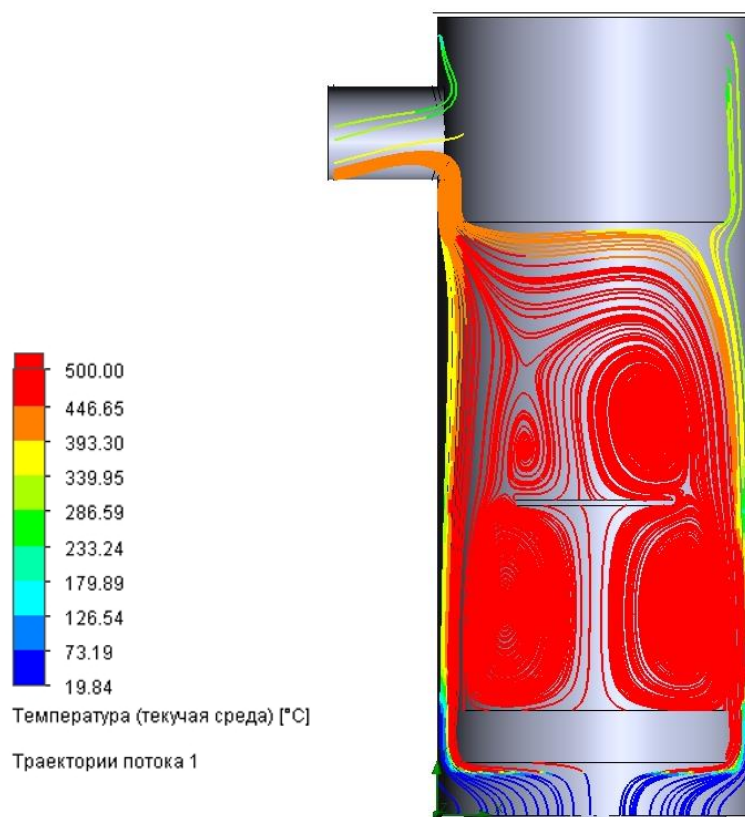


Рисунок 3.24 – Распределение потоков дымовых газов при величине экранирования $1/2$ в середине стадии горения

При меньшей величине экранирования $2/3$ и $1/2$ на различных стадиях горения (рисунки 3.23-3.24) движение дымовых газов не сдерживается, температура и скорость продуктов сгорания остается высокой.

Анализ визуализации распределения потоков в топочной камере с разной степенью экранирования и на отличающихся расстояниях от плоскости максимальных температур до плоскости экрана показал, что по мере прогорания слоя топлива при увеличенном объеме топочной камеры $h_2=0,5$ м и при увеличенных площадях экранирования топки со значением $D=0,5$ м дымовые газы распределяются более равномерно по стенкам подогревательного контура, эффективнее повышая теплоотдачу и снижая температуру на выходе из топки.

3.6 Выводы

1. На основании исследований, выполненных в главе 2, предложена усовершенствованная конструкция топочной камеры котлоагрегата с экранированием, позволяющая регулировать топочный объем в процессе горения.

2. С использованием программного комплекса Solidworks Flow Simualtion (FloEFD) выполнено численное моделирование течений и теплопередачи в различных точках усовершенствованной конструкции топочной камеры.

3. Получены теоретические значения температуры газов на выходе из топки при заданной постоянной лучевоспринимающей поверхности и с учетом изменения относительной высоты положения максимума температуры топочных газов коэффициента M , учитывающего геометрические параметры и характер распределения температур по высоте топочной камеры. Уточнены его значения для предложенной усовершенствованной конструкции топочной камеры.

4. Выявлено, что с увеличением расстояния от плоскости максимальных температур до плоскости дымохода котлоагрегата, то есть по мере прогорания слоя топлива вниз, поток дымовых газов по стенкам подогревательного контура распределяется неравномерно, в большем объеме концентрируясь в середине и в верхней части топки.

5. В результате выполненного анализа данных численного моделирования работы топочной камеры с применением различных экранов-ограничителей установлено, что наиболее эффективным и предпочтительным для рассмотрения является степень экранирования ограничителя $D=0,5$ м, который за счет покрываемой площади зеркала горения топки наиболее эффективно способствует снижению скорости и увеличению теплоотдачи дымовых газов за счет поверхностей омывания.

6. Установлено, что по мере прогорания слоя топлива при увеличенном объеме топочной камеры $h_2=0,5$ и $h_2=0,4$ м большей площади экранирования дымовые газы распределяются более равномерно по стенкам подогревательного контура, эффективнее повышая теплоотдачу и снижая температуру на выходе из топки, что в конечном итоге стабилизирует работу топки котла.

4 НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В МОДИФИЦИРОВАННОЙ ТОПОЧНОЙ КАМЕРЕ В ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ СЕВЕРА

4.1 Описание экспериментальной установки

Экспериментальные исследования работы котлоагрегата с предлагаемой конструкцией экрана-ограничителя проводились с целью получения характеристик работы топочной камеры в действительных эксплуатационных условиях. Значения параметров экспериментальных исследований приняты с учетом результатов, полученных при проведении исследований работы топочной камеры котлоагрегата в разделе 2.1 и численного моделирования, результаты которого приведены в разделе 3.5.

Исследования производились на созданном экспериментальном стенде на базе ООО «Якутский котловой завод» на территории опережающего развития (ТОР) «Якутия». Основой стенда является твердотопливный котел с верхним принципом горения марки «Liepsnele Arctic» с паспортной тепловой мощностью 40 кВт и предлагаемой конструкцией экрана-ограничителя в топочной камере.

Испытания производились в естественных условиях при температуре наружного воздуха в диапазоне -30 до -40 °С, что характеризует отопительный период. Растопка производилась на буром угле Кангаласского месторождения. Фиксация температур измеряемых сред производилась каждые 60 секунд с начала подготовки и запуска котлоагрегата до полного завершения растопки. В каждой точке и в системе измерения проводились не менее пяти раз.

Измерения температуры уходящих газов в дымоходной системе осуществлялись на участках: 1) на выходе из котлоагрегата, 2) в середине участка, на высоте $h=3,5$ м, 3) на выходе из системы (устье), на высоте $h=7,0$ м.

Определение места отбора данных температуры дымовых газов на выходе из котлоагрегата производилось на участке, где уменьшается

турбулентность потока продуктов сгорания и расположенном не менее двух диаметров по ходу движения. Гидравлический диаметр рассчитывался по формуле 4.1:

$$D_{\text{гидр}} = \frac{4 \cdot F_{\text{дым}}}{P_{\text{дым}}}, \text{ м} \quad (4.1)$$

где $F_{\text{дым}}$ – площадь сечения дымохода, м^2 , $P_{\text{дым}}$ – периметр сечения дымохода, м

Измерение температуры уходящих газов в дымоходной системе производилось с использованием измерителей-регистраторов температуры EClerk-M-K-NP с использованием погружных термоэлектрических преобразователей ДТПК 035-0100.100. Измерение температуры горения пламени внутри топочной камеры производилось с использованием измерителя-регистратора температуры EClerk-M-K-NP с применением термоэлектрического преобразователя ТП.ХК(ХА)-К12.

Технические характеристики использованных измерителей и термопар приведены в таблицах 4.1-4.3.

Таблица 4.1 – Технические характеристики EClerk-M-K-NP

Наименование	Значение
Диапазон измеряемой величины	-75...+1200 °C
Пределы допускаемой абсолютной основной погрешности	$\pm(0,5+0,002T_{\text{изм.}})^{\circ}\text{C}^*$
Количество каналов измерения	2 (температура объекта и холодный спай)
Объём памяти, максимальный	260 тыс. значений на каждый канал
Суточная точность хода внутреннего таймера	в пределах ± 1 с
Период регистрации	от 1 с до 24 ч (устанавливается в ПО)
Диапазон температуры эксплуатации	-40...+55 °C
Степень защиты корпуса	IP54
Масса	не более 0,15 кг

Таблица 4.2 – Технические характеристики термопары ДТПК 035-0100.100

Характеристика	Значение
Номинальная статическая характеристика (НСХ)	К (ХА) хромель-алюмель
Рабочий диапазон измеряемых температур	-40...+800 °С
Класс допуска датчика	2
Условное давление	0,4...10 МПа (в зависимости от конструктивного исполнения)
Исполнение рабочего спая термопары, относительно корпуса датчика	изолированный неизолированный
Диаметр термоэлектродной проволоки	0,5 мм; 0,7 мм; 1,2 мм
Показатель тепловой инерции, не более:	
- с изолированным рабочим спаем	20 с
- с неизолированным рабочим спаем	10 с
Количество рабочих термопар в изделии	1 или 2
Материал защитной арматуры	сталь 12Х18Н10Т сталь 10Х23Н18
Степень защиты по ГОСТ 14254	IP54

Таблица 4.3 – Технические характеристики термопары ТП.ХК(ХА)-К12

Характеристика	Параметр
НСХ	ХА (К)
Класс допуска	2
Рабочий спай	неизолирован
Диапазон измеряемой температуры, °С	-40 ...+1000 С
Диаметр электродов, d, мм	1,13
Показатель тепловой инерции, с	1
Материал защитной арматуры	нить стеклокерамики
Средний срок службы, лет	не менее 6

Измерение температуры воздуха, идущего на горение, наружного воздуха и температуры теплоносителя в системах Т1 и Т2 производилось с использованием многоканального измерителя температуры Center 309. Технические характеристики прибора приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Технические характеристики измерителя температуры Center 309

Характеристики	Параметры	Значения
Температура (К-термопара)	Диапазон измерений	- 200 ... 1370 °C
	Погрешность (без учета погрешности термопары)	$\pm (0,2 \% + 1\text{ }^{\circ}\text{C}); \pm (0,2 \% + 2\text{ }^{\circ}\text{F})$
	Макс. разрешение	0,1 °C; 0,1 °F
	Защита входа	= 60 В; ~ 24 В
Общие данные	Измерительный вход	4 входа
	Цифровая шкала	4 шкалы; 4 разряда
	Объем регистратора	16000
	Интервалы регистрации	1 с ... 60 мин
	Скорость измерения	0,3 изм. / с
	Условия эксплуатации	Температура: 0 °C ... 50 °C; отн. влажность: не более 80 %

Измерение теплопроизводительности и температур подающей и обратной линии отопительной системы котлоагрегата фиксировалось на электромагнитный тепловычислитель Взлет ТСРВ-026М с автоматической сменой формул расчета тепловой энергии отопительного и межотопительного сезонов. В приборе предусмотрены 11 типовых схем теплоснабжения, характеристики указаны в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Технические характеристики тепловычислителя Взлет ТСРВ-026М

Характеристика	Значение
Количество каналов измерения:	
- расхода	до 4
- температуры	до 5

- давления	до 4
Количество контролируемых теплосистем	1 (отопительный / межотопительный/ГВС)
Номинальный диаметр, DN, мм	от 10 до 5 000
Диапазон измерения среднего объемного расхода, м ³ /ч	от 0,01 до 1 000 000
Диапазон измерения температуры, °С	от минус 50 до 180
Относительная погрешность измерения количества тепла, %	не более ±5,0
Температура окружающей среды для тепловычислителя, °С	от 5 до 50
Длина линии связи между тепловычислителем и первичными преобразователями, м	до 300
Глубина архивов измерительной информации, записей:	
- часового	1440 (60 суток)
- суточного	186 часов
- месячного	48 часов

Схема испытательного стенда для экспериментального исследования работы твердотопливного котлоагрегата с измененной конструкцией топочной камеры представлена на рисунке 4.1.

Работа экспериментального стенда осуществляется следующим образом. До загрузки топлива в топочную камеру на телескопическую трубу распределителя воздуха фиксируют экран-ограничитель. В топочную камеру через дверцы загружают топливо и поджигают, распределитель воздуха опускается на топливо под собственным весом. Открывается заслонка и посредством вентилятора WPA 120 в топочную камеру нагнетается воздух для горения с постоянной скоростью и расходом. Контроль работы вентилятора осуществляется контроллером TAL RT-22, путем измерения термодатчиком параметров теплоносителя в подающей линии котлоагрегата. Образующиеся во время горения дымовые газы через топочную камеру попадают в конвективную зону в верхней части котла и далее выводятся наружу через дымоходную систему, где датчики прибора EClerk-M-K-HP фиксируют их температуру. Циркуляция теплоносителя осуществляется через циркуляционный насос на обратной линии отопительной системы, измерение

расхода и температуры теплоносителя производится прибором Взлет ТСРВ-026М на входе и на выходе из котла.

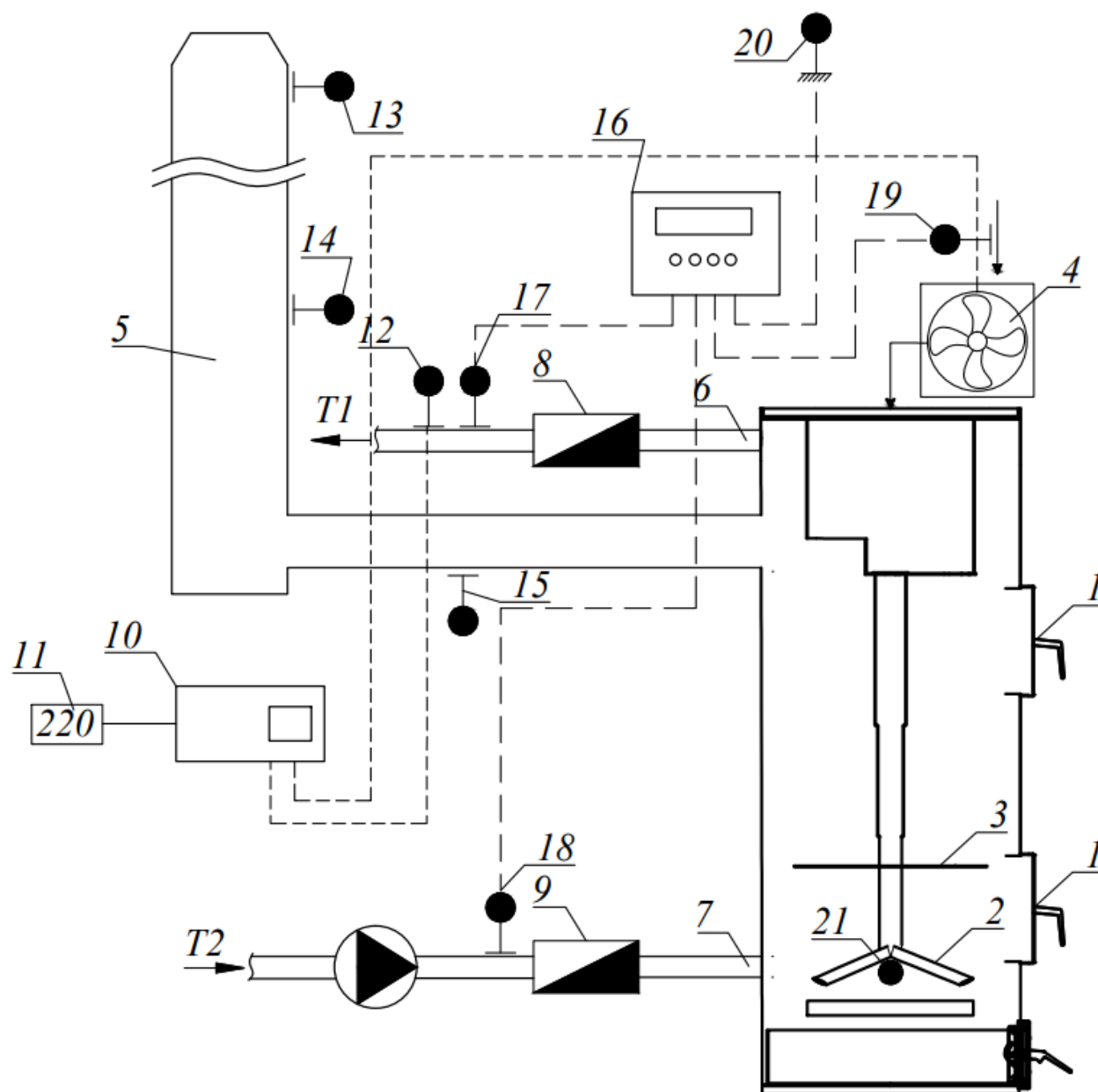


Рисунок 4.1 - Схема испытательного стенда для экспериментального исследования работы твердотопливного котлоагрегата

Испытательный стенд включает в себя следующие компоненты и оборудование:

- 1 – твердотопливный котел с дверцами для загрузки топлива;
- 2 – распределитель воздуха для горения;
- 3 – экран-ограничитель активного объема топки;
- 4 – вентилятор поддува воздуха WPA 120;

- 5 – дымоходная система котла, из стальных теплоизолированных секций, диаметром $d=180$ мм, высотой $h=7,0$ м;
- 6, 7 – подающая и обратная линии отопительной системы;
- 8, 9 – расходомеры подающей и обратной линии отопительной системы тепловычислителя Взлет ТСРВ-026М;
- 10 – контроллер вентиляторного поддува TAL RT-224;
- 11 – сеть питания контроллера и вентиляторного поддува;
- 12 – термодатчик параметров теплоносителя;
- 13, 14, 15 – термопары ДТПК 035-0100.100, подключаемые к автономным канальным измерителям EClerk–М-К-НР;
- 16 – 4-х канальный измеритель температуры Center 309;
- 17, 18 – контактные датчики температуры подающей и обратной линии отопительной системы;
- 19, 20 – бесконтактные датчики температуры внутреннего и наружного воздуха;
- 21 – термопара ТП.ХК(ХА)-К12, установленная на распределителе воздуха в топочной камере, подключаемая к автономному канальному измерителю EClerk–М-К-НР.

Порядок работы со стендом следующий:

1. Производим настройку контроллера TAL RT-22, ставим на средний оборот 50%, температура контроля подающей линии $t_{\text{под}} = 65$ °С.
2. Включаем в сеть вентилятор WPA 120.
3. С помощью измерителей-регистраторов температуры EClerk-М-К-НР фиксируем начальную температуру среды в дымоходной системе и в топочной камере.
4. С помощью измерителей-регистраторов температуры Center 309 фиксируем начальные температуры T_1 и T_2 , наружного воздуха и воздуха, участвующего в горении.
5. Включаем в сеть циркуляционный насос отопительной системы.

6. Включаем в сеть тепловычислительный прибор Взлет ТСРВ-026М отопительной системы и фиксируем показания расхода и температуры теплоносителя в подающей и обратной линии в память.
7. С использованием приборов EClerk-M-K-HP, Center 309 фиксируем показания температур в измеряемых средах до полного окончания растопки загруженного топлива.
8. После завершения 1 цикла измерений отключаем от сети все приборы в следующей последовательности: Взлет ТСРВ-026М, измерительные приборы температуры, вентилятор WPA 120, контроллер вентилятора.
9. Перед следующей серией экспериментов ожидают возвращения показаний термодатчиков к начальным показаниям.

Фотографии экспериментальной установки и расположения измерительных приборов и оборудования показаны на рисунках 4.2-4.3.



Рисунок 4.2 – Испытуемый котлоагрегат с измененной конструкцией топочной камеры



Рисунок 4.3 - Расположение измерительных приборов на экспериментальном стенде

4.2 Результаты натурных экспериментальных исследований топочной камеры с экранированием при условиях низких температур

Целью исследования является выявление эффективности и особенностей работы предложенной конструкции топочной камеры котлоагрегата с экраном-ограничителем в натурных условиях.

На рисунке 4.4 приведены графики распределения показателей теплопроизводительности котлоагрегата, построенные по результатам натурных измерений (данные измерений приведены в Приложении Ж). Характер распределения теплопроизводительности с использованием предлагаемой конструкции экрана-ограничителя показывает более стабильный режим производства тепловой энергии за весь период времени горения топлива, отсутствуют перепады и колебания, присутствующие при работе стандартного заводского котлоагрегата с типовой топочной камерой.

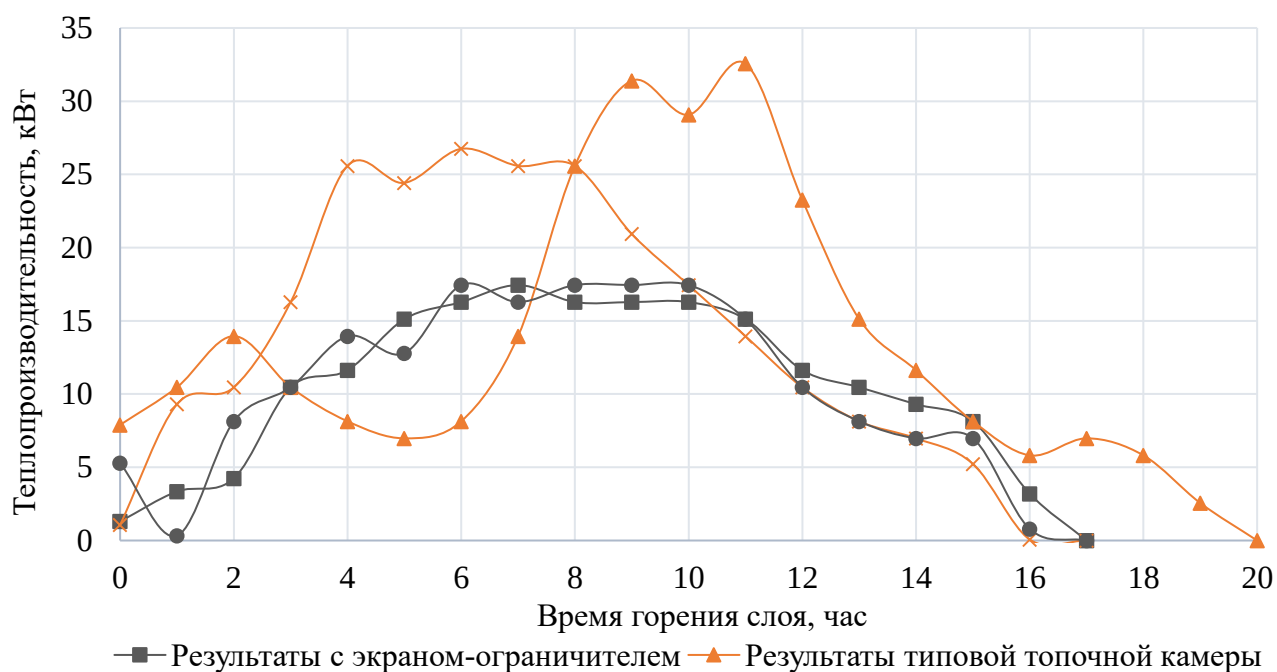


Рисунок 4.4 – Распределение показателей теплопроизводительности
испытываемого котлоагрегата

По полученным результатам измерения температуры горения топлива внутри топки построены графики распределения температур за период работы котлоагрегата на 1 растопке, показанный на рисунке 4.5.



Рисунок 4.5 – Сравнительный график показателей температуры горения в топке

Фрагменты данных эксперимента на завершающий период измерений, на основании которых построены графики на рисунке 4.5 приведены: 1) для типовой топочной камеры 14.02.2022 22:23 pm – 15.02.2022 01:53 pm (см. Приложение 3); 2) для топки с экраном-ограничителем 02.02.2022 17:40 pm – 02.02.2022 19:40 pm (см. Приложение И).

Анализ данных на рисунке 4.5 показывает, что в начальный период горения в обоих случаях наблюдается резкое возрастание температур, связанное с высоким расходом воздуха на растопку топлива и возникновением пламени. Далее фиксируется постепенное снижение температуры в слое. Данный процесс просматривается также при измененной компоновке топочной камеры, что можно описать нехваткой воздуха, необходимого в начальном этапе с появлением химической неполноты сгорания. Нехватка воздуха связана с высокой толщиной и неравномерностью загруженного топлива и начальной ограниченностью топочного пространства экраном-ограничителем. Далее, по мере прогорания слоя топлива и появления кокса, температура горения повышается. При уменьшении слоя топлива неполнота сгорания уменьшается, но при этом в топочной камере увеличивается количество избыточного воздуха, проникающего через распределитель воздуха и колосниковую решетку. Как известно, избыточный воздух будет негативно влиять на эффективную работу топки. Как видно из графика, применение экрана-ограничителя в средней и завершающей стадии работы топки позволило повысить температуру горения и добиться устойчивого горения.

Повышение температуры горения топлива в рассмотренной начальной стадии работы топки возможно за счет подачи подогретого воздуха, а также увеличения количества воздуха путем применения шиберных заслонок экрана-ограничителя.

В целях анализа полученных теоретических численных данных с натурными экспериментальными данными построен сводный график на рисунке 4.6. При построении точек по результатам экспериментальных

данных использованы области максимальных температур уходящих газов, возникших в определенный период работы топки. Полученные натурные результаты показывают, что в процессе снижения толщины слоя топлива на завершающей стадии горения показатели температуры дымовых газов имеют повышенные значения, носят более упорядоченный характер, без резких перепадов по сравнению с ранее полученными результатами растопки котлоагрегата без измененной конструкции.

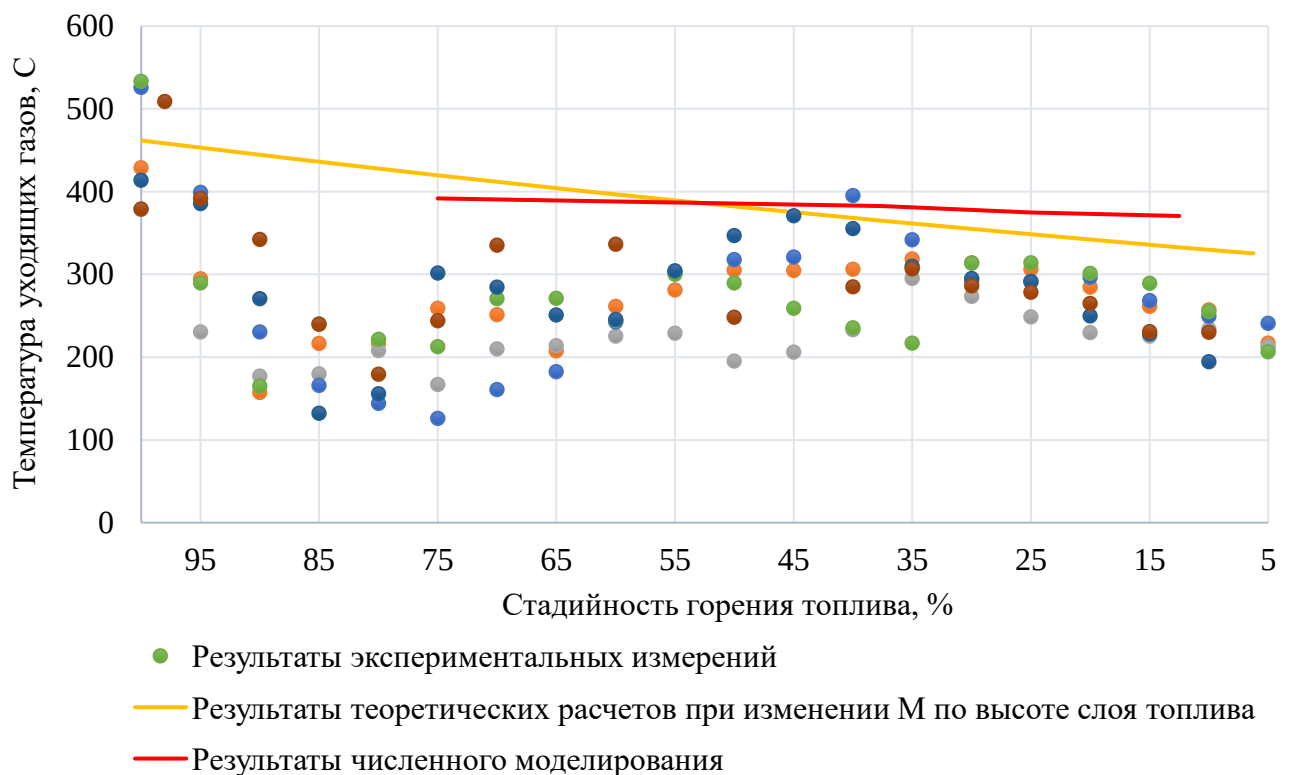


Рисунок 4.6 – Сравнительный график максимальных температур уходящих газов на выходе из топки полученных в натурных условиях при применении экрана-ограничителя

Представленным на рисунке 4.6 сводным графиком также достоверно воспроизводится характер горения топлива в начальной и завершающей стадии, показанный на рисунке 4.5. При этом результаты теоретических расчетов и численного моделирования не учитывают влияние объема воздуха, участвующего в горении при их нехватке или избытке.

Сравнение полученных экспериментальных данных температур уходящих газов на выходе из топки с экраном ограничителем относительно существующей стандартной заводской топочной камеры представлены на

рисунке 4.7 (данные измерений эксперимента, на основании которых построены графики, приведены в Приложении К). На графиках можно видеть, что применение экрана-ограничителя позволяет добиться более стабильного режима работы, по сравнению с показателями топки заводского изготовления, не допуская снижения температуры уходящих газов и преждевременного затухания до завершения стадии горения.

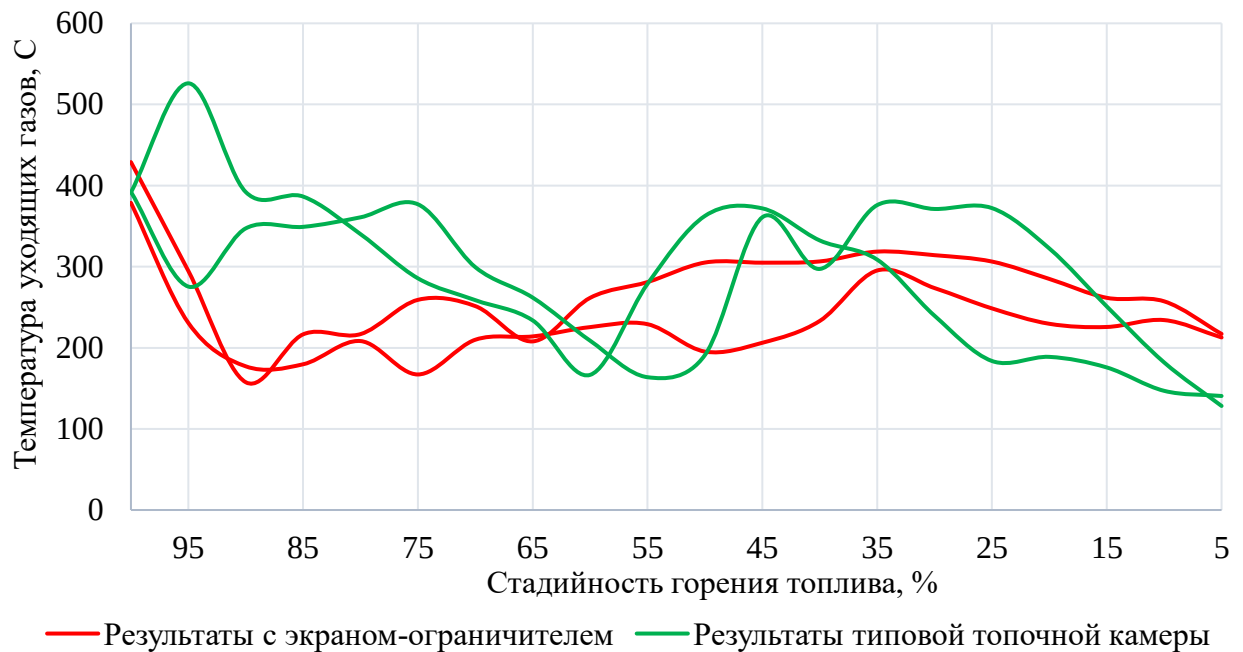


Рисунок 4.7 – Сравнительные результаты температур уходящих газов на выходе из топки

Значения температур уходящих газов, по которым можно характеризовать эффективность работы топки, также можно применять для анализа влияния низкотемпературной коррозии на различные элементы котла. Наибольшее первоначальное воздействие данный вид коррозии имеет на металлические части конвективных поверхностей нагрева и дымоходной системы. Для оценки надежности работы котлоагрегата с измененной конструкцией топки выполнено сравнение натурных результатов средних значений температуры уходящих газов на участках дымоходной системы с температурой образования точки росы дымовых газов. Надежная работа элементов котлоагрегата будет обеспечиваться при исключении низкотемпературной коррозии поверхностей за счет соблюдения «безопасного» интервала температур, с минимальной разницей в 5 °C [143].

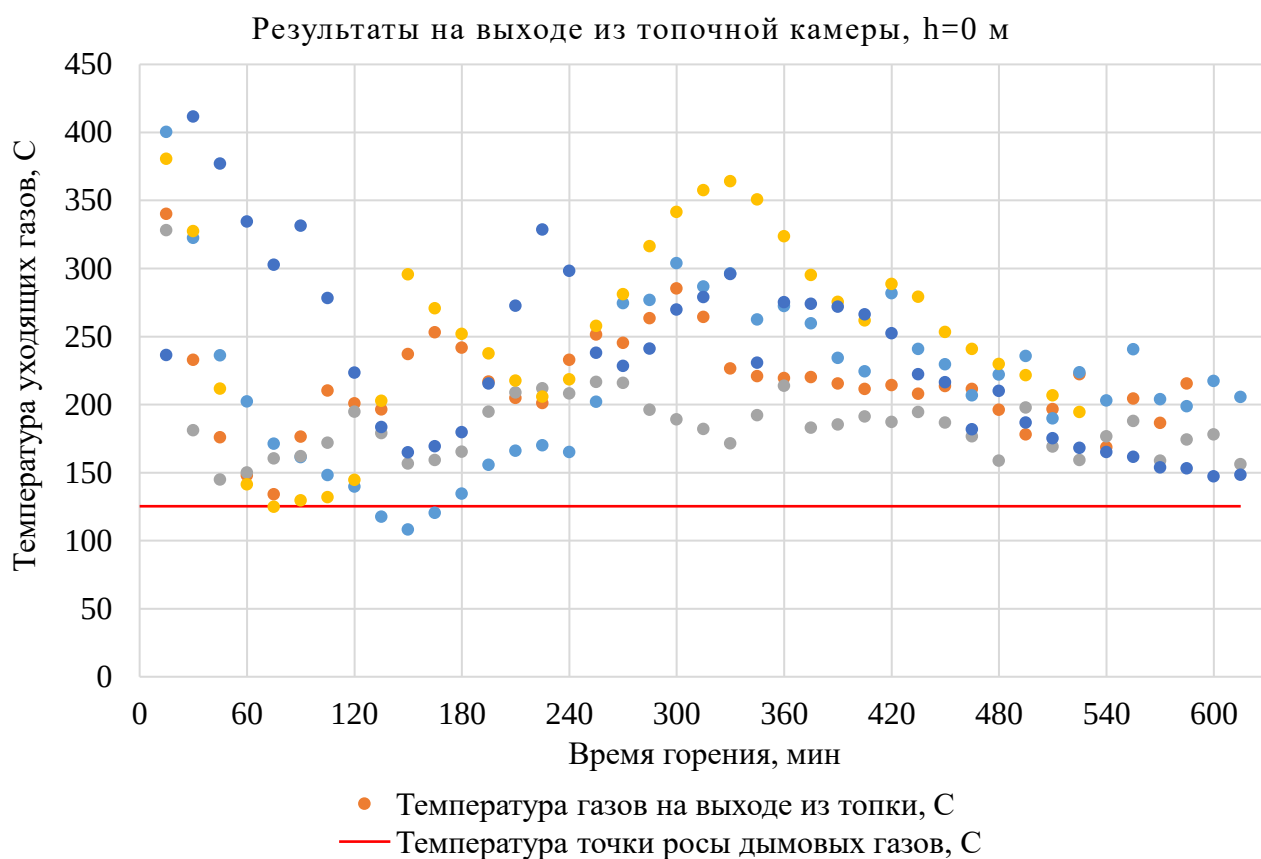


Рисунок 4.8 – График средних температур уходящих газов на выходе из топки

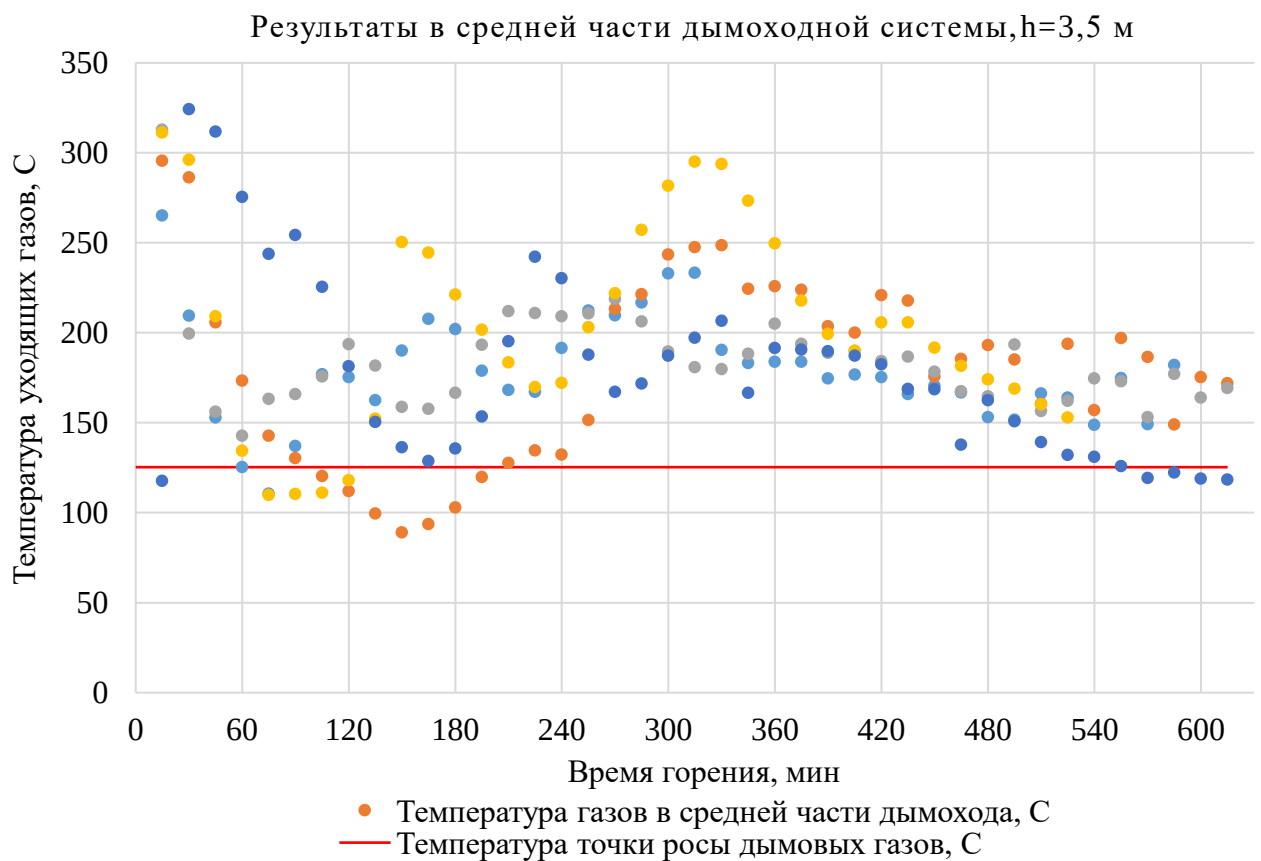


Рисунок 4.9 – График средних температур уходящих газов в середине дымохода

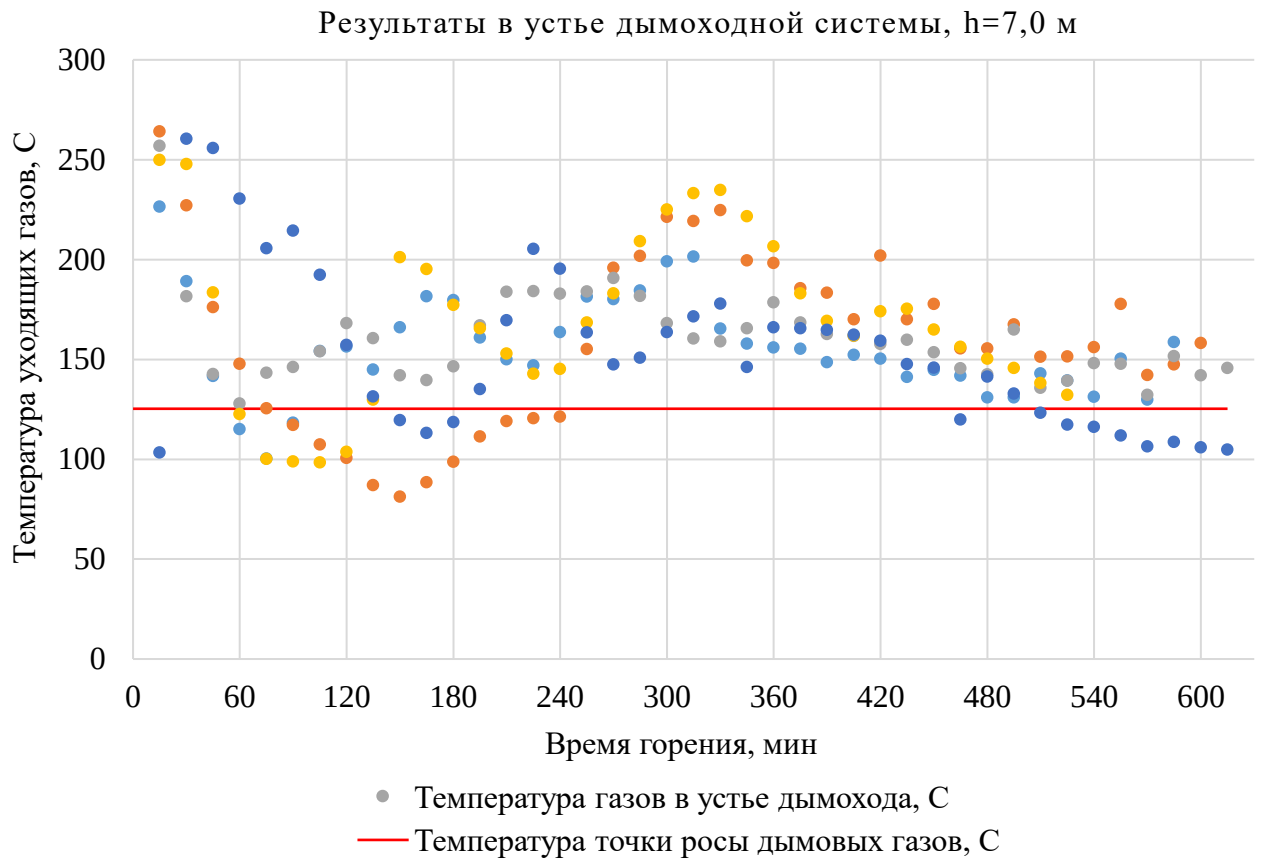


Рисунок 4.10 – График средних температур уходящих газов в устье дымохода

Как показывают построенные графики на рисунках 4.8-4.10 зависимостей температуры уходящих газов по участкам дымоходной системы: на выходе из топочной камеры при $h=0$ м, в середине при $h=3,5$ м и в устье дымохода при $h=7,0$ м, в большинстве рассмотренных случаев показатели дымовых газов находятся выше действительной температуры точки росы. Фрагменты данных экспериментов на завершающий период горения топки с 420 по 615 мин., на основании которых построены графики, приведены в Приложении Л.

По представленным графикам видно, что снижается вероятность возникновения во внутренней поверхности дымоходной системы коррозионных процессов, заметно снижающих надежность и безопасность эксплуатации систем в условиях низких температур. Положительный эффект заключается в увеличении срока службы котельной установки.

Относительно высокие результаты полученных экспериментальных данных по температуре уходящих газов свидетельствующие о повышении

температуры горения в топочной камере в период работы котлоагрегата, располагают к дальнейшему развитию хвостовых конвективных поверхностей нагрева, в целях увеличения тепловой эффективности.

Таким образом, сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований характеристик топочной камеры с предложенной конструкцией экрана-ограничителя, подтвердило адекватность результатов численных вычислений и правильность сделанных в результате экспериментальных исследований выводов.

4.3 Выводы

1. Разработан и изготовлен натурный стенд, работающий в условиях реальной эксплуатации, для проведения натурных исследований котлоагрегата с предлагаемой конструкцией экрана-ограничителя.

2. Для получения теплотехнических характеристик усовершенствованной конструкции котлоагрегата с помощью сертифицированных измерительных приборов произведены замеры в эксплуатационных условиях.

3. График распределения показателей теплопроизводительности котлоагрегата, построенный по результатам натурных измерений, позволяет утверждать, что распределение теплопроизводительности с использованием предлагаемой конструкции экрана-ограничителя имеет более стабильный режим производства тепловой энергии, без резких перепадов и колебаний, присутствующих при работе стандартного заводского котлоагрегата.

4. Установлено, что применение экрана-ограничителя в средней и завершающей стадии работы топки позволило повысить температуру горения и продуктов сгорания и добиться устойчивой работы котлоагрегата.

5. Полученные натурные результаты показывают, что в процессе снижения толщины слоя топлива на завершающей стадии горения показатели температуры дымовых газов имеют повышенные показатели, носят более

упорядоченный характер, без резких перепадов по сравнению с ранее полученными результатами растопки котлоагрегата без измененной конструкции.

6. Сравнение полученной экспериментальной зависимости температур уходящих газов на выходе из топки от стадийности горения топлива в топке с экраном-ограничителем относительно существующей стандартной топочной камеры показывает, что результаты, полученные с применением экрана-ограничителя, позволяют добиться более стабильного режима работы, по сравнению с показателями заводского котла, не допуская снижения температуры уходящих газов до завершения стадии горения.

7. Подтверждено, что надежная работа элементов котлоагрегата будет обеспечиваться при исключении низкотемпературной коррозии поверхностей за счет соблюдения «безопасного» интервала температур. В топке с экраном-ограничителем минимизируется вероятность возникновения на низкотемпературных поверхностях котлоагрегата и его дымоходной системы коррозионных процессов, что позволяет увеличить срок их службы.

8. Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований характеристик топочной камеры с предложенной конструкцией экрана-ограничителя, подтвердило адекватность результатов численных вычислений и правильность сделанных в результате экспериментальных исследований выводов.

5 МЕТОДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ТОПОЧНОЙ КАМЕРЫ. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

5.1 Методы регулирования

Безопасная, надежная и эффективная работа автономной котельной достигается применением тепловых схем с автоматизацией процесса горения и производства тепловой энергии, обеспечивающей необходимые рабочие режимы отопительного оборудования. Системами автоматизации производится защита котлоагрегата от нерациональных режимов эксплуатации, приводящих к низкотемпературной коррозии, потерям теплоносителя, отложениям накипи и др. При регулировании данными системами производится контроль температуры наружного воздуха, температуры горения, температуры теплоносителя в системе отопления и т.д. [144, 145].

Согласно уравнению теплового баланса, количество полезного тепла котлоагрегата рассчитывается по следующей формуле:

$$Q_{пол} = B_t \cdot Q_n^p \cdot \eta_k = G_{под} \cdot c_v \cdot (t_{под} - t_{обр}), \quad (5.1)$$

где B_t – расход топлива, кг/ч; Q_n^p – теплота сгорания топлива, ккал/кг; η_k – коэффициент полезного действия, %; $G_{под}$ – расход воды в подающей линии, кг/ч; c_v – теплоемкость воды при данной температуре теплоносителя; $t_{под}$, $t_{обр}$ – температура подающей и обратной магистрали системы отопления.

В закрытых системах отопления индивидуальных жилых домов с применением водогрейных котлов малой мощности присутствуют минимально допустимые диапазоны изменения расхода теплоносителя, перемена которых может привести к нарушению гидравлического режима, что не допускается при их эксплуатации [146].

Из уравнения 5.1 получается, что при постоянном расходе воды $G_{под} = \text{const}$ и при постоянной температуре воды на входе в котел $t_{обр} = \text{const}$ тепловая нагрузка определяется заданием температуры воды на выходе из котла $t_{под}$, что на твердотопливных котлах малой мощности достигается

требуемым расходом (топлива B_T [147]. Работа системы происходит следующим образом: при изменении параметров температуры воды $t_{вод}$ в контрольно-регулирующий блок поступают сигналы, при реакции на которые посредством дутьевого вентилятора, подающего в топку воздух для горения, происходит управление расходом топлива B_T [148] за счет изменения количества воздуха, участвующего в горении.

При автоматизации объектов теплоэнергетики в зависимости от условий точности принимаются законы регулирования. Законом регулирования является зависимость регулирующего воздействия $\mu_{рег}$ от изменения регулируемого параметра φ . Основными законами регулирования являются ПИ (пропорционально-интегральный) и ПИД (пропорционально-интегрально-дифференциальный) – законы, которые выбирают, когда требуется регулирование без ошибки в статических режимах.

ПИ-закон действует, когда в регулятор введена гибкая обратная связь по положению регулирующего органа $\mu_{рег}$, что можно охарактеризовать уравнением:

$$\mu_{рег} = k_p \cdot \varphi + \frac{k_p}{T_i} \int \varphi \cdot dt, \quad (5.2)$$

где k_p , T_i – параметры настройки ПИ-регулятора.

ПИД-закон формируется вводом в ПИ-регулятор дополнительного импульса по скорости регулируемого параметра и описывается формулой:

$$\mu_{рег} = k_p \cdot \varphi + \frac{k_p}{T_i} \int \varphi \cdot dt + k_p \cdot T_d \cdot \frac{d\varphi}{dt}, \quad (5.3)$$

где k_p , T_i , T_d – параметры настройки ПИД-регулятора, где T_d – время дифференцирования.

Наиболее подходящим при автоматизации котлоагрегатов и систем отопления, связанных с регулированием параметров температуры, расхода воздуха является ПИ-закон.

По результатам натурных экспериментов твердотопливных котлов с верхним способом горения построены графики изменения температуры воды

на подающем трубопроводе, температуры продуктов сгорания на выходе из котла при одном цикле загрузки топлива, представленные на рисунках 5.1 и 5.2.



Рисунок 5.1 – График температуры воды на подающем трубопроводе при одном цикле загрузки твердого топлива

Из графиков в зависимости от показателей температуры на подающем трубопроводе и температуры дымовых газов видно распределение зон процесса горения топлива. Зона «1» – отсутствие горения, очистка и загрузка топлива. Зона «2» растопки выражается увеличенным поддувом воздуха для начала процесса горения и повышенными значениями температур дымовых газов порядка 400-500 °C, средняя длительность данного периода, до установления оптимального процесса горения составляет 30-60 минут. Зона «3», где происходит основной процесс верхнего горения с постоянной подачей воздуха через распределитель и колосниковую решетку. Зона «4» – затухание с характерным снижением температуры на подающем трубопроводе, по длительности составляет порядка 4-6 часов. Продолжительность зоны «4» наблюдается с резким понижением температуры на подающем трубопроводе, что приводит к нарушению комфортных условий и недостаточной теплоотдачи системы отопления.

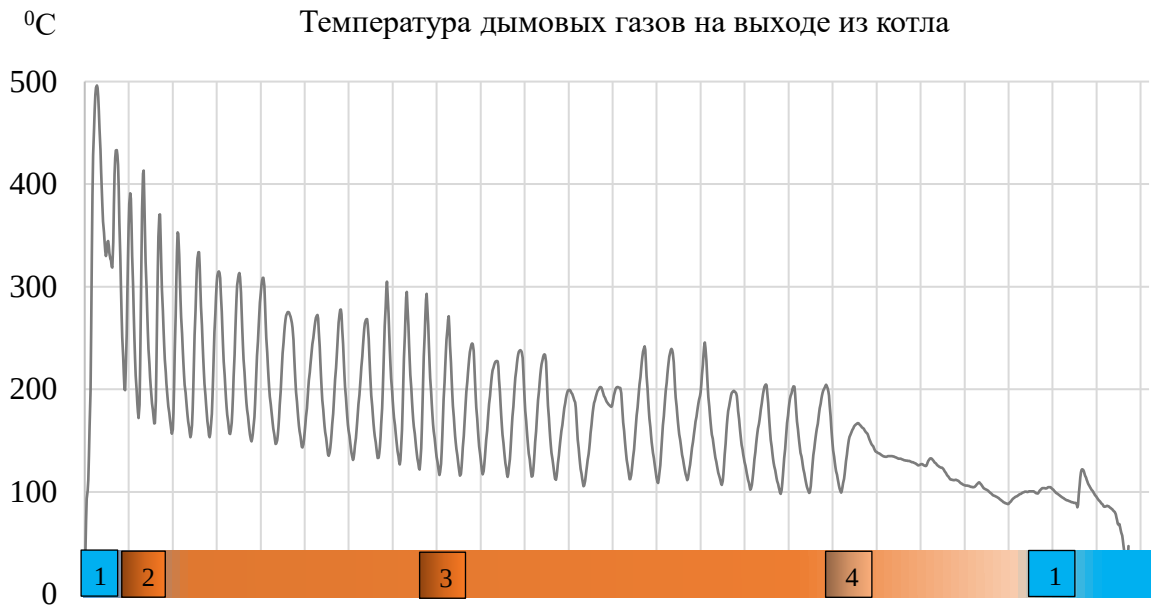


Рисунок 5.2 – График температуры дымовых газов
при 1 цикле загрузки твердого топлива

Для повышения условий комфортности и увеличения полезного времени работы котла, продолжительность зоны «4» следует сократить и увеличить температуру на подающем трубопроводе. Для этого необходимо при достижении зоны «4» перейти с принципа «верхнего» горения на «классический» принцип горения твердого топлива. Для перехода необходимо подать действительное количество воздуха для полного горения. Это обеспечивается за счет увеличения подачи воздуха в топочное пространство котла сверху - через распределитель, снизу - через поддув из колосниковой решетки с ограничением объема топочного пространства.

Для эффективной работы системы данный процесс автоматизируется. Для определения оптимального регулирования работы дутьевого вентилятора необходимо найти значение пропорционального коэффициента регулятора k_p и значение постоянного коэффициента интегрирования функции ПИ-регулятора T_i , что позволит регулировать температуру на подающем трубопроводе T_1 в зависимости от расхода воздуха на горение.

На рисунке 5.3 представлена функциональная схема автоматизации регулирования подачи воздуха в котлах с «верхним» принципом горения.

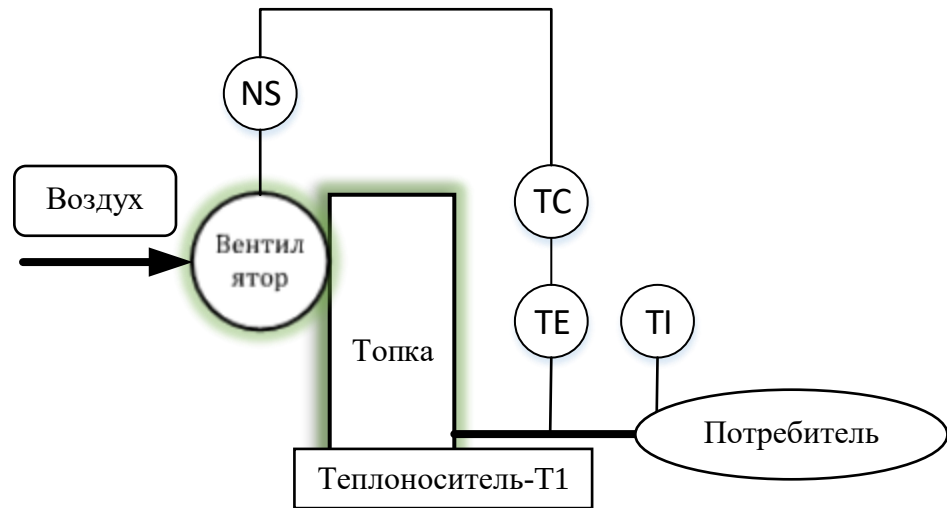


Рисунок 5.3 – Функциональная схема автоматизации регулирования подачи воздуха в котлах с «верхним горением».

Согласно разработанной схеме была выполнена симуляция на программе MATLAB Simulink. На рисунке 5.4 представлена структурная схема автоматизации регулирования.

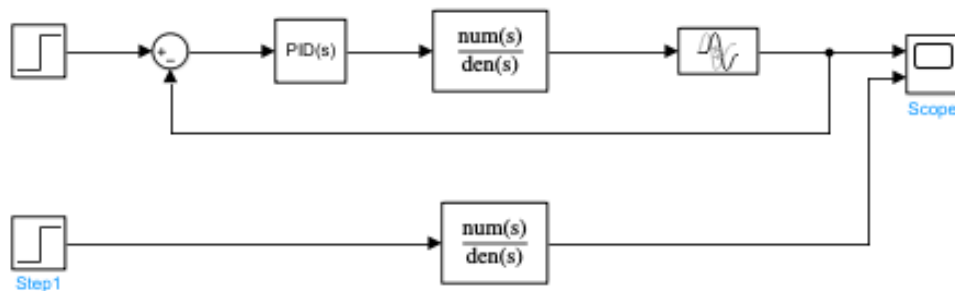


Рисунок 5.4 – Структурная схема автоматизации регулирования

Из экспериментальных данных для придаточной функции объекта были определены пропорциональный коэффициент $k_{об} = 0,39$ с временным периодом $T = 3600$ сек. В итоге получена зависимость, представленная в формуле 5.4:

$$W_{об} = \frac{0,39}{3600 \cdot s + 1}, \quad (5.4)$$

где $W_{об}$ – передаточная функция ПИ - регулятора, s – переменная Лапласа.

В процессе симуляции определили рациональное значение пропорционального коэффициента регулятора $k_p = 3,43$ и значение постоянного

коэффициента интегрирования функции ПИ-регулятора $T_i=0,001904$. Данные коэффициенты определяют регулирование котла с верхним принципом горения. На рисунке 5.5 представлена зависимость изменения разности среднего значения температуры на подающем трубопроводе и изменения температуры T_1 .

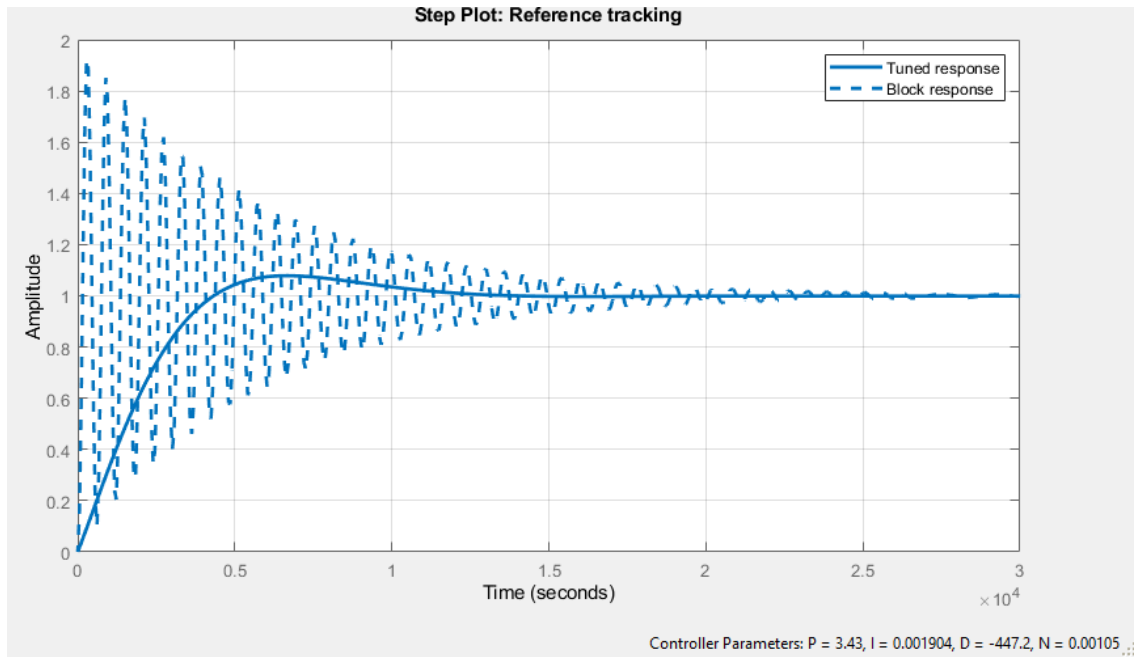


Рисунок 5.5 – Переходная характеристика регулирования разности среднего значения температуры на подающем трубопроводе и изменения колебания T_1 во времени

На рисунке 5.5 видно, что в начале процесса без регулирования наблюдаются активные колебания, далее с учетом рассчитанных коэффициентов k_p , T_i процесс регулирования выравнивается и имеет более плавные линии, что позволяет наиболее эффективно регулировать процесс подачи воздуха в зависимости от понижения температуры T_1 .

Таким образом, температура на подающем трубопроводе устанавливается. Используя данный метод регулирования для каждой номинальной мощности теплогенератора и типа топлива, можно определять соответствующий уровень слоя топлива в топочной камере для регулирования количества воздуха.

5.2 Промышленное внедрение экрана-ограничителя топочной камеры

По результатам проведенных экспериментальных исследований на производственной базе ООО «Якутский котловый завод» налажено изготовление экранов-ограничителей топки для выпускаемой линейки твердотопливных котлов с верхним способом горения. Производственные мощности завода позволяют выпускать 3000 ед. котловой продукции в год, из них 1000 ед. с предлагаемой модифицированной топочной камерой (рисунок 5.6).



Рисунок 5.6 – Установка экранов-ограничителей топки на новые котлы «Liepsnele Arctic» на заводе ООО «ЯКЗ»

При промышленном производстве предлагаемого устройства экрана-ограничителя топочной камеры экономически целесообразно применение доступных стальных горячекатанных листов с маркой стали Ст3пс5/сп5, так как в процессе горения из-за особенностей конструкции котла высокие температуры горения (выше 800 °С) длительный период в топке не поддерживаются. При изготовлении устройства применяется

полуавтоматическая сварка, механическая гильотина и лазерная резка на станке ЧПУ (рисунок 5.7).



Рисунок 5.7 – Формование устройства на механической гильотине

Произведен расчет затрат на материалы для изготовления экрана-ограничителя с шибберным механизмом и рассчитано увеличение итоговой рыночной стоимости твердотопливного котла. Для этого вычислены объёмы используемой стали, сумма произведений полученных объёмов, значений плотности и стоимости соответствующих металлов позволяет определить суммарные расходы на сырьё. Также рассчитан рост затрат на оснащение твердотопливных котлов экранами-ограничителями топки.

Расчет стоимости изготовления предлагаемого изделия для твердотопливных котлов с различной тепловой мощностью представлен в таблице 5.1. Ориентировочные денежные затраты на изготовление 1 экрана-ограничителя составят для котлов мощностью 10-20 кВт – 1200 руб., для 40 кВт – 1800 руб.

Таблица 5.1 – Стоимость изготовления предлагаемого экрана-ограничителя для твердотопливных котлов с различной тепловой мощностью

Тепловая мощность котлоагрегата, кВт	10	20	40
Размеры экрана-ограничителя, D x h, (диаметр x толщина), м	0,375x0,002	0,375x0,002	0,5x0,002
Объем устройства*, м ³	0,0002	0,0002	0,0004
Плотность металла: сталь Ст3пс5/сп5	7850 кг/м ³		
Масса устройства, кг	1,57	1,57	3,14
Цена металла: сталь Ст3пс5/сп5, руб./кг	97,64		
Стоимость материала, руб.	153,3	153,3	306,6
Себестоимость производства с учетом цеховых затрат (лазерная резка, сварочные работы и т.д.), руб.	150,0	150,	150,0
Наценка предприятия с учетом прибыли и других издержек, %	300		
Ориентировочная стоимость устройства, руб.	1200	1200	1800
Примечание: *- объем устройства принят без вычета объема металла на технологические и конструктивные отверстия, так как они являются расходным материалом.			

5.3 Технико-экономическое обоснование

Эффективность реализации проектов модернизации, усовершенствования конструкций характеризуют с экономической точки зрения технические и технологические решения [149]. Оценка эффективности работы оборудования производится для определения потенциала развития, коммерческой выгоды и повышения эксплуатационных характеристик, в том числе надежности и повышения сроков работы. В ходе выполнения расчетов сопоставляются затраты: расходы на приобретение и замену оборудования,

эксплуатационные издержки и возможные выгоды, в том числе экономия издержек благодаря устойчивости предлагаемых технических решений.

При сравнении капитальных вложений в мероприятия с длительным периодом их освоения на оценку эффективности оказывает влияние фактор времени. При анализе эффективности предлагаемого решения по сравнению с типовым вариантом, имеющим меньший срок эксплуатации, необходимо их привести в сопоставимый вид с учетом дополнительных инвестиций для замены новыми фондами с более коротким сроком службы [150, 151, 152].

Для котлоагрегата, имеющего более длительный срок службы (паспортный), вследствие произведенной модернизации с установкой экранно-ограничителя расчет затрат для производства тепловой энергии производится по формуле 5.5:

$$P_1 = K_1 + \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+i)^t}, \text{ руб.} \quad (5.5)$$

где P_1 – приведенные затраты на производство тепловой энергии котлом с более длительным сроком службы, руб.; K_1 – расходы на приобретение оборудования (котел, дымоходная система, комплектующие) с более длительным сроком службы, руб.; C_t – эксплуатационные затраты при функционировании оборудования в соответствующие периоды, руб./год; T – продолжительность функционирования оборудования с более длительным сроком службы; t – период приведения в годах, i – норма рентабельности для приведения равно временных затрат к базисному периоду.

Для теплогенератора, имеющего более короткий срок службы, из-за влияния на металлические элементы котла и дымоходной системы негативных факторов, связанных с процессами кислотной коррозии формула примет вид:

$$P_2 = K_2 + \frac{K_{зам}}{(1+i)^t} + \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+i)^t}, \text{ руб.} \quad (5.6)$$

где P_2 – приведенные затраты на производство тепловой энергии котлом с более коротким сроком службы, руб.; K_2 – расходы на приобретение оборудования (котел, дымоходная система, комплектующие) с более коротким

сроком службы, руб.; $K_{зам}$ – расходы на замену оборудования с более короткими сроками службы, руб.; C_t – эксплуатационные затраты при функционировании оборудования в соответствующие периоды, руб./год; i – норма рентабельности для приведения равно временных затрат к базисному периоду.

Исходя из полученных стоимостных данных предлагаемого устройства, расценок котельного оборудования, дымоходной системы, расходных материалов и комплектующих, представленных на сайте завода-производителя [153], выполнен расчет приведенных затрат для производства тепловой энергии твердотопливными котлами, показанный на рисунке 5.8.

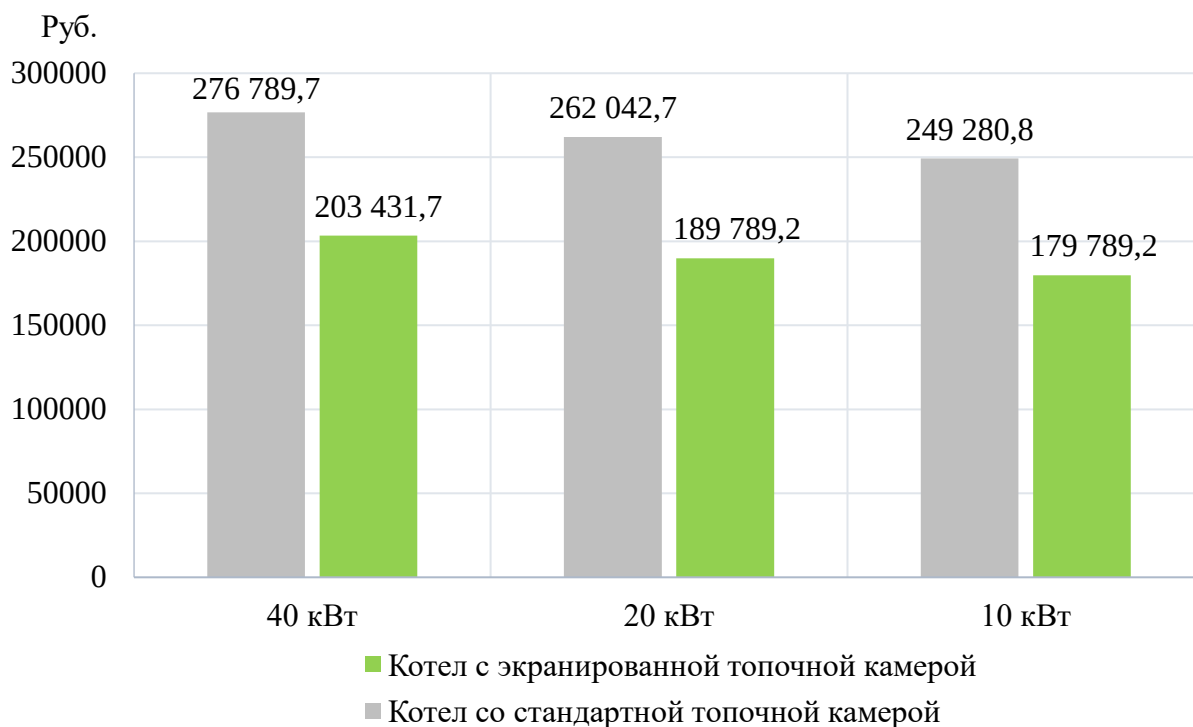


Рисунок 5.8 – Приведенные затраты на производство тепловой энергии котлами различной мощности, руб.

Для расчета выбрана средняя норма рентабельности 10%, эксплуатационные затраты, помимо расходных материалов, учитывали выход из строя дымоходных систем для двух вариантов расчета: паспортный срок службы для $P_1=15$ лет и короткий срок службы для $P_2=13,5$ лет согласно натурным результатам исследований и данным завода-производителя ООО «ЯКЗ».

Одним из показателей оценки качества уровня предлагаемых технических решений является обеспечение надежности работы оборудования. Целесообразным видом анализа является экономический подход с учетом эксплуатационных затрат и срока работы [154]. Изменение приведенных затрат при повышении надежности работы котлоагрегата и его отдельных элементов за счет применения экрана-ограничителя определяется по формуле 5.7:

$$\Pi = \sum_{t=1}^T \frac{(C_1 - C_2)}{(1+i)^t} - (K_2 - K_1), \text{ руб.} \quad (5.7)$$

где C_1 , C_2 – эксплуатационные затраты по исходному и более надежному варианту котлов, руб./год; K_1 , K_2 – инвестиции на приобретение указанных вариантов, руб.; T – срок службы системы, лет.

Расчет экономической эффективности модернизированных котлов от повышения надежности, представлен рисунке 5.9.

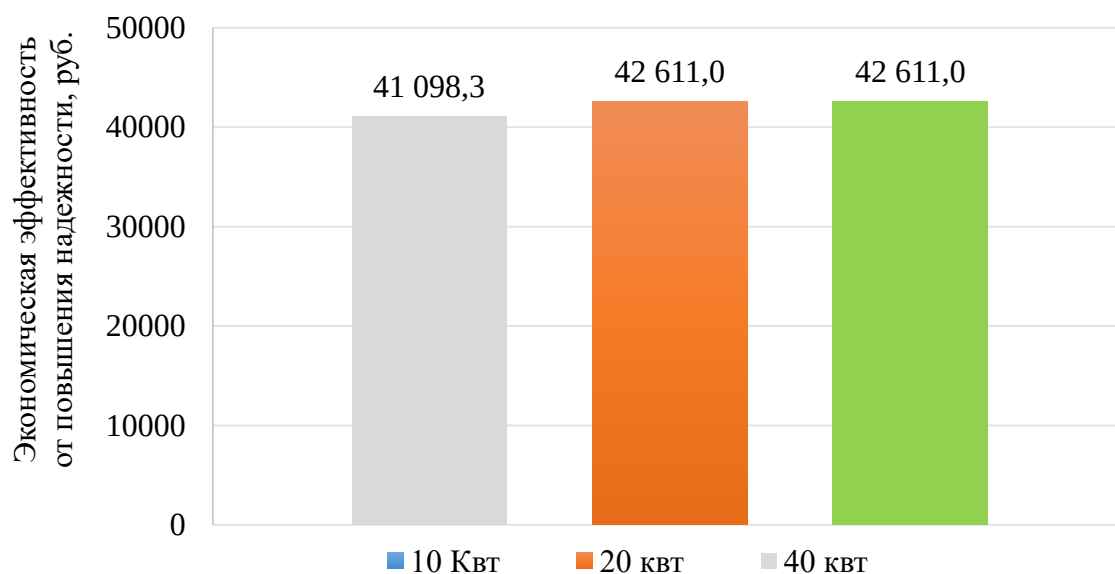


Рисунок 5.9 – Экономическая эффективность от повышения надежности применения модернизированных котлов различной мощности, руб.

На основании полученных данных можно сделать вывод, что определяющее влияние на экономические показатели эффективности применения технологического оборудования в долгосрочном периоде, оказывают расходы, связанные с текущим ремонтом и заменой оборудования

[155], где наилучший эффект достигается путем сокращения издержек и увеличением срока службы оборудования. Полученные результаты показывают большую привлекательность использования методов повышения стабильности работы котлоагрегатов с применением низко затратных способов интенсификации горения топки и предохранения дымоходной системы от разрушающих процессов конденсатообразования.

5.4 Сравнительный анализ применения автономных теплогенераторов для теплоснабжения населенных пунктов

Одной из основных задач при выборе схемы теплоснабжения сельских населенных пунктов является экономия капитальных затрат и снижение сметной стоимости устройства инженерных систем, низкие эксплуатационные затраты и себестоимость генерации тепловой энергии. Решение данной задачи возможно выполнить путем оценки предлагаемых технических решений с существующими технологиями централизованного теплоснабжения.

Расчет эффективности применения систем автономного теплоснабжения населенного пункта с использованием модернизированных котлов с верхним принципом горения выполнен с учетом методики изложенной в [156, 157]. Основным критерием расчета является внедрение автономного источника тепловой генерации с заменой централизованного источника теплоснабжения (котельной на твердом топливе с тепловыми сетями). Основным экономическим показателем является типовой одноэтажный жилой дом, с отапливаемой площадью 100 м². Рассмотрены различные удельные показатели максимальной тепловой нагрузки на отопление и вентиляцию жилых зданий постройки до 1995 года, после 2000 года, после 2010 года и после 2015 года. Расчет выполнен для климатических условий центральной Якутии (г. Якутск).

Для оценки расхода тепловой энергии использована видоизмененная укрупненная формула расчета максимального теплового потока [158]:

$$Q_{o\max} = q_o \cdot A, \text{ Вт.} \quad (5.8)$$

где q_o – укрупненный показатель максимального теплового потока на отопление и вентиляцию 1 м² общей площади, принят согласно [15], для температуры наиболее холодной пятидневки, обеспеченностью 0,92, $t_{нар} = -52$ °С; A – площадь жилого здания, м².

Средний тепловой поток рассчитывается по формуле:

$$Q_{o.cр} = Q_{o\max} \frac{t_i - t_{cp}}{t_i - t_{нар}}, \text{ Вт} \quad (5.9)$$

где t_i – средняя температура внутреннего воздуха отапливаемых зданий, $t_i = 21$ °С; $t_{нар}$ – расчетная температура наиболее холодной пятидневки, обеспеченностью 0,92, $t_{нар} = -52$ °С; t_{cp} – средняя температура наружного воздуха за отопительный период, $t_{cp} = -20,6$ °С.

Формула расчета годового расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию примет вид:

$$Q_{o\text{год}} = 24 \cdot Q_{o.cр} \cdot n, \text{ кВт} \quad (5.10)$$

где n – продолжительность отопительного периода, $n = 252$ суток.

Далее из результатов годового расхода $Q_{o\text{год}}$ рассчитываем удельные расчетные годовые расходы тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания, полученные результаты расчетов сводим в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты укрупненного расчета расхода тепловой энергии для жилых зданий 1-3 этажности по годам постройки

Жилые здания 1-3 этажные, отдельностоящие	Года строительства			
	до 1995	после 2000	после 2010	после 2015
$q_o, \text{ Вт/м}^2$	242	107,8	93,4	85,4
$Q_{o\max}, \text{ Вт}$	24200	10780	9340	8540
$Q_{o.cр}, \text{ Вт}$	13790,68	6143,12	5322,52	4866,63
$Q_{o\text{год}}, \text{ кВт}$	83406,06	37153,61	32190,60	29433,38
$q_{от}, \text{ кВт} \cdot \text{ч}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$	834,06	371,54	321,91	294,33

С использованием данных таблицы 1.1. снижение затрат тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания можно выразить разницей удельной годовой себестоимости тепловой генерации с применением централизованного теплоснабжения и автономного отопления на основе бурого угля из Кангаласского месторождения в следующем виде:

$$\Delta D = q_{om} \cdot 6,7 - q_{om} \cdot 0,76, \text{ тыс. руб./м}^2 \cdot \text{год} \quad (5.11)$$

где 6,7 – рассчитанная средняя стоимость 1 кВт тепловой энергии из централизованных источников по таблице 1.1, руб.; 0,76 – рассчитанная средняя стоимость 1 кВт тепловой энергии на автономном отоплении из местного топлива по таблице 1.1, руб.

Исходными данными для расчета экономической эффективности являются: инвестиции в мероприятия по переводу на автономное теплоснабжение K (закуп котла, сопутствующего оборудования и комплектующих), паспортный срок эксплуатации оборудования $T_{cl}=15$ лет, норма дисконта принимается равной $r=0,10$.

Полный дисконтированный доход за счет экономии энергоресурсов за весь срок эксплуатации автономного теплоснабжения $ДД_{T_{cl}}$, определяется по формуле:

$$ДД_{T_{cl}} = \Delta D \cdot [1 - (1 + r)^{-T_{cl}}] / r, \text{ тыс. руб./м}^2 \quad (5.12)$$

Чистый дисконтированный доход ЧДД, определяется по формуле:

$$ЧДД = ДД_{T_{cl}} - K, \text{ тыс. руб./м}^2 \quad (5.13)$$

Бездисконтный срок окупаемости инвестиций T_0 год, определяется по формуле:

$$T_0 = K / \Delta D, \text{ год} \quad (5.14)$$

где K – инвестиции в мероприятия по переводу на автономное отопление, тыс. руб./м²·год; $K=1,232$; 1,332 и 1,438 для твердотопливных котлов с тепловой мощностью 10, 20 и 40 кВт, соответственно.

Срок окупаемости инвестиций с учетом дисконтирования поступающих доходов за счет экономии ресурсов T_d , год, определяется по формуле:

$$T_d = -\ln[1 - r \cdot T_0] / \ln(1 + r), \text{ год} \quad (5.15)$$

Индекс доходности инвестиций при условии дисконтирования всех поступающих доходов $ИД_d$ в течение срока эксплуатации системы автономного теплоснабжения рассчитывается по формуле:

$$ИД_d = ДД_{T_{cl}} / K \quad (5.16)$$

Полученные результаты критериев экономической эффективности сравнительного расчета сводим в таблицу 5.3.

Таблица 5.3 – Критерии экономической эффективности для жилых зданий 1-3 этажности по годам постройки при переводе на автономное теплоснабжение

Обозначение	Ед. измерения	Года строительства			
		до 1995	после 2000	после 2010	после 2015
ΔD	тыс. руб./м ² ·год	4,95	2,21	1,91	1,75
$ДД_{T_{cl}}$	тыс. руб./м ²	37,68	16,79	14,54	13,30
$ЧДД$	тыс. руб./м ²	36,24	15,45	13,31	12,07
T_0	год	0,29	0,60	0,64	0,70
T_d	год	0,31	0,65	0,70	0,77
$ИД_d$	-	26,2	12,6	11,8	10,8

Рассчитанные сроки окупаемости инвестиций T_0 и T_d при высоком сроке эксплуатации оборудования, выполняют требование по критерию экономической эффективности, согласно формуле:

$$T \cdot r < 1 \quad (5.17)$$

Сравнительный анализ приведенных в таблице 5.3 результатов показал целесообразность инвестиций в мероприятия по переводу зданий с централизованного на автономное теплоснабжение при наличии местного топлива без существенной транспортной наценки. При этом следует отметить, что наиболее существенная экономия при генерации тепловой энергии может быть достигнута только при внедрении комплексных мероприятий и системном анализе эксплуатационных расходов [159].

5.5 Выводы

1. Обоснован метод и предложен способ повышения регулирования теплоотдачи котлоагрегата за счет увеличения подачи воздуха в топочное пространство котла сверху - через распределитель воздуха, снизу - через поддув из колосниковой решетки, с ограничением объема топочного пространства за счет разработанного устройства. Используя обоснованный метод регулирования для каждой номинальной мощности теплогенератора и типа топлива, можно определять соответствующий уровень слоя топлива в топочной камере для перехода типа горения с верхнего принципа на нижнее.

2. По результатам проведенных экспериментальных исследований на производственной базе ООО «Якутский котловой завод» (ТОР «Якутия») налажено изготовление экранов-ограничителей топки для выпускаемой линейки твердотопливных котлов с верхним способом горения. Производственные мощности завода позволяют выпускать 3000 ед. котловой продукции в год, из них 1000 ед. с модифицированной конструкцией топочной камеры.

3. Расчет приведенных затрат для производства тепловой энергии твердотопливными котлами разработанной конструкции показал, что для котлов с экранированной топочной камерой по сравнению с котлами со стандартной топочной камерой снижение затрат составит: при мощности котла 40 кВт – 73 358 руб., 20 кВт – 72 253,5 руб., 10 кВт – 69 491,6 руб.

4. Расчет экономической эффективности модернизированных котлов за счет повышения надежности показал высокую эффективность использования методов повышения стабильности работы котлоагрегатов с применением низко затратных способов интенсификации горения топки и предохранения дымоходной системы от разрушающих процессов конденсатообразования.

5. Рассчитанные сроки окупаемости инвестиций T_0 и T_d при длительном сроке эксплуатации оборудования, выполняют требование по критерию экономической эффективности и подтверждают целесообразность инвестиций

в мероприятия по переводу зданий с централизованного на автономное теплоснабжение с применением котлоагрегатов предложенной конструкции при наличии местного топлива без существенной транспортной наценки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная задача совершенствования методов исследований процессов горения теплогенераторов в условиях Севера и разработки конструктивных предложений для повышения эффективности работы топочной камеры и дымоходной системы твердотопливных котлоагрегатов с верхним принципом горения.

Итоги выполненного исследования

1. На основе изучения состояния коммунального комплекса Республики Саха (Якутия) определено, что высокая себестоимость производства тепловой энергии и значительный уровень износа централизованных систем теплоснабжения в регионе обусловлены сложными климатическими условиями, особенностями транспортной логистики региона и децентрализацией системы теплоснабжения. При нарастающих объемах индивидуального жилищного строительства перспективным направлением развития является применение эффективного инженерного оборудования и современных автономных котлоагрегатов на местном топливе.

2. Выполнен анализ работы котельных агрегатов, используемых в отопительных системах, наиболее частые сбои в работе и случаи аварийных остановок твердотопливных котлов происходят в 70% случаев из-за образования кислотного конденсата, 30% из-за процессов сажеобразования в топочной камере и дымоходной системе. Установлено, что из-за конструктивных особенностей топочной камеры по мере прогорания слоя топлива в среднем ниже 25% от первоначального, увеличивается объем воздушного пространства топки с присутствием избыточного воздуха. Образование избыточного воздуха увеличивает объем топочных газов и потери тепла с уходящими газами, при этом снижая температуру горения, дымовых газов и тепловую эффективность топочной камеры.

3. На основе анализа работы дымоходной системы твердотопливных котлоагрегатов в условиях низких температур разработана комплексное аналитическое выражение, позволяющее подобрать высоту теплоизоляции металлического ствола дымохода в зависимости от мощности котлоагрегата и параметров наружного воздуха в районах строительства. Понижение температуры наружного воздуха повышает соотношение теплоизолированных участков с на 5% до 20% в зависимости от мощности котла. В результате использования эффективных материалов с высокими теплозащитными характеристиками поддерживается безопасный температурный режим в полости дымохода, исключается вероятность образования кислотного конденсата из-за несоответствия тепловой защиты.

4. На основании выполненных натурных исследований, предложена усовершенствованная конструкция топочной камеры котлоагрегата с экранированием, позволяющая ограничивать и регулировать топочный объем в процессе горения (ППМ РФ № 218229). Предложенное устройство используется для поддержания горения при увеличении активного объема топочной камеры в процессе прогорания и уменьшения толщины слоя топлива.

5. Выполнено численное моделирование потоков уходящих газов предложенного экранирования топочной камеры с определением наиболее рациональной конструкции на основании выбранных типоразмеров экрана-ограничителя в зависимости от поперечного сечения зеркала горения котла. В качестве факторов, влияющих на процесс прохождения тепловых потоков, рассмотрена динамика уменьшения толщины слоя топлива и изменение области, ограничивающей активный объем топочной камеры по зонам максимального тепловыделения и площадью ограждений топки. В результате выполненного анализа установлено, что наиболее эффективным является степень экранирования «5/6», диаметром экрана $D=0,5$ м, обусловленное большей площадью контактирования продуктов сгорания со стенками подогревательного контура, за счет снижения скорости и температуры дымовых газов.

6. Выполнены экспериментальные исследования усовершенствованной конструкции теплогенератора и дымоходной системы. Сравнение полученной экспериментальной зависимости температур уходящих газов на выходе из топки от стадийности горения топлива в топке с экраном-ограничителем относительно существующей стандартной топочной камеры показывает, что результаты, полученные с применением экрана-ограничителя, позволяют добиться более стабильного режима работы, по сравнению с показателями заводского котла, не допуская снижения температуры уходящих газов до завершения стадии горения.

7. Расчет приведенных затрат для производства тепловой энергии твердотопливными котлами разработанной конструкции на весь срок эксплуатации показал, что для котлов с экранированной топочной камерой по сравнению с котлами со стандартной топочной камерой снижение затрат составит: при мощности котла 40 кВт – 73 358 руб., 20 кВт – 72 253,5 руб., 10 кВт – 69 491,6 руб. Рассчитанные сроки окупаемости инвестиций T_0 и T_d при длительном сроке эксплуатации оборудования, выполняют требование по критерию экономической эффективности и подтверждают целесообразность инвестиций в мероприятия по переводу зданий с централизованного на автономное теплоснабжение с применением котлоагрегатов предложенной конструкции при наличии местного топлива без существенной транспортной наценки.

Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы могут быть **рекомендованы** для внедрения в деятельность проектных организаций и производственных предприятий котельного оборудования.

Перспективы дальнейшей разработки темы будут направлены на повышение эффективности работы теплогенераторов на твердом топливе, выявлению закономерностей коэффициента теплоотдачи и температуры продуктов сгорания при изменении конструкции и геометрических характеристик экрана-ограничителя. Представляет интерес изучить влияние экранирования топочных камер на процессы лучистого теплообмена, повышения КПД и увеличения длительности горения водогрейных котлов.

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

t	– температура	$^{\circ}\text{C}$
T	– температура	K
α	– коэффициент избытка воздуха	
$T_{\text{ад}}$	– абсолютная теоретическая температура горения	K
B_o	– критерий Больцмана	
$a_{\text{ф}}$	– эффективная степень черноты факела	
$a_{\text{т}}$	– степень черноты топки	
КПД, η ,	– энергоэффективность газовой горелки	$\%$
B_p	– расход твердого топлива при горении	кг/ч
$S_{\text{т}}$,	– эффективная толщина излучаемого слоя в топке	м^2
$F_{\text{ст}}$	– лучевоспринимающая поверхность топки, равная площади топки	м^2
$h_{\text{т}}$	– высота топочной камеры от уровня колосниковой решетки (нижней плоскости) до потолочного экрана	м
M	– коэффициент, учитывающий геометрический характер распределения температур по высоте топочной камеры	
$V_{\text{акт}}$	– активный объем топочной камеры	м^3
$\Psi_{\text{ср}}$	– средний коэффициент эффективности экранов, учитывающий их загрязнение	
$Q_{\text{н}}^p$	– низшая теплотворность топлива	кДж/кг
Q_p^p	– располагаемое тепло	кДж/кг
Q	– мощность тепловыделения источника энергии	кВт
$S_{\text{пр}}$	– приведенное содержание серы в топливе	$\text{кг \% / ккал}$
$A_{\text{пр}}$	– приведенное содержание золы в топливе	$\text{кг \% / ккал}$
$\alpha_{\text{ун}}$	– доля золы топлива в уносе	

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Некрасов А.С., Воронина С.А. Экономические проблемы теплоснабжения России // Экономические и организационные проблемы теплового хозяйства. Открытый семинар «Экономические проблемы энергетического комплекса». Заседание 8. М.: ИНП, 2000.
2. Национальный доклад «Теплоснабжение Российской Федерации. Пути выхода из кризиса. / Кн. 1 и 2. Министерство промышленности, науки и технологий Российской Федерации». Глобальный экологический фонд. Программа развития ООН. М., 2002.
3. Казанбиева, А. Х. Реформа жилищно-коммунального хозяйства в России: анализ и оценка результативности / А. Х. Казанбиева. — Текст: непосредственный // Вестник университета . — 2019. — № 9. — С. 82-90.
4. Федотова, К.А. Основные характеристики и проблемы рынка услуг жилищно-коммунального хозяйства / К. А. Федотова, В. С. Исачкин. — Текст : непосредственный // Инновационная экономика и общество. — 2018. — № 1(19). — С. 70-81.
5. Ключевые проблемы в сфере ЖКХ и пути их решения / Г. В. Астратова, С. В. Астратова, А. В. Вихарева, А. В. Злоказова. — Текст : непосредственный // Экономика и управление. — 2018. — № 3. — С. 3-9.
6. Ненахова, О. А. Особенности функционирования жилищно-коммунального хозяйства и основные направления реформы ЖКХ / О. А. Ненахова. — Текст : непосредственный // Северо-Кавказский юридический вестник . — 2018. — № 2. — С. 87-90.
7. Никулина, О. М. Анализ основных проблем инновационного развития ЖКХ региона / О. М. Никулина, Г. З. Акимова. — Текст : непосредственный // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. — 2017. — № 12. — С. 226-232.
8. Саввина, Н.В. Актуальные проблемы реализации федерального закона №261 от 23.11.2009 г. в Российской Федерации в части теплоснабжения / Н.В. Саввина, Е.Ю. Артюшевская. — Текст : непосредственный // Известия

высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2017. – №19(3-4). – С. 31-40.

9. Региональные проблемы теплоэнергетики : учебное пособие / В. М. Лебедев, С. В. Приходько, В. К. Гаак [и др.] ; под общей редакцией В. М. Лебедева. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 136 с. — ISBN 978-5-8114-3694-1. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/206825> (дата обращения: 15.06.2023). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

10. Государственная программа Республики Саха (Якутия) "Обеспечение качественным жильем и повышение качества жилищно-коммунальных услуг на 2020 – 2024 годы. Указ Главы РС (Я) от 13.12.2019 №897.

11. О внесении изменений в постановление Правления ГКЦ РС (Я) от 12.12.2018 г. №139 «Об установлении тарифов на тепловую энергию (мощность), поставляемую ГУП «ЖКХ РС (Я)» потребителям Республики Саха (Якутия) на 2019-2023 годы. Постановление Правления ГКЦ РС (Я) №243 от 14 декабря 2020 года.

12. О внесении изменений в постановление Правления ГКЦ РС (Я) от 14.12.2018 г. № 158 "Об установлении тарифов на тепловую энергию (мощность), поставляемую АО "Теплоэнергосервис" потребителям Республики Саха (Якутия) в 2019-2023 гг. Постановление Правления ГКЦ РС (Я) №225 от 09 декабря 2020 года.

13. О корректировке долгосрочных тарифов на тепловую энергию, ранее установленных на долгосрочный период 2019-2023 годы ПАО «Якутскэнерго», на 2021 год. Постановление Правления ГКЦ РС (Я) №284 от 17 декабря 2020 года.

14. О льготных тарифах на сжиженный газ, электрическую и тепловую энергию (мощность), водоснабжение и водоотведение. Закон Республики Саха (Якутия) от 05 декабря 2013 г. N 1235-3 N 25-V.

15. СП 124. 13330.2012. Тепловые сети: актуализированная версия СНиП 41-02.2003. – М.: Минрегионразвития, 2012. – 78 с.

16. Об утверждении категорий зонирования территории РС (Я) на уровне населенных пунктов с учетом развития систем газоснабжения, электроснабжения и теплоснабжения. Распоряжение Правительства РС (Я) от 04 декабря 2017 г. № 1516-р.

17. Безопасность и надежность технических систем : учебное пособие / Л. Н. Александровская, И. З. Аронов, В. И. Круглов [и др.]. — Москва : Логос, 2010. — 376 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/126109> (дата обращения: 15.06.2023). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

18. Байтасов, Р. Р. Основы энергосбережения : учебное пособие для вузов / Р. Р. Байтасов. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 188 с. — ISBN 978-5-8114-8789-9. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/180865> (дата обращения: 15.06.2023). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

19. Толстова, Ю. И. Централизованное теплоснабжение / Ю. И. Толстова. — 3-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2023. — 88 с. — ISBN 978-5-507-46695-5. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/316976> (дата обращения: 15.06.2023). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

20. Беляев, В. С. Энергоэффективность и теплозащита зданий / Беляев В. С. , Граник Ю. Г. , Матросов Ю. А. - Москва : Издательство АСВ, 2016. - 400 с. - ISBN 978-5-93093-838-8. - Текст : электронный // ЭБС "Консультант студента" : [сайт]. - URL : <https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785930938388.html> (дата обращения: 15.06.2023). - Режим доступа : по подписке.

21. Хаванов, П. А. Развитие, перспективы и состояние децентрализованных систем теплоснабжения в РФ / П. А. Хаванов. — Текст : непосредственный // Вестник МГСУ. — 2012. — № 11. — С. 219-226.

22. Сибикин, М. Ю. Технология энергосбережения : учебник / М. Ю. Сибикин, Ю. Д. Сибикин. - 3-е изд., перераб. и доп. - М. : Форум, 2012. - 352 с.

23. Зайцев, О. Н. Критерии оценки и анализа территории теплоснабжения для проведения инженерного районирования / О. Н. Зайцев. — Текст : непосредственный // Строительство и техногенная безопасность . — 2016. — № 5 (57). — С. 43-48.

24. Суслов, Д. Ю. Исследование распределения газозооной смеси в корпусе инжекционной горелки с тепловым рассекателем / Д. Ю. Суслов, Р. С. Рамазанов, И. В. Лобанов. — Текст : непосредственный // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова . — 2019. — № 10. — С. 60-65.

25. Практическое использование альтернативных энергетических ресурсов в православных храмах / А. Г. Кочев, М. М. Соколов, Е. А. Кочева, А. А. Федотов. — Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Строительство. — 2019. — № 7. — С. 78-85.

26. Файст, В. Основные положения по проектированию пассивных домов [Текст]/ В. Файст. - М.: АСВ, 2011. - 148 с

27. Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на основе принципов государственно-частного партнерства : монография / А.Э. Березин [и др.].. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2016. — 214 с. — ISBN 978-5-7782-3100-9. — Текст : электронный // IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/91596.html> (дата обращения: 15.06.2023). — Режим доступа: для авториз. пользователей

28. Федеральный закон №261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» (с изменениями на 28 апреля 2023 г.). Закон РФ – 2009.

29. Интенсификация процесса сжигания природного газа в системах газоснабжения ЖКХ / Л. А. Куцев, Д. Ю. Суслов, Р. С. Рамазанов, М. А.

Швыдкая. — Текст : непосредственный // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова . — 2017. — № 11. — С. 95-99.

30. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года. Указ Президента РФ от 26.10.2020 года №645.

31. Децентрализованные системы водяного отопления индивидуальных жилых зданий [Текст]: Учебно – методическое пособие для студентов очной и заочной форм обучения по направлениям 08.03.01 Строительство и 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника, обучающихся в Нижегородском государственном архитектурно - строительном университете; сост. Г.М. Климов. – Ниж. Новгород: ННГАСУ, 2016. – 58 с.: ил.

32. СП 373. 1325800.2018. Источники теплоснабжения автономные: Правила проектирования. – М.: Минстрой России, 2018. – 36 с.

33. Энергетическая безопасность России / В.В. Бушуев, Н.И. Воропай, А.М. Мастепанов, Ю.К. Шафраник и др. / Новосибирск: Наука. Сиб. изд. фирма РАН, 1998. 302 с.

34. Радченко, С. А. Теплотехника и энергетические машины: учебное пособие / С. А. Радченко, А. Н. Сергеев. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. – 630 с.

35. Гусев, Ю.Л. Основы проектирования котельных установок: учебное пособие / Ю.Л. Гусев. – 2-е изд. – М.: Стройиздат. 1973. – 248 с.

36. Щеголев, М.М. Котельные установки: учебник для вузов / М.М. Щеголев, Ю.Л. Гусев, М.С. Иванова. – 2-е изд. - М.: Стройиздат. 1972. – 384 с.

37. Мансуров Р.Ш. Тепловой расчет теплогенератора (водогрейного котла) : методические указания / Мансуров Р.Ш., Пикулев И.А.. — Оренбург : Оренбургский государственный университет, ЭБС АСВ, 2006. — 42 с. — Текст : электронный // IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/21681.html> (дата обращения: 15.06.2023). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

38. СП 89.13330.2016 Котельные установки. Актуализированная редакция СНиП II-35-76. – СТАНДАРТИНФОРМ, 2017. - 78 с.

39. Варес, В. Справочник потребителя биотоплива / В. Варес. – Таллин: Изд-во Таллиннского технического университета, 2005. – 183 с.
40. Хаванов, П.А. Теплогенераторы для автономного теплоснабжения на твердом топливе / П.А. Хаванов, А.С. Чуленев // АВОК. – 2017. – №4. – С. 30-39.
41. Фокин, В.М. Теплогенерирующие установки систем теплоснабжения / В.М. Фокин. М.: «Издательство Машиностроение-1», 2006. – 240 с.
42. Слободчиков, Е. Г. Энергоэффективность индивидуальных домов на основе пенобетона в условиях Якутии / Е. Г. Слободчиков, А. Е. Местников. — Текст : непосредственный // Жилищное строительство . — 2016. — № 7. — С. 29-32.
43. Зайцев, О. Н. Совершенствование систем микроклимата в сооружениях полуоткрытого типа / О. Н. Зайцев, Т. В. Дихтярь, А. А. Циплина. — Текст : непосредственный // Строительство и техногенная безопасность . — 2018. — № 11 (63). — С. 187-193.
44. Пухкал, В.А. Исследование инерционности отопительных приборов / В.А. Пухкал // Современные проблемы науки и образования – 2014. – №5. С. 269.
45. Грудзинский, М.М. Отопительно-вентиляционные системы зданий повышенной этажности / М.М. Грудзинский, В.И. Ливчак, М.Я. Поз. – М.: Стройиздат, 1982. – 256 с.
46. Богословский, В. Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха) / В.Н. Богословский.; Изд. 2-е. – М.: Высшая школа, 1982. – 415 с.
47. Табунщиков, Ю.А., Бродач М.М. Научные основы проектирования энергоэффективных зданий / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач. М., АВОК, №1, 1998.
48. Табунщиков, Ю. А. Оценка годового расхода энергии на отопление и охлаждение зданий / Ю. А. Табунщиков. — Текст :

непосредственный // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. — 2013. — № 3. — С. 56-63.

49. Сканави, А.Н. Отопление / А.Н. Сканави, Л.М. Махов. - М.: Изд. АСВ, 2008. - 562 с.

50. Самарин, О. Д. Теплофизика. Энергосбережение. Энергоэффективность / О. Д. Самарин. – Москва : Издательство Ассоциации строительных вузов (АСВ), 2009. – 296 с. : схем., табл. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=273410> (дата обращения: 15.06.2023). – Библиогр. в кн. – ISBN 978-5-93093-665-0. – Текст : электронный.

51. Самарин, О. Д. Принципы расчета нестационарного теплового режима помещения, обслуживаемого автоматизированными системами обеспечения микроклимата / О. Д. Самарин, С. С. Азивская. — Текст : непосредственный // Известия вузов. Строительство. — 2011. — № 1. — С. 59-62.

52. Малявина, Е.Г. Теплотери здания. Справочное пособие / Е.Г. Малявина. – 2-е изд., испр. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2011. – 144 с.

53. Минко, В.А. Анализ состояния микроклимата в учебных аудиториях БГТУ им. В.Г. Шухова / В.А. Минко, Т.Н. Ильина, И.В. Дивиченко // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2009. – № 3. – С. 83-88.

54. Еремкин, А.И. Тепловой режим зданий / А.И. Еремкин, Т.И. Королева. – М.: Издательство АСВ, 2000. – 368 с.

55. Игонин, В.И. Тепловой режим зданий и сооружений: учебное пособие / В.И. Игонин, Д.Ф. Карпов, М.В. Павлов – Вологда: ВоГТУ, 2010. – 103 с.

56. Карауш, С.А. Теплогенерирующие установки систем теплоснабжения: Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по

направлению «Строительство»/ А.Н. Хуторной. - Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2003.- 161 с.

57. Бурьянов, И. А. Определение основных свойств пылевых частиц заточного участка / И. А. Бурьянов, К. И. Логачев, В. А. Уваров. — Текст : непосредственный // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова . — 2020. — № 10. — С. 23-31.

58. Экологические проблемы производства прокатных валков / А. А. Аверков, О. А. Аверкова, Ю. А. Дорошенко, К. И. Логачев. — Текст : непосредственный // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова . — 2009. — № 3. — С. 172-176.

59. Иванов, В.Н. Энергоэффективность газовых теплогенераторов малой мощности в условиях Крайнего Севера: учебное пособие / В.Н. Иванов, А.В. Иванова. – Якутск.: Издательский дом СВФУ, 2019. – 376 с.

60. О надежности эксплуатации газовых котлов малой мощности в условиях Северо-Востока России / В. Н. Иванов, Иванова, В. А, В. С. Тихонов. — Текст : непосредственный // Промышленное и гражданское строительство. — 2013. — № 8. — С. 51-53.

61. Лицкевич, В.К. Жилище и климат / В.К. Лицкевич. - М.: Стройиздат, 1984. с.

62. Михеева, А.П. Проектирование зданий и застройки населенных мест с учетом климата и энергосбережения: учеб. пособие / А.П. Михеева, А.М.Береговой, Л.Н. Петрянина. - Изд. 3-е, перераб и доп. - М.: АСВ, 2002. – 192 с.

63. Janusz A. Lasek. The influence of primary measured parameters and electricity consumption in automatic solid fuels-fired boilers on the seasonal space heating energy efficiency. Fuel, 2022, Volume 313, Article 122689, doi: 10.1016/j.fuel.2021.122689

64. Viktor Stenberg, Magnus Rydén, Fredrik Lind. Evaluation of bed-to-tube heat transfer in a fluidized bed heat exchanger in a 75 MWth CFB boiler for

municipal solid waste fuels. *Fuel*, 2023, Volume 339, Article 127375, doi: 10.1016/j.fuel.2022.127375

65. Oguzhan Erbas. Investigation of factors affecting thermal performance in a coal - fired boiler and determination of thermal losses by energy balance method. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2021, vol. 26, article 101047, doi: 10.1016/j.csite.2021.101047

66. Gianluca Caposciutti, Federica Barontini, Marco Antonelli, Leonardo Tognotti, Umberto Desideri. Experimental investigation on the air excess and air displacement influence on early stage and complete combustion gaseous emissions of a small scale fixed bed biomass boiler. *Applied Energy*, 2018, vol. 216, pp. 576-587, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.02.125

67. Yanhong Wang, Xiaoyu Li, Tianqin Mao, Pengfei Hu, Xingcan Li, Guan Wang. Mechanism modeling of optimal excess air coefficient for operating in coal fired boiler. *Energy*, 2022, vol. 261, part A, article 125128, doi: 10.1016/j.energy.2022.125128

68. Цэен-Ойдов, Ж. Зуухны тохооромжийн туршилт, зугшруулэлт / Ж. Цэен-Ойдов – Улаанбаатар: Соёмбо принтинг ХХК-д хэвлэв, 2015. – 41 х.х

69. Кнорре, Г.Ф. Теория топочных процессов / Г.Ф. Кнорре, К.М. Арефьев, А.Г. Блох и др. – М.: Изд. Энергия, 1966. - 490 с.

70. Хаванов, П. А. Общие вопросы конструирования теплогенераторов малой мощности / П. А. Хаванов, А. С. Чуленев // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 5. – С. 315-318.

71. Повышение эффективности возврата уноса в котлах со слоевыми топками / С. Д. Горшенин, С. И. Шувалов, Е. В. Зиновьева, И. А. Кокулин // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2022. – № 5. – С. 18-23. – DOI 10.17588/2072-2672.2022.5.018-023.

72. Ицкович, А. М. Котельные установки малой мощности : производственно-практическое издание / А.М. Ицкович. – М.: Машгиз, 1958. – 226 с.

73. Перескокова, С. А. Повышение эффективности конструкции твердотопливных котлов со слоевыми топками / С. А. Перескокова, Н. С. Копылова, А. Ю. Яковлева // Вестник гражданских инженеров. – 2014. – № 6(47). – С. 164-168.

74. Белкин, А. П. Повышение энергоэффективности твердотопливных водогрейных котлов малой мощности установкой подвижной колосниковой решетки / А. П. Белкин, П. С. Хужаев // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2017. – Т. 3, № 4. – С. 51-64. – DOI 10.21684/2411-7978-2017-3-4-51-64.

75. Желтухина, Е. С. Численные исследования сжигания газа и твердого топлива в топках бытового и энергетического котлов / Е. С. Желтухина, М. Г. Зиганшин, М. В. Павлова // Промышленная энергетика. – 2021. – № 2. – С. 41-47. – DOI 10.34831/EP.2021.25.57.006.

76. Моделирование топочных процессов в современных теплогенераторах малой и средней производительности / М. Р. Валеев, А. А. Дюдина, А. Р. Фатихов, М. Г. Зиганшин // Надежность и безопасность энергетики. – 2019. – Т. 12, № 2. – С. 126-134. – DOI 10.24223/1999-5555-2019-12-2-126-134.

77. Желтухина, Е. С. Моделирование сжигания топлива в котлоагрегатах большой и малой производительности для понижения токсичности продуктов горения / Е. С. Желтухина, М. В. Павлова, М. Г. Зиганшин // Надежность и безопасность энергетики. – 2020. – Т. 13, № 3. – С. 188-196. – DOI 10.24223/1999-5555-2020-13-3-188-196.

78. Воликов А.Н. Теплогенерирующие установки (часть 1). Котельная установка – схемы и элементы. Топливо. Основы теории горения и теплового расчета котлов: учебное пособие для студентов специальности 270109 – теплогазоснабжение и вентиляция (Изд. испр. и дополн.) / А.Н. Воликов, В.И. Шаврин. – СПб.: СПбГАСУ, 2009. – 224 с.

79. Удовенко, В.Е. Автономное теплоснабжение. Системы дымоудаления: Справочное пособие / В.Е. Удовенко, Е.Х. Китайцева, К.Е. Паргунькин; Под общей ред. Е.В.Китайцевой. – М.: ЗАО «Полимергаз», 2006. - 280 с.
80. Любимова, Н. Г. Варианты децентрализации теплоснабжения зданий / Н. Г. Любимова // Вестник университета. – 2012. – № 2. – С. 165-171.
81. Технический паспорт и инструкция по монтажу котла «Liepsnele», - Vakaro Rasa, 2013.
82. Полонский, В. М. Автономное теплоснабжение: учебное пособие / В. М. Полонский, Г. И. Титов, А. В. Полонский. – Москва.: Издательство Ассоциации строительных вузов (АСВ), 2007. – 152 с.
83. Андреев, С. А. Энергонезависимое поддержание уровня теплоносителя в автономных отопительных системах / С. А. Андреев, Д. В. Шибаров. — Текст : непосредственный // Современные материалы, техника и технологии. — 2015. — № 3. — С. 17-23.
84. Патент РФ № 187524. МПК F23B 101/00 F24H 1/24 F23B 60/00 Универсальный отопительный аппарат верхнего и нижнего горения / Жирков И.П., Слободчиков Е.Г., Тимофеев П.С. // №2018127787; заявл. 27.07.2018; опубл. 11.03.2019, Бюл. №8.
85. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). Издание третье, переработанное и дополненное – СПб.: НПО ЦКТИ, 1998. - 257 с.
86. Гаврилова, М.К. Климаты холодных регионов земли: учебное пособие. / М.К. Гаврилова. – Якутск: Изд. СО РАН, 1998. - 206 с.
87. СП 131.13330.2020 Свод правил. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99* – Москва: ГУП ЦПП, 2021. – 113 с.
88. Швер, Ц. А. Климат Якутска / Ц.А. Швер, С.А. Изюменко – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 246 с.

89. Степанов, А.В. Жесткость климата и надежность систем теплоснабжения / А.В. Степанов, В.С. Игнатьев // Известия Самарского научного центра РАН. 2012.- Том 14. - №4(5). –С. 1300-1302.

90. Малявина, Е.Г. Строительная климатология. Учебно-методическое пособие / Е.Г. Малявина, О.Ю. Маликова, А.А. Фролова. – Москва: Издательство МИСИ – МГСУ, 2020 – 29 с.

91. Гагарин, В.Г. Учет теплотехнических неоднородностей ограждений при определении тепловой нагрузки на систему отопления здания / В.Г. Гагарин, А.Ю. Неклюдов // Жилищное строительство – 2014. - №6. – С. 3-7.

92. Современные способы интенсификации работы кожухотрубных теплообменных аппаратов систем теплоснабжения / Л. А. Кущев, Н. Ю. Никулин, Ю. Г. Овсянников, А. И. Алифанова. — Текст : непосредственный // Технические науки. Строительство. — 2019. — № 9. — С. 82-90.

93. Слободчиков, Е.Г. К проблеме организации воздухообмена в многоквартирных жилых домах в условиях Крайнего Севера / Е.Г. Слободчиков, Л.М. Баишева // Инновации и инвестиции – 2018. – №12. –С. 217-221.

94. Гаврилова, М. К. Климат центральной Якутии / М.К. Гаврилова. - Якутск: Якутское кн. изд-во, 1973. - 118 с.

95. Корнилов, Т. А. Эффективность использования систем солнечной генерации для инженерного обеспечения жилых домов в климатических условиях центральной Якутии / Т. А. Корнилов, Е. Г. Слободчиков, Д. Н. Аммосов. — Текст : непосредственный // Жилищное строительство . — 2016. — № 1-2. — С. 10-14.

96. Богословский, В. Н. Тепловой режим зданий / В.Н. Богословский - М.: Стройиздат, 1979. - 248с.

97. Полежаев, Ю.В. Тепловая защита [Текст] / Ю. В. Полежаев, Ф. Б. Юревич ; Под ред. А. В. Лыкова. - Москва : Энергия, 1976. - 391 с.

98. СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003 – СТАНДАРТИНФОРМ, 2012. - 6 с.
99. Дворецкий, А.Т. Карта изолиний градусо-суток отопительного периода для территории Российской Федерации / А.Т. Дворецкий, Т.В. Денисова, К.Н. Клевец // Строительство и техногенная безопасность – 2016. – №4 (56). – С. 14-18.
100. Гагарин, В.Г. Методы экономического анализа повышения уровня теплозащиты ограждающих конструкций зданий. Часть 2 / В.Г. Гагарин // АВОК. – 2009. – №2. – С. 14.
101. Гагарин, В.Г. О нормировании тепловой защиты зданий в Китае / В.Г. Гагарин, Чжоу Чжибо // Жилищное строительство – 2015. – №7. – С. 18-22.
102. Крайнов, Д.В. Относительное энергосбережение при изменении уровня тепловой защиты зданий / Д.В. Крайнов // Жилищное строительство – 2016. – №7. – С. 6-10.
103. СП 41-104-2000. Проектирование автономных источников теплоснабжения. - М.: Госстрой России ФГУП ЦПП, 2001. - 25 с.
104. Хаванов, П.А. Источники теплоты автономных систем теплоснабжения: монография / П.А. Хаванов. – М.: МГСУ, 2014. – 208 с.
105. Хаванов, П.А. Некоторые ошибки при разработке тепломеханической части автономных источников теплоты / П.А. Хаванов, К.П. Барынин // АВОК. – 2004. – №8. – С 54-57.
106. Местников, А.Е. Северный дом: надежность, экономичность / Местников А.Е., - Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2006. – 152 с.
107. Сибикин, Ю.Д. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: учеб.пособие / Ю.Д. Сибикин.; Изд. 5-е. –М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 304 с.
108. Мазурова, О.К. Автономное теплоснабжение: учебное пособие / О.К. Мазурова, Н.В. Кузнецов, А.Н. Бутенко – Ростов-на-Дону: РГСУ, 2011. – 143 с.

109. Делягин Г.Н., Лебедев В.И., Пермяков Б.А., Хаванов П.А. Теплогенерирующие установки: Учеб. для вузов. / Г.Н. Делягин, В.И. Лебедев, Б.А. Пермяков, П.А. Хаванов – М.: ООО «ИД Бастет», 2010. 624 с.
110. Хаванов, П.А. Источники теплоты автономных систем теплоснабжения / П.А. Хаванов // АВОК. – 2002. - №1. – С. 14-15
111. Роддатис, К.Ф. Котельные установки. Учебное пособие / К.Ф. Роддатис – М.: Энергия, 1977. – 423 с.
112. Дымовые трубы / А.М. Ельшин, М.Н. Ижорин, В.С. Жолудов, Е.Г. Овчаренко; Под ред. С.В. Сатьянова. М.: Стройиздат, 2001.-296 с.
113. Герасимова, Н.П. Золовой износ поверхностей нагрева котлоагрегатов / Н.П. Герасимова // Вестник Иркутского государственного технического университета – 2020. – №3 (152). – С. 596-605.
114. Слободчиков, Е.Г. Исследование работы твердотопливных теплогенераторов малой мощности в климатических условиях Севера / Е.Г. Слободчиков // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова – 2022. – №10. – С. 49-56.
115. Шишков И.А., Лебедев В.Г., Беляев Д.С. Дымовые трубы энергетических установок. М.: Энергия, - 1976, - 176 с.
116. Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Смирнова О.С. Топливо и теория горения. Ч.1. Топливо: учеб. пособие / В.Н. Белоусов, С.Н. Смородин, О.С. Смирнова – СПб.: СПбГТУРП, 2011. 84 с.
117. Гаврильева, Н.К. Мониторинг земельных ресурсов Республики Саха (Якутия) / Н.К. Гаврильева, Ф.В. Николаева, А.А. Старостина, Н.И. Гоголева // Московский экономический журнал – 2020. - №7. – С. 45-57.
118. Перлов, И.С. Эксплуатация котельных установок / И.С. Перлов – М.: Хлебоиздат, 1957. – 160 с.
119. Петрова, Л.А. Получение бытовых топливных брикетов с использованием нефтяных связующих / Л.А. Петрова, В.Г. Латышев, О.Н. Буренина // Электронный научный журнал нефтегазовое дело – 2007. - №1. –С. 49.

120. Портола, В.А. Расчет процессов горения и взрыва: учебное пособие / В.А. Портола, Н.Ю. Луговцева, Е.С. Торосян – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 108 с.

121. Полежаев, Ю.В. Законы горения / Ю.В. Полежаев – М.: Энергомаш, 2006. - 352 с.

122. Полежаев, Ю.В. Методы интенсификации горения газообразных топлив / Ю.В. Полежаев // Труды пятой Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Т.1. Общие проблемные доклады. Доклады на круглых столах. - М.: Издательский дом МЭИ, 2010. - С. 52-54.

123. Климов, Г.М.: Материальный и тепловой балансы котельной установки. Методическая разработка к практическим занятиям, курсовому и дипломному проектированию, для студентов очной и заочной форм обучения специальностей: 140104 «ПТ», 270109 «ТГВ», 280101 «БЖД в техносфере» / Г.М. Климов, М.Г. Климов – Ниж. Новгород, ННГАСУ, 2010. – 54 с.: ил.

124. Михайловский, В.П.: Расчеты горения топлива, температурных полей и тепловых установок технологии бетонных и железобетонных изделий: учебное пособие / В.П. Михайловский, Э.Н.Мартемьянова, В.В. Ушаков; под ред. В.П. Михайловского. – Омск: СибАДИ, 2011. – 262 с.

125. Феткуллов, М.Р. Автономные системы теплоснабжения: учебно-практическое пособие / М.Р. Феткуллов – Ульяновск: УлГТУ, 2011. – 158 с.

126. Сологаев, В.И. Автономное теплоснабжение: учебное пособие / В.И. Сологаев – Омск: СибАДИ, 2017. – 50 с.

127. Иванова, А.В. Математическое моделирование систем дымоудаления газовых котлов малой мощности в условиях низких температур / А.В. Иванова // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова – 2013. – №4. – С. 46-54.

128. Кудинов, А. А. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина – М. : Машиностроение, 2011. — 374 с., ил. 117

129. Шойхет, Б.М. Тепловая изоляция металлических стволов дымовых труб / Б.М. Шойхет, Л.В. Ставрицкая, Н.И. Бобкова // Энергосбережение – 2001. - №5. – С. 60-65.

130. Варнашов, В.В. Расчетные исследования режимов работы кирпичных дымовых труб в условиях эксплуатации / В.В. Варнашов, А.А. Киселев, В.С. Гребнов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета – 2016. - №1 (152). С. 18-26.

131. Ведрученко, В.Р. Особенности температурного режима дымовой трубы блочной автоматизированной котельной, работающей на природном газе / В.Р. Ведрученко, Н.В. Жданов // Известия Транссиба - 2010. - № 4 (4). – С. 40-43.

132. Любовь, В.К. Исследование эффективности сжигания дров в стальных водогрейных котлах / В.К. Любовь, А.Н. Попов, О.Д. Мюллер // Вестник Череповецкого государственного университета – 2013. - № 2-2 (48). – С. 16-21.

133. СП 346.1325800.2017. Свод правил. Системы газоздушных трактов котельных установок мощностью до 150 МВт – Москва: Стандартинформ, 2018. – 22 с.

134. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева – М.: «Энергия», 1977 – 344 с.

135. Кутателадзе С.С, Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче / С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанский. – М – Л.: Госэнергоиздат, 1958. - 414 с.

136. Патент РФ № 218229. МПК F23B 101/00 F24H 1/24 Отопительный аппарат верхнего и нижнего горения с модифицированной топочной камерой / Жирков И.П., Прокопьев В.В., Слободчиков Е.Г., Тимофеев П.С. // № 2023105710; заявл. 13.03.2023; опубл. 17.05.2023, Бюл. №14.

137. FloEFD for NX Обучающие примеры. — Текст : электронный // Mentor Graphics Corporation : [сайт]. — URL: http://www.cadflo.com/fileadmin/user_upload/туториалы/FloEFD.NX_Tutorial.pdf (дата обращения: 15.06.2023).

138. CFD thermal analysis of a three-layer chimney used in residential buildings. — Текст : электронный // X-MOL : [сайт]. — URL: <https://www.x-mol.net/paper/article/1390753298497818624> (дата обращения: 15.06.2023).

139. FloEFD Technical Reference. — Текст : электронный // Mentor Graphics Corporation : [сайт]. — URL: <https://www.smart-fem.de/media/floefd/TechnicalReferenceV17.pdf> (дата обращения: 15.06.2023).

140. Багоутдинова, А.Г. Моделирование процессов гидродинамики и теплообмена в каналах сложной конфигурации с помощью программного модуля SolidWorks Flow Simulation / А.Г. Багоутдинова, Я.Д. Золотоносов, О.В. Шемелова // Вестник Казанского технологического университета. 2014. №14. – С. 199-201.

141. Алямовский А. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. Алямовский, А. Собачкин, Е. Одинцов, А. Харитонович, Н. Пономарев. - Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2010. - 1040 с. - ISBN 978-5-94157-994-5. - URL: <https://www.ibooks.ru/bookshelf/18434/reading> (дата обращения: 15.06.2023). - Текст: электронный.

142. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод). Издание второе, переработанное – М.: Энергия, 1973. - 296 с.

143. Роддатис, К.Ф. Справочник по котельным установкам малой производительности / К.Ф.Роддатис, А.Н. Полтарецкий – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 488 с.: ил.

144. Берсенева, И.С. Автоматика отопительных котлов и агрегатов / И.С. Берсенева, М.А. Волков, Ю.С. Давыдов. – 2-е изд. – М.: Стройиздат, 1979. – 376 с.

145. Файерштейн, Л.М. Справочник по автоматизации котельных / Л.М. Файерштейн, Л.С. Этинген, Г.Г. Гохбойм. – 2-е изд. – М.: Энергия, 1978. – 344 с.

146. Хаванов, П.А. Оптимизация тепловых и гидравлических режимов работы универсального ряда автономных котельных для ЖКХ / П.А. Хаванов, К.П. Барынин // АВОК. – 2005. – № 4. – С. 32–44.

147. Голдобин, Ю.М. Автоматизация теплоэнергетических установок: учеб. пособие / Ю.М. Голдобин, Е.Ю. Павлюк. — Екатеринбург : УрФУ, 2017.— 186 с.

148. Сергеев, А.В. Справочное учебное пособие для персонала котельных: Топливное хозяйство котельных / А.В. Сергеев. – 2-е изд. – СПб.: ДЕАН, 2007. – 320 с.

149. Экономика строительства: учебник / Г.М. Загидуллина, А.И. Романова, Э.Р. Мухаррамова [и др.]; под общ. ред. Г.М. Загидуллиной, А.И. Романовой. – 2-е изд. – Москва: ИНФРА-М, 2023. — 360 с.

150. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов и их отбору для финансирования. Утверждены постановлением Госстроя РФ от 21.06.1999 № ВК 477. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200005634>

151. Коробко, В.И. Экономика городского хозяйства: учеб. пособие для студ. вузов / В.И. Коробко – 2-е изд., стер. – М.: Академия, 2008. - 160с.

152. Романова А.И., Талипова Л.Ф. Расчет экономической эффективности капитальных вложений, учебно-методическое пособие / А.И. романова, Л.Ф. Талипова – Казань: КГАСУ, 2017. – 28 с.

153. Каталог. — Текст : электронный // Якутский котловой завод : [сайт]. — URL: <https://sakha-liepsnele.ru/types/komplekt/> (дата обращения: 15.06.2023).

154. Чудаева, А.А. Надежность и срок службы оборудования как экономическая теория / А.А. Чудаева // Вестник ОГУ – 2009. – №8(102). – С. 150-155.

155. Ример, М.И. Управление эффективностью использования основных фондов / М.И. Ример – Саратов: Издательство Саратовского университета, 1981. С. 158-159.

156. Дмитриев А.Н., Ковалев И.Н., Табунщиков Ю.А., Шилкин Н.В. Руководство по оценке эффективности инвестиций в энергосберегающие мероприятия / А.Н. Дмитриев, И.Н. Ковалев, Ю.А. Табунщиков, Н.В. Шилкин – М: АВОК-ПРЕСС – МГСУ, 2005 – 120 с.
157. Табунщиков Ю.А., Бродач М.М., Шилкин Н.В. Энергоэффективные здания / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач, Н.В. Шилкин – М.: АВОК-ПРЕСС, 2003. – 200 с.
158. Брюханов О.Н., Жила В.А., Плужников А.И. Газоснабжение: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / О.Н. Брюханов, В.А. Жила, А.И. Плужников – М.: Издательский центр «Академия», 2008 – 448 с.
159. Табунщиков, Ю.А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач – М.: АВОК-ПРЕСС, 2002 – 194 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Патент РФ №187524 «Универсальный отопительный аппарат верхнего и
нижнего горения»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ
НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 187524

**Универсальный отопительный аппарат верхнего и нижнего
горения**

Патентообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью
"САХА ЛИПСНЕЛЕ" (RU)*

Авторы: *Жирков Игорь Петрович (RU), Слободчиков Егор
Гаврильевич (RU), Тимофеев Пуд Спиридонович (RU)*

Заявка № 2018127787
Приоритет полезной модели 27 июля 2018 г.
Дата государственной регистрации в
Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 11 марта 2019 г.
Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 27 июля 2028 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности



Г.П. Ивлиев

Патент РФ №218229 «Отопительный аппарат верхнего и нижнего горения с
модифицированной топочной камерой»

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 218229

**Отопительный аппарат верхнего и нижнего горения с
модифицированной топочной камерой**

Патентообладатель: **Общество с ограниченной
ответственностью "Якутский котловый завод" (RU)**

Авторы: **Жирков Игорь Петрович (RU), Прокопьев Виталий
Витальевич (RU), Слободчиков Егор Гаврильевич (RU),
Тимофеев Пуд Спиридонович (RU)**

Заявка № **2023105710**

Приоритет полезной модели **13 марта 2023 г.**

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации **17 мая 2023 г.**

Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает **13 марта 2033 г.**



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077e14e40f0a94e0bd24145d5c7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 20.03.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов

Акт о внедрении материалов диссертационной работы в производственную
организацию

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

"Якутский котловой завод"

ИНН 1435274626, ОГРН 1131447015996,

г. Якутск, ТОР «Якутия», с. Капитоновка, ул. Семенова 26/5



Утверждаю

Директор ООО «Якутский котловой завод»

Тимофеев П.С.

« 18 » 05 2025 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Настоящий акт составлен по результатам диссертационной работы старшего преподавателя Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова Слободчикова Егора Гаврильевича по теме: «Повышение эффективности твердотопливных котлов малой мощности в условиях Севера», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук внедрены в производственную деятельность в **Обществе с ограниченной ответственностью «Якутский котловой завод»** при изготовлении универсальных твердотопливных котлов с верхним способом горения линейки «Liepsnele Arctic», мощностью 10, 20 и 40 кВт. Экспериментальные исследования котлов проведены на испытательной базе завода, а также в натуральных условиях в индивидуальных жилых домовладениях г. Якутска и в Арктических районах РС (Я).

Интенсификация процесса горения за счет применения экрана-ограничителя топочной камеры позволила увеличить надежность работы котлоагрегатов путем снижения количества случаев аварийных остановок из-за низкотемпературной коррозии. Внедрение предлагаемых технических решений не требует существенных капитальных вложений, в связи с простотой производства, однако позволит существенно повысить эксплуатационные качества выпускаемых котлов.

Главный инженер

Прокопьев В.В.

Акт о внедрении материалов диссертационной работы в проектную
организацию



Общество с ограниченной ответственностью «Техэнерго»
ИНН 1435288410, КПП 143501001, ОГРН 1141447013575
677008, г. Якутск, ул. Лонгинова, 12А
эл. почта: tengergo14@mail.ru
тел: 8(964)419-80-04

№143 от 18.05.2023 г.

АКТ
о внедрении результатов диссертационной работы

Комиссия в составе:

Федоров В.Б. – директор ООО «Техэнерго»

Захарова С.Р. – инженер ООО «Техэнерго»

Степанов И.И. – инженер ООО «Техэнерго»

Комиссия составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы старшего преподавателя Слободчикова Егора Гаврильевича выполненного в Инженерно-техническом институте ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова» по теме: «Повышение эффективности твердотопливных котлов малой мощности в условиях Севера» использованы в деятельности Общества с ограниченной ответственностью «Техэнерго»:

- при проектировании и подборе оборудования систем тепловой генерации в районах Республики Саха (Якутия) при реализации муниципальных программ по развитию автономного теплоснабжения с использованием твердотопливных котлов верхнего длительного горения;

- при проектировании тепловой защиты дымоходных систем твердотопливных котельных с различной тепловой мощностью в климатических условиях Арктических районов;

- при технических испытаниях и оценки работы экранированных топочных камер твердотопливных котлов с верхним способом горения.

Федоров В.Б.

Захарова С.Р.

Степанов И.И.



**Акт о внедрении материалов диссертационной работы в орган
государственной власти**

Министерство
жилищно-коммунального
хозяйства и энергетики
Республики Саха (Якутия)



Саха Өрөспүүбүлүкэтин
олорор дьыһа, коммунальной
хаһаайыстыба уонна
энергетикэ министригитэ

ул. Кирова, д. 13, г. Якутск, 677000.
тел.: (4112) 34-19-33, факс: (4112) 42-27-39
<http://www.minjkh.sakha.gov.ru>, e-mail: mingkx@sakha.gov.ru

от 15 мая 2023 г. № 8/н

**АКТ
о внедрении результатов диссертационной работы**

Министерством жилищно-коммунального хозяйства и энергетики Республики Саха (Якутия) приняты к внедрению результаты диссертационной работы старшего преподавателя Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова Слободчикова Егора Гаврильевича на тему: «Повышение эффективности твердотопливных котлов малой мощности в условиях Севера».

Обоснованием применения современных автономных твердотопливных котлоагрегатов в районах Севера является наличие большого объема индивидуального жилищного фонда, не обеспеченного централизованными источниками теплоснабжения и газификацией. Рассмотренные в работе основные экономические показатели показывают высокую бюджетную эффективность применения в коммунальной сфере автономных теплогенераторов с верхним способом горения с модернизированной топочной камерой. Повышение эксплуатационной надежности теплогенерирующей установки при применении предлагаемой конструкции экрана-ограничителя способствует увеличению срока службы агрегата и снижает количество аварийных случаев при низких температурах. Применение численных методов моделирования работы топочных камер в производственной деятельности позволит рационализировать опытно-конструкторские исследования в части снижения текущих затрат, связанных с повышением эффективности котельных установок.

Первый заместитель
министра ЖКХ и
энергетики РС(Я)

В.Д. Романов

Акт о внедрении материалов диссертационной работы в учебный процесс

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное
автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Северо-Восточный федеральный
университет имени М.К.Аммосова»
(СВФУ)

**Инженерно-технический
институт**

Кулаковского ул., д.50, г. Якутск
Республика Саха (Якутия), 677000
Тел. IP +7 (411) 249-65-85
<http://www.s-vfu.ru>

18.05.23 № 56-1996

На № _____ от _____

АКТ

**о практическом использовании результатов кандидатской диссертации
Слободчикова Е.Г. в учебном процессе СВФУ им. М.К. Аммосова**

Мы, нижеподписавшиеся: директор Инженерно-технического института к.т.н., доцент Архангельская Е.А., к.т.н., доц. Иванов В.Н., к.т.н., доц. Анцупова С.Г., к.т.н. Иванова А.В. составили настоящий акт о том, что научные результаты кандидатской диссертационной работы Слободчикова Е.Г.: **«Повышение эффективности твердотопливных котлов малой мощности в условиях Севера»:**

Результаты натурных исследований работы твердотопливных котлов и способ подбора оптимальной высоты теплоизолированного участка дымоходной системы в зависимости от тепловой мощности котлоагрегата и температуры наружного воздуха используются в учебном процессе на кафедре «Теплогазоснабжение и вентиляция» в лекционных и практических занятиях для **магистров** обучающихся в СВФУ им. М.К. Аммосова по направлению подготовки: *08.04.01 Строительство, направленности «Энергосбережение и энергоэффективность в зданиях»* по дисциплинам:

«Энергоэффективность теплогенерирующих установок»,
«Эксплуатационная энергоэффективность систем ТГВ»

и в лекционных и практических занятиях для **бакалавров** по направлению подготовки: *08.03.01 Строительство, направленности «Теплогазоснабжение и вентиляция»* по дисциплинам:

«Теплогенерирующие установки»,
«Энергосбережение и энергоаудит систем ТГВ»

/ Председатель комиссии:

Члены комиссии:



Архангельская Е.А.

Иванов В.Н.

Анцупова С.Г.

Иванова А.В.

Приложение Ж

**Результаты измерений показателей теплопроизводительности
котлоагрегатов с типовой топочной камерой и с экраном-ограничителем**

Ведомость учета параметров потребления тепловой энергии тепловычислителем «Взлет ТСРВ-026М»										
Потребитель: Общество с ограниченной ответственностью «Якутский котловый завод»									Версия ПО: VZLJOT	
Прибор учета:	№ 1002600				Тхв = 5,0 °C				65.00.01.24	

1) Результаты произведенной тепловой энергии типовой топочной камеры:

Дата	Температура (°C)		Масса (т)			Теплота (ГКал)			Время раб.(ч)	Произведённая тепловая энергия, кВт
	T1	T2	M1	M2	Mп=M1-M2	Q1	Q2	Qп=Q1-Q2 кВт		
10.02.2022 14:00	43,3	41,7	2,422	2,509	-0,087	0,105	0,101	0,004	0,23	1,06996
10.02.2022 15:00	49,8	44,9	1,597	1,672	-0,075	0,080	0,072	0,008	1,00	9,304
10.02.2022 16:00	53,0	46,2	1,293	1,362	-0,069	0,068	0,060	0,009	1,00	10,467
10.02.2022 17:00	57,5	47,0	1,298	1,368	-0,071	0,075	0,061	0,014	1,00	16,282
10.02.2022 18:00	67,6	50,9	1,326	1,401	-0,075	0,090	0,067	0,022	1,00	25,586
10.02.2022 19:00	68,3	52,2	1,333	1,407	-0,075	0,091	0,070	0,021	1,00	24,423
10.02.2022 20:00	69,7	52,8	1,337	1,413	-0,076	0,093	0,071	0,023	1,00	26,749
10.02.2022 21:00	69,8	53,1	1,337	1,412	-0,076	0,093	0,071	0,022	1,00	25,586
10.02.2022 22:00	69,4	53,2	1,338	1,414	-0,076	0,093	0,071	0,022	1,00	25,586
10.02.2022 23:00	65,2	52,0	1,342	1,416	-0,074	0,087	0,070	0,018	1,00	20,934
11.02.2022 0:00	61,4	50,6	1,346	1,419	-0,073	0,083	0,068	0,015	1,00	17,445
11.02.2022 1:00	57,8	49,2	1,349	1,420	-0,071	0,078	0,066	0,012	1,00	13,956
11.02.2022 2:00	54,7	47,9	1,351	1,420	-0,070	0,074	0,065	0,009	1,00	10,467
11.02.2022 3:00	52,3	46,8	1,354	1,423	-0,069	0,071	0,063	0,007	1,00	8,141
11.02.2022 4:00	50,5	46,0	1,353	1,421	-0,068	0,068	0,062	0,006	1,00	6,978
11.02.2022 5:00	49,0	45,4	1,353	1,420	-0,067	0,066	0,061	0,005	0,90	5,2335
11.02.2022 6:00	47,0	44,6	1,353	1,419	-0,066	0,064	0,060	0,003	0,02	0,06978
11.02.2022 7:00	45,9	44,0	1,353	1,419	-0,066	0,062	0,059	0,003	0,00	0
Дата	Температура (°C)		Масса (т)			Теплота (ГКал)			Время раб.(ч)	Произведённая тепловая энергия, кВт
	T1	T2	M1	M2	Mп=M1-M2	Q1	Q2	Qп=Q1-Q2 кВт		
02.03.2022 18:00	36,7	31,8	1,365	1,443	-0,078	0,050	0,043	0,007	0,97	7,90
02.03.2022 19:00	45,3	38,5	1,351	1,431	-0,080	0,061	0,052	0,009	1,00	10,47
02.03.2022 20:00	50,4	41,4	1,354	1,435	-0,081	0,068	0,056	0,012	1,00	13,96
02.03.2022 21:00	48,9	42,3	1,354	1,434	-0,080	0,066	0,057	0,009	1,00	10,47
02.03.2022 22:00	46,4	41,3	1,357	1,436	-0,079	0,063	0,056	0,007	1,00	8,14
02.03.2022 23:00	45,4	40,7	1,361	1,440	-0,079	0,062	0,055	0,006	1,00	6,98
03.03.2022 0:00	46,1	40,6	1,361	1,441	-0,079	0,063	0,055	0,007	1,00	8,14
03.03.2022 1:00	49,4	40,9	1,362	1,442	-0,080	0,067	0,056	0,012	1,00	13,96
03.03.2022 2:00	60,9	44,5	1,355	1,439	-0,084	0,082	0,060	0,022	1,00	25,59
03.03.2022 3:00	67,9	47,9	1,349	1,433	-0,085	0,092	0,065	0,027	1,00	31,40
03.03.2022 4:00	68,0	49,3	1,346	1,430	-0,083	0,091	0,066	0,025	1,00	29,08
03.03.2022 5:00	70,6	49,8	1,345	1,430	-0,084	0,095	0,067	0,028	1,00	32,56
03.03.2022 6:00	64,3	49,2	1,345	1,427	-0,082	0,086	0,066	0,020	1,00	23,26
03.03.2022 7:00	56,3	46,3	1,350	1,429	-0,079	0,076	0,063	0,013	1,00	15,12

03.03.2022 8:00	51,2	43,8	1,347	1,424	-0,077	0,069	0,059	0,010	1,00	11,63
03.03.2022 9:00	46,8	41,8	1,336	1,412	-0,076	0,063	0,056	0,007	1,00	8,14
03.03.2022 10:00	44,4	40,2	1,301	1,375	-0,075	0,058	0,052	0,005	1,00	5,82
03.03.2022 11:00	44,6	39,6	1,291	1,366	-0,075	0,058	0,051	0,006	1,00	6,98
03.03.2022 12:00	43,5	39,5	1,297	1,372	-0,075	0,056	0,051	0,005	1,00	5,82
03.03.2022 13:00	42,1	39,1	1,309	1,383	-0,074	0,055	0,051	0,004	0,55	2,56

2) Результаты произведенной тепловой энергии с экраном-ограничителем:

Дата	Температура (°C)		Масса (т)			Теплота (ГКал)			Время раб.(ч)	Произведённая тепловая энергия, кВт
	T1	T2	M1	M2	Mп=M1-M2	Q1	Q2	Qп=Q1-Q2		
02.02.23 10:00	50,8	48,4	1,708	1,781	-0,073	0,087	0,083	0,004	0,28	1,30256
02.02.23 11:00	54,9	51,1	1,683	1,757	-0,074	0,092	0,086	0,006	0,48	3,34944
02.02.23 12:00	54,1	51,0	1,685	1,758	-0,073	0,091	0,086	0,005	0,73	4,24495
02.02.23 13:00	57,6	52,2	1,708	1,783	-0,075	0,098	0,089	0,009	1,00	10,467
02.02.23 14:00	59,1	53,0	1,702	1,777	-0,075	0,101	0,090	0,010	1,00	11,63
02.02.23 15:00	61,6	53,9	1,681	1,756	-0,075	0,104	0,090	0,013	1,00	15,119
02.02.23 16:00	63,0	54,6	1,695	1,771	-0,076	0,107	0,093	0,014	1,00	16,282
02.02.23 17:00	63,9	55,0	1,693	1,770	-0,077	0,108	0,093	0,015	1,00	17,445
02.02.23 18:00	63,4	55,1	1,727	1,804	-0,078	0,110	0,095	0,014	1,00	16,282
02.02.23 19:00	63,0	54,9	1,740	1,817	-0,077	0,110	0,095	0,014	1,00	16,282
02.02.23 20:00	63,1	54,9	1,749	1,827	-0,078	0,110	0,096	0,014	1,00	16,282
02.02.23 21:00	62,3	54,8	1,748	1,826	-0,078	0,109	0,096	0,013	1,00	15,119
02.02.23 22:00	59,5	53,8	1,750	1,826	-0,077	0,104	0,094	0,010	1,00	11,63
02.02.23 23:00	57,8	52,8	1,753	1,830	-0,076	0,101	0,093	0,009	1,00	10,467
03.02.23 00:00	56,7	52,3	1,755	1,831	-0,076	0,100	0,092	0,008	1,00	9,304
03.02.23 01:00	55,9	51,9	1,757	1,832	-0,076	0,098	0,091	0,007	1,00	8,141
03.02.23 02:00	54,4	51,4	1,760	1,836	-0,076	0,096	0,090	0,005	0,55	3,19825
Дата	Температура (°C)		Масса (т)			Теплота (ГКал)			Время раб.(ч)	Произведенная тепловая энергия, кВт
	T1	T2	M1	M2	Mп=M1-M2	Q1	Q2	Qп=Q1-Q2		
03.02.23 17:00	54,3	50,4	1,700	1,774	-0,075	0,092	0,086	0,007	0,65	5,29165
03.02.23 18:00	53,1	50,8	1,747	1,822	-0,075	0,093	0,089	0,004	0,07	0,32564
03.02.23 19:00	54,8	51,0	1,748	1,825	-0,076	0,096	0,089	0,007	1,00	8,141
03.02.23 20:00	56,9	51,6	1,749	1,826	-0,077	0,099	0,090	0,009	1,00	10,467
03.02.23 21:00	59,9	52,9	1,747	1,825	-0,078	0,105	0,092	0,012	1,00	13,956
03.02.23 22:00	59,6	53,3	1,747	1,825	-0,078	0,104	0,093	0,011	1,00	12,793
03.02.23 23:00	62,5	53,8	1,746	1,825	-0,079	0,109	0,094	0,015	1,00	17,445
04.02.23 00:00	62,7	54,4	1,747	1,826	-0,079	0,109	0,095	0,014	1,00	16,282
04.02.23 01:00	63,2	54,6	1,749	1,828	-0,079	0,110	0,095	0,015	1,00	17,445
04.02.23 02:00	63,2	54,7	1,750	1,828	-0,078	0,111	0,096	0,015	1,00	17,445
04.02.23 03:00	63,3	54,8	1,751	1,829	-0,078	0,111	0,096	0,015	1,00	17,445
04.02.23 04:00	62,0	54,6	1,750	1,828	-0,078	0,109	0,096	0,013	1,00	15,119
04.02.23 05:00	58,4	53,3	1,752	1,829	-0,077	0,102	0,093	0,009	1,00	10,467
04.02.23 06:00	55,9	52,1	1,752	1,828	-0,076	0,098	0,091	0,007	1,00	8,141
04.02.23 07:00	54,8	51,4	1,750	1,827	-0,077	0,096	0,090	0,006	1,00	6,978
04.02.23 08:00	54,5	51,2	1,747	1,823	-0,076	0,095	0,089	0,006	1,00	6,978
04.02.23 09:00	53,4	50,9	1,742	1,818	-0,076	0,093	0,089	0,004	0,17	0,79084

Приложение 3

Значения температуры горения в топке на завершающий период измерений типовой топочной камеры

Время	Дата	t горения	Время	Дата	t горения	Время	Дата	t горения	Время	Дата	t горения	Время	Дата	t горения
420	14.02.22 23:53	427,06	446	15.02.22 0:19	447,50	472	15.02.22 0:45	631,67	498	15.02.22 1:11	427,77	524	15.02.22 1:37	384,65
421	14.02.22 23:54	429,59	447	15.02.22 0:20	443,23	473	15.02.22 0:46	659,74	499	15.02.22 1:12	428,90	525	15.02.22 1:38	354,09
422	14.02.22 23:55	424,20	448	15.02.22 0:21	437,54	474	15.02.22 0:47	623,26	500	15.02.22 1:13	431,47	526	15.02.22 1:39	355,90
423	14.02.22 23:56	422,41	449	15.02.22 0:22	462,55	475	15.02.22 0:48	640,16	501	15.02.22 1:14	423,00	527	15.02.22 1:40	381,26
424	14.02.22 23:57	423,52	450	15.02.22 0:23	469,76	476	15.02.22 0:49	639,58	502	15.02.22 1:15	418,29	528	15.02.22 1:41	373,81
425	14.02.22 23:58	425,13	451	15.02.22 0:24	474,72	477	15.02.22 0:50	635,14	503	15.02.22 1:16	442,46	529	15.02.22 1:42	394,88
426	14.02.22 23:59	433,03	452	15.02.22 0:25	524,00	478	15.02.22 0:51	656,15	504	15.02.22 1:17	429,70	530	15.02.22 1:43	382,62
427	15.02.22 0:00	454,06	453	15.02.22 0:26	551,49	479	15.02.22 0:52	648,05	505	15.02.22 1:18	426,38	531	15.02.22 1:44	404,41
428	15.02.22 0:01	453,37	454	15.02.22 0:27	559,18	480	15.02.22 0:53	628,58	506	15.02.22 1:19	438,14	532	15.02.22 1:45	371,99
429	15.02.22 0:02	430,24	455	15.02.22 0:28	655,89	481	15.02.22 0:54	624,51	507	15.02.22 1:20	436,18	533	15.02.22 1:46	394,52
430	15.02.22 0:03	434,10	456	15.02.22 0:29	664,55	482	15.02.22 0:55	637,64	508	15.02.22 1:21	442,42	534	15.02.22 1:47	396,18
431	15.02.22 0:04	435,85	457	15.02.22 0:30	662,47	483	15.02.22 0:56	623,17	509	15.02.22 1:22	431,16	535	15.02.22 1:48	383,20
432	15.02.22 0:05	434,61	458	15.02.22 0:31	603,91	484	15.02.22 0:57	607,78	510	15.02.22 1:23	437,73	536	15.02.22 1:49	398,43
433	15.02.22 0:06	448,39	459	15.02.22 0:32	567,67	485	15.02.22 0:58	601,11	511	15.02.22 1:24	422,85	537	15.02.22 1:50	391,37
434	15.02.22 0:07	430,28	460	15.02.22 0:33	596,85	486	15.02.22 0:59	618,62	512	15.02.22 1:25	423,90	538	15.02.22 1:51	407,35
435	15.02.22 0:08	424,25	461	15.02.22 0:34	578,36	487	15.02.22 1:00	618,32	513	15.02.22 1:26	405,71	539	15.02.22 1:52	457,91
436	15.02.22 0:09	434,43	462	15.02.22 0:35	551,64	488	15.02.22 1:01	605,11	514	15.02.22 1:27	432,91	540	15.02.22 1:53	405,34
437	15.02.22 0:10	431,86	463	15.02.22 0:36	590,88	489	15.02.22 1:02	614,30	515	15.02.22 1:28	419,44			
438	15.02.22 0:11	447,37	464	15.02.22 0:37	594,27	490	15.02.22 1:03	590,91	516	15.02.22 1:29	414,63			
439	15.02.22 0:12	442,49	465	15.02.22 0:38	596,23	491	15.02.22 1:04	601,84	517	15.02.22 1:30	442,74			
440	15.02.22 0:13	460,19	466	15.02.22 0:39	626,86	492	15.02.22 1:05	626,76	518	15.02.22 1:31	411,62			
441	15.02.22 0:14	453,72	467	15.02.22 0:40	611,39	493	15.02.22 1:06	582,36	519	15.02.22 1:32	410,65			
442	15.02.22 0:15	455,28	468	15.02.22 0:41	681,76	494	15.02.22 1:07	562,18	520	15.02.22 1:33	417,45			
443	15.02.22 0:16	455,14	469	15.02.22 0:42	683,20	495	15.02.22 1:08	550,24	521	15.02.22 1:34	372,54			
444	15.02.22 0:17	470,00	470	15.02.22 0:43	697,53	496	15.02.22 1:09	493,21	522	15.02.22 1:35	361,01			
445	15.02.22 0:18	449,60	471	15.02.22 0:44	651,26	497	15.02.22 1:10	438,92	523	15.02.22 1:36	387,11			

Приложение И

Значения температуры горения в топке на завершающий период измерений с экраном-ограничителем

Время	Дата	t горения	Время	Дата	t горения	Время	Дата	t горения	Время	Дата	t горения	Время	Дата	t горения
420	02.02.23 17:40	691,30	446	02.02.23 18:06	744,55	472	02.02.23 18:32	734,13	498	02.02.23 18:58	751,39	524	02.02.23 19:24	592,81
421	02.02.23 17:41	704,10	447	02.02.23 18:07	743,48	473	02.02.23 18:33	743,60	499	02.02.23 18:59	759,05	525	02.02.23 19:25	572,89
422	02.02.23 17:42	708,82	448	02.02.23 18:08	751,83	474	02.02.23 18:34	746,03	500	02.02.23 19:00	748,84	526	02.02.23 19:26	566,39
423	02.02.23 17:43	710,15	449	02.02.23 18:09	767,67	475	02.02.23 18:35	743,79	501	02.02.23 19:01	739,86	527	02.02.23 19:27	558,71
424	02.02.23 17:44	713,08	450	02.02.23 18:10	778,10	476	02.02.23 18:36	738,76	502	02.02.23 19:02	727,67	528	02.02.23 19:28	550,05
425	02.02.23 17:45	715,39	451	02.02.23 18:11	772,35	477	02.02.23 18:37	731,72	503	02.02.23 19:03	716,67	529	02.02.23 19:29	546,31
426	02.02.23 17:46	716,58	452	02.02.23 18:12	765,47	478	02.02.23 18:38	731,91	504	02.02.23 19:04	708,50	530	02.02.23 19:30	544,44
427	02.02.23 17:47	716,24	453	02.02.23 18:13	776,76	479	02.02.23 18:39	739,42	505	02.02.23 19:05	700,80	531	02.02.23 19:31	550,09
428	02.02.23 17:48	720,50	454	02.02.23 18:14	784,76	480	02.02.23 18:40	716,24	506	02.02.23 19:06	702,23	532	02.02.23 19:32	552,66
429	02.02.23 17:49	723,38	455	02.02.23 18:15	786,88	481	02.02.23 18:41	692,11	507	02.02.23 19:07	692,37	533	02.02.23 19:33	654,54
430	02.02.23 17:50	718,38	456	02.02.23 18:16	784,07	482	02.02.23 18:42	676,71	508	02.02.23 19:08	731,42	534	02.02.23 19:34	750,28
431	02.02.23 17:51	718,52	457	02.02.23 18:17	779,17	483	02.02.23 18:43	663,76	509	02.02.23 19:09	750,73	535	02.02.23 19:35	787,14
432	02.02.23 17:52	723,83	458	02.02.23 18:18	773,05	484	02.02.23 18:44	656,99	510	02.02.23 19:10	772,87	536	02.02.23 19:36	803,10
433	02.02.23 17:53	729,46	459	02.02.23 18:19	765,32	485	02.02.23 18:45	657,25	511	02.02.23 19:11	799,15	537	02.02.23 19:37	805,49
434	02.02.23 17:54	734,47	460	02.02.23 18:20	766,35	486	02.02.23 18:46	659,21	512	02.02.23 19:12	810,24	538	02.02.23 19:38	805,51
435	02.02.23 17:55	735,62	461	02.02.23 18:21	779,53	487	02.02.23 18:47	641,12	513	02.02.23 19:13	814,37	539	02.02.23 19:39	799,56
436	02.02.23 17:56	735,15	462	02.02.23 18:22	758,73	488	02.02.23 18:48	656,50	514	02.02.23 19:14	814,95	540	02.02.23 19:40	791,29
437	02.02.23 17:57	747,50	463	02.02.23 18:23	735,72	489	02.02.23 18:49	688,12	515	02.02.23 19:15	813,54			
438	02.02.23 17:58	754,84	464	02.02.23 18:24	720,96	490	02.02.23 18:50	714,23	516	02.02.23 19:16	808,59			
439	02.02.23 17:59	756,27	465	02.02.23 18:25	707,63	491	02.02.23 18:51	729,98	517	02.02.23 19:17	768,87			
440	02.02.23 18:00	752,98	466	02.02.23 18:26	696,17	492	02.02.23 18:52	737,35	518	02.02.23 19:18	702,18			
441	02.02.23 18:01	747,20	467	02.02.23 18:27	691,12	493	02.02.23 18:53	738,79	519	02.02.23 19:19	655,60			
442	02.02.23 18:02	742,02	468	02.02.23 18:28	683,42	494	02.02.23 18:54	736,23	520	02.02.23 19:20	626,30			
443	02.02.23 18:03	735,44	469	02.02.23 18:29	667,06	495	02.02.23 18:55	730,96	521	02.02.23 19:21	620,23			
444	02.02.23 18:04	757,05	470	02.02.23 18:30	688,04	496	02.02.23 18:56	740,71	522	02.02.23 19:22	615,26			
445	02.02.23 18:05	753,04	471	02.02.23 18:31	714,89	497	02.02.23 18:57	766,21	523	02.02.23 19:23	601,39			

Приложение К

Результаты измерений температур уходящих газов на выходе из топки: типовой и с экранированием

Стадийность горения топлива, %	Результаты типовой топочной камеры		Результаты топочной камеры с экранированием	
	02.03-03.03.2022	03.03-04.04.2022	02.02.2023	03.02.-04.02.2023
	t дымовых газов на выходе из топки			
100	392,18	391,55	428,89	378,68
95	275,45	526,02	294,77	230,66
90	347,21	392,00	157,56	177,16
85	349,09	386,43	216,59	179,69
80	360,86	340,06	216,89	208,29
75	376,86	285,62	259,12	167,12
70	299,37	258,71	251,39	209,94
65	261,84	233,70	207,88	214,00
60	208,71	166,62	261,60	225,50
55	163,73	278,92	281,03	229,07
50	191,11	362,57	305,08	195,29
45	360,94	371,84	304,91	206,20
40	297,19	332,31	306,45	233,08
35	375,89	308,68	318,58	295,30
30	371,11	239,47	314,16	273,61
25	372,19	183,74	306,29	248,56
20	322,43	188,79	284,87	229,58
15	250,99	175,78	261,61	225,65
10	181,92	146,94	257,26	234,15
5	128,29	140,57	217,09	212,73

Приложение Л

Значения средних температур уходящих газов на разных участках дымохода,
на завершающий период горения топки

Дата проведения измерений															
02.02.2023				03.02.2023			06.02.2023			01.03.2023			02.03.2023		
Время периода горения, мин	Температура дымовых газов, С														
	На выходе из котла h=0 м	В середине дымохода h=3,5 м	В устье дымохода h=7 м	На выходе из котла h=0 м	В середине дымохода h=3,5 м	В устье дымохода h=7 м	На выходе из котла h=0 м	В середине дымохода h=3,5 м	В устье дымохода h=7 м	На выходе из котла h=0 м	В середине дымохода h=3,5 м	В устье дымохода h=7 м	На выходе из котла h=0 м	В середине дымохода h=3,5 м	В устье дымохода h=7 м
420	214,47	175,34	150,38	187,37	184,26	157,81	281,94	220,82	202,10	261,78	189,96	161,98	252,40	182,49	159,45
435	207,96	165,91	141,34	194,73	186,79	159,82	241,06	217,87	170,17	288,78	205,83	174,17	222,26	168,82	147,65
450	213,66	170,52	144,76	186,88	178,42	153,60	229,56	175,73	177,84	279,26	205,72	175,44	216,42	168,59	145,91
465	211,57	166,85	141,97	176,65	167,54	145,55	206,95	185,52	155,57	253,51	191,69	164,96	181,83	137,77	119,94
480	196,37	153,16	131,06	158,74	164,75	142,50	222,05	193,15	155,59	240,88	181,55	156,28	210,15	162,49	141,51
495	178,19	151,70	131,09	197,86	193,48	165,07	235,76	185,19	167,54	229,84	174,12	150,48	186,85	150,79	133,00
510	196,78	166,33	143,08	169,22	156,42	135,83	189,92	160,56	151,39	221,58	168,95	145,69	175,36	139,13	123,37
525	222,31	163,93	139,52	159,35	162,24	139,35	223,76	193,91	151,47	206,84	160,18	138,27	168,15	132,11	117,36
540	168,67	148,85	131,31	176,82	174,54	148,24	203,01	157,01	156,15	194,55	152,98	132,26	165,11	131,01	116,34
555	204,44	174,79	150,39	188,02	172,94	147,91	240,68	197,10	177,79	-	-	-	161,77	125,93	111,90
570	186,50	149,16	129,97	158,83	153,08	132,35	203,97	186,55	142,30	-	-	-	153,86	119,36	106,42
585	215,49	182,13	158,74	174,33	177,06	151,61	198,96	148,95	147,59	-	-	-	153,09	122,39	108,69
600	-	-	-	178,10	164,01	142,10	217,41	175,39	158,25	-	-	-	147,28	119,02	105,96
615	-	-	-	156,16	169,33	145,70	205,67	171,91	152,02	-	-	-	148,58	118,39	104,90