

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа энергетики
Направление подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника
Отделение школы НОЦ И.Н. Бутакова

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Проектирование системы управления процессом сжигания органоводоугольных композиций в котельном агрегате

УДК 681.51:662.66.022.51-032.2:621.182.2

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ74	Шлегель Никита Евгеньевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ИШФВП	Стрижак Павел Александрович	д.ф.- м.н., профессор		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель ИШФВП	Вершинина Ксения Юрьевна	к.ф.- м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Киселева Елена Станиславовна	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	Куликова Ольга Александровна	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ИШФВП	Стрижак Павел Александрович	д.ф.- м.н., профессор		

Томск – 2019 г.

Планируемые результаты освоения

Код	Результат обучения*	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
Общие по направлению подготовки		
<i>расчетно-проектная и проектно-конструкторская деятельность:</i>		
P1	применять передовые знания и достижения для формулирования заданий на разработку проектных решений, проектировать инновационные теплоэнергетические и теплотехнические системы и оборудование, разрабатывать проектные решения, связанные с модернизацией технологического оборудования	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-11**, УК-2, ПК-1, ПК-2), Критерий 5 АИОР (п.2.1)согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.011 «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам», 20.001 «Работник по оперативному управлению объектами тепловой электростанции», 20.014 «Работник по организации эксплуатации тепломеханического оборудования тепловой электростанции», 16.005 «Специалист по эксплуатации котлов, работающих на твердом топливе», 16.012 «Специалист по эксплуатации котлов на газообразном, жидком топливе и электронагреве», 16.065 «Инженер-проектировщик технологических решений котельных, центральных тепловых пунктов и малых теплоэлектроцентралей», 20.022 «Работник по оперативному управлению тепловыми сетями», 20.023 «Работник по расчету режимов тепловых сетей», 20.024 «Работник по ремонту оборудования, трубопроводов и арматуры тепловых сетей», 20.025 «Работник по эксплуатации оборудования, трубопроводов и арматуры тепловых сетей», 16.014 «Специалист по эксплуатации трубопроводов и оборудования тепловых сетей», 16.064 «Инженер-проектировщик тепловых сетей», 19.011 «Специалист по управлению балансами и поставками газа»)
<i>производственно-технологическая деятельность:</i>		
P2	интегрировать знания различных областей для разработки мероприятий по совершенствованию технологии производства, обеспечению экономичности, надежности и безопасности эксплуатации, ремонта и модернизации энергетического, теплотехнического и теплотехнологического оборудования	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1, УК-2, ПК-3, ПК-4, ПК-5), Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI , требования профессиональных стандартов (40.011 «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам», 20.001 «Работник по оперативному управлению объектами тепловой электростанции», 20.014 «Работник по организации эксплуатации тепломеханического оборудования тепловой электростанции», 16.005 «Специалист по эксплуатации котлов, работающих на твердом топливе», 16.012 «Специалист по эксплуатации котлов на газообразном, жидком топливе и электронагреве», 20.022 «Работник по оперативному управлению тепловыми сетями», 20.023 «Работник по расчету режимов тепловых сетей», 20.024 «Работник по ремонту оборудования, трубопроводов и арматуры тепловых сетей», 20.025 «Работник по эксплуатации оборудования, трубопроводов и арматуры тепловых сетей», 16. «Специалист по эксплуатации трубопроводов и оборудования тепловых сетей», 16.064 «Инженер-проектировщик тепловых сетей», 19.011 «Специалист по управлению балансами и поставками газа»)
P3	применять современные методы и средства практической инженерной деятельности в теплоэнергетике, теплотехнике и теплотехнологиях	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1, УК-2, ПК-5, ПК-6), Критерий 5 АИОР (пп. 1.6, 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.011

¹ ** - универсальные компетенции из СУОС ТПУ (для 2017 г. приема - приказ № 2226 от 01.03.2017 г).

		«Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам», 20.001 «Работник по оперативному управлению объектами тепловой электростанции», 20.014 «Работник по организации эксплуатации тепломеханического оборудования тепловой электростанции», 16.005 «Специалист по эксплуатации котлов, работающих на твердом топливе», 16.012 «Специалист по эксплуатации котлов на газообразном, жидком топливе и электронагреве», 20.022 «Работник по оперативному управлению тепловыми сетями», 20.023 «Работник по расчету режимов тепловых сетей», 20.024 «Работник по ремонту оборудования, трубопроводов и арматуры тепловых сетей», 20.025 «Работник по эксплуатации оборудования, трубопроводов и арматуры тепловых сетей», 16. «Специалист по эксплуатации трубопроводов и оборудования тепловых сетей», 16.064 «Инженер-проектировщик тепловых сетей», 19.011 «Специалист по управлению балансами и поставками газа»)
P4 (P6)	применять знания нетехнических ограничений инженерной деятельности, разрабатывать мероприятия по безопасности жизнедеятельности персонала и населения, предотвращать экологические нарушения	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1, УК-2, ПК-9), Критерий 5 АИОР (п. 1.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.011 «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам», 20.001 «Работник по оперативному управлению объектами тепловой электростанции», 20.014 «Работник по организации эксплуатации тепломеханического оборудования тепловой электростанции», 16.005 «Специалист по эксплуатации котлов, работающих на твердом топливе», 16.012 «Специалист по эксплуатации котлов на газообразном, жидком топливе и электронагреве», 20.022 «Работник по оперативному управлению тепловыми сетями», 20.023 «Работник по расчету режимов тепловых сетей», 20.024 «Работник по ремонту оборудования, трубопроводов и арматуры тепловых сетей», 20.025 «Работник по эксплуатации оборудования, трубопроводов и арматуры тепловых сетей», 16. «Специалист по эксплуатации трубопроводов и оборудования тепловых сетей», 16.064 «Инженер-проектировщик тепловых сетей», 19.011 «Специалист по управлению балансами и поставками газа»)
<i>научно-исследовательская деятельность:</i>		
P5 (P4)	применять глубокие знания для планирования и постановки задачи инновационного инженерного исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать и создавать критерии оценки, применять инновационные методы исследования, проводить исследование, критически интерпретировать, публично представлять и обсуждать результаты научных исследований	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1, УК-2, ПК-7), Критерий 5 АИОР (пп.2.4, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (20.001 «Работник по оперативному управлению объектами тепловой электростанции», 20.014 «Работник по организации эксплуатации тепломеханического оборудования тепловой электростанции», 16.005 «Специалист по эксплуатации котлов, работающих на твердом топливе», 20.022 «Работник по оперативному управлению тепловыми сетями», 20.025 «Работник по эксплуатации оборудования, трубопроводов и арматуры тепловых сетей», 16. «Специалист по эксплуатации трубопроводов и оборудования тепловых сетей», 19.011 «Специалист по управлению балансами и поставками газа»)
<i>организационно-управленческая деятельность:</i>		
P6 (P5)	руководить коллективом специалистов различных	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-2, УК-3, УК-4, УК-5, ОК-2, ПК-8, ПК-10), Критерий 5 АИОР (п. 1.1),

	направлений и квалификаций, действовать в нестандартных ситуациях, принимать организационно-управленческие решения и нести за них ответственность при организации работ, разрабатывать мероприятия по предотвращению экологических нарушений	согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.011 «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам», 20.001 «Работник по оперативному управлению объектами тепловой электростанции», 20.014 «Работник по организации эксплуатации тепломеханического оборудования тепловой электростанции», 16.005 «Специалист по эксплуатации котлов, работающих на твердом топливе», 16.012 «Специалист по эксплуатации котлов на газообразном, жидком топливе и электронагреве», 20.022 «Работник по оперативному управлению тепловыми сетями», 20.023 «Работник по расчету режимов тепловых сетей», 20.024 «Работник по ремонту оборудования, трубопроводов и арматуры тепловых сетей», 20.025 «Работник по эксплуатации оборудования, трубопроводов и арматуры тепловых сетей», 16. «Специалист по эксплуатации трубопроводов и оборудования тепловых сетей», 16.064 «Инженер-проектировщик тепловых сетей», 19.011 «Специалист по управлению балансами и поставками газа»)
<i>педагогическая деятельность:</i>		
P7	осуществлять педагогическую деятельность в области профессиональной подготовки	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (ПК-11), Критерий 5 АИОР (пп.1.1, 1.2, 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессионального стандарта 01.004 «Педагог профессионального обучения, профессионального образования и дополнительного профессионального образования», утвержденный приказом Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 8 сентября 2015 г. № 608н (зарегистрирован Министерством юстиции Российской Федерации 24 сентября 2015 г., регистрационный № 38993)
<i>Универсальные компетенции</i>		
P8	мыслить абстрактно, обобщать, анализировать, систематизировать и прогнозировать, принимать решения в сложных инженерных задачах с технической неопределенностью и недостатком информации	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1, ОК-1, ОК-2), Критерий 5 АИОР (п. 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P9	использовать творческий потенциал, саморазвиваться, самореализовываться	Требования ФГОС (УК-6, ОК-3), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P10	использовать иностранный язык для эффективного взаимодействия в профессиональной сфере	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-4, УК-5, ОПК-3), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Профиль 4		
P14	применять современные методы и средства практической инженерной деятельности в автоматизированных системах управления технологическими процессами в теплоэнергетике и теплотехнике	Требования ФГОС ВО, СУОС ТПУ (УК-1, УК-2, ПК-6, ПК-10), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов (40.012 Профессиональный стандарт «Специалист по метрологии», 40.057 Профессиональный стандарт «Специалист по автоматизированным системам управления производством», 40.061 Оператор-наладчик автоматических линий

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа энергетики
Направление подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника
Отделение школы (НОЦ) НОЦ И.Н. Бутакова

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП
_____ П.А. Стрижак

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ74	Шлегель Никите Евгеньевичу

Тема работы:

Проектирование системы управления процессом сжигания органоводоугольных композиций в котельном агрегате	
Утверждена приказом директора №3502/с	06.05.2019

Срок сдачи студентом выполненной работы:	30.05.2019
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Объектом проектирования является водогрейный котельный агрегат КЕ. Основное топливо – органоводоугольная топливная композиция, приготовленная на основе влажного отхода углеобогащения и жидкого горючего компонента нефтяного происхождения. При разработке системы управления процессом сжигания топлива предусмотреть использование современных микропроцессорных технических средств автоматизации для реализации функций автоматизированного контроля параметров и управления системы топливоподачи.
--------------------------	---

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ol style="list-style-type: none"> 1. Исследовательские изыскания. 2. Проектирование АСУ топливоподачи. 3. Схема взаимосвязи оборудования верхнего и полевого уровней. 4. Разработка документации АСУ топливоподачи. 5. Расчет параметров настройки регулятора. 6. Разработка SCADA системы для АСУ топливоподачи. 7. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение. 8. Социальная ответственность.
Перечень графического материала	<ol style="list-style-type: none"> 1 Схемы структурная. 2 Схема функциональная. 3 Схема принципиальная электрическая щита управления. 4 Схема монтажная. 5 Общий вид щита управления.

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Киселева Елена Станиславовна
Социальная ответственность	Куликова Ольга Александровна

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

Исследовательские изыскания (Comparative study of fuel compositions)
--

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	10.02.19
--	----------

Задание выдал руководитель/ консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ИШФВП	Стрижак Павел Александрович	д.ф.- м.н., профессор		
Старший преподаватель ИШФВП	Вершинина Ксения Юрьевна	к.ф.- м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ74	Шлегель Никита Евгеньевич		

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 145 с., 24 рис., 24 табл., 90 источников.

Ключевые слова: котлоагрегат, органомоугольное топливо, система топливоподачи, автоматизированная система управления, микропроцессорные средства автоматизации, проектирование.

Объектом автоматизации является система топливоподачи котла КЕ 10/14 С.

Цель работы – модернизация АСУ ТП топливоподачи котла типа КЕ 10/14 С на основе микропроцессорных средств автоматизации.

В процессе выполнения работы проводились экспериментальные исследования, анализ объекта автоматизации, составление структурной схемы АСУ ТП топливоподачи, разработка функциональной схемы, разработка принципиальной электрической схемы и общего вида щита управления, выбор приборов и технических средств автоматизации с последующим составлением заказной спецификации.

В результате исследования разработана автоматизированная система управления топливоподачи водогрейного котла на основе современных микропроцессорных средств автоматизации.

Основным преимуществом разработанной АСУ ТП является наличие программно-оперативного комплекса на базе SCADA-системы, который осуществляет разделение функций между автоматической системой и оперативным персоналом для повышения качества регулирования и быстродействия системы, а также позволяет вовремя отреагировать на любую сложную ситуацию в процессе эксплуатации системы.

Обозначения и сокращения

ОВУТ – органоводогольное топливо;

ВУТ – водоугольное топливо;

КЖТ – композиционное жидкое топливо;

Фильтр-кек– отход флотационного обогащения угля;

АСУ – автоматизированная система управления;

SCADA – программный пакет, предназначенный для разработки или обеспечения работы, в реальном времени систем сбора, обработки, отображения и архивирования информации об объекте мониторинга или управления;

ТПС – термопреобразователь сопротивления;

НСХ – номинальная статическая характеристика;

АРМ – автоматизированное рабочее место оператора.

Оглавление

Введение.....	11
1 Исследовательские изыскания.....	16
1.1. Цель и задачи исследований.....	22
1.2. Исследуемые материалы.....	22
1.3. Характеристики зажигания и горения.....	23
1.4. Относительные показатели эффективности.....	26
1.5. Характеристики зажигания.....	28
1.6. Характеристики горения.....	31
1.7. Относительные коэффициенты полезного использования.....	34
1.8. Использование результатов исследований.....	36
2 Проектирование АСУ топливоподачи.....	39
2.1. Анализ объекта автоматизации.....	39
2.2. Выбор структуры автоматизированной системы топливоподачи.....	42
2.3 Разработка функциональной схемы АСУ топливоподачи.....	46
2.4. Выбор технических средств АСУ топливоподачи.....	48
2.4.1. Выбор датчиков температуры.....	48
2.4.2. Выбор управляющего устройства.....	51
2.4.3. Выбор технических средств измерения расхода топлива.....	54
2.4.4. Выбор исполнительного механизма.....	56
2.4.5. Выбор технических средств для автоматизированного рабочего места.....	58
3. Схема уровней управления.....	61
4. Разработка документации АСУ топливоподачи.....	63
4.1. Перечень входных и выходных сигналов.....	63
4.2. Проектирование принципиальной схемы АСУ топливоподачи.....	63
4.3. Проектирование монтажной схемы АСУ топливоподачи.....	65
4.4. Разработка чертежа общего вида щитовой конструкции АСУ.....	69
5 Расчет параметров настройки регулятора.....	71
5.1 Идентификация объекта управления.....	71
5.2 Расчет параметров настройки регулятора.....	74

6. Разработка SCADA системы для АСУ топливоподачи	81
7. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение..	86
7.1. Планирование работ и оценка времени выполнения	86
7.2 Смета затрат на проект	90
7.3 Смета затрат на оборудование и монтажные работы.....	93
8.4 Определение экономической эффективности проекта	94
Вывод по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	95
8. Социальная ответственность	97
8.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	98
8.2. Производственная безопасность	99
8.3. Экологическая безопасность.....	107
8.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	109
Выводы по разделу «Социальная ответственность»	113
Заключение	114
Список использованных источников	116
Приложение А Comparative study of fuel compositions	125
Графический материал:	на отдельных листах
ФЮРА.421000.012 С2	Схема функциональная
ФЮРА.421000.012 Э3	Схема принципиальная электрическая
ФЮРА.421000.012 С4	Схема монтажная
ФЮРА.421000.012 ВО	Общий вид щита автоматизации

Введение

В последние годы уголь занимает одну из лидирующих позиций в мировом энергетическом балансе. Сохраняющиеся на сегодняшний день значительные запасы и доступность угля во многих регионах мира способствовали увеличению добычи твердого топлива. Большая часть добываемого объёма угля обогащается. К примеру, в мире в среднем обогащается 70–90% добываемого угля, в Австралии и ЮАР обогащается весь добываемый уголь, а в Кузбассе – более половины. В результате переработки угля образуются отходы углеобогащения (фильтр-кеки). Ежегодно в угледобывающих регионах формируются миллионы тонн фильтр-кеков [1–7]. Например, углеперерабатывающие предприятия Кузбасса ежегодно производят свыше 2 млрд. тонн таких отходов. Как правило, отходы углеобогащения складываются в бункерах, гидроотвалах и прудах-накопителях, которые, в свою очередь, ухудшают экологическое состояние окружающей среды и занимают значительные площади. По этим причинам задача масштабной утилизации отходов переработки угля имеет мировое значение.

Большой интерес отходы флотации угля, представляют для энергетической промышленности, так как обладают конкурентоспособными экологическими и экономическими показателями. Применение горючих отходов в составе композиционного топлива позволяет произвести их утилизацию с минимальными затратами. Использование таких отходов позволит расширить ресурсную базу энергопредприятий и получить альтернативное топливо.

Мировое научное сообщество разработало группу технологий утилизации отходов углеобогащения (основными направлениями считаются строительство, изготовление композитных материалов, сжигание). Главным способом утилизации отходов углеобогащения, является их сжигание с последующим получением тепловой энергии. Этот способ утилизации

является достаточно безопасным и ресурсоэффективным [8–22]. Для улучшения экологических показателей и минимизации затрат на сжигание целесообразно создавать топливные композиции на базе отходов углеобогащения: органоводоугольное топливо (ОВУТ) и водоугольное топливо (ВУТ). Одним из преимуществ суспензий ОВУТ является возможность использования в их составе компонентов нефтяного происхождения. В этой связи обоснованный интерес вызывает перспектива вовлечения в энергетический сектор неостребованных продуктов нефтепереработки и отработанных масел (машинных, турбинных, моторных, трансформаторных), формирующихся ежегодно в объеме сотен миллионов тонн.

На сегодняшний день выполнено достаточно большое число исследований (например, [8–22]) процессов приготовления и сжигания органоводоугольных композиций на основе фильтров-кеков. Например, перспективные исследования особенностей использования водоугольных топливных композиций провела группа ученых из Института теплофизики СО РАН, ООО «ПРОТЭН», г. Новосибирск, ОАО «СКЭК», г. Кемерово (Мальцев Л.И., Кравченко И.В., Лазарев С.И., Лапин Д.А.). В поселке Барзас Кемеровской области работает в тестовом режиме АСУ котельного агрегата, использующего ВУТ, активные исследования в этой области ведутся и в Китае. Вопросами зажигания и горения ОВУТ также занимается научно-исследовательская группа Томского политехнического университета в лаборатории моделирования процессов тепломассопереноса.

Результаты экспериментов [8–22] дают представление о закономерностях и характеристиках процессов зажигания ОВУТ. В работах [8–22] экспериментально получены данные об основных характеристиках и закономерностях процессов зажигания и горения ОВУТ, а также представлены результаты численных исследований зажигания композиционных жидких топлив (КЖТ). Следует, однако, отметить, что существует недостаток экспериментальных данных о влиянии компонентного состава ОВУТ на

характеристики его горения (особенно топлив, приготовленных на основе отходов угле- и нефтепереработки) при сравнительно низких температурах окислителя. Получение экспериментальной базы характеристик ОБУТ в широком диапазоне варьирования значимых факторов (температуры в камере сгорания, вида и концентраций компонентов топлива, размеров капель и др.), является перспективной задачей, так как такие топлива позволяют улучшить экологические и экономические показатели работы энергетической установки.

Результаты исследования будут интересны в сфере образования для студентов и аспирантов:

- для изучения процессов теплопереноса при горении группы распыленных капель ОБУТ;
- для изучения влияния свойств угля (или отхода его обогащения) на параметры процесса зажигания и горения топлива (пороговая температура зажигания, время задержки зажигания и полного сгорания ОБУТ);
- для определения влияния способа и длительности приготовления топлива на перечисленные параметры;
- для определения влияния концентрации и свойств органической составляющей топлива на характеристики зажигания и горения ОБУТ;
- для исследования систем автоматического управления энергоустановок по сжиганию топлива.

Экспериментальная информационная база интегральных характеристик и условий низкотемпературного зажигания органоводоугольных топливных композиций будет востребована в научной сфере при разработке технологий сжигания таких топлив, создании математических моделей зажигания и горения, получении новых знаний о процессах теплопереноса и фазовых превращениях, протекающих при горении капель композиционных суспензионных топлив. Развитие исследований в этом направлении позволит разработать эффективные автоматизированные технологии топливоприготовления и сжигания в энергоустановках отходов углеобогащения и нефтепереработки.

Возможности утилизации широкой группы промышленных отходов, сокращения площадей отвалов, расширения сырьевой энергетической базы, получения суспензионных топлив с низкой стоимостью обуславливает интерес промышленных предприятий (как энергетических, так и углеперерабатывающих) в результатах исследований различных характеристик ОБУТ и ВУТ.

В последние несколько лет выполнены экспериментальные исследования (например, [23–28]) сжигания органоводоугольных суспензий базирующихся на углях разных марок, отработанной масляной продукции обеспечения производственной техники и смесях нефти с водой. Группой авторов показано [23–28], что применение ОБУТ в котлоагрегатах в качестве основного топлива является перспективным. Однако в качестве основных компонентов ОБУТ в экспериментах [23–28] использованы высокосортные угли разной степени метаморфизма. Так как большая часть таких углей активно экспортируется развитыми государствами (например, Китаем, США, Индией, Россией), то целесообразно при приготовлении ОБУТ использовать отходы переработки и обогащения этих углей (например, фильтр-кеки). Объемы последних к 2020 году могут вырасти в несколько раз [7]. Актуальна задача создания ОБУТ на основе фильтр-кеков с добавлением отработанных масел разного происхождения. Важно определить, как могут влиять наиболее типичные компоненты таких топливных суспензий на их основные характеристики (стабильность, вязкость, теплота сгорания, инерционность зажигания, длительность горения и другие). Процессы зажигания и горения ВУТ и ОБУТ пока мало изучены (для условий низкотемпературного (менее 900 К) [23–28] зажигания нет данных), то целесообразно для получения соответствующей базы данных провести эксперименты с разными фильтр-кеками и отходами нефтехимического происхождения. При этом для расширения возможных приложений результатов исследований, условия нагрева топлив следует рассмотреть от низкотемпературных [26–28] до

соответствующих (более 1200 К) современным энергетическим установкам, блокам и агрегатам.

При использовании ОБУТ в котлоагрегате возникают некоторые проблемы, одна из них – это подача топлива в котел. При непрерывной подаче композиционного жидкого топлива с помощью форсунки необходимо регулировать количество воздуха, смешивающегося с ОБУТ для предотвращения выхода форсунки из строя. Кроме этого, для обеспечения жидкого шлакоудаления необходимо поддерживать в топке котельного агрегата высокие температуры (свыше 1300 °С).

Система управления процессом сжигания топлива называется АСУ топливоподачи.

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование характеристик ОБУТ, полученных на основе фильтр-кеков каменных углей и отработанных масел, а также проектирование автоматизированной системы сжигания органоводоугольной топливной композиции в котлоагрегате.

1 Исследовательские изыскания

На типичной углеобогатительной фабрике сырье состоит из смеси различных компонентов: угольной пульпы, продуктов накопителей, отвалов терриконов, тонкодисперсного угля, низкосортного угля [29,30]. Эти элементы получили обобщенное название – отходы углеобогащения и переработки (шламы, фильтр-кеки, промпродукт, концентрат, их смеси). Характеристика исходных материалов: относительно высокая зольность до 50...60% и влажность до 20...30%. Как следствие, такие твердые компоненты топлив считаются высокобалластными [31–33].

Обогащение угля – совокупность процессов переработки добываемого угля с целью отделения примесей, препятствующих его дальнейшему использованию. Примесями являются в основном минеральные компоненты и серосодержащие вещества. Продуктами обогащения являются: концентрат – имеет наибольшее содержание «чистого» угля; промышленный продукт – содержит сросстки угля с породой; хвосты – имеют наибольшее содержание минеральных примесей. Основные методы обогащения каменного угля: гравитационный – на основе различия плотности компонентов; флотационный – на основе различной естественной или создаваемой реагентами смачиваемости компонентов; магнитный – на основе различной магнитной восприимчивости компонентов; электрический – на основе различных электрических свойств компонентов; специальные – редко применяются для углей (рентгенометрическая сепарация, обогащение по форме и трению, магнитогидродинамическое обогащение, химическое обогащение и др.). Рациональный выбор одного или нескольких методов обусловлен, прежде всего, свойствами ископаемого угля, техникой и технологией обогащения, технико-экономическими индикаторами. В настоящее время в мире применяются в основном методы гравитационного и флотационного обогащения. В связи с широкой механизацией добычи угля выход мелких высокозольных классов угля менее 1 мм резко возрос и составляет 25...30% от

рядового угля. Дальнейшее совершенствование техники добычи углей (особенно применение гидравлического способа) еще увеличит выход и зольность этого класса. Кроме этого, например, для различных процессов глубокой переработки угля желательно иметь исходное топливо с зольностью не более 3%. Этого гравитационными методами обогащения не добиться. Также существует проблема необходимости очистки различных угольных шламов (может достигать до 25% от производительности фабрики) и шламовых вод. Как следствие, большое значение приобретает флотационный метод обогащения. Применение флотации позволило увеличить выход концентрата для коксования и снизить его зольность.

В России добывается 400...500 млн. тонн угля в год. В среднем обогащается около 60...70% угля (коксуемый уголь обогащается примерно на 90...95%). Поставлена задача довести эти значения до 85% к 2020 г. (при добыче почти 500 млн. тонн в год). Значение удельного показателя отходов флотации составляет 120...130 кг/т рядового угля, а породы углеобогащения 410 кг/т рядового угля (показатели справочные и приблизительные). Как следствие, объемы ежегодного производства фильтр-кеков, шламов, промпродукта в ближайшие годы кратно возрастут и проблема их утилизации станет еще более острой. Такие проблемы типичны не только для России, но и Китая, Индии, США. Известные технологии использования угольных шламов, к сожалению, имеют невысокие коэффициенты эффективности (по комплексным экономическим, экологическим и энергетическим оценкам) и позволяют вовлекать небольшие объемы.

Торф состоит из частично разложившихся органических продуктов, минералов и воды. Низинный тип имеет следующий состав: углерод 40...60%; водород 5%; кислород 2...3%; сера, фосфор, калий – в небольшом количестве. Благодаря большому содержанию углерода средняя теплота сгорания торфа составляет 10...15 МДж/кг (для некоторых торфов до 20 МДж/кг), которая может увеличиваться по мере разложения и содержания органических соединений – битумов. Внешний вид, структура и свойства этого природного

образования изменяются по мере смены стадий разложения. Так, цвет меняется от светло-желтого до черного. Разной от степени разложения будет и структура – волокнообразная либо аморфная, а также пористость. Чем большей будет степень разложения торфа, тем меньше в нем будет содержаться водорастворимых и легкогидролизуемых веществ, и тем выше будет содержание гуминовых кислот и негидролизуемого остатка.

Использование торфа в качестве топлива вызывает много дискуссий, так как он имеет существенные ограничения применения. Большие объемы накопления являются основной причиной необходимости использования торфа. Он представляет собой остатки растений, которые не полностью разложились в болотных условиях. Болото характеризуется недостатком кислорода и большой влажностью. Это и не дает растениям полностью разложиться. Растительная масса накапливается из года в год и превращается в однородную массу – торф. Мировой ресурс этого ископаемого по оценкам экспертов от 250 до 500 млрд. тонн. В общей сложности он покрывает 3% суши. Первое место по запасам торфа досталось Канаде (170 млрд. тонн), а второе у России (150 млрд. тонн). Большая доля торфяников в Швеции, Финляндии, Германии, Белоруссии, Ирландии, Великобритании, некоторых штатах США. В России, по подсчетам экспертов, сосредоточено от 40 до 60% мировых запасов. Занятые торфом земли в нашей стране составляют 31,8% в Томской области и 12,5% в Вологодской области. Внушительное количество залежей находится в Центральных регионах – Рязанская, Московская, Владимирская области. Каждый год запасы торфа в России пополняются на 250 млн. тонн. При таких условиях у России есть большое будущее в решении проблемных вопросов местной энергетики, повышении плодородия почвы, экологических задач.

Совсем недавно Россия была лидером в потреблении торфяного топлива, но сегодня уступает место таким странам, как Финляндия, Ирландия и Канада. В России торф стали добывать еще 200 лет назад. Он использовался в качестве топлива на тепловых электростанциях. На сельскохозяйственные нужды

добывали 160–180 тонн каждый год. А в 1965 году добыча достигла своего исторического максимума и составила 27,9 млн. тонн. Последующие 30 лет показатели только снижались. В Западной Сибири были открыты крупные месторождения природного газа. Энергетика ускоренными темпами стала переходить на этот вид топлива. В итоге к концу 90-х годов объем добычи торфа снизился до 2...4 миллионов тонн в год. Во времена СССР эта цифра составляла 220...280 миллионов тонн. Использование газа в качестве основного теплоэнергетического топлива не имеет альтернатив по экологии и экономике для крупных государств. Поэтому газификация районов происходит ударными темпами. Но помимо того, что газ – ресурс исчерпаемый, эта тенденция имеет еще один минус. Большая часть регионов мира зависима от газа, за счет которого сегодня вырабатывается 90% тепла. Избежать зависимости можно за счет резервного топлива.

Что касается сравнения торфа с углем, преимущество по многим позициям находится у первого. Энергоемкость торфяных брикетов однородна, тогда как теплотворная способность угля неравномерна. И стоимость его при учете транспортных расходов во много раз выше цены торфа. Определяющим преимуществом торфяного топлива является его экологическая безопасность, проблема которой является сегодня одной из актуальных в мире. Например, каменный уголь содержит 1–3% серы, мазут 1.2%. При сгорании из серы образуется двуокись серы, которая вступает в реакцию с атмосферной влагой и вырабатывает сернистую кислоту, а она превращает обычный дождь в кислотный. В торфе сера практически отсутствует (по сравнению с углем). Также при использовании торфяного топлива в десятки раз уменьшаются выбросы твердых взвешенных частиц. Торфяную золу легко утилизировать, чего не скажешь про угольные шлаки. Также специалисты сделали вывод, что освоение торфяных территорий поможет уберечь большие участки от пожаров. Но некоторые специалисты выступают против широкого использования торфа. Они утверждают, что большая торфодобыча может негативно сказаться на климате и биологическом разнообразии. Болото, как и

лес, обладает свойством поглощения из атмосферы диоксида углерода и высвобождения кислорода. При его осушении большие объемы углекислоты, накопленной тысячами, попадут в атмосферу и стимулируют парниковый эффект. В ближайшее время такого масштабного освоения торфяников, которое может оказать ощутимое влияние на климат Земли в России ожидать не стоит. Специалисты утверждают, что запасов природного газа нам может хватить еще на 80–100 лет. Но, тем не менее, расширять торфяную отрасль тоже необходимо, потому что ресурс этого вида топлива в мире огромен [34,35].

Известно [36], что применение суспензионных водосодержащих топлив (водоугольных, органоводоугольных, композиционных) позволяет повысить эффективность сжигания угля, а так же снизить концентрации вредных выбросов в атмосферу (в частности, оксидов азота и серы) [37–39]. Технологии сжигания водоугольных (ВУТ), органоводоугольных (ОВУТ) и композиционных жидких топлив (КЖТ) считаются практически безотходными. Мелкие частицы в составе суспензий размером от 50 мкм и менее либо целиком сгорают в топке, либо вообще не горят (например, оксиды металлов). Использование отходов переработки угля для получения ВУТ позволяет существенно упростить технологические схемы приготовления топлива (отсутствуют затраты на первичную подготовку топлива, связанную с помолом), а также снизить штрафы производств за загрязнение окружающей среды отходами углеобогащения [40]. В течение последних пяти лет интерес к ВУТ на основе фильтр-кеков существенно возрос в таких странах, как Россия, Китай, Индия. Активно ведутся работы, направленные на изучение характеристик сжигания таких топлив. Известно [41], что фильтр-кеки по сравнению с углями имеют малое количество летучих компонентов и углерода. Как следствие, времена задержки зажигания таких топлив существенно выше [42]. Для большинства фильтр-кеков разных каменных углей инерционность зажигания возрастает в несколько раз по сравнению с углями. Одним из направлений интенсификации процессов зажигания

водоугольных суспензий считается создание ОВУТ [42]. Добавление горючих жидкостей (отработанных турбинных, трансформаторных, компрессорных, автомобильных и других масел; нефтяных шламов) в топливные суспензии позволяет снизить времена зажигания и горения топлив ОВУТ, расширить номенклатуру утилизируемых отходов, значительные запасы которых представляют высокую экологическую опасность [40]. В качестве одного из ограничивающих факторов можно выделить недостаточность экспериментальной информации об энергетических, экологических и экономических характеристиках, а также показателях пожаровзрывобезопасности [40].

Важной и перспективной задачей является изучение возможности совместного вовлечения угольных шламов, торфа, отработанных масел, фусов, смол и других компонентов (перечни представлены в обзорной статье [40]) в составе ОВУТ, ВУТ и КЖТ. При этом важно главным образом уделить внимание компонентам, которые изначально уже содержат воду или находятся в жидком и суспензионном состоянии. К наиболее перспективным в таком случае можно отнести торф, угольные шламы и флотационные отходы (фильтр-кеки).

1.1. Цель и задачи исследований

Целью исследований являлось экспериментальное определение предельных условий и основных характеристик процессов зажигания и горения капель водосодержащих топлив из торфа, угольных шламов и измельченного угля.

Основные задачи исследований:

- 1) приготовление топливных суспензий с использованием торфа, отходов переработки угля, бурого угля и отработанного турбинного масла;
- 2) определение времен задержек зажигания, длительностей горения капель приготовленных суспензий, а также минимальных температур зажигания и максимальных температур горения капель;
- 3) определение концентраций оксидов азота, оксидов серы в продуктах сгорания исследуемых суспензий;
- 4) расчет относительных показателей эффективности использования исследованных суспензий в сравнении с углем и мазутом наиболее распространенных марок.

1.2. Исследуемые материалы

Внешний вид твердых горючих компонентов представлен на рисунке 1. В качестве дисперсной среды использовалась водопроводная вода. Торф добыт в Томской области (месторождение «Суховское»), бурый уголь – в Красноярском крае, фильтр-кек и угольный шлам получены от обогатительной фабрики Кемеровской области. Турбинное масло получено с энергетической турбины ТЭС в Томской области после года эксплуатации. Анализ твердых горючих компонентов осуществлялся в соответствии с методиками и регламентами [43–47]. Свойства отработанного масла определялись по рекомендациям [48–50]. Типичные кадры исследуемых материалов приведены на рисунке 1.1.

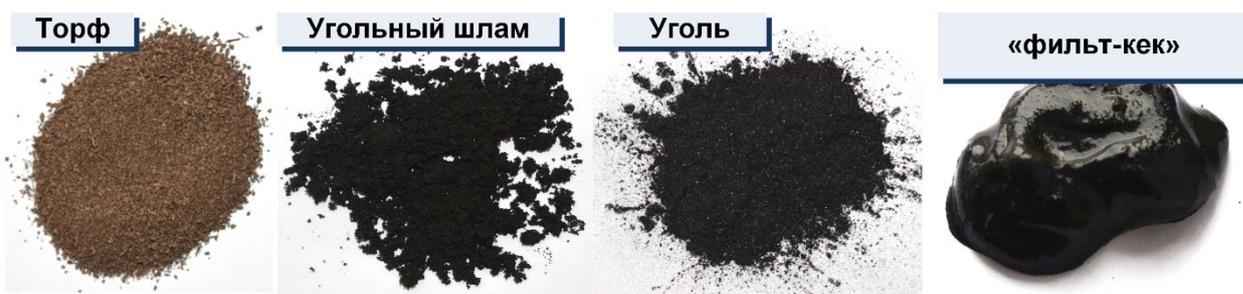


Рисунок 1.1 – Твердые горючие компоненты суспензионных топлив (фильтр-кек показан в невысушенном виде).

Исследовались суспензии следующего компонентного состава:

- 1) 40% торф, 10% отработанное турбинное масло, 50% вода;
- 2) 40% фильтр-кек коксующегося угля, 10% отработанное турбинное масло, 50% вода;
- 3) 40% бурый уголь, 10% отработанное турбинное масло, 50% вода;
- 4) 40% угольный шлам, 10% отработанное турбинное масло, 50% вода;
- 5) 30% фильтр-кек коксующегося угля, 20% угольный шлам, 50% вода.

Приготовление топливных суспензий проводилось с использованием гомогенизатора. На первом этапе смешивались вода и масло. Затем в водомасляную эмульсию добавлялся твердый горючий компонент. Смешение осуществлялось до получения полностью однородной суспензии.

1.3. Характеристики зажигания и горения

Характеристики зажигания и горения исследовались с помощью модельной камеры сгорания (муфельной печи) и ряда вспомогательного оборудования. На рисунке 1.2 представлена схема используемого стенда. Показаны два блока регистрации, использованные в экспериментах по определению условий и характеристик процессов зажигания и горения, а также по изучению экологических параметров.

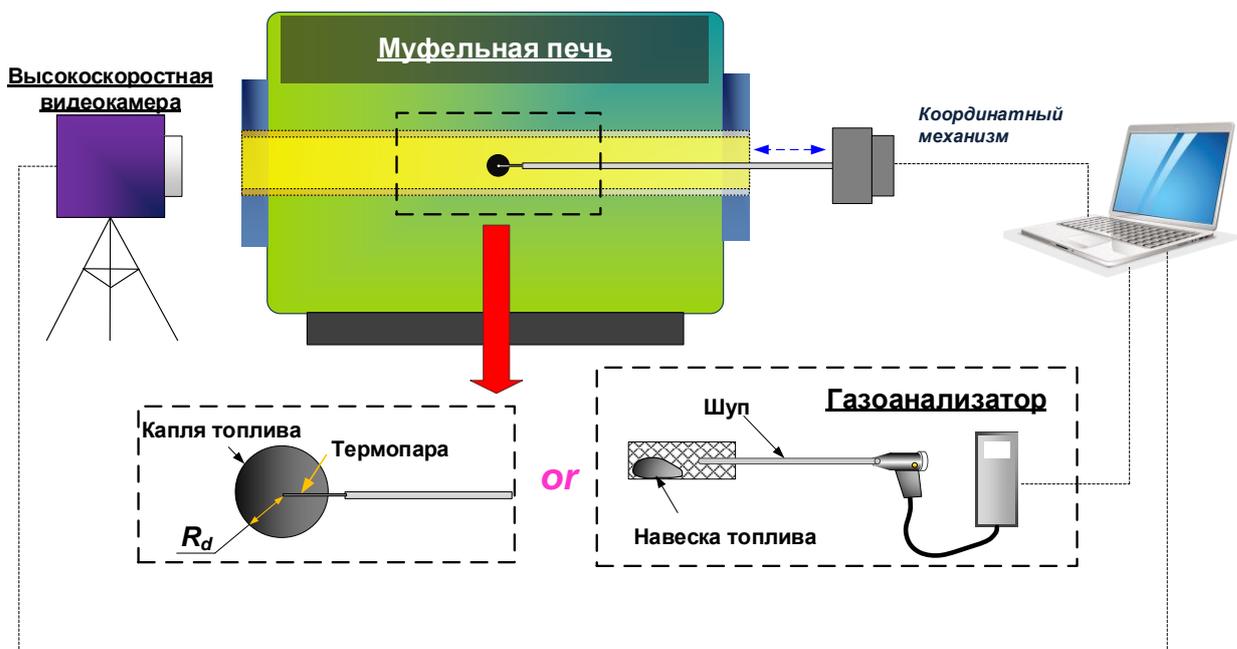


Рисунок 1.2 – Схема экспериментального стенда

Внутри полой керамической трубки муфельной печи (рисунок 1.2) поддерживалась высокая температура 350...1000 °С. На передней панели муфельной печи отображалось значение температуры внутри камеры. Также проводилось дополнительное измерение температуры в камере сгорания T_g с помощью шупа с термопарой (хромель-алюмель, диапазон измеряемых температур 0...1100 °С, систематическая погрешность ± 3 °С, инерционность не более 10 с) для проверки показаний встроенного в муфельную печь сенсора.

С одной из боковых сторон муфельной печи устанавливалась высокоскоростная (до 10^5 кадр/с) видеокамера. С другой стороны, размещалось координатное устройство для автоматизированной подачи образца топлива внутрь камеры сгорания (рисунок 1.2). Устройство имело привод и шаговой механизм и могло управляться сигналами, подаваемым в ручном режиме с персонального компьютера. Координатное устройство настраивалось таким образом, чтобы образец топлива расположился в центре камеры сгорания.

После прогрева камеры до необходимой температуры проводился этап подготовки капли топлива. Капли формировалась с помощью электронного

дозатора (пределы дозирования 1...10 мкл, шаг варьирования объема дозирования 0,1 мкл). Сформированная капля топливной суспензии помещалась на наконечник тонкой металлической проволоки (диаметр около 0,25 мм), установленной в моторизированном координатном механизме, который затем использовался для помещения капли в камеру сгорания (рисунок 1.2). Процессы нагрева, зажигания и горения капли суспензии регистрировались высокоскоростной видеокамерой.

Для капель суспензий фиксировались следующие характеристики: время задержки гетерогенного зажигания τ_d , длительность горения τ_b , минимальная температура зажигания T_g^{\min} , максимальная температура горения твердого остатка топлива T_d^{\max} . Для регистрации T_d^{\max} использовался тепловизор (температурная чувствительность <30 мК, детектор 640×480, максимальная измеряемая температура 1197 °С).

По видеозаписи, получаемой в процессе эксперимента, можно определить временные характеристики зажигания и горения капли топлива, поскольку реакция горения является экзотермической и сопровождается не только выделением тепла, но и света. Задача определения времени задержки зажигания и длительности горения решалась с применением специализированных алгоритмов программного обеспечения Tema Automotive, позволяющего отслеживать интенсивность свечения капли композиционного жидкого топлива. Временем задержки гетерогенного зажигания τ_d считался интервал от момента входа капли топлива в камеру сгорания до момента зажигания твердой части капли. Параметр τ_b представлял время от момента гетерогенного зажигания твердого остатка топлива до момента окончания горения. Минимальная температура зажигания определялась путем усреднения 5–7 повторяемых измерений. Погрешность ее определения не превышала 10 °С. Теплота сгорания топливных композиций определялась как сумма теплот сгорания каждого компонента в соответствии с массовой долей в смеси. Правомерность применения подхода обоснована в [51].

Начальный радиус R_d каплей топлив определялся с использованием высокоскоростной видеокамеры и программного обеспечения Tema Automotive. По начальным изображениям каплей вычислялись четыре размера в различных сечениях. По среднему значению из этих четырех размеров определялся радиус капли R_d . Систематическая погрешность определения R_d с максимально возможным разрешением видеокамеры и частотой кадров не превышала 4%, а времен τ_d и τ_b – не более 2,5%. Определялись характеристики зажигания каплей суспензий с начальным радиусом около 1 мм. Результаты сопоставлялись, если отклонение среднего радиуса не превышало ± 0.15 мм.

Стенд (рисунок 1.2) также использовался для определения экологических характеристик горения суспензий. В экспериментах использовалась навеска топлива массой около 1 г. Методика регистрации определения экологических индикаторов в соответствии с подходом [36,40]. Установленная на координатном механизме вертикальная заслонка со слоем высокотемпературной изоляции закрывала отверстие, служащее для ввода навески топлива в камеру сгорания. Таким образом, обеспечивался контроль коэффициента избытка воздуха (во всех экспериментах составил 1,05). Для измерения использовался газоанализатор. При обработке экспериментальных данных рассчитывались суммарные средние выбросы за время горения. При каждой температуре получали не менее четырех повторяемых измерений, на основании которых получали зависимость концентраций NO_x и SO_x от температуры в камере сгорания.

1.4. Относительные показатели эффективности

Целесообразно для новых топливных композиций провести оценку их энергетических, экономических, экологических показателей, а также пожаровзрывобезопасности относительно традиционных топлив. В настоящее время на тепловых электрических станциях наиболее часто используют три вида топлива: уголь, топочный мазут, природный газ. Среди этих трех видов топлив природный газ является экологически чистым и обладает высокой

теплотой сгорания. Сжигание природного газа оказывает наименьшее антропогенное давление в сравнении с углем. В 2015 году в мировом масштабе по выбросу SO_2 на долю угля приходилось 60%, нефти – 35%, биомассы – 5%; по выбросу NO_x на долю нефти приходилось 70%, угля – 15%, природного газа – 10%, биомассы – 5% [52]. Также в 2015 году лидерами по выбросам углекислого газа в продуктах сгорания являлся уголь с долей 44,9%, затем нефть 34,6% и природный газ 19,9% [53]. Разумеется, что композиционные суспензии из отходов не могут соперничать с природным газом по теплоте сгорания и антропогенным выбросам. Поэтому сравнение показателей горения ВУТ и ОБУТ проводилось с каменным углем и мазутом.

Для оценки разных аспектов применения топлива рассчитывались показатели, учитывающие теплоту сгорания, стоимость, пожаровзрывобезопасность и антропогенную опасность:

1) отношение теплоты сгорания суспензии Q_{slurry} к теплоте сгорания угля

Q_{coal} или мазута $Q_{fuel\ oil}$:

$$Q_{relative_coal} = Q_{slurry} / Q_{coal}; \quad (1.1)$$

$$Q_{relative_fuel\ oil} = Q_{slurry} / Q_{fuel\ oil}. \quad (1.2)$$

2) отношение выбросов оксидов азота исследуемых суспензий NO_x_{slurry} и

угля NO_x_{coal} (мазута $NO_x_{fuel\ oil}$):

$$NO_x_{relative_coal} = NO_x_{coal} / NO_x_{slurry}; \quad (1.3)$$

$$NO_x_{relative_fuel\ oil} = NO_x_{fuel\ oil} / NO_x_{slurry}. \quad (1.4)$$

3) отношение выбросов оксидов серы исследуемых суспензий SO_x_{slurry} и

угля SO_x_{coal} (мазута $SO_x_{fuel\ oil}$):

$$SO_x_{relative_coal} = SO_x_{coal} / SO_x_{slurry}; \quad (1.5)$$

$$SO_x_{relative_fuel\ oil} = SO_x_{fuel\ oil} / SO_x_{slurry}. \quad (1.6)$$

4) отношение стоимости суспензии C_{slurry} и угля C_{coa} (мазута $C_{fuel\ oil}$):

$$C_{relative_coal} = C_{coal} / C_{slurry}; \quad (1.7)$$

$$C_{relative_fuel\ oil} = C_{fuel\ oil} / C_{slurry}. \quad (1.8)$$

Далее рассчитывался более обобщенный показатель по выражению:

$$D^{NO_x\&SO_x}_{slurry} = Q^a_{s_slurry} / (C_{slurry} \cdot NO_{x_slurry} \cdot SO_{x_slurry}). \quad (1.9)$$

После соответствующих подсчетов интегральный показатель новой композиционной суспензии $D^{NOx\&SOx}_{slurry}$ делился на аналогичный показатель для угля $D^{NOx\&SOx}_{coal}$ или мазута $D^{NOx\&SOx}_{fuel\ oil}$:

Дополнительным показателем оценки рассматриваемых топлив являлась пожаровзрывобезопасность. Этот показатель рассчитывали по выражению $P = T_g^{\min} \cdot \tau_d \cdot T_d^{\max}$. После соответствующих подсчетов показатель пожаровзрывобезопасности нового композиционного топлива (P_{slurry}) делился на аналогичный показатель для угля (P_{coal}) или мазута ($P_{fuel\ oil}$):

Итоговый усредненный показатель рассчитывался путем сложения всех ранее рассчитанных коэффициентов с последующим делением на их количество:

$$C_{c\ coal} = (Q_{relative_coal} + NOx_{relative_coal} + SOx_{relative_coal} + C_{relative_coal} + D_{relative_coal} + P_{relative_coal}) / 6. \quad (1.10)$$

1.5. Характеристики зажигания

На рисунке 1.3 представлены времена задержки зажигания капель топливных композиций в зависимости от температуры в камере сгорания, которая варьировалась от 700 °С до 900 °С. Как показали эксперименты, устойчивость газофазной стадии зажигания во многом зависит от наличия в составе турбинного масла. Жидкие горючие компоненты испаряются, воспламеняются и выгорают в газовой фазе, выделяя достаточно большое количество тепла (для отработанного турбинного масла теплота сгорания составляет около 45 МДж/кг), которое идет на дополнительный прогрев коксового остатка, ускоряя его гетерогенное воспламенение. Однако в экспериментах зарегистрирован, на первый взгляд, противоречащий данному явлению результат. Для состава без добавления турбинного масла характерны наименьшие времена задержки гетерогенного зажигания (рисунок 1.3). Возможно, что результат обусловлен тем, что для данного состава нетипична стадия газофазного горения, предшествующая гетерогенному зажиганию коксового остатка. При сгорании смеси паров турбинного масла и летучих

веществ потребляется кислород. Как следствие, поступление окислителя к коксовому остатку на некоторый период затруднено, хотя поверхность топлива разогревается сильнее при наличии стадии интенсивного газофазного горения.

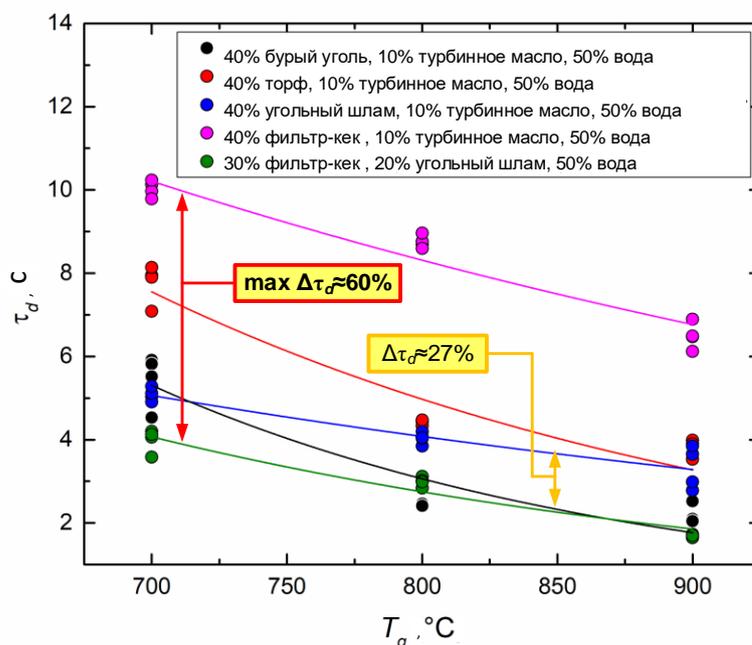


Рисунок 1.3 – Времена задержки зажигания капель композиционных топлив в зависимости от температуры в камере сгорания

С увеличением температуры в камере сгорания до 900 °C отмечались близкие времена задержки зажигания смесевых топлив. Это говорит о том, что для стабильного горения в топке котла необходима приблизительно одинаковая тепловая энергия. Главной особенностью данного исследования является использование в составе суспензий низкосортных топлив (бурый уголь, торф) и отходов углеобогащения (угольный шлам и фильтр-кек). Эти компоненты имеют малую стоимость и не требуют больших затрат, связанных с приготовлением топлив. Уголь перед подачей в камеру сгорания необходимо измельчать, отходы же углеобогащения этого не требуют. При переходе на суспензии из отходов это позволит удешевить производство тепловой энергии. Как показал эксперимент, времена задержки зажигания у смесевого топлива 30% фильтр-кек, 20% угольный шлам, 50% вода, ниже в среднем на 17%

относительно состава 40% бурый уголь, 10% турбинного масла, 50% воды. Целесообразен перевод водогрейных котлов на суспензию на основе шлама и фильтр-кека с позиции минимизации временных затрат на розжиг.

Рисунок 1.4 иллюстрирует значения минимальных температур зажигания (T_g^{\min}) при варьировании состава суспензий.

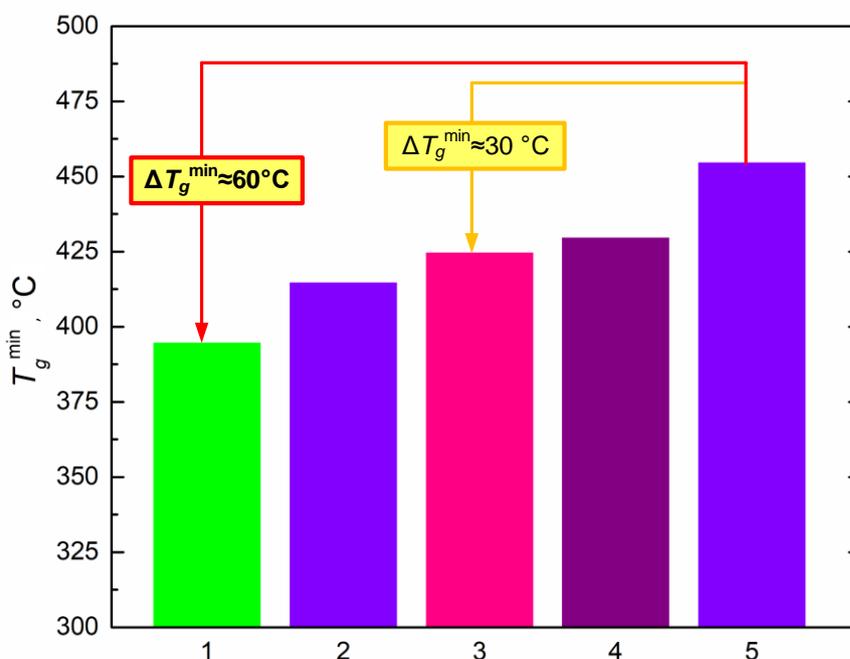


Рисунок 1.4 – Минимальные температуры зажигания топлив: 1 – (40% бурый уголь, 10% отработанное турбинное масло, 50% вода); 2 – (40% торф, 10% отработанное турбинное масло, 50% вода); 3 – (40% угольный шлам, 10% отработанное турбинное масло, 50% вода); 4 – (40% фильтр-кек коксующегося угля, 10% отработанное турбинное масло, 50% вода); 5 – (30% фильтр-кек коксующегося угля, 20% угольный шлам, 50% вода)

Подбиралась такая температура, при которой происходило устойчивое воспламенение твердой составляющей топлива. Этот параметр является очень важным для растопки котла, поскольку чем больше температура зажигания, тем более возрастают затраты на энергию, необходимую для зажигания этого топлива. Эксперименты показали, что минимальную температуру зажигания имеет состав на базе бурого угля, а максимальная температура зажигания

характерна составу на базе угольного шлама и фильтр-кека (рисунок 1.4.). При этом максимальная разница составила около 60 °С. Такое отличие вызвано тем, что в составе на основе фильтр-кека и угольного шлама отсутствует турбинное масло, поэтому для устойчивого гетерогенного воспламенения коксового остатка необходимы более высокие температуры внешней газовой среды.

1.6. Характеристики горения

Рисунок 1.5 иллюстрирует влияние температуры в камере сгорания на длительности горения исследуемых топлив. Параметр τ_b представляет интервал времени от момента гетерогенного зажигания до полного выгорания твердой части топлива. Этот параметр является одним из наиболее важных для котлоагрегата, так как распыленное жидкое топливо должно успеть выгореть за время пребывания в камере сгорания. Иначе произойдет налипание на стенки топочной камеры, что приведет к коррозионному износу металла. Эксперименты показали, что состав на базе бурого угля имеет наименьшее время горения (Рисунок 1.5). Для данного топлива характерно диспергирование капли (Рисунок 1.5). Фрагментация исходной капли влечет снижение длительности прогорания. Кроме того, дополнительная энергия может расходоваться на прогрев центральной части капли, где сохраняется влага и непрореагировавшая масса топлива. Поэтому длительность горения может увеличиваться при увеличении влажности топлива (у торфа влажность, как правило, выше, чем у бурых углей). Следует отметить, что не для всех составов топливных композиций прослеживалась такая закономерность. Это обусловлено тем, что, например, при приготовлении суспензий с несколькими твердыми горючими компонентами могли формироваться сложные агломераты в составе, которые при нагреве и реагировании имели как меньшие, так и большие инерционности зажигания. Доминирующую роль играл фактор преобладающей концентрации того или иного твердого горючего компонента.

Также длительность гетерогенного горения возрастает при увеличении концентрации твердого компонента суспензии, что характерно для состава 20% угольный шлам, 30% фильтр-кек, 50% вода. В других составах твердая горючая масса была меньше на 10%, что влияет на длительность гетерогенного прогорания.

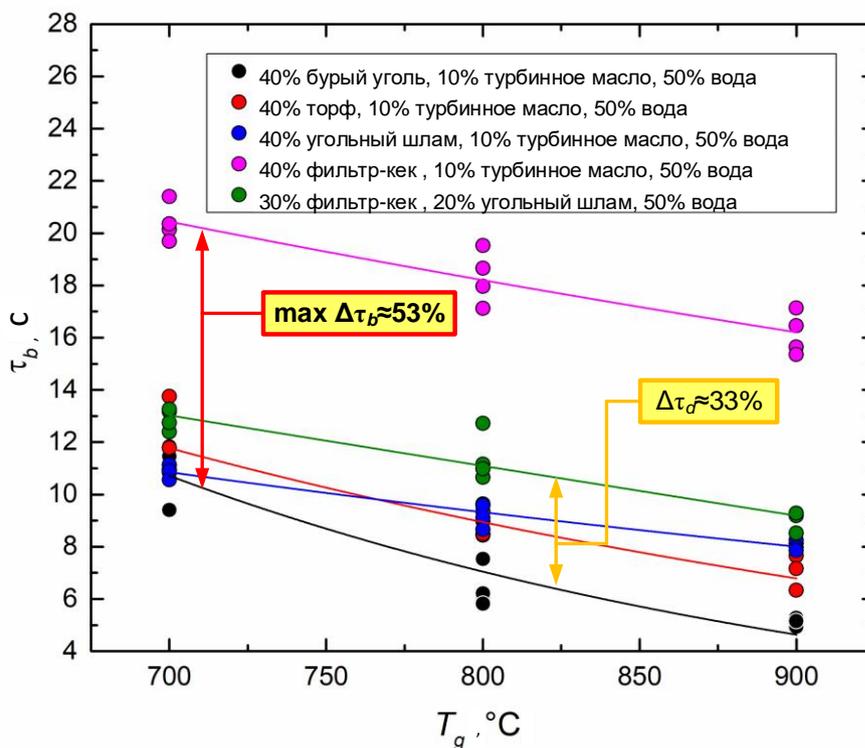


Рисунок 1.5 – Длительности горения композиционных топлив в камере сгорания в зависимости от температуры

Экологические показатели важны для объектов промышленной теплоэнергетики, так как за превышения допустимых значений антропогенных выбросов предполагается штраф. К примеру, в России концентрация SO_x не должна превышать 526 ppm, а NO_x 320 ppm. Для США характерны выбросы, не превышающие NO_x около 600 ppm, SO_x около 556 ppm. В Китае нормы предполагают выбросы SO_2 в пределах 450 ppm, NO_x в пределах 600 ppm [38]. Экспериментальные результаты, представленные на рисунках 1.6, 1.7 входят в диапазоны разрешенных антропогенных выбросов, следовательно, все полученные композиционные топлива могут применяться

для сжигания в котлоагрегатах. Причем данные эксперименты проводились без газоочистки. При сжигании топлив в промышленности наличие оборудования по очистке дымовых газов обязательно. С учетом этого, экологические показатели могут уменьшаться еще на 10–20%.

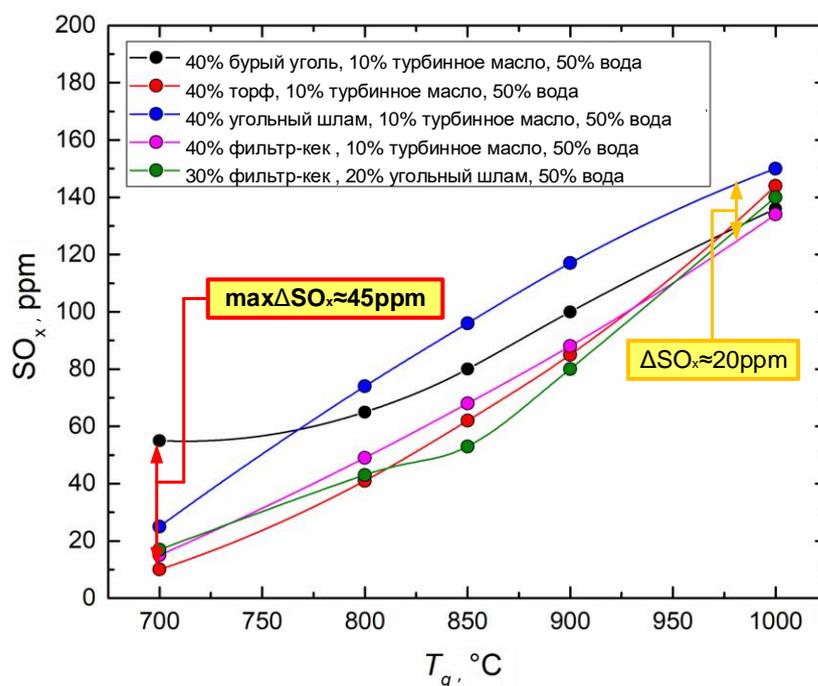


Рисунок 1.6 – Зависимости концентраций оксидов серы в продуктах сгорания композиционных топлив при изменении температуры в камере сгорания

Как показали измерения, первый состав 20% угольный шлам, 30% фильтр-кек, 50% вода характеризуется в сравнении с другими композициями минимальными концентрациями оксидов азота в продуктах сгорания (рисунок 1.7). По концентрациям оксидов серы данный состав сопоставим с суспензиями, в состав которых включено турбинное масло. Как видно на рисунке 1.6, при температуре в 850 °C наименьшие выбросы имеет состав 30% фильтр-кек коксующегося угля, 20% угольный шлам, 50% вода, что и доказывает эффективность при отказе от турбинного масла. Одной из главных особенностей является то, что при достижении температуры в 1000 °C значения концентрации SO_x для разных топлив становятся близкими.

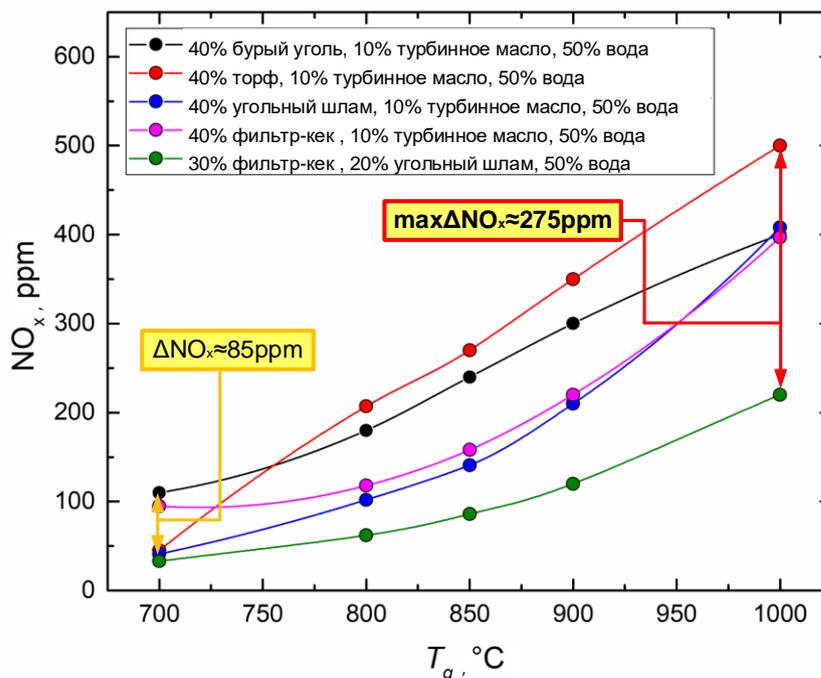


Рисунок 1.7 – Зависимости концентраций оксидов азота в продуктах сгорания композиционных топлив при изменении температуры в камере сгорания

1.7. Относительные коэффициенты полезного использования

Для определения оптимальной топливной композиции, которая представляет интерес для использования на производстве, целесообразно рассмотреть группу важных критериев, таких как теплоту сгорания, стоимость компонентов, антропогенные выбросы и пожаровзрывобезопасность, а также проанализировать оценочный коэффициент, который включает все эти показатели.

В расчетах приняты следующие сокращенные индексы: “comp.fuel_1” – композиционное топливо с составом 40% торф, 10% турбинное масло, 50% вода; “comp.fuel_2” – композиционное топливо с составом 40% бурый уголь, 10% турбинное масло, 50% вода; “comp.fuel_3” – композиционное топливо с составом 40% фильтр-кек, 10% турбинное масло, 50% вода; “comp.fuel_4” – композиционное топливо 40% угольный шлам, 10% турбинное масло, 50% вода; “comp.fuel_5” – композиционное топливо 20% угольный шлам, 30% фильтр-кек, 50% вода.

Теплота сгорания топливных композиций рассчитана в соответствии с процентной концентрацией и теплотой отдельных компонентов. Так же рассчитан относительный показатель по теплоте сгорания в сопоставлении с углем и мазутом.

При расчете относительных экологических показателей D^{NO_x} и D^{SO_x} выбирались концентрации опасных газов при температуре в камере сгорания около 1000 °С (рис. 1.6, 1.7). Для сопоставления относительного показателя проводились эксперименты с углем и мазутом, получены следующие значения выбросов оксидов серы и азота: $NO_{x_fuel\ oil}$ около 156 ppm, $SO_{x_fuel\ oil}$ практически 150 ppm. Относительно угля и мазута рассчитан коэффициент экономического и экологического потенциала топлив.

Одним из главных показателей для использования топливных композиций является стоимость, был рассчитан относительный показатель стоимости топливной композиции в сравнении с углем и мазутом. Общая стоимость топлива определена в зависимости от массовой концентрации компонентов в готовой смеси.

Для использования топлива в производстве тепловой энергии показатель безопасности ($P_{relative\ coal}$; $P_{relative\ fuel\ oil}$) является очень важным. При превышении значения «1» состав считается более пожаровзрывоопасным, чем угольная пыль или мазут. Данный показатель рассчитывается с использованием значений минимальной температуры зажигания, и времени задержки зажигания топлива.

Анализируя показатели использования композиционных топлив, представленные на рисунке 1.8, можно сделать вывод, что самая эффективная топливная композиция для сжигания на энергетических объектах имеет состав: 30% фильтр-кек коксующегося угля, 20% угольный шлам, 50% вода. Эффективность его в сравнении с углем в 3 раза больше, а в сравнении с мазутом в 24 раза больше. При переводе котельных на такую композицию, уменьшится стоимость тепловой энергии, экологические выбросы, а также в

составе такого топлива можно утилизировать многочисленныe отходы углеобогатительных предприятий.

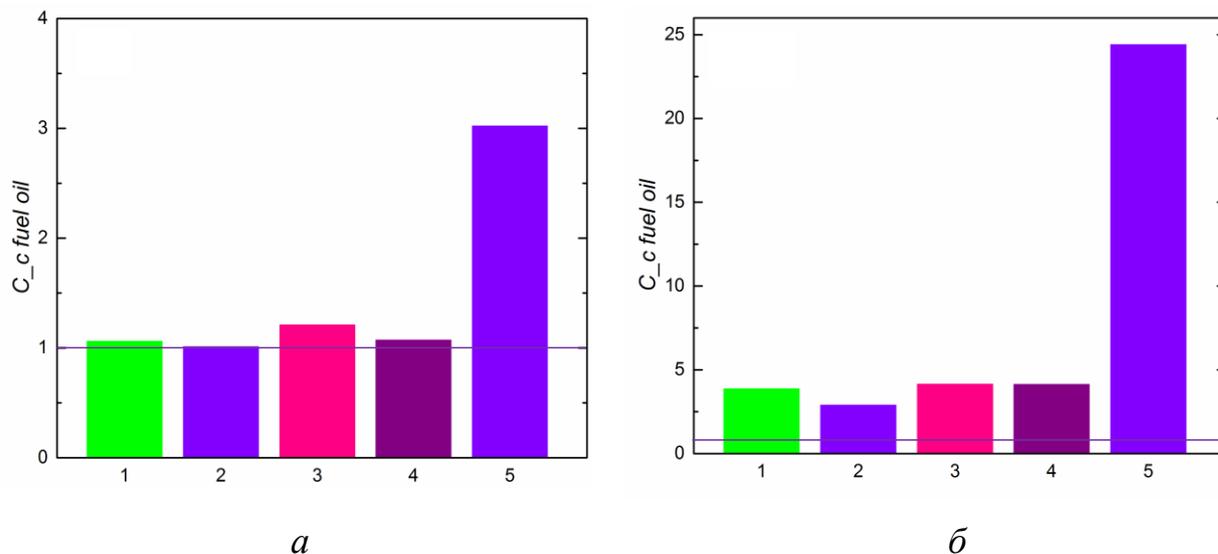


Рисунок 1.8 – Усредненный совокупный показатель использования композиционных топлив относительно каменного угля (*а*) и мазута (*б*): 1 – (40% бурый уголь, 10% отработанное турбинное масло, 50% вода); 2 – (40% торф, 10% отработанное турбинное масло, 50% вода); 3 – (40% угольный шлам, 10% отработанное турбинное масло, 50% вода); 4 – (40% фильтр-кек коксующегося угля, 10% отработанное турбинное масло, 50% вода); 5 – (30% фильтр-кек коксующегося угля, 20% угольный шлам, 50% вода)

1.8. Использование результатов исследований

В ходе исследований было установлено, что топливная композиция с составом «30% фильтр-кек коксующегося угля, 20% угольный шлам, 50% вода», имеет наибольший коэффициент полезного использования относительно традиционных угля и мазута, поскольку в ее составе используются отходы углеобогащения, которые имеют низкую стоимость. Также основные параметры по горению топлива наиболее оптимальны для перевода котельных на такую топливную композицию.

Выполненные исследования показали, что множество горючих отходов можно выгодно вовлекать в энергетику и получать при этом достаточно

масштабные положительные эффекты в экологическом и экономическом профиле работы предприятия. В более глобальном масштабе при использовании отходов можно снизить темп извлечения основных горючих ископаемых – угля, нефти и природного газа. Ежегодно в мире добывается около 7269 млн. тонн угля и около 4331 млн. тонн сырой нефти [53]. В то же время, в мире ежегодно формируется не менее 700 млн. тонн отходов обогащения и переработки угля, не менее 400 млн. тонн отходов нефтяного происхождения (включая шламы, различные отработанные индустриальные масла, эмульсии и другие горючие жидкости). Они представляют большую опасность [54–57] для окружающей среды, здоровья людей и животных. Торф, рассмотренный в настоящей работе в качестве компонента суспензионного топлива, представляет гигантский топливный ресурс, хотя и трудно извлекаемый. Его запасы оцениваются не менее чем в 350 млрд. тонн. На сегодняшний день в мире добывается около 25 млн. тонн торфа в год. С учетом этих данных, можно спрогнозировать, что при вовлечении торфов, отходов обогащения угля, нефтепродуктов можно сохранить около 10% угольного и нефтяного ресурса.

В ходе выполнения исследований выявлено, что при горении состава на базе отходов углеобогащения без добавления отработанного турбинного масла при температурах ниже 800 °С газофазного зажигания не происходит. Наличие жидкого горючего компонента для изученных составов способствовало снижению пороговой температуры зажигания, но также повышало время задержки гетерогенного воспламенения коксового остатка.

Выявлено, что при увеличении температуры в камере сгорания сжигание отличия времен задержки зажигания минимизируется для топливных композиций с отличающимся составом. Такое явление благоприятно отражается в промышленности. То есть при запуске котла, интерес представляет топливо с минимальным временем задержки зажигания, но при стабильной работе котлагрегата, когда топка прогрета и температуры велики, можно перейти к использованию составов с большим временем зажигания.

Для растопки необходимо использовать составы: 20% угольный шлам, 30% фильтр-кек, 50% вода; 40% угольный шлам, 10% отработанное турбинное масло, 50% вода.

Установлено, что минимальную концентрацию выбросов NO_x имеет состав 20% угольный шлам, 30% фильтр-кек, 50% вода, в сравнении с составом на базе бурого угля этот показатель снизился на 275 ppm. Выигрыш данного состава перед другими можно наблюдать и для показателя SO_x , максимальная разница для которого составила 45 ppm в сопоставлении с составом: 40% фильтр-кек, 10% отработанное турбинное масло, 50% вода.

Наибольшим коэффициентом эффективности обладает суспензия с составом: 20% угольный шлам, 30% фильтр-кек, 50% вода. У данного топлива средний коэффициент эффективности в 3 раза больше чем у угля, а также в 24 раза выше, чем у мазута. Такая большая разница вызвана тем, что стоимость такого состава очень мала, потому что используются отходы углеобогащения, которые проблематично складировать в связи с большой занимаемой площадью.

2 Проектирование АСУ топливоподачи

2.1. Анализ объекта автоматизации

В качестве объекта автоматизации выбрана система управления топливоподачи для котельного агрегата КЕ 10/14 С, предназначенного для выработки насыщенного пара или работы в водогрейном режиме, используемого на технологические нужды промышленных предприятий, в системах отопления, вентиляции и горячего водоснабжения [58].

КЕ 10/14 С – котел с естественной циркуляцией со слоевыми механическими топками [58]. Отличительной особенностью такого котла, является наличие вертикальных труб.

Расшифровка наименования котла КЕ 10/14 С. КЕ – тип котла с естественной циркуляцией, 10 – паропроизводительность (т/ч), 14 – абсолютное давление пара (кгс/см²), С – слоевое сжигание.

В данной работе данный котел рассматривается для использования в водогрейном режиме.

Топочная камера такого котла имеет особенность образования газовых вихрей в вертикальной плоскости, что способствует к многократной циркуляции уноса и ведет к минимизированию недожога твердых частиц топлив.

Котел КЕ способен работать как в водогрейном, так и в паропроизводственном режиме. Водогрейный режим позволяет уменьшить затраты на собственные нужды, связанные с работой питательных насосов, теплообменников и оборудования непрерывной продувки. Также такой режим позволяет снизить расход топлива, за счет сокращения количества энергии необходимой на подготовку воды. Среднеэксплуатационный КПД котлоагрегата, использованного в качестве водогрейного, повышается на 2,0-2,5%. На рисунке 2.1 изображена схема КЕ 10/14 С [58].

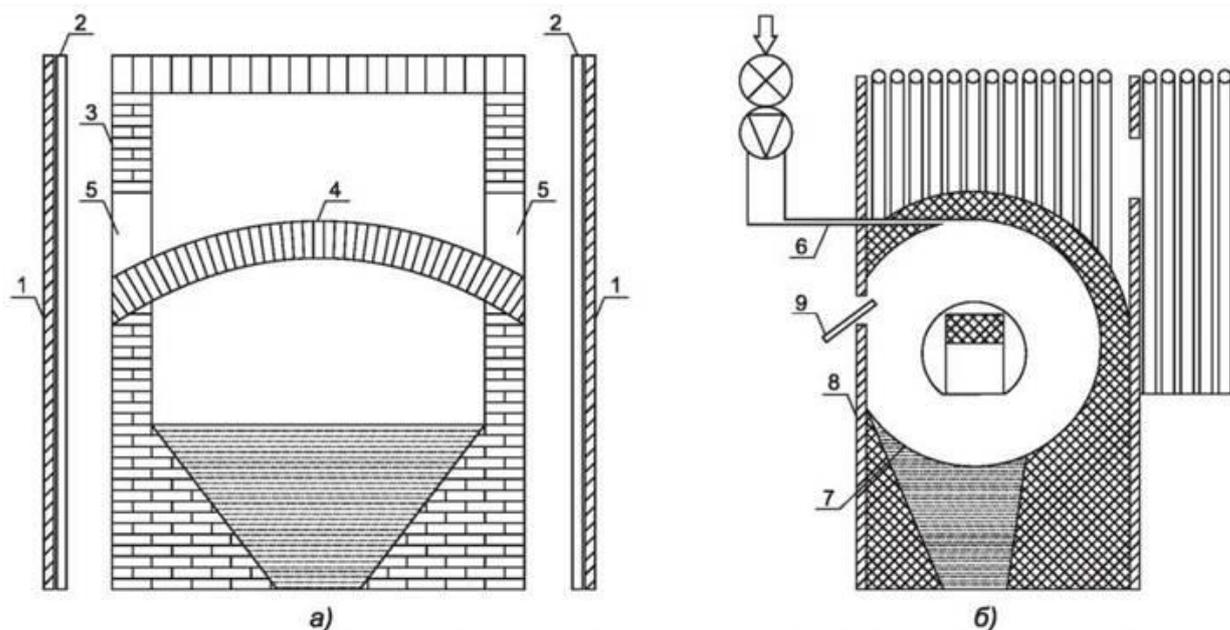


Рисунок 2.1 – Схема топочной камеры котла КЕ 10/14 С:

а) – фронтальный разрез; б) – боковой разрез; 1 – стенка котла; 2 – кипяtilьные трубы; 3 – камера сгорания; 4 – центральная вставка; 5 – газоперепускное окно; 6 – дутьевое сопло; 7 – золоуловитель; 8 – фронтальная стенка; 9 – топливная форсунка

Так как в водоугольном топливе содержится влага, которая уменьшает время воспламенения, то необходима организация вихревого режима горения [59]. При таком режиме обеспечивается достаточная продолжительность пребывания топливной частицы топлива в камере сгорания, что гарантирует полное сгорания ВУТ, следовательно, и высокую экономичность процесса сжигания.

Задача регулирования технологического процесса котельного агрегата сводится, в основном, к необходимости поддержания материального и энергетического баланса, при котором он будет работать в постоянном (стационарном) режиме.

Главной задачей автоматизации котлоагрегата, является обеспечение полноты сгорания топлива, что и приводит к экономичности процесса горения. Тем самым повышая КПД котла.

В котлоагрегат топливная композиция подается при помощи форсуночного устройства (рисунок 2.2). При помощи сжатого воздуха топливо проходит центральный канал и поступает в камеру сгорания. Такая форсунка позволяет снизить абразивный износ деталей форсуночного устройства за счет большого диаметра и низкой скорости движения [60].

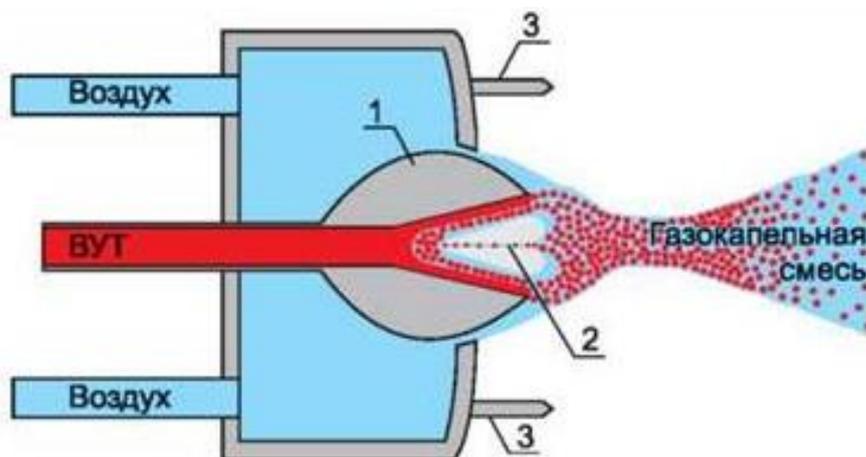


Рисунок 2.2 – Продольный разрез форсунки:

- 1 – распылитель; 2 – высокоскоростная возвратная струя газа;
- 3 – электроды системы розжига

Вихревой поток в камере сгорания создается за счет закручивания воздушного потока в кольцевом канале. Дутьевой воздух подается по касательным к стенкам камеры сгорания, тем самым обеспечивая закрутку вихревого потока.

На каплю топлива, попадающую в топочную камеру, действуют центробежные силы и тангенциальные составляющие скорости, которые стремятся выбросить каплю на стенки камеры сгорания, но радиальные потоки воздушной смеси препятствуют и не позволяют прибиться к стенке. В результате происходит распределение капель по орбитам в зависимости от размеров. Мелкие капли находятся в центре камеры сгорания, более крупные закручиваются по вихревому потоку от стенок к центру. Такое распределение позволяет произвести полное сжигание всех топливных капель.

Золоуловительная воронка в начальном этапе работы котла заполняется песком. Как известно [60], зола ВУТ имеет большую парусность в отличие от угольной. Маленькие частички золы уносятся вместе с уходящими газами, а большие при помощи центробежных сил скапливаются в нижней части камеры сгорания. При накоплении нужного количества золы, она удаляется через нижнее окно воронки золоуловителя.

На основании описанных свойств и параметров котлоагрегата выберем структуру АСУ.

2.2. Выбор структуры автоматизированной системы топливоподачи

При разработке АСУ ТП должны быть соблюдены требования:

- 1) ввод в действие АСУ должен приводить к повышению качества функционирования объекта управления;
- 2) система должна быть приспособлена к модернизации, развитию и наращиванию;
- 3) надежность АСУ должна быть достаточна для достижения установленных требований;
- 4) любая поступающая информация в АСУ, должна быть актуализирована в соответствии с периодичностью ее использования при выполнении функций системы;
- 5) информация, которая содержится в базах данных АСУ, должна быть актуализирована в соответствии с периодичностью ее использования при выполнении функций системы.

Разработанная АСУ ТП должна соответствовать требованиям, представленным в ГОСТ 24.104.85.

В данной работе рассматриваются два варианта системы управления подачей топлива. Первый вариант предусматривает воздействие на подачу топлива V_T по схеме «задание по нагрузке-тепло». Структурная схема изображена на рисунке 2.3. Входной сигнал «задание по нагрузке» формируется корректирующим ПИ-регулятором давления, получающим

сигнал от датчика давления пара в паропроводе на выходе парогенератора. Второй сигнал регулятора топлива «тепло» формируется двумя сигналами от датчиков расхода и давления пара в промежуточной точке (в зоне максимальной теплоемкости пароводяного тракта) [61].

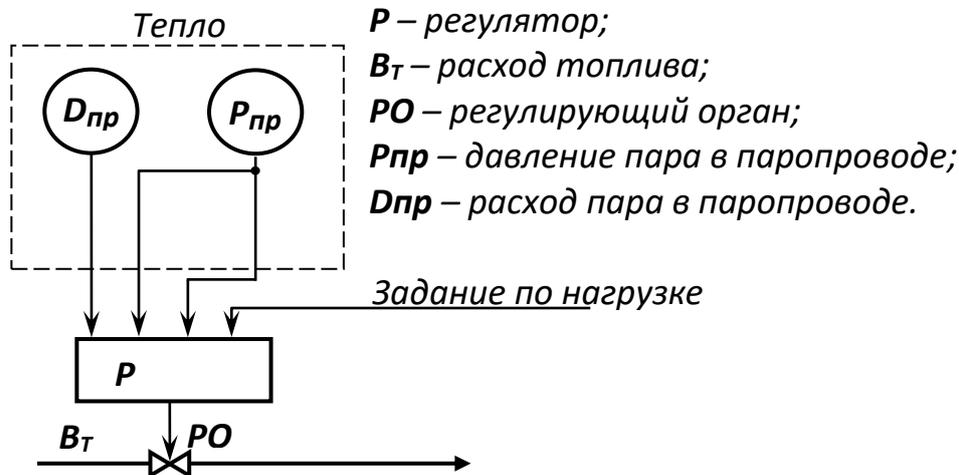


Рисунок 2.3 – Структурная схема автоматического регулирования расхода топлива по системе «нагрузка-тепло»

Второй вариант системы регулирования подачи топлива V_T по схеме «вода-тепло» (рисунок 2.4) предусматривает использование в качестве задания для регулятора топлива расхода питательной воды. Соответствие между подачей воды и топлива осуществляется в этом случае в прямой зависимости от расхода питательной воды [61].

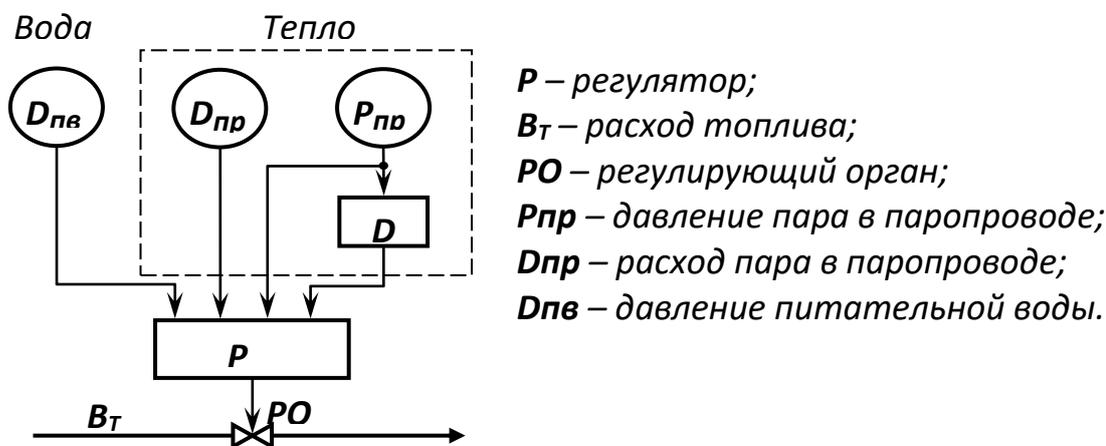


Рисунок 2.4 – Структурная схема автоматического регулирования расхода топлива по системе «вода-тепло»

Каждая из рассматриваемых схем регулирования тепловой нагрузки имеет определенные преимущества и недостатки. Так, например, регулятор питания имеет больший по сравнению с регулятором подачи топлива диапазон регулирования и использование его в качестве ведущего при регулировании тепловой нагрузки может привести к рассогласованию в подаче воды и топлива. Использование регулятора питания в качестве регулятора тепловой нагрузки более целесообразно на блочных установках с независимым питанием. При этом будет обеспечиваться более быстрое соответствие между подачей воды и топлива при внешних возмущениях и с некоторой инерцией при нарушениях топочного режима.

Эффективность работы объекта автоматизации, относительная стоимость, ремонтпригодность и надежность напрямую зависит от выбора структуры управления. Поэтому примем структурную схему управления расхода топлива по температуре воды на выходе из котла и температуре в топке котлоагрегата. Таким образом, будет поддерживаться баланс между количеством сжигаемого топлива и нагревом воды, т.е. в топке котла будет сгорать столько топлива, чтобы количество тепла, вырабатываемого котельным агрегатом, соответствовало количеству потребляемого тепла. Окончательная структура системы контроля и регулирования расхода топлива представлена на рисунке 2.5.

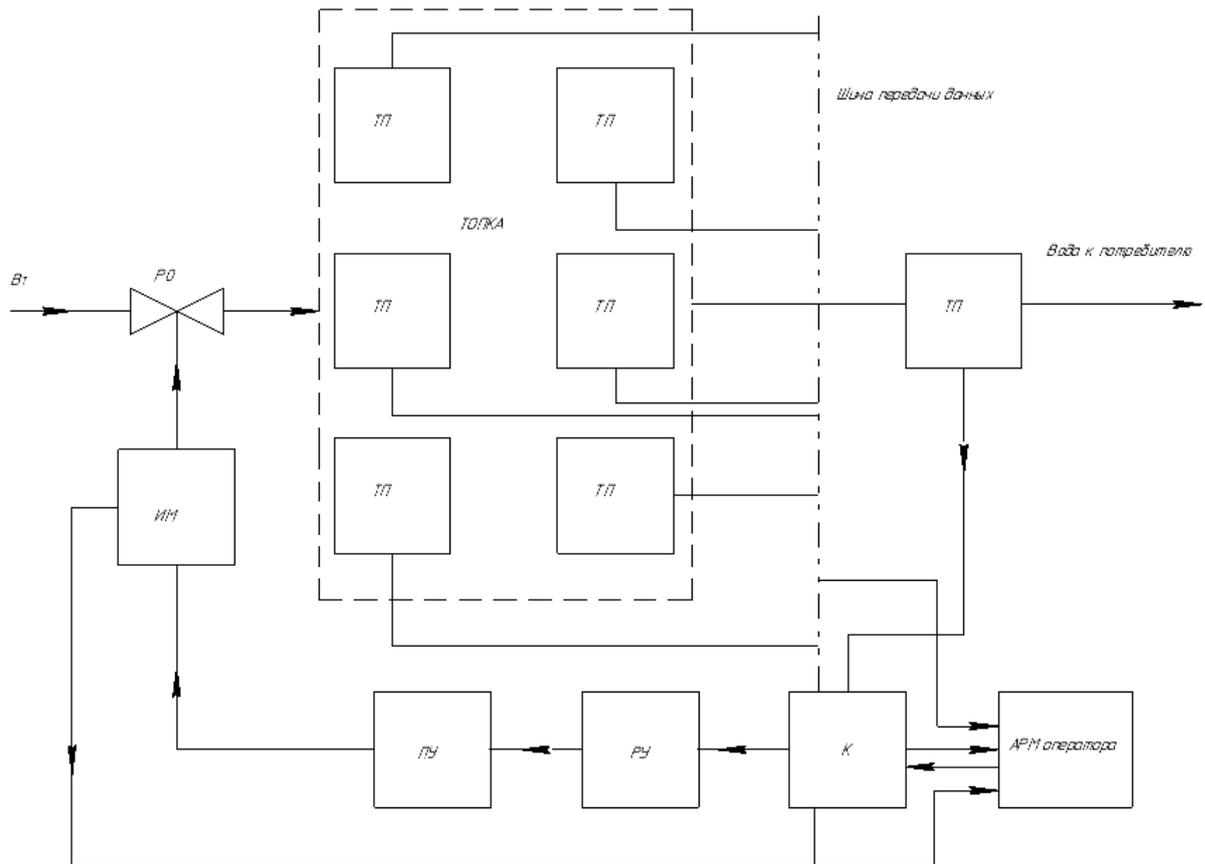


Рисунок 2.5 – Структурная схема автоматизированной системы управления расходом топлива: ТП – термоэлектрический преобразователь; К – микропроцессорный контроллер; ЗУ – задающее устройство; РУ – устройство ручного управления; ПУ – пусковое устройство; РО – регулирующий орган; ИМ – исполнительный механизм; АРМ оператора – автоматизированное рабочее место оператора

В процессе функционирования системы на объект управления поступают воздействия возмущения, вызывающие отклонения регулируемых параметров – значение влажности и температуры от требуемого значения. Информация о значениях параметра в текущий момент времени поступает непосредственно в систему управления, где происходит сравнение с заданным для них значением. Регулировка значения осуществляется на основе ПИ закона регулирования. Как результат, система управления обязана выработать

управляющее воздействие, которое необходимо для компенсации отклонений нашего выходного параметра.

2.3 Разработка функциональной схемы АСУ топливоподачи

Функциональная схема систем автоматизации технологических процессов является основным техническим документом, определяющим структуру и характер систем автоматизации технологических процессов, а также оснащения их приборами и средствами автоматизации [61, 62].

Система автоматического управления технологическими процессами является совокупностью основного и вспомогательного оборудования.

Для разрабатываемых функциональных схем АСУ ТП, должны решаться задачи:

- 1) сбор первичной информации;
- 2) сбор информации о состоянии оборудования;
- 3) сбор информации о регистрируемых параметрах и процессах;
- 4) сбор информации о работе оборудования.

На функциональной схеме оборудование изображается, как правило упрощено. Но изображенная схема должна давать полное представление о работе и взаимодействии частей системы управления.

Регулирующая и запорная арматура изображается только та, которая необходима для работы системы автоматизации, а также необходима для определения расположения первичных преобразователей измерений.

Поясняющие надписи необходимо приводить рядом с технологическим оборудованием [61, 62].

Была разработана функциональная схема АСУ расхода жидкого топлива. Схема представлена на листе с шифром ФЮРА.421000.012 С2.

На первом этапе разработки функциональной схемы были определены измерительные каналы (1-9,11) и канал управления (10). Для измерения температуры в магистрали воды, идущей на нужды потребителя, используется канал 1, а для температуры питательной воды канал 2. В топке установлены 6

датчиков температуры для контроля распределения температурного поля. Им соответствуют каналы измерения 3-8. По измеренным температурам осуществляется регулирование расхода ОБУТ в топку, измеряемого при помощи измерительного канала 9 расходомером. Канал 11 передает на микропроцессорный контроллер информацию о работе заслонки.

На втором этапе разрабатывалась нижняя часть функциональной схемы. В этой части изображались приборы, установленные по месту, пусковой щит аппаратуры и щит управления. В щите управления установлен микропроцессорный контроллер 10а [62].

Сигналы, поступающие на контроллер, также передаются на пульт управления, для регулировки управляющих воздействий и предотвращения аварийных режимов.

Технологическое оборудование на функциональной схеме изображено в соответствии с ГОСТ 21.403 – 80, условные обозначения запорной арматуры изображены по ГОСТ 2.785 – 70, первичные и функциональные измерительные приборы – в соответствии с ГОСТ 21.404 – 85.

Измерительные каналы 1-8 формируют сигналы о величине температуры питательной и сетевой воды, а также о распределении температуры в топке. Измерительный канал 9 преобразует значения расхода органомоноугольного топлива, которые поступают к регулируемому устройству в виде унифицированного токового сигнала 4-20 мА с ультразвукового расходомера 9а. Микропроцессорный контроллер формирует дискретный регулирующий сигнал, который поступает на пусковое устройство 10б, где сигнал усиливается и приводит в действие электрический привод исполнительного механизма.

2.4. Выбор технических средств АСУ топливоподачи

Система управления теплотехнических параметров должна проектироваться на основе современных средств автоматизации. Также АСУ должна обладать высокой надежностью.

2.4.1. Выбор датчиков температуры

В разрабатываемой автоматизированной системе управления расхода ОВУТ регистрируется температура в топке котла и температура воды после нагрева в котлоагрегате. Для измерения температуры воды до и после нагрева в топке котла, используются термопреобразователи сопротивления. Для регистрации изменения процесса распространения температуры в топке используются платиновые термопары. В данной системе предполагается установка шести термопар. Компании «Метран» и «Элемер» представляют большой выбор датчиков для измерения температуры. Рассмотрим некоторые из них подробнее.

Для измерения температуры входящей и выходящей сетевой воды рассмотрим несколько ТПС:

Термопреобразователи сопротивления серии Метран-200

Термометры сопротивления предназначены для измерения температур жидких и газообразных сред. В линейку Метран-200 входит несколько преобразователей с разным диапазоном температур. Связь датчика с контроллером осуществляется с помощью аналогового унифицированного сигнала 4...20 мА.

Тип и исполнение ТПС, НСХ первичного преобразователя температуры, диапазон измеряемых температур представлены в таблице 2.1 [63].

Таблица 2.1 – Основные технические характеристики первичных преобразователей температуры серии Метран–200

Наименование характеристик	ТСМ Метран-203, -204	ТСМ Метран-243
Диапазон измеряемых температур, °С - для класса допуска В - для класса допуска С	От -50 до +180	От -50 до +120
Класс допуска по ГОСТ 6651-2009	В; С	С
Условное обозначение НСХ по ГОСТ 6651-2009	50М; 100М	50М

Термопары предназначены для измерения температуры разных сред, которые не вступают в химическую реакцию с защитным корпусом преобразователя. Рассмотрим несколько модификаций и область их применения:

- 1) ТП-1388 – предназначены для измерения температуры жидких, твердых и газообразных сред;
- 2) ТП-1388В – вибропрочное исполнение ТП-1388;
- 3) ТП-2088 – предназначены для измерения температуры агрессивных жидких и газообразных сред;
- 4) ТП-2088В – вибропрочное исполнение ТП-2088;
- 5) ТП-2088А – предназначены для использования на объектах повышенной опасности (атомные станции);
- 6) ТП-2388 – предназначены для измерения температуры жидких, газообразных сред (в том числе агрессивных, которые не разрушают защитную арматуру изделия) и твердых тел в различных отраслях промышленности.

Метрологические характеристики представленных модификаций приведены в таблице 2.2 [63].

Таблица 2.2 – Номинальная статическая характеристика (НСХ) и класс допуска

НСХ	Класс допуска	Рабочий диапазон температур, °С
ХА (К)	1	-40...+1000
	2	-40...+1200
ХК (L)	2	-40...+600
ХК _н (E)	1	-40...+600
	2	-40...+600

Для измерения температуры входящей и выходящей сетевой воды одним из главных критериев является долговечность используемого датчика и диапазон работы, поэтому выбираем две ТПС фирмы «Метран» типа Метран-204 и Метран-243 с НСХ 50М и классом допуска С, но с различным диапазоном измеряемых температур. Первый ТПС обладает диапазоном от -50 до +180 °С, а второй от -50 до +120 °С. В целом, данный датчик температуры удовлетворяет предъявляемым требованиям: имеет достаточную точность измерения и приемлемую цену.

Для измерения температуры в топке рассмотрим термопары фирмы «Метран». В таблице 2.3 приведены характеристики для термопар ТП-0395/2, так как эти термопары являются высоко температурными, что и требуется для решения данной задачи, то осуществим выбор НСХ [63].

Таблица 2.3 – Номинальная статическая характеристика (НСХ) и класс допуска

НСХ	Диапазон измерений, °С	Класс допуска	Кол-во рабочих спаев
ХА (К)	0...+1250	1	1
НН (N)		2	2
ПП (R) ПП (S)	0...+1600	2	
ПР (B)	+600...+1800	2	
		3	
Показатель тепловой инерции, 40 с			
Длина монтажной части L, 320, 400, 500, 600, 740, 1000, 1190 мм			

Максимальная температура в топке достигает около 1700 °С, для измерения таких значений подходят термопары ТП-0395/2 с НСХ ПР(В). Необходимо 6 термопар.

2.4.2. Выбор управляющего устройства

В качестве управляющего устройства используется микропроцессорный контроллер. В данной работе рассматривались 3 контроллера от различных производителей, таких как: «ОВЕН»; «ВЭСТ»; «Siemens». Технические характеристики Simatic S7-200 приведены в таблице 2.4 [64].

Таблица 2.4 – Технические характеристики контроллера Simatic S7-200

Центральные процессоры	CPU 221	CPU 222	CPU 224	CPU 224XP	CPU 226
1	2		3	4	5
Объем памяти программ (EEPROM), КБ (вкл/выкл редактирование в режиме RUN)	4		8 / 12	12 / 16	16 / 24
Объем памяти данных, КБ	2		8	10	
Время выполнения инструкций	0,2 мкс				
Арифметика с плавающей запятой	Поддерживается				
ПИД-регулирование	Поддерживается				
Скоростной счет, кГц	4x30		6x30	4x30 +2x200	6x30
Импульсные выходы, кГц	2x20			2x100	2x20
	только в моделях с транзисторными выходными каскадами				
Количество таймеров / счетчиков / флагов	256/256/256				
Часы	Опциональный картридж		Встроенные		
Кол-во встроенных портов RS 485	1		2		
Кол-во встроенных входов-выходов	6 DI + 4 DO	8 DI + 6 DO	14 DI + 10 DO	14 DI + 10 DO 2 AI + 1 AO	24 DI + 16 DO
Кол-во модулей расширения, не более	–	2	7		
Макс. кол-во входов-выходов системы	6 DI + 4 DO	40 DI + 38 DO; 8(0)AI + 2(4)AO	94 DI + 74 DO; 28(0)AI+7(14)AO	94 DI + 74 DO; 30(2)AI + 8(15)AO	128 DI + 120 DO; 28(0)AI + 7(14)AO
Выходной ток встроенного блока питания	180 мА		280 мА		400 мА

Для реализации задачи необходимо 10 аналоговых входов для регистрации температуры и расхода топлива. Также необходимо учитывать

стоимость контроллера. Проведем сравнение характеристик контроллеров этих производителей. Для начала рассмотрим ПЛК фирмы «Siemens», цена которого составляет 59000 рублей. Применяется для решения задач автоматизации среднего уровня. Исполнение контроллера блочно-модульное.

Компания «ВЭСТ» разработала контроллер ВЭСТ-02 для автоматизации процессов в тепловой промышленности. Имеет бесплатное программное обеспечение АКИАР. Цена ПЛК составляет 15000 рублей. Рассмотрим технические характеристики в таблице 2.5 [65].

Таблица 2.5– Технические характеристики контроллера ВЭСТ-02

Напряжение питания	~220 В, 50 Гц
Потребляемая мощность	3 ВА
Диапазон контроля температур	-50...+150 °С
Тип входных датчиков температуры	Pt1000
Аналоговых входов	8 шт.
Цифровых входов	5 шт.
Симисторных выходов	6 шт.
Аналоговых выходов 0...10 В	2 шт.
Аналоговых выходов с ШИМ	2 шт.
Максимальный ток, коммутируемый контактами реле	0,5 А
Интерфейс связи	RS-232, RS-485
Средняя наработка на отказ	50000 ч
Средний срок службы	10 лет
Масса прибора	350 г

Контроллер фирмы «ОВЕН» имеет наименьшую цену (13000 рублей), а также встроенный источник питания. Рассмотрим ПЛК «ОВЕН 63» более подробно.

Имеется возможность управлять технологическим процессом непосредственно с лицевой панели контроллера с помощью встроенного текстового монохромного дисплея – для конфигурирования вывода и задания значения параметров программы, информации о ходе процесса и сигнализации и 9 кнопок управления – для управления индикацией задания значения параметров.

Встроена батарея бесперебойного питания, позволяющая выполнять программу при пропадании питания, и переводить выходные элементы в безопасное состояние.

Имеется 5 различных типов выходных элементов, которые можно выбрать при заказе контроллера, а также универсальные аналоговые входы для подключения широкого спектра датчиков и встроенные интерфейсы RS – 485, RS – 232. В качестве выходных устройств выбираем 5 цифроаналоговых преобразователей, с аналоговым выходным сигналом 0 – 10 В. В таблице 2.6 приведена характеристика контроллера [66].

Таблица 2.6 – Технические характеристики микропроцессорных контроллеров

Наименование контроллера	ОВЕН 63	ВЭСТ-02	SIMATIC-S7-200
Питание			
Напряжение питания	~220 В, 50 Гц; 24 В	~220 В, 50 Гц	~220 В, 50 Гц
Потребляемая мощность, для переменного тока, ВА	18	3	12
Параметры встроенного вторичного источника питания, выходное напряжение, В	24±3	–	24±3
Цифровые (дискретные) входы			
Количество входов	8	8	6
Аналоговые входы			
Количество аналоговых входов	8	5	6
Разрядность АЦП, бит	15	15	
Среда программирования	Xcos	Xcos	Step7
Стоимость, руб.	12514	13990	13372

Контроллер фирмы «ОВЕН» подходит для реализации задачи проекта, так как за наименьшую стоимость имеет необходимые характеристики. Для

реализации автоматизированной системы управления расхода ОВУТ необходимо 10 аналоговых входов в контроллер. Выбранный ПЛК имеет 8 аналоговых входов. Для увеличения количества входов установим модуль аналоговых сигналов фирмы «ОВЕН» МВ110-8А. Технические характеристики представлены в таблице 2.7 [66].

Таблица 2.7 – Технические характеристики модуля МВ110-8А

Наименование	Значение
Напряжение питания:	~220 В, 50 Гц
Потребляемая мощность	6 ВА
Количество аналоговых входов	8
Предел основной приведенной погрешности при измерении: термоэлектрическими преобразователями, термометрами сопротивления и унифицированными сигналами постоянного напряжения и тока	$\pm 0,5$ % $\pm 0,25$ %
Электрическая прочность изоляции цепей	1500 В
Интерфейс связи с компьютером	RS-485
Максимальная скорость обмена по интерфейсу RS-485	115200 бит/с
Протокол связи, используемый для передачи информации	ОВЕН; ModBus-RTU; ModBus-ASCII; DCON
Степень защиты корпуса	IP20 со стороны передней панели, IP00 со стороны клеммной колодки
Габаритные размеры прибора, мм, не более	63x110x73
Масса прибора, кг, не более	0,5
Средний срок службы, лет	10
Средняя наработка на отказ	50 000 ч

Для подключения к контроллеру модуля ввода аналоговых сигналов используется интерфейс RS-485. Цена МВ110-8А составляет 5664 руб. Модуль МВ110-8А питается от постоянного напряжения 24 В. Выбран блок питания БП30Б-ДЗ-24, цена которого составляет 2006 руб.

2.4.3. Выбор технических средств измерения расхода топлива

Для измерения количества сжигаемого топлива в топке котла необходимо установить расходомер в магистрали подачи ОВУТ. Датчики расхода работают по разному принципу и имеют разные характеристики. В

дипломном проекте рассмотрим 3 расходомера, работающих по разному принципу:

- электромагнитный расходомер фирмы «Endress+Hauser» типа Promag 53P;
- кориолисовый расходомер фирмы «Endress+Hauser» типа Proline Promass 80F;
- ультразвуковой расходомер фирмы «Эй-Си Электроник» типа US800.

Технические характеристики электромагнитного расходомера типа Promag 53P представлены в таблице 2.8 [67].

Таблица 2.8 – Технические характеристики электромагнитного расходомера типа Promag 53P

Наименование	Значение
Токовый выход	0-20 или 4-20 мА
Импульсный частотный выход	верхнее значение частоты 2...1000 Гц,
Интерфейс	RS-485, MODBUS
Питание	220 В АС или 24 В DC
Потребляемая мощность	15 Вт
Нормальные рабочие условия	температура среды: +80 °С
Измерение расхода	до 9600 м ³ /ч

Технические характеристики кориолисового расходомера типа Proline Promass 80F представлены в таблице 2.9 [67].

Таблица 2.9 – Технические характеристики расходомера Proline типа Promass 80F

Наименование	Значение
Токовый выход	4-20 мА; импульсно-частотный
Питание	220 АС или 24 DC
Потребляемая мощность	15 Вт
Диапазон измерения	до 3200 т/ч
Рабочая температура	минус 50 до плюс 350 °С
Рабочее давление	0–300 бар

Технические характеристики ультразвукового расходомера типа US-800 представлены в таблице 2.10 [67].

Таблица 2.10 – Технические характеристики ультразвукового расходомера фирмы «Эй-Си Электроник» типа US-800

Наименование	Значение
Токовый выход	4-20 мА
Интерфейс	RS-485
Питание	24 В
Потребляемая мощность	17 Вт
Рабочие условия	-40...+180 °С
Измерение расхода	до 6500 м ³ /ч

Проведя анализ технических характеристик преобразователей расхода делаем вывод о том, что расходомер фирмы «Эй-Си Электроник» типа US800 подходит для нашей системы по диапазону рабочих температур и классу точности. Стоимость данного расходомера составляет 42500 руб.

2.4.4. Выбор исполнительного механизма

Исполнительный механизм выбираем исходя из вида регулирующего органа и крутящего момента.

Максимальный крутящий момент принимался по диаметру трубопровода 65 мм и составил 110 Н·м.

При выборе учитывалось условие:

$$M_H > M_{\max},$$

где M_H – номинальный крутящий момент на выходном валу ИМ, Н·м.

Выбираем ИМ типа МЭО-250/25-0,25-Р-99 [68]. Данный исполнительный механизм снабжен датчиком положения выходного вала и функцией ручного управления. Питание данного исполнительного механизма осуществляется от сети переменного тока 220 В. Потребляемая мощность 240 Вт [67]. Стоимость составляет 19000 рублей.

2.4.5. Выбор блока управления исполнительным механизмом

В качестве блока управления исполнительным механизмом будем использовать интеллектуальный блок серии БУЭР1-30-02, выполняющий пуск, реверс и останов однофазных электродвигателей [69].

Новые блоки управления типа БУЭР, разработанные и выпускаемые ЗАО «Волмаг» являются аналогами известных пускателей для исполнительных механизмов МЭО типа ПБР и ФЦ, разработанных ОАО «СКБ СПА» (г. Чебоксары) более 20 лет назад.

Режим работы – повторно-кратковременный с продолжительностью включения до 25%. Блок управления содержит микропроцессорное устройство, два приемо-передатчика интерфейсного канала RS-485 и преобразователь питания, что обеспечивает:

- резервирование цифрового канала;
- прием команд управления исполнительным механизмом;
- формирование управляющих импульсов;
- передачу по цифровому каналу значения сигнала датчика положения механизма;
- диагностику работоспособности блоков управления и исполнительного механизма.

Для обмена по каналу RS-485 используется стандартный протокол Modbus.

Настройка интеллектуального блока осуществляется при помощи переносного пульта ПК–302.

Решения по выбору технических средств автоматизации приведены в заказной спецификации, представленной в таблице 2.12.

2.4.5. Выбор технических средств для автоматизированного рабочего места

АРМ объединяет программно-аппаратные средства, обеспечивающие взаимодействие человека с компьютером, предоставляет возможность ввода информации.

Организация сетей передачи данных осуществляется посредством сетей Ethernet/Modbus TCP/IP, полевой шины Modbus и технологической сети Ethernet

В таблице 2.11 приведены два компьютера, между которыми производится выбор.

Таблица 2.11 – Технологические характеристики компьютеров

Наименование	Обозначение компьютера	
	Asus KP55	Acer Aspire TC-605 DT.SRQER.085
Производитель видеокарты	NVIDIA	NVIDIA
Видео память	2 ГБ	2 ГБ
Графический контроллер	GeForce GT720	GeForce GT625
Операционная система	Windows 10 SL 64 Bit	Windows 8.1 SL 64 bit
Оперативная память (ram)	8 ГБ	8 ГБ
Тип процессора	Core i7-4660	Core i5-4460
Кэш-память	8 МБ	6 МБ
Жесткий Диск (hdd)	1 ТБ	1 ТБ
Стоимость	26134	265178

Выбираем компьютер Asus потому, что компьютер имеет лучшие характеристики, такие как оперативная память, тип процессора, кэш-память, и наименьшую стоимость.

Таблица 2.12 – Заказная спецификация средств автоматизации

Позиция	Наименование, техническая характеристика приборов и средств автоматизации	Тип и марка прибора	Кол
1	2	3	4
1а	Термопреобразователь сопротивления, погружаемый, НСХ 50М, диапазон измерения -50 ... +120 °С, монтажная длина 250 мм, класс допуска С. ПГ «Метран», г. Челябинск	ТСП-Метран-204	1
2а	Термопреобразователь сопротивления, погружаемый, НСХ 50М, диапазон измерения -50 ... +180 °С, монтажная длина 250 мм, класс допуска С. ПГ «Метран», г. Челябинск	ТСП-Метран-243	1
3а ... 8а	Преобразователь термоэлектрический, НСХ ПР(В), диапазон измерения 600 ... 1800 °С, монтажная длина 600 мм, класс допуска С. ПГ «Метран», г. Челябинск	ТПР-Метран0395/2	6
9а	Расходомер ультразвуковой, верхний предел измерения до 6.5 т/ч, класс точности 1.5 «Эй-Си Электроник», г. Чебоксары	US-800	1
10а	Контроллер программируемый, логический, микропроцессорный, количество входов – 8 аналоговых и 8 дискретных, количество выходов – 6 (1 – з/м реле, 4 А, 220 В; 5 – ЦАП, 0...10 В). ОАО «ОВЕН», г. Москва.	ОВЕН ПЛК63	1
10б	Блок управления электродвигателем реверсивный, входной сигнал управления 24 ± 6 В, климатическое исполнение УХЛ 4.2. ЗАО «Волмаг», г. Чебоксары.	БЧЭР1-30-02	1
10в	Механизм электроисполнительный однооборотный, в составе с токовым датчиком сигнализации положения выходного вала; год разработки – 2015. ОАО «СКБ СПА», г. Чебоксары.	МЭ0-250/25-0,25-Р-99	1
		ФЮРА.4.21000.012 С01	
Исполнил	Шлегель Н.Е.	Спецификация приборов и средств автоматизации	Станд
Проверил	Стрижак П.А.		Лист
			Листов
		ТПУ ИШЭ НОЦ Группа 56М74	

3. Схема уровней управления

Автоматизированная система управления топливоподачи ОВУТ, строится по многоуровневому принципу.

Основными функциями автоматизированной системы управления являются: сбор, обработка, хранение данных, а также предоставление отчетности. Такая система должна работать непрерывно, 24 часа в день и 7 дней в неделю. Для обеспечения контроля параметров и аварийного управления необходим мониторинг работы системы оператором

АСУ должна быть организована по трехуровневому принципу. Так же оборудование системы регулирования должно иметь возможность архивации данных о состоянии технологического процесса.

Структурная схема автоматизированной системы управления расходом органоводугольной композиции представлена на рисунке 3.1.

Верхний уровень АСУ является автоматизированным рабочим местом оператора (АРМ). Оборудование АРМ оператора предназначено для оперативного отражения состояний технологических объектов и оборудования комплекса на экране компьютера, а также предоставляет возможность дистанционного управления оборудованием и задания технологических уставок. В составе оборудования может поставляться промышленный компьютер, стойка сервера, источник бесперебойного питания и периферийное оборудование.

Нижний уровень представляет собой совокупность первичных средств измерения температуры и расхода, необходимого для контроля всех технологических параметров топливоподачи. Используются шесть датчиков температур непосредственно в топке котла, а также два датчика температуры сетевой воды. Установлен расходомер на магистрали топливоподачи.

Средний уровень используется для взаимосвязи нижнего уровня с верхним уровнем и выполнен с помощью щита автоматизации. Сигналы с

нижнего уровня поступают в щит и далее передаются на верхний уровень управления, сигналы воздействия поступают с АРМ.

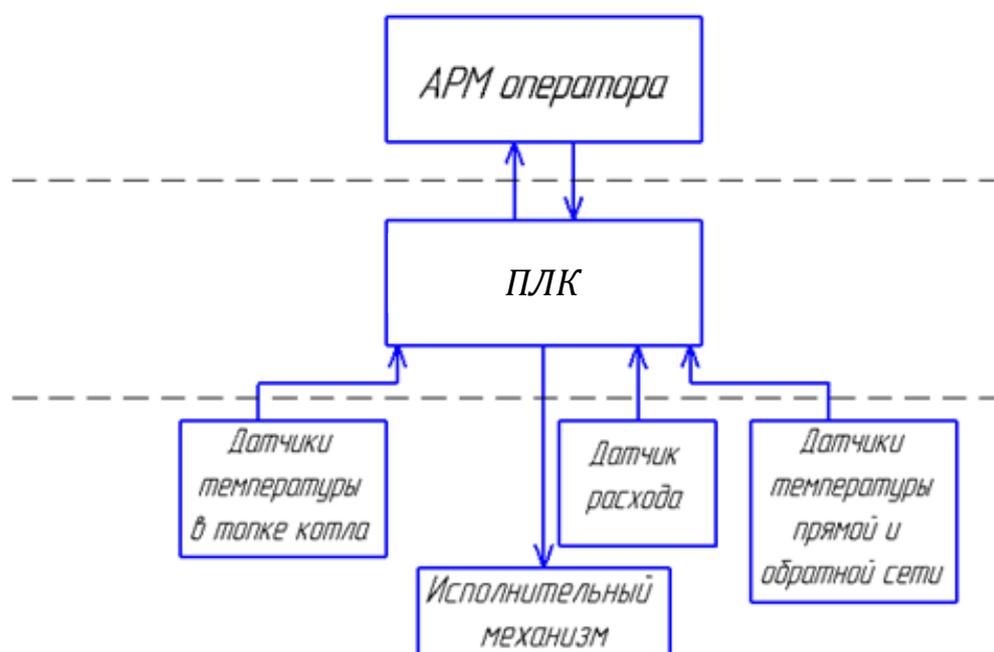


Рисунок 3.1 – Структурная схема автоматизированной системы топливоподачи

4. Разработка документации АСУ топливоподачи

4.1. Перечень входных и выходных сигналов

На основе функциональной схемы составлен перечень входных и выходных сигналов, который представлен в таблице 4.1. Для работы системы используются 10 входных аналоговых сигналов (AI), 2 входных аналоговых сигнала (DI) и 2 дискретных выходных сигнала (DO).

Таблица 4.1 – Перечень входных/выходных сигналов

N	Наименование параметра (единица измерения)	Позиция	Тип датчика, прибора	AI	AO	DI	DO	Интерфейс
1	Температура в топке котла	3-8	ТПР0395/2	+				
2	Температура в прямой сети	1	ТСП-204	+				
3	Температура в обратной сети	2	ТСП-243	+				
4	Расход ОВУТ	9	Эй-си	+				
5	Клапан ОВУТ открыт	10-9	МЭО			+		
6	Клапан ОВУТ закрыт	10-9				+		
7	Клапан ОВУТ открыть	10-11					+	
8	Клапан ОВУТ закрыть	10-11					+	

Пояснения к таблице 4.1: AI – входной аналоговый сигнал; АО – аналоговый сигнал на выходе; DI – дискретный входной сигнал; DO – дискретный сигнал на выходе.

4.2. Проектирование принципиальной схемы АСУ топливоподачи

Электрическая схема является основным чертежом, отражающим состав аппаратов и устройств системы управления. Также при помощи принципиальной электрической схемы разрабатываются монтажные чертежи, которые используются для пусконаладочных работ [61,62].

При проектировании схемы используются полные изображения средств, обеспечивающих работоспособность системы управления.

К электрическим схемам предъявляются требования в соответствии с ЕСКД ГОСТ 2.710-81:

- 1) линии связи должны состоять только из горизонтальных и вертикальных линий;
- 2) линии связи должны иметь минимальное количество пересечений;

- 3) расстояние между соседними линиями не менее 5 мм;
- 4) условные обозначения на схемах должны соответствовать требованиям ГОСТ 2.710-81;
- 5) в соответствии с назначениями присваиваются буквы и цифры элементам схемы.

В данном разделе была разработана схема электрическая принципиальная АСУ расхода ОВУТ, которая приведена на первом листе с шифром ФЮРА.421000.012 ЭЗ.

Для обозначения участков цепей принципиальных электрических схем применяются арабские цифры одного размера. Последовательность обозначений сверху вниз в направлении слева направо. В данной схеме для цепей управления и измерения используется группа чисел 1 – 100, для цепей питания 101 – 200.

Электропитание всех технических средств осуществляется от распределительного щита питания переменным напряжением 220 В, 50 Гц.

Термопреобразователи сопротивления В2 и В3, термопары В3 – В5, а также ультразвуковой расходомер В1 преобразуют измеряемые величины в унифицированные токовые сигналы 4–20 мА, которые поступают на соответствующие входы контроллера А2, подключения средств измерения осуществлено в соответствии с требованием производителя [70]. Для увеличения входных аналоговых сигналов установлен модуль (А2.1) МВ110–8А фирмы «ОВЕН». На модуль А2.1 поступают унифицированные сигналы с термопар В6 – В9. Связь контроллера А2 с блоком А2.1 происходит с помощью интерфейса RS-485, также установлены два шунтирующих резистора R3 и R4, имеющие сопротивление 100 Ом. Подключение ТПС В2 и В3, а также расходомера В1, производится с помощью шунтирующих резисторов R5-R7, сопротивление которых 100 Ом [71].

Контроллер А2 обрабатывает информацию, полученную с датчиков В1–В9. На основе программно-заданных алгоритмов формирует

управляющий сигнал, который передается на блок управления А1 посредством цифрового интерфейса RS-485.

В соответствии с сигналами управления силовые ключи блока управления А1 коммутируют цепи нагрузки обмотки электродвигателя исполнительного механизма М1, обеспечивая его вращение в соответствующем направлении.

Сигнал обратной связи о положении регулирующего органа микроконтроллер А2 получает с исполнительного механизма, который подключен непосредственно к контроллеру А2 по трехпроводной схеме, так же контроллер подключен к АРМ.

Схема электрическая принципиальная АСУ расхода ОВУТ приведена на первом листе с шифром ФЮРА.421000.012 ЭЗ.

4.3. Проектирование монтажной схемы АСУ топливоподачи

Монтажная документация предназначена для выполнения монтажных работ. Эту документацию также используют в процессе эксплуатации, наладке, ремонте и выполнении профилактических работ. Для сложных систем автоматизации отдельно выполняют монтажные схемы щитов, пультов, внешних электрических и трубных проводок [61, 62]. В нашем случае система небольшая, монтажные схемы внешних электрических проводок и щита управления выполнены на одном листе с шифром ФЮРА.421000.012 С4.

Монтажная документация, разрабатываемая в процессе проектирования систем автоматизированного управления, включает в себя:

- 1) монтажную документацию щитов и пультов;
- 2) монтажную документацию внешних электрических и трубных проводок.

Монтажные схемы показывают, каким образом соединены между собой клеммы или выводы технических средств, расположенных: на конструкции и за пределами конструкций.

Для разработки монтажной документации используются следующие материалы:

- 1) функциональная схема;
- 2) принципиальная электрическая схема;
- 3) техническая документация заводов изготовителей средств автоматизации и других средств:
 - техническое описание;
 - инструкция по эксплуатации.
- 4) общие виды щитовых и других конструкций.

В данной работе необходимо разработать монтажную схему автоматизированной системы регулирования расхода ОВУТ, для этого нужно выполнить следующие этапы:

- 1) нанести на монтажную схему технические средства автоматизации, в соответствии с принятыми обозначениями;
- 2) выбрать проводки для соединения технических средств;
- 3) произвести нумерацию проводников в соответствие с электрической схемой;
- 4) выполнить подключение средств измерения и управления в шкаф автоматизации.

Размещенная таблица в верхнем поле чертежа, поясняет расположение датчиков на оборудовании системы и технологических трубопроводов.

Датчики температуры и исполнительный механизм изображены монтажными символами в соответствии с заводскими инструкциями. При этом внутри монтажных символов указаны номера зажимов и подключение к ним жил кабелей, причем, изображены только использующиеся клеммы. Маркировка жил нанесена вне монтажного символа.

Щит автоматизации изображается условно в виде прямоугольника, в котором показываются блоки зажимов и подключение к ним кабеля.

Первичные преобразователи, внешние приборы и шкаф управления соединены между собой электрическими линиями связи, выполненными с помощью электрических кабелей, проводов и жгутов проводов.

По принципиальной электрической схеме присваиваются номера системным средствам, проводникам и клеммным блокам.

Проектирования внутренних и внешних проводок, необходимо для проведения монтажных работ, ввода в эксплуатацию, и проведения пуско-наладочных испытаний.

Для питающих линий выбираем кабели с алюминиевыми жилами типа АКРВБГ сечением жил $2,5 \text{ мм}^2$, с броней из двух стальных оцинкованных лент.

Для информационных линий выбираем кабели типа КРВГ сечением 1 мм^2 .

Выбранные кабели, а также их технические характеристики представлены в таблице 4.1 [72].

Таблица 4.1 – Характеристики проводов и кабелей электропроводки АСУ

№ линии	Марка	Кол-во жил	Номинальное сечение жил, мм^2	Наружный диаметр, мм
17, 12	АКРВБГ	4	2,5	15,51
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 14, 15,	КРВГ	4	1	10,54
5	КРВГ	10	1	12,39
11	КРВГ	12	1	12,39
16	КИПЭВ	2	0,6	9,2

Для защиты кабелей от внешних воздействий необходимо выбрать защитную трубу. В соответствии с ГОСТ 10704-91 выбираем электросварные тонкостенные трубы. Для кабелей линий питания защитные трубы не выбираются, так как кабели бронированные.

При определении внутреннего диаметра защитной трубы, необходимой для данной конкретной проводки, учитываем диаметр кабеля, проходящего в ней. Причем для удобства протяжки кабелей через трубы, внутренний диаметр должен быть в 1,5 раза больше диаметра кабеля. Таким образом, защитные

трубы выбираем по внешнему диаметру с учетом толщины стенки из стандартного ряда [72].

Тогда для кабелей КРВГ 4x1

$$D \geq 1,5 \cdot 10,7 = 16,05 \text{ мм},$$

выбираем защитную трубу диаметром $D = 18$ мм с толщиной стенки $\delta=1$ мм.

Для кабеля КРВГ 10x1

$$D \geq 1,5 \cdot 15,8 = 23,7 \text{ мм},$$

выбираем защитную трубу диаметром $D = 24$ мм с толщиной стенки $\delta=1,2$ мм.

Для кабеля КРВГ 12x1

$$D \geq 1,5 \cdot 17,1 = 25,65 \text{ мм},$$

выбираем защитную трубу диаметром $D = 26$ мм с толщиной стенки $\delta=1,4$ мм.

Для кабеля КИПЭВ 1x2x0,6

$$D \geq 1,5 \cdot 9,2 = 13,8 \text{ мм},$$

выбираем защитную трубу диаметром $D = 16$ мм с толщиной стенки $\delta = 1$ мм.

Трубные проводки, связывающие объект с датчиками, выберем исходя из параметров среды. Выбираем бесшовные трубы из нержавеющей стали диаметром $D = 14$ мм с толщиной стенки $\delta = 2$ мм.

В щите автоматизации для соединения сборок зажимов с микроконтроллером используем провод с медной жилой и изоляцией из поливинилхлоридного пластика марки ПВ-1.

Схема монтажная внешних электрических проводок, представлена на листе с шифром ФЮРА.421000.012 С4.

Контроллер 4в изображен условно сплошной линией в виде упрощенного контура с теми клеммами, которые используются. При входе в щит автоматизации установлена клеммная сборка зажимов ХТ5, в который входят проводки, предающие унифицированный сигнал от:

- 1) термопреобразователей сопротивления;
- 2) шести термопар, установленных в топке котла;
- 3) расходомера, установленного на магистрали подачи ОВУТ в котлоагрегат.

Все выше перечисленные технические средства подключаются сначала к соединительным коробкам КСК-14 и КСК-12 с помощью кабелей КРВБГ 4×1, а далее собираются в единые кабели КРВБГ 12×1 и КРВБГ 10×1 соответственно, которые уже подключаются в щит автоматизации.

Также в щите расположены клеммный блок питания 220 В ХТ3, и клеммная сборка ХТ4 перед модулем входа аналоговых сигналов 4б, в который поступают сигналы с термопар. Питание модуля аналоговых сигналов осуществляется с помощью блока питания БП30Б-ДЗ-24, который расположен в щите автоматизации.

Для связи контроллера с блоком управления используются кабели симметричной парной скрутки, использующиеся для связи по интерфейсу RS-485, КИПЭВ 1х2х0,6 в общем экране из алюмолавсановой ленты с контактным проводником. Кабель соответствует строгим требованиям пожарной безопасности, не поддерживает горение при условии одиночной прокладки.

4.4. Разработка чертежа общего вида щитовой конструкции АСУ

Щитовая конструкция в системах автоматического управления предназначена для размещения в ней средств управления и контроля, а также измерительных приборов и сигнализирующих устройств. Такие конструкции обычно устанавливаются в специальных помещениях: аппаратных, операторских и диспетчерских [62, 63].

Целью данного этапа является составление комплекта чертежей, необходимых для изготовления щита, монтажа технических средств автоматизации, электрических проводок и эффективной эксплуатации средств автоматизации.

Учитывая конструктивные особенности, в том числе степень защиты от прикосновения к токоведущим частям, в операторском помещении применим для монтажа средств автоматизации разрабатываемой системы регулирования щит шкафной, односекционный с задней дверью (ЩШ-ЗД) исполнения 2.

Для оперативного контроля технологического процесса разместим в необходимом и достаточном количестве на щите контроллер и сборки зажимов.

В данном случае для размещения средств автоматизации используем щит с задней дверью одиночный, шириной 600 мм и глубиной 600 мм – ЩШ-ЗД-П-600×600. Фасадная сторона щитов (шкафных и панельных с каркасом) разбита на два (исполнение 1) или на три (исполнение 2) функциональных поля. На основании оптимального распределения приборов, управляющих органов и сигнализирующей арматуры, выполняется разбивка. Рекомендованное исполнение 2, для проектирования щитовых конструкций. Такие изделия изготовлены с минимальными размерами, что наиболее технологично для процесса автоматизации.

Чертеж общего вида одиночного щита содержит вид спереди, вид на внутренние плоскости, перечень составных частей.

Блок контроллера 4 рассчитан на утопленный монтаж на вертикальной панели щита управления. Все остальные блоки, входящие в состав контроллера, рассчитаны на навесной монтаж.

В нижней части панели щита расположены сборки зажимов ХТ1, ХТ2, на левой стенке – ХТ3.

Общий вид щита представлен на чертеже с шифром ФЮРА.421000.012 ВО.

5 Расчет параметров настройки регулятора

5.1 Идентификация объекта управления

Идентификация предназначена для получения математических моделей объекта управления. Существует активная и пассивная, в инженерной практике применяют активную идентификацию (на объект подается специализированное входное воздействие и по реакции объекта при обработке результатов получают математическую модель).

В данной работе для получения кривой разгона была использована динамическая модель изменения температуры в топке котла КЕ. Модель составлена на базе экспериментальных исследований, проведенных на реальном объекте. Кривая разгона приведена на рисунке 5.1.

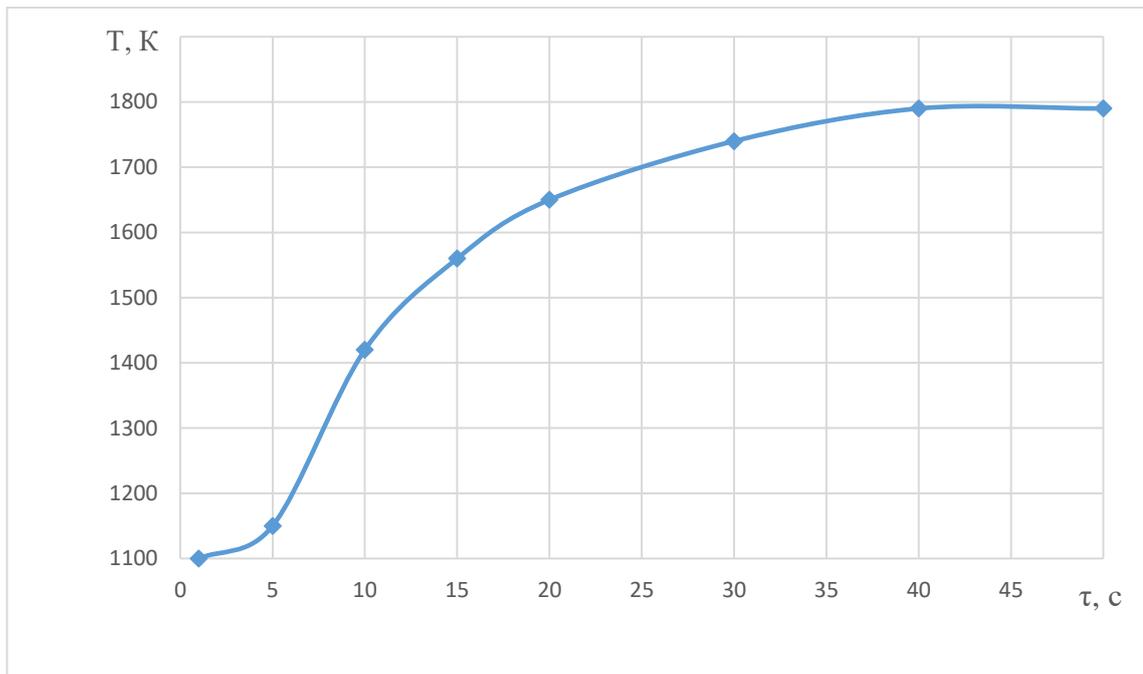


Рисунок 5.1 – Кривая разгона объекта управления, где τ – время, T – температура

По полученной переходной характеристике определяем динамические параметры объекта, такие как: постоянная времени T ; запаздывание t , коэффициент передачи K .

Передаточная функция для кривой представляет собой аperiodическое звено с запаздыванием:

$$W(P) = \frac{k}{(TP+1)} e^{-P\tau}, \quad (5.1)$$

где k – коэффициент усиления;

P – оператор Лапласа;

τ – время запаздывания;

T – постоянная времени.

Решение уравнения 5.1 при нулевых начальных условиях представляет собой:

$$\begin{cases} h(t) = 0 & 0 \leq t \leq \tau, \\ h(t) = h(\infty) \left[1 - e^{-\frac{t-\tau}{T}} \right] & t > \tau. \end{cases} \quad (5.2)$$

Получаем два неизвестных значения время запаздывания τ и постоянную времени T . Коэффициент усиления $k = \frac{h(T_y)}{A}$, где A – выходное воздействие; при единичном воздействии $k = h(T_y)$. Время чистого запаздывания заранее выделяется из $h(t)$. На кривой разгона строим две точки A и B . Точка A определяется как $0,33 k$, а точка B имеет ординату $0,7 k$. Постоянная времени T и время запаздывания τ определяются по формулам:

$$T = -\frac{t_A - \tau}{\ln(1 - h_A)}, \quad (5.3)$$

$$\tau = \frac{t_B \ln(1 - h_A) - t_A \ln(1 - h_B)}{\ln(1 - h_A) - \ln(1 - h_B)}, \quad (5.4)$$

где t_A и t_B – значение времени при соответствующих точках на кривой;

h_A и h_B – значение ординат при точках A и B .

Определяем расположение на кривой точек A и B и находим необходимые неизвестные параметры.

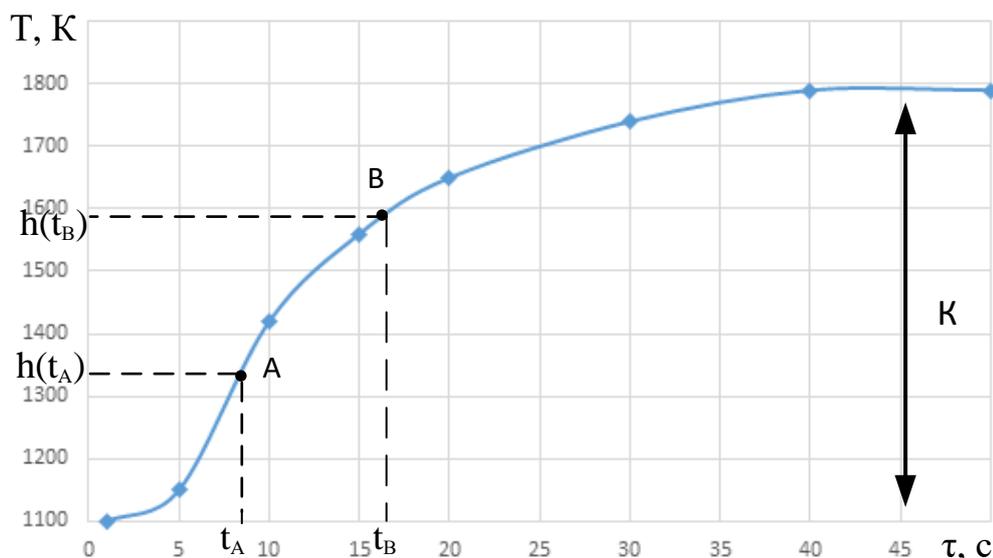


Рисунок 5.2 – Определение точек на кривой разгона для расчета параметров регулятора где τ – время, T – температура

Для наглядности и точности производится аппроксимация кривой по методу Орманна. Определяется время t_B по нормированной переходной функции $H(t)$, которое является корнем уравнения $h(t_B)$ и время t_A и $h(t_A)$. Затем вычисляются постоянная времени T и время запаздывания τ :

$$\tau = 0,5(3t_A - t_B), \quad (5.5)$$

$$T = \frac{t_B - \tau}{1.2} = 1,25(t_B - t_A). \quad (5.6)$$

Определяем значения по кривой разгона:

$$\tau = 0,5(3 \cdot 8 - 17) = 3,4 \text{ с}, \quad (5.7)$$

$$T = 1,25(17 - 8) = 11,25 \text{ с}. \quad (5.8)$$

Передаточная функция имеет вид:

$$W(P) = \frac{700}{(11,25P + 1)} e^{-3,4P}. \quad (5.9)$$

5.2 Расчет параметров настройки регулятора

На рисунке 5.3 представлен вид структурной схемы системы регулирования.

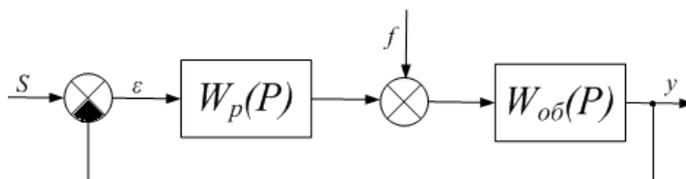


Рисунок 5.3 – Структурна схема системы регулирования

Расчет системы производится для степени устойчивости равной $\psi=0,75$.

Определяем значение степени колебательности:

$$m = -\frac{1}{2\pi} \cdot \ln(1 - \psi) = -\frac{1}{2\pi} \cdot \ln(1 - 0,9) = 0,366. \quad (5.10)$$

Передаточная функция объекта регулирования описывается формулой:

$$W(P) = \frac{700}{(11,25P+1)} e^{-3,4P}. \quad (5.11)$$

Полученные расширенные частотные характеристики объекта представлены в таблице 17 в виде листинга расчета. Полученные значения представлены для диапазона частот от 0,0001 до 0,054 c^{-1} , с шагом по частоте 0,02 c^{-1} .

Таблица 5.1 – Расширенные частотные характеристики объекта

ω, c^{-1}	$Re_{об}(m,\omega)$	$Im_{об}(m,\omega)$	$A_{об}(m,\omega)$
0.0001	1800.57985	-2.63835	1801
0.02	1787.29127	-553.8377	1871
0.0399	1523.14565	-1037.4691	1843
0.0598	1116.10341	-1328.54783	1735
0.0797	703.44485	-1424.5612	1589
0.0996	359.31742	-1391.67297	1437
0.1195	97.84364	-1294.30037	1298
0.1394	-93.05717	-1172.80162	1176
0.1593	-230.5367	-1047.76598	1073
0.1792	-329.29816	-928.30095	984.977
0.1991	-400.26581	-817.74153	910.447
0.219	-451.14904	-716.75727	846.922
0.2389	-487.30485	-624.88912	792.434
0.2588	-512.45904	-541.272	745.379

Продолжение таблицы 5.1

$\omega, \text{с}^{-1}$	$\text{Re}_{об}(m,\omega)$	$\text{Im}_{об}(m,\omega)$	$A_{об}(m,\omega)$
0.2787	-529.22567	-464.95964	704.462
0.2986	-539.46217	-395.06099	668.65
0.3185	-544.50757	-330.78921	637.111
0.3384	-545.34225	-271.4715	609.176
0.3583	-542.69563	-216.54234	584.302
0.3782	-537.11945	-165.53092	562.048
0.3981	-529.03827	-118.04725	542.049
0.418	-518.78471	-73.76926	524.003
0.4379	-506.62428	-32.43131	507.661
0.4578	-492.77314	6.18557	492.812
0.4777	-477.41094	42.26177	479.278
0.4976	-460.69019	75.94598	466.908
0.5175	-442.74315	107.36076	455.574
0.5374	-423.68697	136.60723	1.801

Параметры настройки ПИ-регулятора рассчитываются как:

$$\frac{K_p}{T_u} = - \frac{\omega \cdot (m^2 + 1) \cdot \text{Im}_{об}(m, \omega)}{A_{об}^2(m, \omega)}, \quad (5.12)$$

$$K_p = - \frac{m \cdot \text{Im}_{об}(m, \omega) + \text{Re}_{об}(m, \omega)}{A_{об}^2(m, \omega)}, \quad (5.13)$$

где T_u – постоянная интегрирования регулятора,

K_p – коэффициент передачи регулятора.

Для нахождения значения параметров использовался диапазон значения частот от 0 до 0,054 с^{-1} , с шагом по частоте в 0,02 с^{-1} . Полученные значения представлены в таблице 18 в виде листинга расчета.

Таблица 5.2 – Значение параметров ПИ – регулятора

$\omega, \text{с}^{-1}$	K_p	$\frac{K_p}{T_u}$
0.0001	-0.00055	0.0000000009
0.02	-0.00043	0.00000353
0.0399	-0.0003	0.00001334
0.0598	-0.00016	0.00002836
0.0797	-0.00012	0.00004746

Продолжение таблицы 5.2

ω, c^{-1}	K_p	$\frac{K_p}{T_u}$
0.0996	0.00013	0.00006945
0.1195	0.00028	0.00009315
0.1394	0.00043	0.00011738
0.1593	0.00057	0.000141
0.1792	0.00071	0.00016288
0.1991	0.00084	0.00018199
0.219	0.00097	0.00019733
0.2389	0.00108	0.000208
0.2588	0.00119	0.00021322
0.2787	0.00128	0.00021226
0.2986	0.00136	0.00020455
0.3185	0.00143	0.0001896
0.3384	0.00149	0.00016706
0.3583	0.00153	0.0001367
0.3782	0.00156	0.00009839
0.3981	0.00157	0.00005214
0.418	0.00157	-0.00000191
0.4379	0.00156	-0.00006353
0.4578	0.00153	-0.00013238
0.4777	0.00149	-0.00020798
0.4976	0.00144	-0.00028979
0.5175	0.00137	-0.00037717
0.5374	0.0013	-0.00046939

Для удобства и визуализации строится зависимость от полученных параметров, представленная на рисунке 5.4. Полученная кривая на рисунке, является линией для степени затухания равной 0,9. Все значения параметров настройки, которые будут лежать на этой кривой, будут обеспечивать заданную степень затухания.

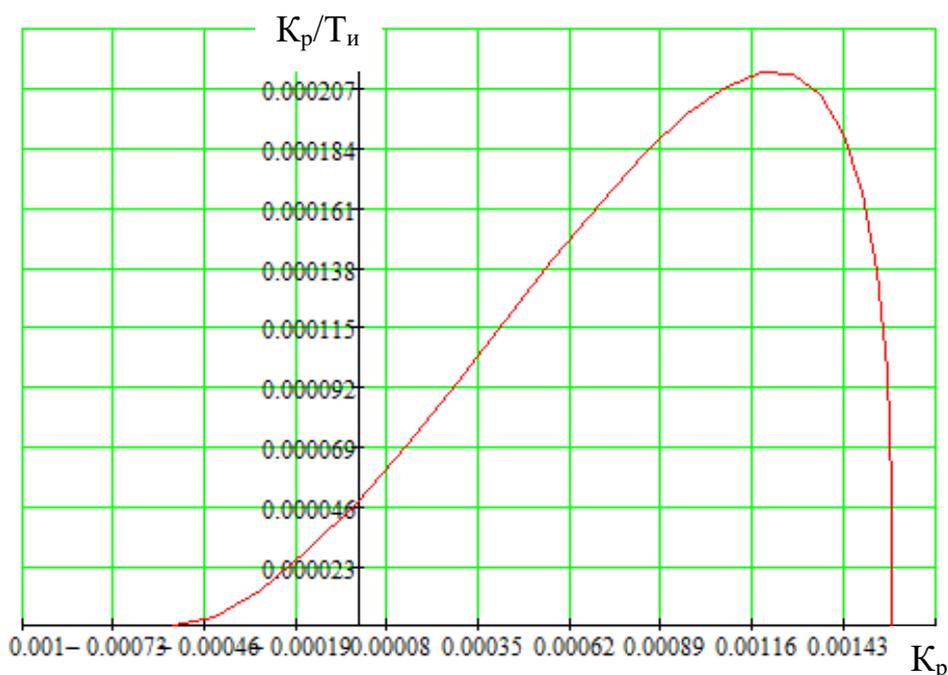


Рисунок 5.4 – Параметры настройки ПИ-регулятора

В качестве критерия качества используется первая интегральная оценка. Минимальное значение этой оценки соответствует точке с максимальным значением отношения K_p/T_i на линии заданного запаса устойчивости.

Из таблицы 18 определяем:

$$\max \left(\frac{K_p}{T_i} \right) = 0,0002122, \quad K_p = 0,00119, \quad \text{резонансная частота } \omega = 0,2588 \text{ с}^{-1}.$$

Определяем значение постоянной интегрирования:

$$T_i = \frac{K_p}{K_p/T_i} = 5,6 \text{ с.} \quad (5.14)$$

Произведем оценку качества переходного процесса в замкнутой системе при возмущении, которое идет по каналу регулирующего воздействия.

Передаточная функция будет иметь вид:

$$W(P) = \frac{W_{об}(P) \cdot W_p(P)}{1 + W_{об}(P) \cdot W_p(P)}, \quad (5.15)$$

где $W_p(P)$ – передаточная функция регулятора;

$W_{об}(P)$ – передаточная функция объекта.

Переходный процесс, идущий в замкнутой системе по каналу задающего воздействия, рассчитывается по методу трапеций. Чтобы рассчитать переходный процесс, необходимо определить вещественную частотную

характеристику системы. На рисунке 5.5 представлен график вещественной частотной характеристики.

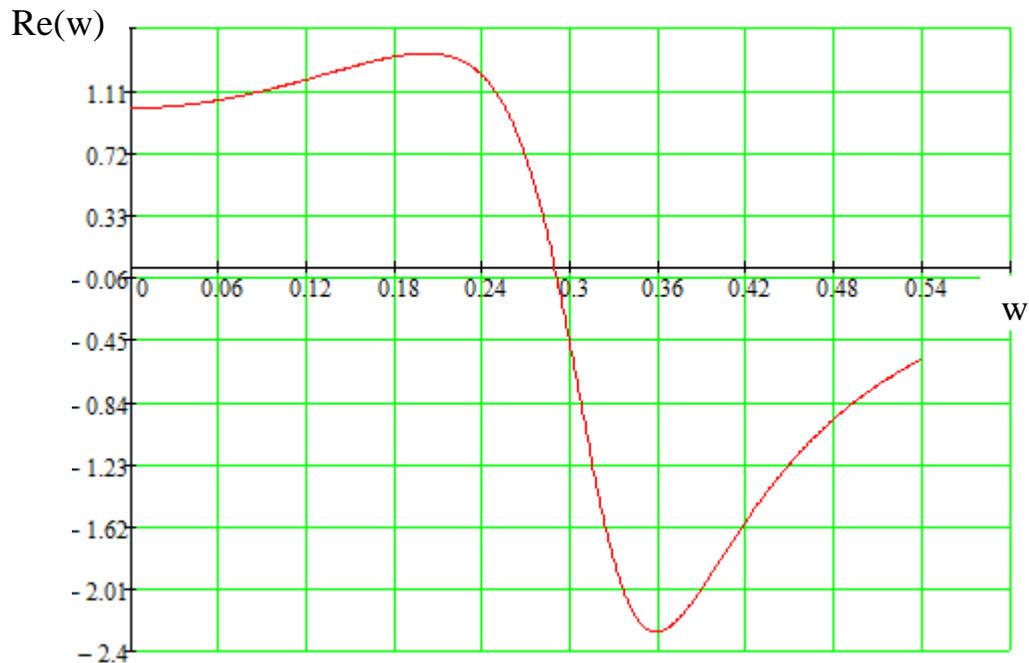


Рисунок 5.5 – Графическое представление вещественной частотной характеристики системы

Переходная характеристика системы связана с вещественной частотной характеристикой системы выражением:

$$y(t) = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^{\infty} \frac{Re(\omega)}{\omega} \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot d\omega, \quad (5.16)$$

где $Re(\omega)$ – вещественная частотная характеристика системы;

ω – частота;

t – продолжительность переходного процесса системы.

Для достижения точности расчета в качестве верхнего предела интеграла применяется не бесконечность, а значение, при котором значение вещественной частотной характеристики системы стремится к 0.

Конечный вид уравнения для определения переходного процесса системы имеет вид:

$$y(t) = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^{0,29} \frac{Re(\omega)}{\omega} \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot d\omega. \quad (5.17)$$

На рисунке 5.6 представлен переходный процесс замкнутой системы по каналу задающего воздействия. С помощью этого переходного процесса была произведена оценка качества регулирования. Данная оценка позволит сделать вывод о том, насколько система удовлетворяет требованиям, при предъявленных к системе ограничениях.

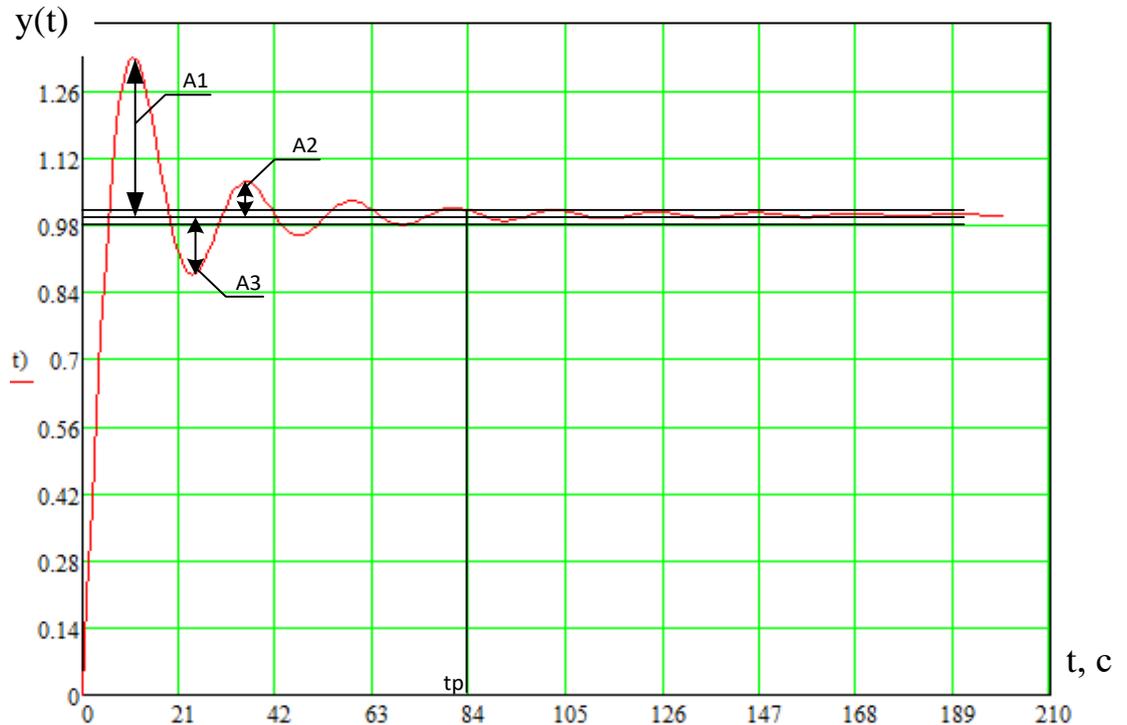


Рисунок 5.6 – Переходный процесс в системе по каналу задающего воздействия

С использованием графика определяются прямые оценки качества:

а) максимальная динамическая ошибка: $A_1=0,33$;

б) перерегулирование: $\sigma = \frac{A_3}{A_1} \cdot 100 = \frac{0,09}{0,33} \cdot 100 = 27,3\%$,

где $A_3 = 0,09$ – первое минимальное отклонение регулируемой величины;

в) динамический коэффициент регулирования R_d :

$$R_d = \frac{A_1 + y(\infty)}{K_{об}} \cdot 100 = \frac{0,33 + 1}{700} \cdot 100 = 0,19\%$$

где $K_{об} = 700$ – коэффициент передачи объекта;

г) степень затухания переходного процесса: $\psi = 1 - \frac{A_2}{A_1} = 1 - \frac{0,07}{0,33} = 0,79$,

где $A_2 = 0,07$ - второй максимальный выброс регулируемой величины;

д) статическая ошибка: $\varepsilon_{ст} = y(\infty) = 0$;

е) время регулирования: $t_p = 84$ с.

6. Разработка SCADA системы для АСУ топливоподачи

Мнемосхема изображения основных контролируемых и управляемых параметров системы автоматизированного управления. Такая схема может описывать технологический процесс с программным управлением. Мнемосхема предназначена для работы оператора с производственным процессом, в процессе управления мнемосхема является основным информирующим источником о системном состоянии, так же характере и структуре процессов.

Требования, предъявляемые к мнемосхеме, устанавливает предприятие, для которого она предназначена. В данной работе схема разрабатывалась в соответствии с общими требованиями:

- 1) мнемосхема должна состоять из элементов, которые необходимы для управления и контроля объекта;
- 2) отдельные элементы или группы элементов, наиболее существенные для контроля и управления, должны выделяться размерами, формой, цветом;
- 3) элементы мнемосхемы должны быть понятными и интуитивными, хорошо видимыми.

В соответствии с вышеизложенными требованиями была разработана мнемосхема процесса управления расходом ОВУТ в водогрейном котле КЕ, которая приведена на рисунке 6.1.

На данной схеме условно показана топка котла, в которой установлены 6 датчиков температуры, измеряющие распределения температуры. Температура изменяется в зависимости от изменения расхода ОВУТ, который управляется с операторной. По расходу ОВУТ соответственно изменяется расход воздуха необходимого для стабильного процесса горения. В случае нехватки воздуха или ОВУТ, в правом нижнем угле мнемосхемы появляется ошибка, которую можно наблюдать на рисунках 6.2 и 6.3.

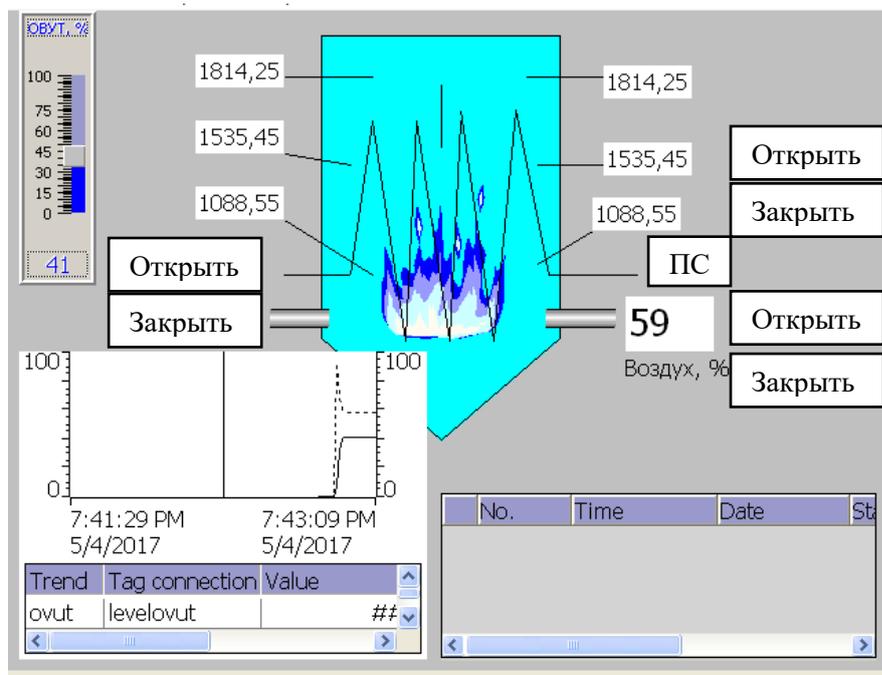


Рисунок 6.1 – Мнемосхема процесса сжигания ОВУТ при содержании воздуха в смеси 59 %

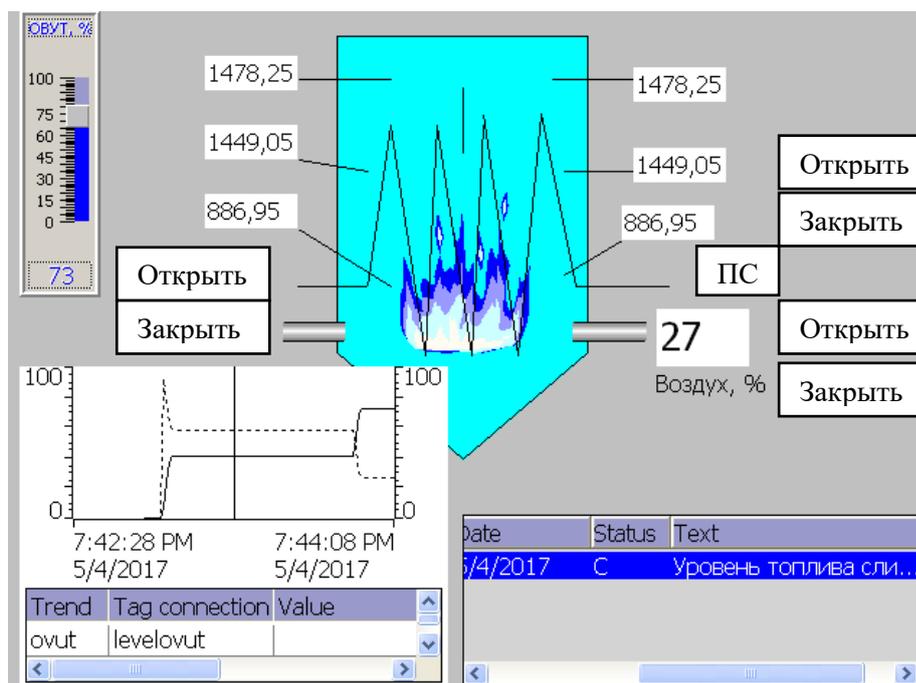


Рисунок 6.2 – Мнемосхема процесса сжигания ОВУТ при содержании воздуха в смеси 27 %

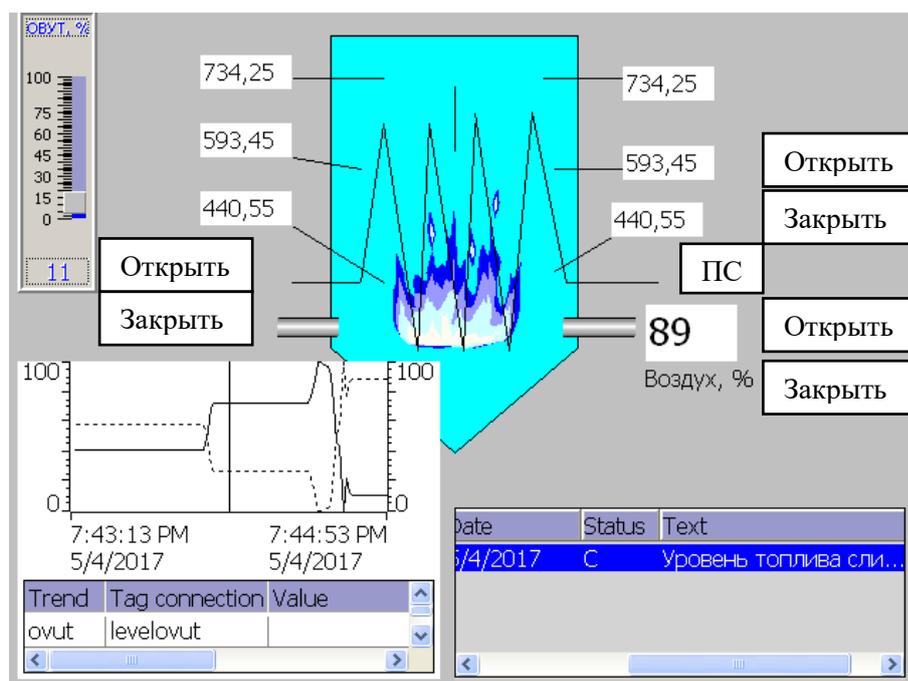


Рисунок 6.3 – Мнемосхема процесса сжигания ОВУТ при содержании воздуха в смеси 89 %

Как видно из схемы, при недостаточном количестве ОВУТ для стабильного процесса горения, возникает ошибка «Уровень топлива слишком мал». Соответствующая ошибка возникает и при увеличении количества подаваемого воздуха, так как расход воздуха влияет на недожог топлива и на количество выбросов оксида азота (NO_x).

Также на мнемосхему выводится изменение расхода ОВУТ в зависимости от времени.

Для отражения реальной картины прогрева топочной камеры, установлено 6 термопар на разной высоте. Это вызвано необходимостью улучшения экономичности сжигания топлива. Одна или две термопары не дают представления об изменении температуры в камере сгорания. При высоких температурах (около $1500\text{ }^\circ\text{C}$ в верхней части котла), экономичность процесса горения падает, так как это последняя ступень теплообменного контура, и температура удаляемых газов будет большая, тем самым удельные показатели увеличатся. Если же котел разделить вертикально на две части, то

показания правых термопар должны равняться показанием левых термопар, иначе процесс горения не стабилен и есть возможность затухания факела.

Также на мнемосхеме приведены кнопки управления задвижками прямой сети (ПС), воздуха и ОВУТ. При заданном соотношении «ОВУТ–воздух», производятся открытия этих задвижек, но только после прогрева и растопки котла. При выходе котла на стационарный режим производится открытие задвижки прямой сети – вода проходит в теплообменных трубах через топочную камеру, нагревается и далее поступает к потребителю. Для контроля температуры воды в трубопроводе прямой сети установлен датчик температуры.

Заключение

В рамках данного дипломного проекта была разработана автоматизированная система сжигания органоводоугольной топливной композиции.

Спроектированная система является трехуровневой. Полевой уровень включает датчики измерения температуры и расхода, а также запорную арматуру и исполнительные механизмы. На среднем уровне располагается микропроцессорный контроллер, на верхнем уровне – АРМ оператора.

В ходе выполнения дипломного проекта была разработана проектная документация: схема структурная, схема функциональная, схема принципиальная электрическая, схема монтажная и общий вид щита.

Пояснительная записка к проекту содержит подробное описание основного оборудования, приборов и технических средств автоматизации, экспериментальных исследований, а также мнемосхема. При выборе приборов руководствовались каталогами и сайтами производителей.

Также выполнены разделы «Социальная ответственность» и «Менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение», в котором рассчитана общая сумма затрат на реализацию проекта (173,2 тыс. руб.), а рассчитанная эффективность проекта составила 1000000 рублей, что говорит об эффективности реализации данного технического проекта.

Основные публикации автора работы:

1. Shlegel N.E., Kats M.D., Glushkov D.O. The Influence Of Mass Fraction Of Dressed Coal On Ignition Conditions Of Composite Liquid Fuel Droplet // MATEC Web of Conferences. – 2015. – V. 37, Article number 01051. – P. 157–168.
2. Nyashina G.S., Kosintsev A.G., Shlegel N.E., Strizhak P.A. The influence of droplet sizes of coal-water slurry containing petrocemicals on integral ignition characteristics // JP Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – Vol. 13. – № 2. – P. 265–276.

3. Glushkov D.O., Shlegel N.E., Strizhak P.A., Vershinina K.Y. Heat transfer under ignition of droplet of composite liquid fuel made of coal, water and oil in an oxidant flow // *Advances and Applications in Fluid Mechanics*. – 2016. – Vol. 19. – № 1. – P. 157–168.
4. Vershinina K. et al. The prospects of burning coal and oil processing waste in slurry, gel, and solid state // *Applied Thermal Engineering*. – 2019. – T. 156. – С. 51-62.
5. Vershinina K. Y., Shlegel N. E., Strizhak P. A. Relative combustion efficiency of composite fuels based on of wood processing and oil production wastes // *Energy*. – 2019. – Vol. 169. – P. 18-28.
6. Vershinina K. Y., Shlegel N. E., Strizhak P. A. Impact of environmentally attractive additives on the ignition delay times of slurry fuels: Experimental study // *Fuel*. – 2019. – Vol. 238. – P. 275-288.
7. Няшина Г.С., Шлегель Н.Е., Стрижак П.А. Анализ антропогенных выбросов при сжигании угольных топлив и отходов углепереработки // *Кокс и химия*. – 2017. – №. 4. – С. 40–46.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Chayka O. G., Kovalchuk O. Z., Chayka Y. A. Monitoring the formation of waste oils //Proceedings Scientifical works. Lviv, Lviv Polytechnic. – 2009. – С. 221-224.
2. Shlegel N. E., Kats M. D., Glushkov D. O. The Influence Of Mass Fraction Of Dressed Coal On Ignition Conditions Of Composite Liquid Fuel Droplet //MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2015. – Т. 37. – С. 01051.
3. Sieminski A. International energy outlook 2013 //US Energy Information Administration (EIA) Report Number: DOE/EIA-0484. – 2013.
4. Dudley B. et al. BP statistical review of world energy 2016 //London, UK. – 2015.
5. Facts C. Based on Data Provided by the International Energy Agency and the BP Statistical Review of World Energy //London: World Coal Association. – 2014.
6. Glushkov D.O., Shlegel N.E., Strizhak P.A., Vershinina K.Y. Heat transfer under ignition of droplet of composite liquid fuel made of coal, water and oil in an oxidant flow // Advances and Applications in Fluid Mechanics. – 2016. – Vol. 19. – № 1. – P. 157–168.
7. Bukhonov D. Y., Morozov V. V. Efficiency of the multipurpose use of solid fuel at thermal power stations //Thermal engineering. – 2003. – Т. 50. – №. 12. – С. 1039-1042.
8. Khodakov G. S., Gorlov E. G., Golovin G. S. Production and pipeline transportation of coal-water slurry fuel //SOLID FUEL CHEMISTRY C/C OF KHMIIA TVERDOGO TOPLIVA. – 2006. – Т. 40. – №. 4. – С. 19.
9. Lior N. Energy resources and use: The present situation and possible paths to the future //Energy. – 2008. – Т. 33. – №. 6. – С. 842-857.
10. Gajewski W., Kijo-Kleczkowska A., Leszczyński J. Analysis of cyclic combustion of solid fuels //Fuel. – 2009. – Т. 88. – №. 2. – С. 221-234.

11. Chen R. et al. Preparation and rheology of biochar, lignite char and coal slurry fuels //Fuel. – 2011. – T. 90. – №. 4. – C. 1689-1695.
12. Nyashina G. S. et al. The influence of droplet sizes of coalwater slurry containing petrochemicals on integral ignition characteristics //JP Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – T. 13. – №. 2. – C. 265-276.
13. Zhu J. et al. Investigation on the rheological and stability characteristics of coal–water slurry with long side-chain polycarboxylate dispersant //Fuel processing technology. – 2014. – T. 118. – C. 187-191.
14. Mukherjee A., Pisupati S. V. Interparticle interactions in highly concentrated coal–water slurries and their effect on slurry viscosity //Energy & Fuels. – 2015. – T. 29. – №. 6. – C. 3675-3683.
15. James D. W. et al. Modeling trace element partitioning during coal combustion //Fuel processing technology. – 2014. – T. 126. – C. 284-297.
16. Belošević S. et al. Numerical prediction of processes for clean and efficient combustion of pulverized coal in power plants //Applied Thermal Engineering. – 2015. – T. 74. – C. 102-110.
17. Bartoňová L. Unburned carbon from coal combustion ash: an overview //Fuel Processing Technology. – 2015. – T. 134. – C. 136-158.
18. Bo Y. et al. Combustion characteristics of coal–water slurry in a slag-tap vertical cyclone furnace through digital imaging //Energy & Fuels. – 2013. – T. 27. – №. 6. – C. 3427-3437.
19. Delitsyn L. M., Vlasov A. S. The need of applying new approaches for using ash produced at coal-fired thermal power stations //Thermal engineering. – 2010. – T. 57. – №. 4. – C. 325-331.
20. Delitsyn L. M. et al. Innovative technologies for full utilization of ash generated at coal-fired thermal power stations for producing alumina and construction materials //Thermal Engineering. – 2013. – T. 60. – №. 4. – C. 231-238.
21. Gorlov E. G. Composite water-containing fuels from coals and

- petroleum products //Solid Fuel Chemistry. – 2004. – Т. 38. – №. 6. – С. 40-50.
22. Gorlov E. G., Seregin A. I., Khodakov G. S. Vibration mills in the manufacturing technology of slurry fuel from unbeneficiated coal sludge //Solid Fuel Chemistry. – 2008. – Т. 42. – №. 4. – С. 208-212.
23. Няшина Г. С., Шлегель Н. Е., Стрижак П. А. Анализ антропогенных выбросов при сжигании угольных топлив и отходов углепереработки //Кокс и химия. – 2017. – №. 4. – С. 40-46.
24. Lishtvan I. I. et al. Fuel suspensions based on fuel oil, peat, waste wood, and charcoal //Solid Fuel Chemistry. – 2009. – Т. 43. – №. 1. – С. 1-4.
25. Red’Kina N. I., Khodakov G. S., Gorlov E. G. Coal fuel slurry for internal combustion engines //Solid Fuel Chemistry. – 2013. – Т. 47. – №. 5. – С. 306-314.
26. Glushkov D. O., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Mathematical simulation of the ignition of coal particles in airflow //Solid Fuel Chemistry. – 2015. – Т. 49. – №. 2. – С. 73-79.
27. Glushkov D. O., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Low-temperature ignition of coal particles in an airflow //Russian Journal of Physical Chemistry B. – 2015. – Т. 9. – №. 2. – С. 242-249.
28. Glushkov D. O., Strizhak P. A., Vysokomornaya O. V. Numerical research of heat and mass transfer during low-temperature ignition of a coal particle //Thermal Science. – 2015. – Т. 19. – №. 1.
29. Tsai S. C. Fundamentals of coal beneficiation and utilization. – Elsevier Scientific, 1982. – С. 335.
30. Cooper B. R., Ellingson W. A. The Science and Technology of Coal and Coal Utilization //The Science and Technology of Coal and Coal Utilization. – Springer, Boston, MA, 1984. – С. 1-5.
31. Pallarés J. et al. Investigation on co-firing of coal mine waste residues in pulverized coal combustion systems //Energy. – 2017. – Т. 140. – С. 58-68.

32. Zhou K. et al. The ignition characteristics and combustion processes of the single coal slime particle under different hot-coflow conditions in N₂/O₂ atmosphere //Energy. – 2017. – T. 136. – C. 173-184.
33. Peña B., Bartolomé C., Gil A. Analysis of thermal resistance evolution of ash deposits during co-firing of coal with biomass and coal mine waste residues //Fuel. – 2017. – T. 194. – C. 357-367.
34. Maltby E. Waterlogged wealth: why waste the world's wet places?. – Routledge, 2013.
35. Taylor J. A. Distribution and development of the world's peat deposits //Nature. – 1964. – T. 201. – C. 454-456.
36. Nyashina G. S. et al. Environmental benefits and drawbacks of composite fuels based on industrial wastes and different ranks of coal //Journal of hazardous materials. – 2018. – T. 347. – C. 359-370.
37. Zhao X. et al. Emission characteristics of PCDD/Fs, PAHs and PCBs during the combustion of sludge-coal water slurry //Journal of the Energy Institute. – 2015. – T. 88. – №. 2. – C. 105-111.
38. Liu J. et al. Co-firing of oil sludge with coal–water slurry in an industrial internal circulating fluidized bed boiler //Journal of hazardous materials. – 2009. – T. 167. – №. 1-3. – C. 817-823.
39. Jianzhong L. et al. Pilot-scale investigation on slurrifying, combustion, and slagging characteristics of coal slurry fuel prepared using industrial wasteliquid //Applied energy. – 2014. – T. 115. – C. 309-319.
40. Dmitrienko M. A., Strizhak P. A. Coal-water slurries containing petrochemicals to solve problems of air pollution by coal thermal power stations and boiler plants: An introductory review //Science of the Total Environment. – 2018. – T. 613. – C. 1117-1129.
41. Glushkov D. O., Strizhak P. A. Ignition of composite liquid fuel droplets based on coal and oil processing waste by heated air flow //Journal of cleaner production. – 2017. – T. 165. – C. 1445-1461.

42. Vershinina K. Y., Glushkov D. O., Strizhak P. A. Characteristics of the ignition of the drops of organic coal–water fuels based on waste oils and industrial oils //Solid Fuel Chemistry. – 2017. – T. 51. – №. 3. – C. 188-194.
43. ISO 11722:1999 «Solid mineral fuels - Hard coal - Determination of moisture in the general analysis test sample by drying in nitrogen».
44. ISO 1171:2010 «Solid mineral fuel – Determination of ash».
45. ISO 562:2010 «Hard coal and coke - Determination of volatile matter».
46. ISO 1928:2009 «Solid mineral fuels - Determination of gross calorific value by the bomb calorimetric method and calculation of net calorific value».
47. ASTM D240-92(1997)e2, Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000.
48. ISO 3733-1999 Petroleum products and bituminous materials. Determination of water. Distillation method.
49. ISO 6245-2001 Petroleum products. Determination of ash.
50. ISO 2592-2000 Petroleum products. Determination of flash and fire points. Clevelandopencup method.
51. Glushkov D. O. et al. Burning properties of slurry based on coal and oil processing waste //Energy & Fuels. – 2016. – T. 30. – №. 4. – C. 3441-3450.
52. OECD I. E. A. et al. Energy and Air Pollution: World Energy Outlook Special Report 2016. – 2016.
53. Holmberg K., Erdemir A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions //Friction. – 2017. – T. 5. – №. 3. – C. 263-284..
54. Tang Q. et al. Characterization of heavy metals in coal gangue-reclaimed soils from a coal mining area //Journal of Geochemical Exploration. – 2018. – T. 186. – C. 1-11.
55. Zhao C., Luo K. Sulfur, arsenic, fluorine and mercury emissions resulting from coal-washing byproducts: A critical component of China's emission inventory //Atmospheric environment. – 2017. – T. 152. – C. 270-278.

56. Li Z, Ma Z, van der Kuijp TJ, Yuan Z, Huang L. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment. *Sci Total Environ* 2014;468-469:843-853.
57. Scholz W., Fuchs W. Treatment of oil contaminated wastewater in a membrane bioreactor // *Water Research*. – 2000. – Т. 34. – №. 14. – С. 3621-3629.
58. Котёл паровой KE-10-14-225С-О(ТЛЗМ) (Е-10-1,4-225Р). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bikz.ru/> свободный. – Загл. с экрана.
59. Vershinina K. Y., Shlegel N. E., Strizhak P. A. Relative combustion efficiency of composite fuels based on of wood processing and oil production wastes // *Energy*. – 2019. – Т. 169. – С. 18-28.
60. Мальцев Л.И., Кравченко И.В., Кравченко А.И., Самборский В.Е. Пневматическая форсунка для распыливания ВУТ // Сб. докл. VII Всероссийской конф. с межд. участием «Горение твердого топлива». Новосибирск, Россия, 10-13 ноября. – 2009. – Ч.2. – С. 83-88.
61. Ключев А.С., Глазов Б.В. Проектирование систем автоматизации технологических процессов. Справочное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 464 с.
62. Волошенко А.В., Медведев В.В. Технологические измерения и приборы. Курсовое проектирование: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 120 с.
63. Метран. Каталог продукции 2016. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mtn.nt-rt.ru/> свободный. – Загл. с экрана.
64. SIMATIC S7-200 Руководство по эксплуатации. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ste.ru/siemens/contr.html> свободный. – Загл. с экрана.
65. ВЭСТ-02 Руководство по эксплуатации. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://npowest.ru/.html> свободный. – Загл. с экрана.
66. ПЛК63 Руководство по эксплуатации. [Электронный ресурс]. –

Режим доступа: http://www.owen.ru/uploads/rie_plk63_1001.pdf свободный. – Загл. с экрана.

67. Каталог продукции ОАО «Endress+Hauser». – М.: Изд-во «Endress+Hauser », 2013. – 215 с.

68. Механизмы исполнительные электрические однооборотные. Руководство по эксплуатации. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.zeim.ru/production/docs/re/53.pdf> свободный. – Загл. с экрана.

69. Блоки управления БУЭР 1-30. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.elkont.ru/> свободный. – Загл. с экрана.

70. ПЛК63 Схемы подключения технических средств измерения. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.owen.ru/uploads/datchik_temperaturi_4..20ma_1.pdf свободный. – Загл. с экрана.

71. Резисторы С2–С3. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.reom.ru/page.php?pageId=5&topic=43&catId=269> свободный. – Загл. с экрана.

72. Электрокомплект сервис. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://e-kc.ru/cena/cable-kvvg-10-1_5 свободный. – Загл. с экрана.

73. СТО ТПУ 2.5.01-2011. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://standard.tpu.ru/docs/standorg/ВКР_ориг1.htm свободный. – Загл. с экрана.

74. Баглай М. В. Конституционное право Российской Федерации. – М.: НОРМА-ИНФРА. М, 1999.

75. ГОСТ 12.0.004-2015 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200136072> свободный. – Загл. с экрана.

76. РФ Т. К. Трудовой Кодекс Российской Федерации» от 30.12. 2001 № 197-ФЗ //Российская газета. – 2001. – №. 256.

77. ГОСТ 12.0.003-2015 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200136071> свободный. – Загл. с экрана.

78. СанПиН 2.2.4.548-96 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/901704046> свободный. – Загл. с экрана.
79. ГОСТ 12.1.003-2014 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200118606> свободный. – Загл. с экрана.
80. СНиП 23-05-95* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/871001026> свободный. – Загл. с экрана.
81. СП 52.13330.2016 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/456054197> свободный. – Загл. с экрана.
82. ГОСТ 12.1.038-82 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/5200313> свободный. – Загл. с экрана.
83. ГОСТ 30331.4-95 (МЭК 364-4-42-80) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200001338> свободный. – Загл. с экрана.
84. ГОСТ Р 56257-2014 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200118630> свободный. – Загл. с экрана.
85. Назаренко О.Б. Безопасность жизнедеятельности: учебное пособие / О.Б. Назаренко, Ю.А. Амелькович; Томский политехнический университет. – 3-е изд., перераб. и доп. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 178 с.
86. Д.А. Кривошеин. Экология и безопасность жизнедеятельности: Учеб. пособие для вузов / Д.А. Кривошеин, Л.А. Муравей, Н.Н. Роева и др.; Под. Ред. Л.А. Муравья. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 200. - 447 с.
87. Правила устройства электроустановок. Минэнерго СССР, 6-е издание – Энергоатомиздат, М.: 1996. – 640 с.
88. ГОСТ Р 50831-95. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200001338> свободный. – Загл. с экрана.
89. ГОСТ Р 22.0.01-2016 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200118606> свободный. – Загл. с экрана.

90. ГОСТ Р [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
<http://docs.cntd.ru/document/1200001338> свободный. – Загл. с экрана.

Приложение А

Раздел (1) Comparative study of fuel compositions

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ74	Шлегель Никита Евгеньевич		

Консультант школы отделения (НОЦ): ИШЭ И.Н. Бутакова

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Вершинина Ксения Юрьевна	к.ф. – м.н.		

Консультант – лингвист отделения (НОЦ) школы: ОИЯ ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Черемисина Харрер Инна Алексеевна	к.фил.н., доцент		

1. Research studies

1.1. Coal slime

At a typical coal preparation plant, the raw material consists of a mixture of various components: coal pulp, storage products, waste heaps, fine coal, low-grade coal [29, 30]. These elements are given a generic name - coal preparation and processing waste (sludge, filter cakes, industrial product, coal concentrate and their mixtures). Characteristics of raw materials: relatively high ash content (up to 50–60%) and humidity (up to 20–30%). As a result, such solid components of fuels are considered high-ballast [31–33].

Coal enrichment is a set of processes of coal produced in order to separate impurities that prevent its further use. Impurities are mainly mineral components and sulfur-containing substances. The enrichment products are: coal concentrate - has the highest content of “pure” coal; industrial product - contains intergrowth of coal with solid; tails - have the highest content of mineral impurities. The main methods of enrichment of coal: gravity - based on differences in the density of components; flotation - on the basis of various wettability of the components, natural or created by the reagents; magnetic - based on different magnetic susceptibility of the components; electrical - based on various electrical properties of the components; special - rarely used for coal (radiometric separation, enrichment in form and friction, magnetohydrodynamic enrichment, chemical enrichment, etc.).

The rational choice of one or several methods is primarily due to the properties of fossil coal, equipment and technology of enrichment, technical and economic indicators. Currently in the world are mainly used methods of gravity and flotation enrichment. Due to the widespread mechanization of coal mining, the yield of fine high-ash coal classes (<1 mm) increased dramatically and amounted to 25–30% of raw coal. Further improvement of coal mining technology (especially the use of the hydraulic method) will further increase the yield and ash content of this class. In addition, for example, for various processes of deep processing of coal, it is desirable

to have the original fuel with an ash content of not more than 3%. This cannot be achieved by gravity enrichment. There is also the problem of the need to clean various coal slurries (up to 25% of the factory capacity) and sludge water. As a result, the flotation enrichment method now has a great importance. The use of flotation made it possible to increase the yield of concentrate for coking and reduce its ash content.

Russia produces 400–500 million tons of coal per year. On average, about 60–70% of coal is enriched (coking coal is enriched by about 90–95%). The task is to bring these values to 85% by 2020 (with production of almost 500 million tons per year). The value of the specific indicator of flotation waste is 120–130 kg/t of raw coal, and the coal beneficiation solid is 410 kg/t of raw coal (reference and approximate indicators). As a result, the volume of annual production of filter cakes, sludges, industrial products in the coming years will multiply and the problem of their disposal will become even more acute. Such problems are typical not only for Russia, but also for China, India, and the USA. The known technologies of using coal sludge, unfortunately, have low efficiency ratios (according to complex economic, environmental and energy estimates) and allow the involvement of small volumes.

1.2. Peat

Peat consists of partially decomposed organic products, minerals and water. The lowland type has the following composition: carbon 40–60%; hydrogen 5%; oxygen 2–3%; sulfur, phosphorus, potassium - in small quantities. Due to the high carbon content, the average calorific value of peat is 10–15 MJ/kg (for some peats, up to 20 MJ/kg), which can increase with the decomposition and content of organic compounds — bitumen. The appearance, structure and properties of this natural formation change as the stages of decomposition change. So, the color changes from light yellow to black. Different from the degree of decomposition will be the structure - fiber or amorphous, as well as porosity. The greater the degree of

decomposition of peat, the less it will contain water-soluble and easily hydrolyzed substances, and the higher will be the content of humic acids and non-hydrolyzed residue.

The use of peat as a fuel causes many discussions, as it has significant limitations in application. Large amount is the main reason for using peat. It represents the remains of plants that are not completely decomposed in marsh conditions. The marsh is characterized by a lack of oxygen and high humidity. This does not allow the plants to completely decompose. The plant mass accumulates from year to year and turns into a homogeneous mass - peat. According to experts, the world resource of this mineral is from 250 to 500 billion tons. In total, it covers 3% of the land. The first place in terms of peat reserves went to Canada (170 billion tons), and second to Russia (150 billion tons). A large proportion of peatlands in Sweden, Finland, Germany, Belarus, Ireland, the UK, some US states. Experts estimate that in Russia from 40 to 60% of world reserves are concentrated. The land occupied by peat in our country makes up 31.8% in the Tomsk Region and 12.5% in the Vologda Region. An impressive amount of deposits is located in the Central regions - Ryazan, Moscow, Vladimir regions. Each year, peat reserves in Russia are replenished by 250 million tons. Under such conditions, Russia has a great future in solving the problematic issues of local energy, improving soil fertility, environmental challenges.

Recently Russia has become one of the leaders in the consumption of peat fuel, but today it is giving way to countries such as Finland, Ireland and Canada. In Russia, peat began to be extracted 200 years ago. It was used as fuel in thermal power plants. For agricultural needs, 160-180 tons were mined every year. And in 1965, production reached its historic maximum and amounted to 27.9 million tons. The next 30 years, the indicators only decreased. Large deposits of natural gas were discovered in Western Siberia. Energy at an accelerated steps began to move to this type of fuel. As a result, by the end of the 90s, the volume of peat production dropped to 2-4 million tons per year. Recall that in Soviet times, this figure was 220-280

million tons. The use of gas as the main thermal energy fuel has no alternatives for ecology and economy for large states. Therefore, gasification of the regions occurs at an accelerated pace. But besides the fact that gas is an exhaustive resource, this trend has another drawback. Most of the world's regions are dependent on gas, which today produces 90% of the heat. You can avoid dependence due to backup fuel.

As for the comparison of peat with coal, the advantage in many positions is in the first. The energy intensity of peat briquettes is homogeneous, while the calorific value of coal is uneven. The cost of it when accounting for transportation costs is many times higher than the price of peat. Suppose that the price of a ton of peat is 100%, the northern and western regions of Russia will have to pay 190% for the same amount of Kuznetsk coal, 120–160% for Vorkuta coal, and 250% for heating oil. The decisive advantage of peat fuel is its environmental safety, the problem of which is today one of the most pressing in the world. For example, coal contains 1–3% sulfur, heating oil 1.2%. During the burning from sulfur forms sulfur dioxide, which reacts with atmospheric moisture and produces sulfurous acid, and it turns ordinary rain into acidic. Sulfur is practically absent in peat (compared to coal). Also, when using peat fuel, emissions of solid suspended particles decrease tenfold. Peat ash is easy to dispose, what cannot be said about coal slags. Also, experts have concluded that the development of peat territories will help to protect large areas from fire. But some experts oppose the widespread use of peat. They argue that large-scale peat extraction can adversely affect climate and biodiversity. A bog, like a forest, has the property of absorbing carbon dioxide from the atmosphere and releasing oxygen. When it is drained, large amounts of carbon dioxide accumulated over thousands of years will enter the atmosphere and stimulate the greenhouse effect. In the near future, such a large-scale development of peatlands, which can have a tangible impact on the Earth's climate in Russia, is not to be expected. Experts say that natural gas reserves may be enough for us for another 80–100 years. But, nevertheless, it is also necessary to expand the peat industry, because the resource of this type of fuel in the world is huge [34,35].

1.3. Suspension slurry fuels

It is known [36] that the use of suspension slurry fuels (coal-water, organo-water-coal) improves the efficiency of coal combustion, as well as reduces the concentration of harmful emissions into the atmosphere (in particular, nitrogen oxides and sulfur) [37–39]. Combustion technologies of water-coal, organo-water-coal, and composite liquid fuels are considered to be practically wasteless. Small particles in the composition of suspensions with a size of 50 microns or less are completely burned in the chamber or do not burn at all (for example, metal oxides). The use of coal processing waste to produce coal-water slurries makes it possible to significantly simplify the technological schemes for preparing fuel (there are no costs for the initial preparation of fuel associated with grinding), as well as to reduce production fines for environmental pollution by coal preparation waste [40]. Over the past five years, interest in coal-water fuels based on filter cakes has increased significantly in countries such as Russia, China, and India. Active work is underway to study the characteristics of the combustion of such fuels. It is known [41] that filter cakes, compared with coal, have a small amount of volatile components and carbon. As a result, the ignition delay times for such fuels are significantly higher [42]. For most filter cakes of different coals, the inertia of ignition increases several times as compared with coals. One of the areas of intensification of the ignition process of coal-water suspensions is the creation of organo-coal fuels [42]. Adding flammable liquids (used turbine, transformer, compressor, automotive and other oils; oil sludge) to fuel slurries reduces the ignition and combustion times for these fuels, and expands the range of recyclable wastes, with significant reserves of high environmental hazard [40]. As one of the limiting factors, we can highlight the lack of experimental information on energy, environmental and economic characteristics, as well as indicators of fire and explosion safety [40].

An important and promising task is to study the possibility of the joint involvement of coal slimes, peat, waste oils, fusions and other components (see the lists in the review article [40]) as part of coal-water fuels and composite liquid fuels.

At the same time, it is important to pay attention mainly to components that initially already contain water or are in a liquid and suspension state. In this case, the most promising are peat, coal slimes and flotation waste (filter cakes).

1.4. The aim and purpose of research

The purpose of the research was the experimental determination of the limiting conditions and the main characteristics of the processes of ignition and combustion of droplets of water-containing fuels from peat, coal slimes and crushed coal.

The main objectives of the research:

- 1) preparation of fuel suspensions using peat, waste coal, lignite and used turbine oil;
- 2) determining the time of ignition delays, duration of burning drops of prepared suspensions, as well as minimum ignition temperatures and maximum burning temperatures of the droplets;
- 3) determination of the concentration of nitrogen oxides, sulfur oxides in products combustion of the investigated suspensions;
- 4) calculation of relative indicators of efficiency of use investigated suspensions in comparison with coal and fuel oil are the most common brands.

1.5. Materials

The appearance of solid combustible components is shown in Figure 1. Municipal water was used as a dispersion medium. Peat was mined in the Tomsk region (Sukhovskoye deposit), lignite - in the Krasnoyarsk Territory, filter cake and coal slime obtained from the processing plant of the Kemerovo region. Turbine oil was obtained from the power turbine of thermal power plant in the Tomsk region after a year of operation. Analysis of solid combustible components was carried out in accordance with the methods and regulations [43–47]. The properties of used oil were determined according to recommendations [48–50].

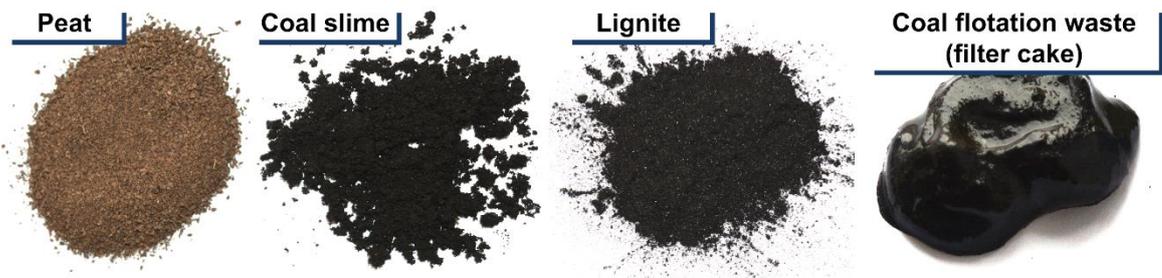


Figure 1.1 – Solid combustible components (filter cake is in wet condition)

Suspensions of the following composition were studied:

- 6) 40% peat, 10% waste turbine oil, 50% water;
- 7) 40% filter cake, 10% waste turbine oil, 50% water;
- 8) 40% lignite, 10% waste turbine oil, 50% water;
- 9) 40% coal slime, 10% waste turbine oil, 50% water;
- 10) 30% filter cake, 20% coal slime, 50% water.

The preparation of fuel suspensions was carried out using a homogenizer. At the first stage, water and oil were mixed. Then a solid combustible component was added to the water-oil emulsion. Mixing was carried out to obtain a completely homogeneous suspension.

1.6. Ignition and Burning Characteristics

Ignition and combustion characteristics were investigated using a model combustion chamber (muffle furnace) and a number of auxiliary equipment. In Figure 1.2 the scheme of the used stand is presented. Two registration units were used in experiments to determine the conditions and characteristics of ignition and combustion processes, as well as to study ecological parameters are shown.

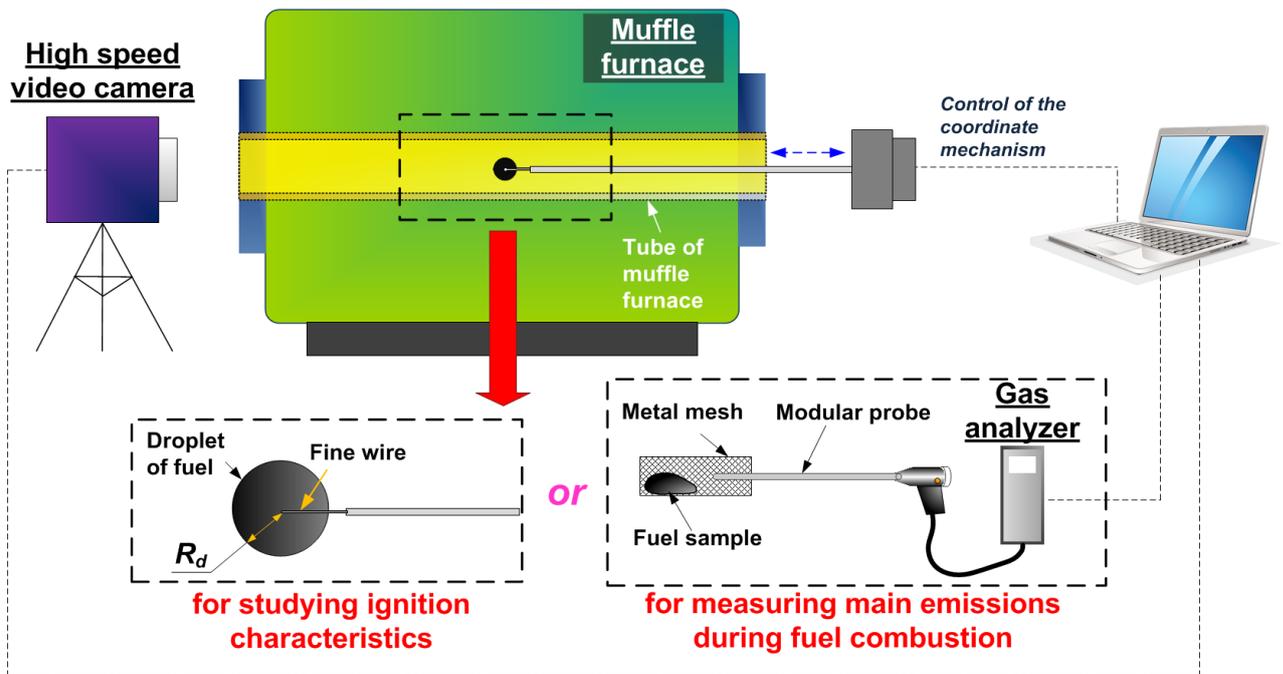


Figure 1.2 – Scheme of experimental bench

A high temperature (350–1000 ° C) was maintained inside the hollow ceramic tube of the muffle furnace (Figure 1.2). The front panel of the muffle furnace displayed the temperature inside the chamber. An additional temperature measurement in the combustion chamber (T_g) was also carried out using a probe with a thermocouple (chromel-alumel, measured temperature range 0–1100 ° C, systematic error of ± 3 ° C, inertia no more than 10 s) to check the readings of muffle furnace sensor.

A high-speed (up to 105 fps) video camera was installed on the one side of the muffle furnace. On the other side, a coordinate device was placed for the automated delivery of a sample of fuel into the combustion chamber (Figure 1.2). The device had a drive and a stepping mechanism and could be controlled by signals supplied in manual mode from a personal computer. The coordinate device is configured so that the fuel sample is located in the center of the combustion chamber.

After the chamber was warmed up to the required temperature, the stage of preparing a drop of fuel was carried out. Drops were formed using an electronic dispenser (dosage limits 1–10 μl , step of varying the dosage volume 0.1 μl). The

formed drop of fuel suspension was placed on the tip of a thin metal wire (diameter about 0.25 mm) installed in a motorized coordinate mechanism, which was then used to place the drop in the combustion chamber (Figure 1.2). The processes of heating, ignition, and burning of the drop of the suspension were recorded with a high-speed video camera.

The following characteristics were recorded for suspension drops: heterogeneous ignition delay time (τ_d), burning time (τ_b), minimum ignition temperature (T_{gmin}), maximum burning temperature of the solid fuel (T_{dmax}). A thermal imager was used to record T_{dmax} (temperature sensitivity <30 mK, detector 640×480 , maximum measured temperature 1197 ° C).

According to the video obtained during the experiment, it is possible to determine the temporal characteristics of the ignition and combustion of a drop of fuel, the combustion reaction is exothermic and is accompanied not only by the release of heat, but also light. The task of determining the ignition delay time and burning duration was solved using specialized software algorithms of Tema Automotive, which allows to track the intensity of the glow of a drop of composite liquid fuel. The delay time of the heterogeneous ignition τ_d was considered – the interval from the moment a fuel drop entered the combustion chamber until the moment when the solid part of the drop was ignited. The parameter τ_b represented the time from the moment of heterogeneous ignition of the solid fuel residue to the moment of the end of combustion. The minimum ignition temperature was determined by averaging 5–7 repeated measurements. The error of its determination did not exceed 10 ° C. The heat of combustion of the fuel compositions was defined as the sum of the heat of combustion of each component in accordance with the mass fraction in the mixture. The validity of the approach is justified in [51].

The initial radius (R_d) of the fuel droplets was determined using a high-speed video camera and Tema Automotive software. The initial images of the droplets were calculated in four sizes in different sections. The mean value of these four sizes was used to determine the radius of the drop R_d . The systematic error in determining

R_d with the highest possible resolution of a video camera and frame rate did not exceed 4%, and the times τ_d and τ_b did not exceed 2.5%. Ignition characteristics of droplets of suspensions with an initial radius of ≈ 1 mm were determined. The results were compared if the deviation of the average radius did not exceed ± 0.15 mm.

A bench (Figure 1.2) was also used to determine the ecological characteristics of the combustion of suspensions. In the experiments, we used a sample of fuel weighing about 1 g. The method of recording the determination of environmental indicators was used in accordance with the approach [36,40]. A vertical valve installed on the coordinate mechanism with a layer of high-temperature insulation covered the hole that serves to enter the fuel sample into the combustion chamber. Thus, control of the air excess coefficient was ensured (in all experiments it was 1.05). A gas analyzer was used for measurements (O₂ (measuring range 0–21%, error 0.1%), CO (measuring range 0–10,000 ppm, error 100 ppm), CO₂ (measuring range 0–20%, error 0.1%), NO_x (measuring range 0–2,000 ppm, error 10 ppm), SO_x (measuring range 0–2,000 ppm, error 10 ppm). When processing the experimental data, the total average emissions during the burning time were calculated. At each temperature, at least four repeated measurements were obtained, based on which the dependence of NO_x and SO_x concentrations on the temperature in the combustion chamber was obtained.

1.7. Relative efficiency indicators

It is advisable for new fuel compositions to assess their energy, economic, environmental indicators, as well as fire and explosion safety relative to traditional fuels. Currently, three types of fuel are most commonly used at thermal power plants: coal, fuel oil, and natural gas. Among these three types of fuels, natural gas is environmentally friendly and has a high calorific value. The burning of natural gas has the least anthropogenic pressure compared to coal. In 2015, globally, in terms of SO₂ emissions, coal accounted for 60%, oil — 35%, biomass — 5%; in terms of NO_x emissions, oil accounted for 70%, coal 15%, natural gas 10%, and

biomass 5% [52]. Also in 2015, coal (with a share of 44.9%), then oil (34.6%) and natural gas (19.9%) were the leaders in terms of carbon dioxide emissions in combustion products [53]. Of course, composite suspensions cannot compete with natural gas in terms of heat of combustion and anthropogenic emissions. Therefore, the comparison of combustion indicators of water-coal suspensions was carried out with coal and fuel oil.

To assess the various aspects of fuel use, indicators were calculated taking into account the heat of combustion, cost, fire and explosion safety and anthropogenic hazards were calculated for each suspension indicators illustrating the relationship:

- 5) Heat of combustion of the suspension to the heat of combustion of coal or fuel oil:

$$Q_{\text{relative_coal}} = Q_{\text{slurry}} / Q_{\text{coal}}; \quad (1.1)$$

$$Q_{\text{relative_fuel oil}} = Q_{\text{slurry}} / Q_{\text{fuel oil}}. \quad (1.2)$$

- 6) Emissions of nitrogen oxides of the investigated suspensions and coal (fuel oil):

$$NOx_{\text{relative_coal}} = NOx_{\text{coal}} / NOx_{\text{slurry}}; \quad (1.3)$$

$$NOx_{\text{relative_fuel oil}} = NOx_{\text{fuel oil}} / NOx_{\text{slurry}}. \quad (1.4)$$

- 7) Emissions of sulfur oxides of the investigated suspensions and coal (fuel oil):

$$SOx_{\text{relative_coal}} = SOx_{\text{coal}} / SOx_{\text{slurry}}; \quad (1.5)$$

$$SOx_{\text{relative_fuel oil}} = SOx_{\text{fuel oil}} / SOx_{\text{slurry}}. \quad (1.6)$$

- 8) Cost of waste-derived slurry and coal (fuel oil):

$$C_{\text{relative_coal}} = C_{\text{coal}} / C_{\text{slurry}}; \quad (1.7)$$

$$C_{\text{relative_fuel oil}} = C_{\text{fuel oil}} / C_{\text{slurry}}. \quad (1.8)$$

Further generalized index was calculated by the expression:

$$D^{NOx\&SOx}_{\text{slurry}} = Q_{s_slurry}^a / (C_{\text{slurry}} \cdot NOx_{\text{slurry}} \cdot SOx_{\text{slurry}}). \quad (1.9)$$

After appropriate calculations the integral indicator of the new compositional suspension ($D^{NOx\&SOx}_{\text{slurry}}$) was divided by the same indicator for coal ($D^{NOx\&SOx}_{\text{coal}}$) or fuel oil ($D^{NOx\&SOx}_{\text{fuel oil}}$):

An additional indicator for evaluating the fuels considered was fire and explosion safety. This indicator was calculated by the expression $P = T_g^{min} \cdot \tau_d \cdot T_d^{max}$. After appropriate calculations, the indicator of fire and explosion safety of a new composite fuel (P_{slurry}) was divided by the same indicator for coal (P_{coal}) or fuel oil ($P_{fuel\ oil}$):

The total average indicator was calculated by adding all the previously calculated coefficients and then dividing by their number:

$$C_{c\ coal} = (Q_{relative_coal} + NOX_{relative_coal} + SOX_{relative_coal} + C_{relative_coal} + D_{relative_coal} + P_{relative_coal}) / 6. \quad (1.10)$$

1.8. Ignition characteristics

Figure 1.3 shows the ignition delay times for the droplets of fuel compositions depending on the temperature in the combustion chamber, which ranged from 700 °C to 900 °C. As experiments have shown, the stability of the gas-phase ignition stage depends largely on the presence of turbine oil in the composition. Liquid combustible components evaporate, ignite and burn out in the gas phase, releasing a sufficiently large amount of heat (for exhaust turbine oil, the heat of combustion is about 45 MJ / kg), which goes to additional heating of the coke residue, accelerating its heterogeneous ignition. However, in experiments, a result was recorded, at first glance, that contradicted this phenomenon (Figure 1.3). The composition without the addition of turbine oil is characterized by the shortest delay times of heterogeneous ignition (Figure 1.3). It is possible that the result is due to the fact that the gas-phase combustion stage preceding the heterogeneous ignition of the coke residue is not typical for this composition. When a mixture of turbine oil and volatile matter is burned, oxygen is consumed. As a consequence, the supply of the oxidant to the coke residue for some period is difficult, although the surface of the fuel heats up more strongly with a stage of intense gas-phase combustion.

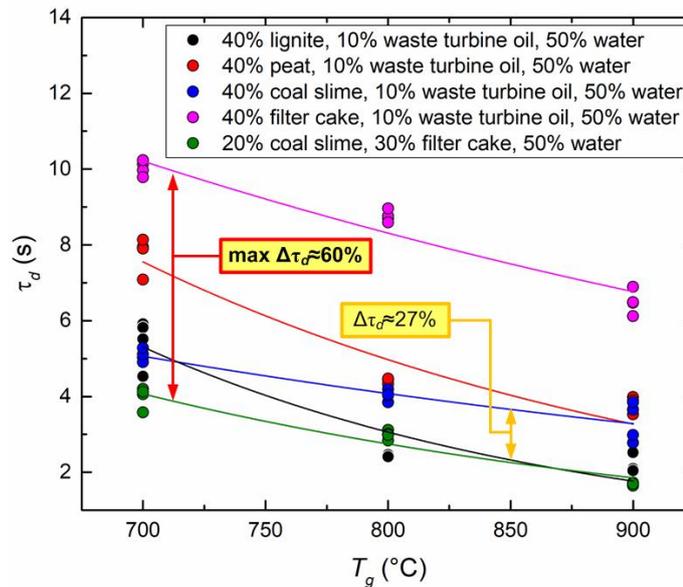


Figure 1.3 – Ignition delay time for composite fuel droplets depending on the temperature in the combustion chamber

With an increase in temperature in the combustion chamber up to 900 ° C, close ignition delay times for mixed fuels were observed. This suggests that for stable combustion in the furnace of the boiler requires approximately the same thermal energy. The main feature of this study is the use of low-grade fuels (brown coal, peat) and coal preparation waste (coal slurry and filter cake) as part of suspensions. These components are of low cost and do not require the high costs associated with the preparation of fuels. Coal before crushing into the combustion chamber must be crushed, but the waste of coal enrichment does not require it. When switching to waste derived slurries, this will reduce the cost of producing heat energy. As the experiment showed, the ignition delay times for mixed fuel are 30% filter cake, 20% coal slurry, 50% water, 17% lower on average, compared to 40% brown coal, 10% turbine oil, 50% water. It is advisable to transfer water boilers to slurry on the basis of sludge and filter cake from the position of minimizing the time spent on ignition.

Figure 1.4. illustrates the values of the minimum ignition temperature (T_{gmin}) with varying the composition of the suspensions. The temperature was chosen at which a steady ignition of the solid component of the fuel occurred. This

parameter is very important for boiler ignition, since the higher the ignition temperature, the more energy is necessary for ignition of this fuel increase. Experiments have shown that the minimum ignition temperature has a composition based on brown coal, and the maximum ignition temperature is characteristic of a composition based on coal slurry and filter cake (Figure 1.4.). The maximum difference was about 60 ° C. This difference is caused by the fact that there is no turbine oil in the composition based on the filter cake and coal slime, therefore, for a steady heterogeneous ignition of the coke residue, higher temperatures of the external gaseous medium are necessary.

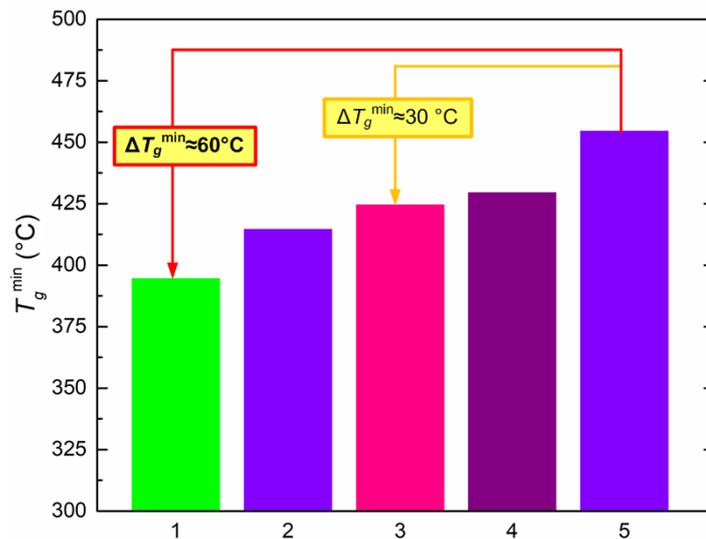


Figure 1.4 – Minimum temperatures of fuel ignition: 1 – 40% lignite, 10% waste turbine oil, 50% water; 2 – 40% peat, 10% waste turbine oil, 50% water; 3 – 40% coal slime, 10% waste turbine oil, 50% water; 4 – 40% filter cake, 10% waste turbine oil, 50% water; 5 – 30% filter cake, 20% coal slime, 50% water.

1.9. Burning characteristics

Figure 1.5 illustrates the effect of temperature in the combustion chamber on the duration of combustion of the studied fuels. The parameter τ_b represents the time interval from the moment of heterogeneous ignition to the complete burnout of the solid part of the fuel. This parameter is one of the most important for the boilers, as the liquid fuel sprayed in the combustion chamber must have enough time to burn

out during the soaring period. Otherwise, sticking to the walls of the combustion chamber will lead to corrosive wear of the metal. Experiments have shown that the composition based on lignite has the shortest burning time (Figure 1.5). Dispersion of a drop is typical for this fuel (Figure 1.5). Fragmentation of the initial drop entails a decrease in the duration of burning. Additional energy can be spent on heating the central part of the drop, where moisture and unreacted mass of fuel is stored. Therefore, the duration of combustion can increase with an increasing in the moisture content of the fuel (in peat, moisture is usually higher than that of brown coal). It should be noted that not all of the compositions of the fuel compositions traced such a pattern. This is due to the fact that, for example, in the preparation of suspensions with several solid combustible components, complex agglomerates could be formed in the composition, which, when heated and reacted, had both smaller and larger ignition inertia. The dominant role was played by the factor of the prevailing concentration of one or another solid combustible component.

Also, the duration of heterogeneous combustion increases with increasing concentration of the solid component of the suspension, which is characteristic of the composition of 20% coal slurry, 30% filter cake, 50% water. In other compositions, the solid combustible mass was 10% less, which affects the duration of heterogeneous burning.

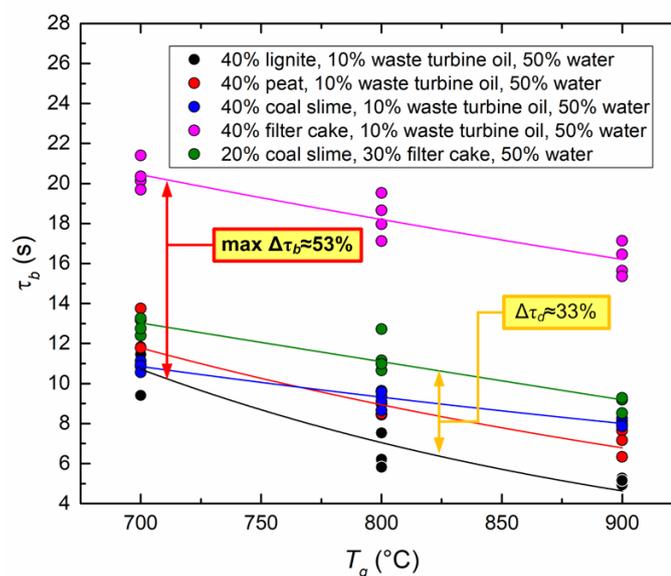


Figure 1.5 – The combustion duration of composite fuels in the combustion chamber, temperature varies from 700 °C to 900 °C.

Ecological indicators are important for industrial heat-and-power engineering objects, as a penalty is assumed for exceeding the permissible values of anthropogenic emissions. For example, in Russia, the concentration of SO_x should not exceed 526 ppm, and NO_x - 320 ppm. For the United States, emissions not exceeding $\text{NO}_x \approx 600$ ppm, $\text{SO}_x \approx 556$ ppm are typical. In China, standards assume SO_2 emissions in the range of 450 ppm, NO_x - in the range of 600 ppm [38]. Experimental results presented in Figures 1.6, 1.7 are included in the ranges of allowed anthropogenic emissions, therefore, all the resulting composite fuels can be used for combustion in boilers. Moreover, these experiments were carried out without gas cleaning. When burning fuels in the industry, the presence of flue gas cleaning equipment is mandatory. With this in mind, environmental performance may decrease by another 10–20%.

As the measurements showed, the first composition of 20% coal slurry, 30% filter cake, 50% water is characterized in comparison with other compositions with the minimum concentrations of nitrogen oxides in the combustion products (Figure 1.7). By concentrations of sulfur oxides, this composition is comparable to suspensions, which include turbine oil. As can be seen in Figure 1.6, at a temperature of 850 °C, 30% of the filter cake of coking coal, 20% of coal sludge, and 50% of water have the lowest emissions, which proves the effectiveness in refusing turbine oil. One of the main features is that when the temperature reaches 1000 °C, the SO_x parameter for different fuels approaches the same value.

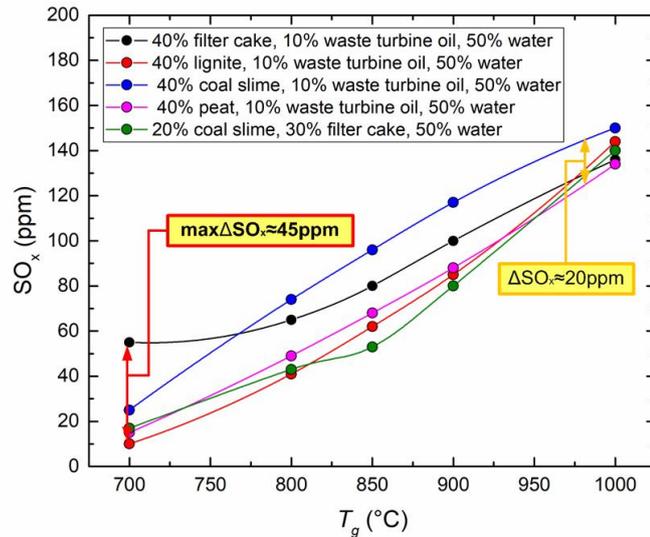


Figure 1.6 – Dependences of sulfur oxide concentrations in the combustion products of composite fuels when the temperature in the combustion chamber varies from 700 ° C to 1000 ° C.

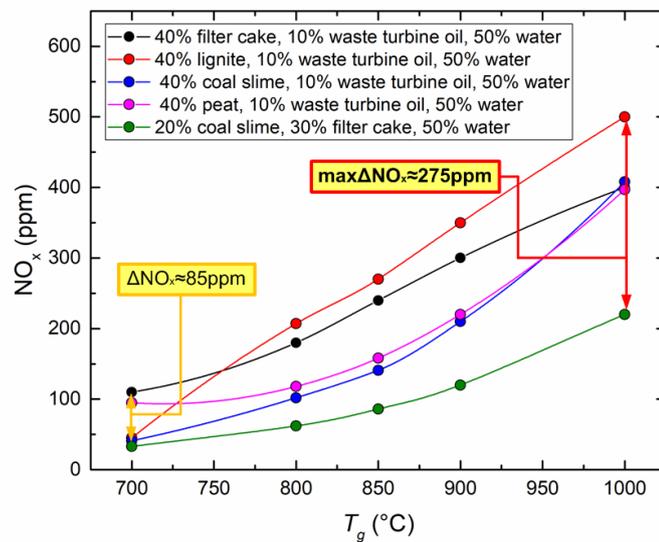


Figure 1.7 – Dependences of nitrogen oxides concentrations in the combustion products of composite fuels when the temperature in the combustion chamber varies from 700 ° C to 1000 ° C.

1.10. Relative coefficients of beneficial use

To determine the optimal fuel composition it is advisable to consider a group of important criteria, such as: heat of combustion, cost of components,

anthropogenic emissions and fire and explosion safety, as well as an estimated coefficient, which includes all these indicators.

The following abbreviated indices are used in the calculations: “comp.fuel_1” - composite fuel with a composition of 40% peat, 10% turbine oil, 50% water; “Comp.fuel_2” - composite fuel with a composition of 40% lignite, 10% turbine oil, 50% water; “Comp.fuel_3” - composite fuel with a composition of 40% filter cake, 10% turbine oil, 50% water; “Comp.fuel_4” - composite fuel 40% coal slurry, 10% turbine oil, 50% water; “Comp.fuel_5” - composite fuel 20% coal slurry, 30% filter cake, 50% water.

The heat of combustion of the fuel compositions are calculated according to the percentage concentration and heat of the individual components. Also calculated relative indicator of the heat of combustion in comparison with coal and fuel oil.

When calculating the relative environmental performance of D^{NO_x} and D^{SO_x} , concentrations of hazardous gases were selected at a temperature in the combustion chamber of ≈ 1000 ° C (Fig. 1.6, 1.7). To compare the relative index, experiments with coal and fuel oil were carried out, the following values of emissions of sulfur oxides and nitrogen were obtained: $NO_{x_fuel\ oil} \approx 156$ ppm, $SO_{x_fuel\ oil} \approx 150$ ppm. The ratio of the economic and environmental potential of fuels is calculated relative to coal and fuel oil.

One of the main indicators for the use of fuel compositions is the cost; a relative measure of the cost of the fuel composition was calculated in comparison with coal and fuel oil. The total cost of fuel is determined depending on the mass concentration of components in the finished mixture.

For the use of fuel in the production of thermal energy, the safety indicator ($P_{relative\ coal}$; $P_{relative\ fuel\ oil}$) is very important; if one exceeds 1, the composition is fire and explosion hazardous. This indicator is calculated using the values of the minimum ignition temperature, and the ignition delay time, hereinafter referred to as coal and fuel oil.

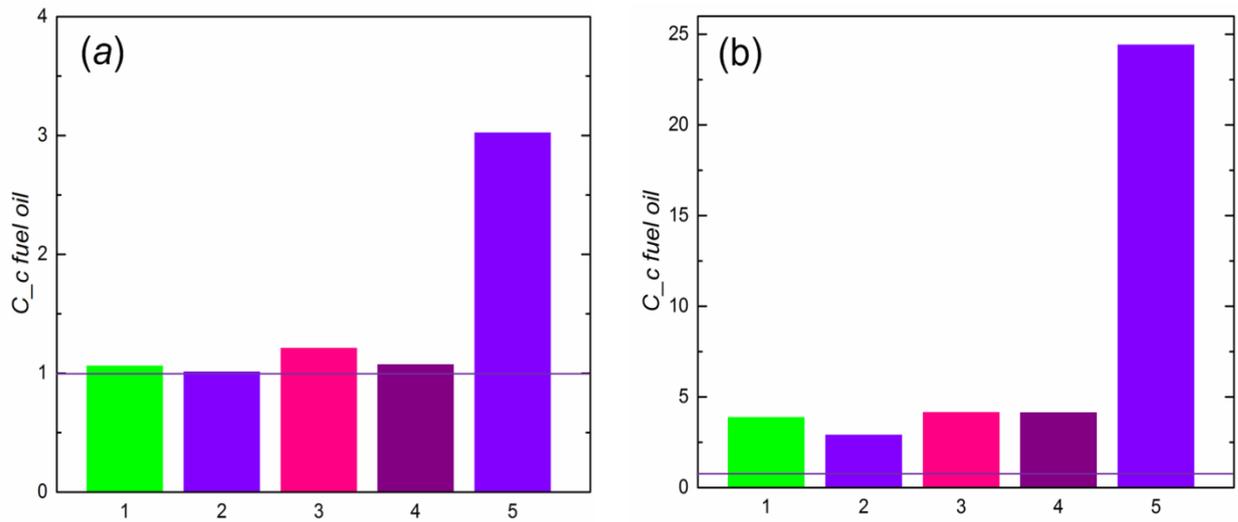


Figure 1.8 – Average indicator of using composite fuels relative to coal (a) and fuel oil (b): 1 – 40% lignite, 10% waste turbine oil, 50% water; 2 – 40% peat, 10% waste turbine oil, 50% water; 3 – 40% coal slime, 10% waste turbine oil, 50% water; 4 – 40% filter cake, 10% waste turbine oil, 50% water; 5 – 30% filter cake, 20% coal slime, 50% water.

Analyzing the indicators of the use of composite fuels presented in Figure 1.8, we can conclude that the most effective fuel composition for burning at power facilities has the following composition: 30% filter cake of coking coal, 20% coal slime, 50% water. Its efficiency in comparison with coal is 3 times greater, and in comparison with fuel oil 24 times. When converting boilers to such composition, the cost of heat energy, environmental emissions can be reduced, as well as the composition of such fuel can use the waste of coal preparation companies.

1.11. Using the results of the research

In the research, it was found that the fuel composition of 30% filter cake of coking coal, 20% coal sludge, 50% water, has the highest efficiency factor relative to traditional coal and fuel oil, also its composition uses coal enrichment waste cost. The main parameters for fuel combustion are optimal for transferring boilers to such fuel composition.

Studies have shown that a lot of combustible waste can be profitably drawn into the energy sector and at the same time produce quite large-scale positive effects in the environmental and economic profile of the enterprise. On a more global scale, using waste can reduce the rate of extraction of major combustible minerals - coal, oil and natural gas. About 7,269 million of coal and about 4,331 million of crude oil are produced worldwide [53]. At the same time, at least 700 million tons of coal preparation and processing waste, at least 400 million tons of oil waste (including sludge, various industrial waste oils, emulsions and other combustible liquids) are formed in the world every year. They represent a great danger [54–57] for the environment, human and animal health. Peat, considered in this work as a component of suspension fuel, is a giant fuel resource, although it is difficult to extract. Its reserves are estimated at no less than 350 billion tons. Today, about 25 million peat per year is produced in the world. Taking into account these data, it is possible to predict that with the involvement of peat, waste coal, oil can save about 10% of the coal and oil resources.

It was revealed that during combustion of a composition based on coal preparation waste without the addition of waste turbine oil at temperatures below 800 ° C, gas-phase ignition does not occur. The presence of a liquid combustible component for the studied compositions contributed to a decrease in the threshold ignition temperature, but also increased the delay time of the heterogeneous ignition of the coke residue.

It was shown that with an increase in temperature in the combustion chamber, the combustion of the differences in the ignition delay times is minimized for fuel compositions with different composition. This phenomenon is favorably reflected in the industry. That is, when starting the boiler, it is of interest to have fuel with a minimum ignition delay time, but with stable operation of the boiler, when the furnace is heated and the temperatures are high, you can switch to using compositions with a long ignition time. For kindling it is necessary to use the

following compositions: 1 - 20% coal slime, 30% filter cake, 50% water; 2 - 40% coal slime, 10% waste turbine oil, 50% water.

It was established that the minimum concentration of NO_x emissions has a composition of 20% coal slime, 30% filter cake, 50% water, compared to the composition based on brown coal, this figure decreased by 275 ppm. The gain of this composition over others can be observed for the SO_x indicator, the maximum difference for which was 45 ppm in comparison with the composition: 40% filter cake, 10% waste turbine oil, 50% water.

The highest efficiency ratio has a suspension with the composition: 20% coal slime, 30% filter cake, 50% water. This fuel has an average efficiency ratio of 3 times higher than that of coal, and also 24 times higher than that of fuel oil. Such a big difference is caused by the fact that the cost of such a composition is very small, because coal preparation wastes are used, which are difficult to store due to the large footprint.