

Министерство науки и высшего образования 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
Разработка АСР процесса горения топлива в топке котла при переводе с угля на композиционное топливо

УДК 621.182.2-6:662.6/.8

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ7Э	Беляев Савелий Викторович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ИШФВП	Глушков Дмитрий Олегович	к.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН, ШБИП	Подопригора Игнат Валерьевич	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
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова	Губин Владимир Евгеньевич	к.т.н.		

Томск – 2019 г.

Запланированные результаты обучения выпускника образовательной программы магистра по направлению в соответствии целями основной образовательной программы, видами и задачами профессиональной деятельности, указанными в ФГОС ВО 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Код	Результат обучения
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
<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
P3	применять современные методы и средства практической инженерной деятельности в теплоэнергетике, теплотехнике и теплотехнологиях
P4 (P6)	применять знания нетехнических ограничений инженерной деятельности, разрабатывать мероприятия по безопасности жизнедеятельности персонала и населения, предотвращать экологические нарушения
<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 исследования, критически интерпретировать, публично представлять и обсуждать результаты научных исследований
<i>организационно-управленческая деятельность:</i>	
P6 (P5)	руководить коллективом специалистов различных 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
<i>педагогическая деятельность:</i>	

P7	осуществлять педагогическую деятельность в области профессиональной подготовки
<i>Универсальные компетенции</i>	
P8	мыслить абстрактно, обобщать, анализировать, систематизировать и прогнозировать, принимать решения в сложных инженерных задачах с технической неопределенностью и недостатком информации
P9	использовать творческий потенциал, саморазвиваться, самореализовываться
P10	использовать иностранный язык для эффективного взаимодействия в профессиональной сфере
Профиль 1	
P11	проводить моделирование и технические расчеты по проектам, анализ надежности, технико-экономический и функционально-стоимостной анализ эффективности проектных решений тепловых и атомных электростанций и их систем
Профиль 2	
P 12	моделировать теплогидравлические процессы в основном и вспомогательном оборудовании атомных электростанций и других энергетических установок, работающих на различных физических принципах
Профиль 3	
P13	проводить моделирование и технические расчеты по проектам, технико-экономический и функционально-стоимостной анализ эффективности проектных решений для разработки нового теплообменного и теплотехнологического оборудования
Профиль 4	
P14	применять современные методы и средства практической инженерной деятельности в автоматизированных системах управления технологическими процессами в теплоэнергетике и теплотехнике

Директору НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ
А.С. Заворину
от студента гр. 5БМ7Э
Беляева Савелия Викторовича

ЗАЯВЛЕНИЕ

Прошу разрешить мне выполнение выпускной квалификационной работы в форме

магистерской диссертации

по направлению подготовки:

13.04.01 – Теплоэнергетика и теплотехника

на тему:

Разработка АСР процесса горения топлива в топке котла при переводе с угля на композиционное топливо

под руководством

к.ф.-м.н., доцента ИШФВП Глушкова Д.О.

Аннотация работы

При выполнении ВКР предполагается разработать АСР процесса горения топлива в топке котла при переводе с угля на композиционное топливо. Будут выполнены экспериментальные исследования для обоснования целесообразности перевода угольного котла на композиционное топливо, разработаны структурная, функциональная схемы АСР, выполнен расчет параметров настройки регулятора, технико-экономическое обоснование.

Наименование предприятия, для которого выполняется работа

Интер РАО «Томская генерация» – ГРЭС-2, ТЭЦ-3, ТЭЦ-1.

08 декабря 2018 г.

(Личная подпись студента)

Руководитель ВКР:

Министерство науки и высшего образования 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 им. И.Н. Бутакова

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ В.Е. Губин

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ7Э	Беляеву Савелию Викторовичу

Тема работы:

Разработка АСР процесса горения топлива в топке котла при переводе с угля на композиционное топливо	
Утверждена приказом директора №1065/с	11.02.2019

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

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Принципиальная тепловая схема и технические характеристики объекта автоматизации. Номинальные значения регулируемого параметра. Основные требования к техническому обеспечению автоматической системы регулирования. Типовые проектные решения.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Формулирование задач по разработке автоматической системы регулирования процесса горения композиционного топлива. Системный анализ объекта автоматизации. Разработка функциональной и структурной схем автоматической системы. Выбор технических средств автоматизации и составление заказной спецификации. Разработка принципиальной электрической схемы и чертежа общего вида щита автоматизации. Выполнение расчета параметров системы автоматического регулирования. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение. Социальная ответственность.

Перечень графического материала	1. Схема структурная. 2. Схема функциональная. 3. Схема электрических соединений щита управления. 4. Чертеж общего вида щита управления.
--	---

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Подопригора Игнат Валерьевич
Социальная ответственность	Куликова Ольга Александровна
Иностранный язык	Даминова Екатерина Сергеевна

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

1. Обзор литературных источников (на русском языке)
2. Экспериментальные исследования (на русском языке)
3. Разработка АСР (на русском языке)
4. Обзор литературных источников (на русском и на английском языках)

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	08.12.2018
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ИШФВП	Глушков Дмитрий Олегович	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ7Э	Беляев Савелий Викторович		

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 184 с., 28 рис., 29 табл., 118 источников, 4 прил.

Ключевые слова: отходы обогащения угля, твердые бытовые отходы, отходы нефтепереработки, композиционное топливо, время задержки зажигания, температура сгорания, топливоприготовление, органоводоугольное топливо, процесс горения, автоматическая система регулирования, теплоэнергетика, проектирование и разработка.

Объектом автоматизации является подсистема горения композиционного топлива в топке котла БКЗ-420-140.

Цель работы – разработка на основе результатов экспериментального исследования процесса горения композиционного топлива АСР горения топлива в топке котла на основе микропроцессорных средств автоматизации.

В процессе исследования проводилось изучение закономерностей и характеристик зажигания группы составов композиционного топлива, анализ объекта автоматизации, составление структурной схемы автоматизированной системы топливоприготовления, расчет параметров настройки регулятора, разработка функциональной схемы, разработка схемы электрических соединений и общего вида щита управления, выбор приборов и технических средств автоматизации с последующим составлением заказной спецификации.

В результате исследования с использованием современных микропроцессорных средств автоматизации разработана автоматическая система регулирования процесса горения топлива в топке котла при замене твердого натурального топлива на композиционное топливо на основе промышленных и бытовых отходов, экспериментально установлены характеристики процессов зажигания и горения 2-х мм одиночных капель композиционного жидкого топлива на основе влажного отхода углеобогащения (фильтр-кека) с добавлением в качестве горючих компонентов типичных твердых бытовых отходов: древесины, резины, пластика, картона, а также отработанного турбинного масла. Экспериментально обоснована устойчивость

зажигания и горения капель композиционного топлива на основе горючих промышленных и бытовых отходов в условиях, характерных для топок котлов. Установлены области гарантированных времен задержки зажигания трех групп топливных композиций, отличающихся компонентным составом, при температурах окружающей среды 600–1000 °С. Также установлено, что для топлив с добавлением твердых бытовых отходов характерны меньшие концентрации оксидов азота и серы в газообразных продуктах сгорания по сравнению с исходным фильтр-кеком. Добавление же отработанного масла в такие топливные композиции ведет к увеличению концентрации антропогенных выбросов, но это ухудшение экологических характеристик не превышает предельно допустимые нормативные выбросы загрязняющих веществ энергетических установок для сжигания твердого топлива.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: наличие программно-оперативного комплекса с использованием SCADA-системы, который предоставляет возможность вовремя отреагировать на любую сложную ситуацию в процессе эксплуатации системы, а также удаленно поддерживать функционирование системы в целом. Обеспечиваются 3 режима управления: ручной, автоматический, дистанционный.

Степень внедрения: результаты планируются внедрить на ТЭЦ, ГРЭС.

Область применения: теплоэнергетика, ТЭС, АСР процесса горения композиционного топлива в топке котла.

Экономическая эффективность работы заключается в использовании относительно дешевых композиционных топлив вместо угля при сжигании их в топке котла.

В будущем планируется провести натурные испытания и ОКР, направленные на разработку универсальной АСР процесса горения композиционного топлива в топке котла.

Обозначения и сокращения

ОВУТ – органоводогольное топливо;

ВУТ – водоугольное топливо;

КЖТ – композиционное жидкое топливо;

Фильтр-кек – типичные отходы углеобогащения;

Кек Д – отходы углеобогащения каменного угля марки Д;

Кек К – отходы углеобогащения каменного угля марки К.

Оглавление

Введение.....	13
1. Обзор литературных источников	17
1.1. Рост объемов потребления энергоресурсов	17
1.2. Рост объемов производства ТБО	21
1.3. Развитие сырьевого потенциала топливно-энергетического сектора Томской, Новосибирской и Кемеровской областей за счет вовлечения ТБО	26
1.3.1. Общая информация.....	28
1.3.2. Энергетический потенциал промышленных отходов и ТБО	32
1.3.3. Энергетический потенциал отходы обогащения угля и переработки нефти	35
1.3.4. Потребность в энергоресурсах угольной теплоэнергетики.....	38
1.3.5. Стратегия совместной утилизации промышленных и бытовых отходов с выработкой энергии	41
2. Экспериментальные исследования.....	45
2.1. Приготовление топлива и методика экспериментального исследования	45
2.1.1. Приготовление топлива	45
2.1.2. Экспериментальная методика.....	48
2.2. Результаты и обсуждение.....	50
2.2.1. Характеристики зажигания и горения	50
2.2.2. Экологические характеристики	57
2.2.3. Относительные показатели эффективности композитных топлив добавлением отходов	64
2.3. Основные результаты выполненного исследования	67
3. Разработка АСР	70
3.1 Описание объекта автоматизации	70
3.2 Разработка структурной схемы АСР горения композиционного топлива в топке котла типа БКЗ-420-140	75
3.3 Разработка функциональной схемы и составление заказной спецификации приборов и средств автоматизации	77
3.3.1 Разработка функциональной схемы.....	77
3.4 Выбор оборудования нижнего уровня автоматизации	79
3.4.1 Выбор датчиков температуры	79
3.4.2 Выбор датчиков давления-разрежения.....	81
3.4.3 Выбор расходомеров	83

3.4.4	Выбор газоанализатора	84
3.4.5	Выбор преобразователя частоты	86
3.4.6	Выбор программируемого логического контроллера.....	87
3.5	Составление заказной спецификации	90
3.6	Разработка принципиальной электрической схемы соединений шкафа управления	91
3.7	Разработка и расчет АСР расхода топлива.....	93
3.8	Разработка общего вида шкафа управления	94
3.9	Разработка SCADA-системы.....	96
4.	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение....	100
4.1.	Перспективы совместного использования промышленных и муниципальных отходов из нескольких регионов путем сжигания с выработкой энергии	100
4.2.	Структура и объемы промышленных отходов и ТБО.....	101
4.3.	Потребность в энергоресурсах угольных теплоэлектростанций	102
4.4.	Стратегия совместной утилизации промышленных и бытовых отходов с выработкой энергии	103
4.5.	Технико-экономический анализ	104
5.	Социальная ответственность	113
5.1.	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	113
5.1.1.	Специальные правовые нормы трудового законодательства.....	114
5.1.2.	Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны	114
5.2.	Производственная безопасность.....	115
5.2.1.	Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	116
5.2.2.	Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований	117
5.2.3.	Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на исследователя (работающего)	122
5.3.	Экологическая безопасность.....	123
5.3.1.	Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду	124
5.3.2.	Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду	124
5.3.3.	Обоснование мероприятий по защите окружающей среды	125
5.4.	Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	125
5.4.1.	Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований	127

5.4.2. Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований	127
5.4.3. Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС	128
5.5. Выводы по разделу.....	129
Заключение	130
Список использованных источников	132
ПРИЛОЖЕНИЕ А	145
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	164
ПРИЛОЖЕНИЕ В	166
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	168
Графический материал: на отдельных листах	
ФЮРА.421000.001 С1	Схема структурная
ФЮРА.421000.001 С2	Схема функциональная
ФЮРА.421000.001 Э4	Схема электрическая соединений щита управления
ФЮРА.421000.001 ОВ	Общий вид щита управления

Введение

В настоящее время одной из основных экологических проблем во всем мире является загрязнение окружающей среды промышленными и бытовыми отходами [1–7]. Только на территории Российской Федерации по данным Росприроднадзора на полигонах уже накоплено и хранится более 94 млрд. т твердых отходов, которые занимают площадь более 150 тыс. гектар. Ежегодно во всем мире производится более 2 млрд. т твердых бытовых отходов (ТБО) [8]. Утилизация горючих ТБО (около 80 % от общего количества) в промышленных масштабах реализуется в основном посредством мусоросжигательных заводов [1–7]. Как правило, основной их целью является уменьшение объемов твердых отходов, складываемых на полигонах [1–7] после сжигания бумаги, древесины, пластика, полиэтилена, текстиля, или термическое обеззараживание опасных отходов [9, 10]. Так как мусоросжигательные заводы – это относительно небольшие предприятия с нестационарными режимами работы энергогенерирующего оборудования, то количество и качество энергии, вырабатываемой при сжигании ТБО с теплотой сгорания 5–10 МДж/кг [1–7], не позволяют функционировать им наряду с угольными тепловыми электрическими станциями и выдавать производимую электрическую энергию в центральную энергосистему [11, 12]. В лучшем случае тепловая энергия, вырабатываемая мусоросжигательными заводами, используется для собственных нужд и отопления близлежащих районов. В противном случае эта энергия рассеивается в окружающую среду, что ведет к тепловому загрязнению атмосферы [7].

Стоит отметить, что мусоросжигание – это один из наиболее эффективных способов утилизации отходов, но проектирование, строительство и последующая эксплуатация технически сложных промышленных объектов являются экономически затратными мероприятиями. Например, процесс проектирования и постройки мусоросжигательного завода в США длится 5–8 лет [13]. В России стоимость строительства типичного завода по мусоропереработке составляет более 1,2 млрд. долларов [14]. В эту стоимость

входят: технология, оборудование, коммуникации, земельный участок, транспортная инфраструктура, лицензии. Для установок непрерывного сжигания ТБО производительностью от 100 до 3000 т в сутки капитальные затраты составляют от 80 до 100 тыс. долларов за тонну сжигаемых отходов в день [15]. Здесь не учитывается стоимость технических приспособлений для подготовки отходов к утилизации. Эксплуатационные расходы составляют около 20 долларов за тонну ТБО. Также для генерации электрической энергии необходимы дополнительные инвестиции в разработку новых модификаций паровых турбин, рассчитанных на относительно низкие параметры водяного пара [16, 17]. Технология прямого сжигания ТБО интенсивно развивалась в период, когда еще не были ужесточены нормы выбросов вредных веществ с дымовыми газами в атмосферу. В настоящее время действуют достаточно жесткие законодательные ограничения [11, 18] на содержание вредных веществ в дымовых газах установок для сжигания ТБО (EU 94/67/ЕЕС): твердые частицы 10 мг/нм³; монооксид углерода 50 мг/нм³; оксиды азота 200 мг/нм³; оксиды серы 50 мг/нм³; хлористый водород 10 мг/нм³; фтористый водород 1 мг/нм³; ртуть 0,05 мг/нм³; кадмий и таллий 0,05 мг/нм³; другие металлы 0,5 мг/нм³.

Известные технологии мусоросжигания по температурному режиму можно разделить на два типа [19]: низкотемпературные (600–900 °С) и высокотемпературные (более 900 °С). Низкотемпературный режим сжигания не требует применения дорогостоящего технологического оборудования и дополнительных высококачественных топлив (например, природного газа) для поддержания рабочей температуры в топке, но при прямом низкотемпературном сжигании ТБО выделяется достаточно большое количество токсичных веществ (диоксинов, полиароматических углеводородов, фуранов). Для соответствия состава дымовых газов нормам по выбросам загрязняющих веществ в атмосферу необходимо применение дорогостоящих систем газоочистки. В связи с этим большинство мусоросжигательных заводов являются убыточными и экологически неэффективными производствами [20].

Более экологически безопасными являются высокотемпературные технологии сжигания ТБО, т.к. при температурах процесса выше 1300 °С происходит полное разложение наиболее вредных веществ (диоксинов и фуранов) до простейших составляющих [10, 11]. Поэтому отсутствует необходимость применения дорогостоящих систем очистки дымовых газов [21, 22]. Но для поддержания относительно высокой температуры в топке необходимо использовать специализированное термическое [11] или электроплазменное [23] оборудование. Как правило, для обеспечения функционирования такого оборудования расходуется высококачественное топливо или затрачивается энергия в большем количестве, чем она выделяется при сжигании ТБО. Несмотря на очевидное преимущество по экологическим показателям электроплазменных технологий утилизации ТБО при температурах в объеме реактора более 1300 °С они не получили широкого применения на практике и используются преимущественно для утилизации опасных медицинских отходов [9, 10].

Другой широко известной технологией переработки углеводородного сырья является получение синтез-газа [24] в процессе термического разложения или частичного окисления, который используется для производства спиртов, синтетических материалов. К составу такого синтез-газа предъявляются относительно высокие требования: соотношение H_2/CO должно составлять 2:1, общий объем примесей (CO_2 , C_2H_4 , C_2H_2 , CH_4), в том числе смол, не должен превышать 1 % [25]. При переработке ТБО в рамках известных технологий генерации синтез-газа, как правило, не удастся обеспечить получение продукта с указанными характеристиками, который кроме всего прочего содержит смолы в достаточно большом количестве [25, 26]. Поэтому такой синтез-газ из биомассы или ТБО преимущественно используется для генерации тепловой энергии путем сжигания [27, 28]. Однако при реализации такого способа утилизации ТБО повышенное внимание должно уделяться решению вопросов взрывопожароопасности технологического процесса при хранении и транспортировке горючего газа.

Таким образом, большинство из упомянутых выше широко известных технологий утилизации ТБО характеризуется значительными капитальными вложениями в их практическую реализацию при относительно невысоком уровне энергетического эффекта. В основном такие технологии востребованы в переходный период, когда в том или ином регионе реализуется трансформация системы обращения с ТБО – переход от модели складирования к модели переработки и повторного использования полезных ресурсов. Поэтому в течение относительного короткого промежутка времени, например 5–10 лет, для сжигания ТБО более рационально использовать существующие промышленные объекты с развитой инфраструктурой, например, угольные ТЭС и котельные. После относительно простой модернизации систем топливоприготовления и топливоподачи угольные котлы можно использовать для сжигания композиционных жидких топлив [29], состоящих из отходов углеобогащения (или смеси низкосортного угля с водой), жидких горючих отходов (трансформаторные, турбинные, автомобильные масла и т.д.) и горючих ТБО (бумага, древесина, пластик, резина). Установлено [30], что в зависимости от состава композиционного топлива температуры в топке котла в процессе горения могут достигать 1300 °С, что способствует снижению содержания диоксинов и фуранов в дымовых газах. Поэтому актуальной задачей для разработки теоретических основ технологий применения композиционных топлив на практике является исследование закономерностей и характеристик зажигания и горения одиночных капель перспективных топливных составов при добавлении типичных ТБО (до 20 %).

1. Обзор литературных источников

1.1. Рост объемов потребления энергоресурсов

Интенсивное развитие мировой экономики оказывает прямое влияние на увеличение объемов потребления энергоресурсов. В течение пяти последних лет ежегодный прирост объемов энергогенерации на международном уровне составляет 2–3 % (рис. 1), что достаточно существенно в рамках общемирового объема потребления электроэнергии (около 25 ПВт·ч в год).

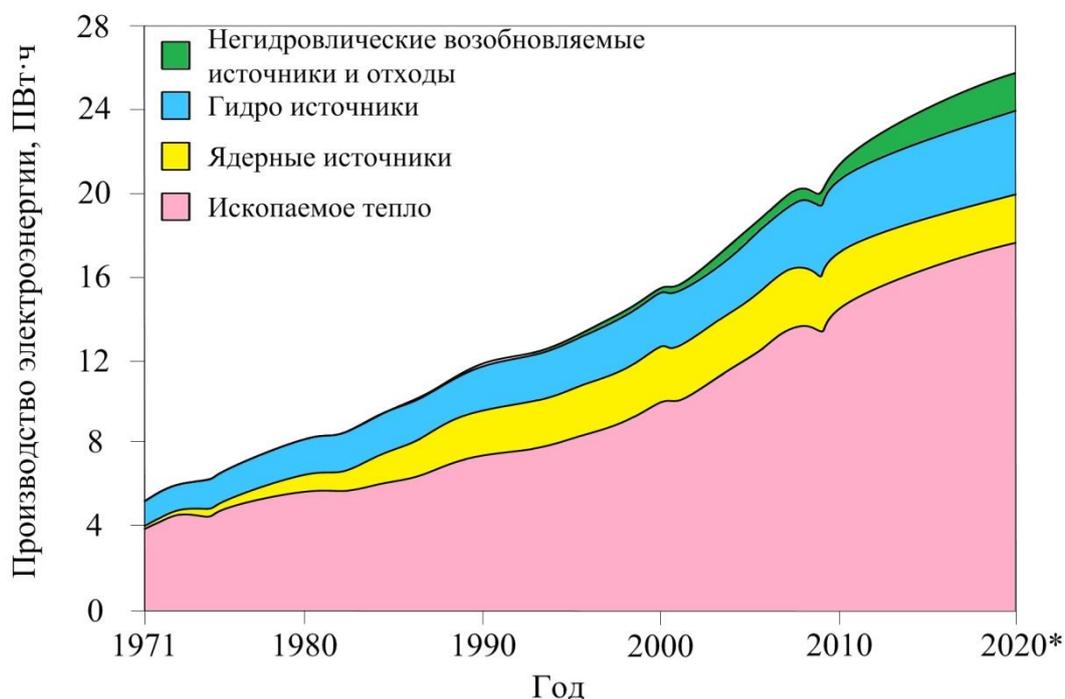


Рисунок 1 – Мировая выработка электроэнергии топливом [31]:
2020* – прогноз

Несмотря на развитие альтернативных источников энергии и увеличение их доли в общемировой структуре энергетического баланса более чем в 10 раз за последние 50 лет, в настоящее время относительное значение этой характеристики составляет всего лишь около 7 % (рис. 2). Это почти в 9 раз меньше по сравнению с выработкой энергии ТЭС при сжигании углеводородов и почти в 4 раза меньше по сравнению с выработкой энергии АЭС и ГЭС. Увеличению доли нетрадиционных возобновляемых источников энергии

(НВИЭ) на практике препятствуют достаточно существенные недостатки [32, 33]:

Низкая удельная мощность потока энергоносителя является причиной больших габаритов и массы энергоустановок, как результат необходимы большие удельные капитальные затраты на их сооружение (от 2 до 15 тыс. долл./кВт).

Низкий КПД энергоустановок по преобразованию первичной энергии в электричество или тепло (12–16 % – для фотопреобразователей; 30–40 % – для большинства НВИЭ; 60–70 – для ГЭС).

Большая суточная и сезонная нестабильность мощности основных НВИЭ требует создание достаточно сложных технических систем, которые объединяют энергоустановки на разных НВИЭ, установки по аккумулированию энергии и установки, генерирующие энергию путем сжигания углеводородного топлива.

Все эти недостатки существенно усложняют и удорожают процесс производства энергии, снижают надежность системы энергоснабжения.

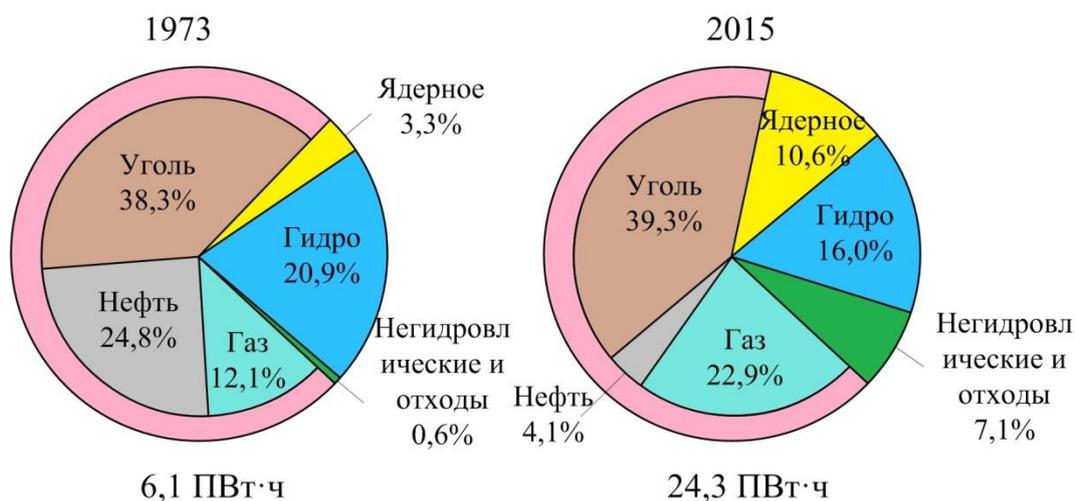


Рисунок 2 – Общемировая структура энергогенерации [31]

Страны с ограниченным запасом традиционных энергоресурсов ввели на практике программы стимулирования для освоения НВИЭ. Эти программы, с одной стороны, заключаются в поощрении развития НВИЭ и расширении их номенклатуры, с другой стороны, накладывают ограничения на сжигание

углеводородов для производства энергии. Евросоюз в 2008 г. принял программу [34], согласно которой к 2020 г. доля НВИЭ в балансе производства энергии должна составлять 20 %. В 2017 году это значение составляло около 15 %. Международное энергетическое агентство прогнозирует, что доля НВИЭ в мировом балансе производства электроэнергии к 2050 году будет составлять 46 %. Достаточно существенный прирост мощностей обусловлен комплексным применением НВИЭ, к которым относятся биомасса, солнце, ветер, земные недра, водотоки (малые реки, каналы), воды морей и океанов, содержащих потенциальную энергию градиентов температуры, кинетическую энергию приливов и отливов, волн и течений, а также химическую энергию градиентов солёности. В последние годы возрастает интерес к горючим бытовым и промышленным отходам, которые имеют большой потенциал для производства энергии при их утилизации [35, 36].

По этим причинам, а также в условиях нестабильности объемов добычи и цен (рис. 3) на жидкие и газообразные ископаемые топлива роль угля в теплоэнергетике в последнее время возрастает.

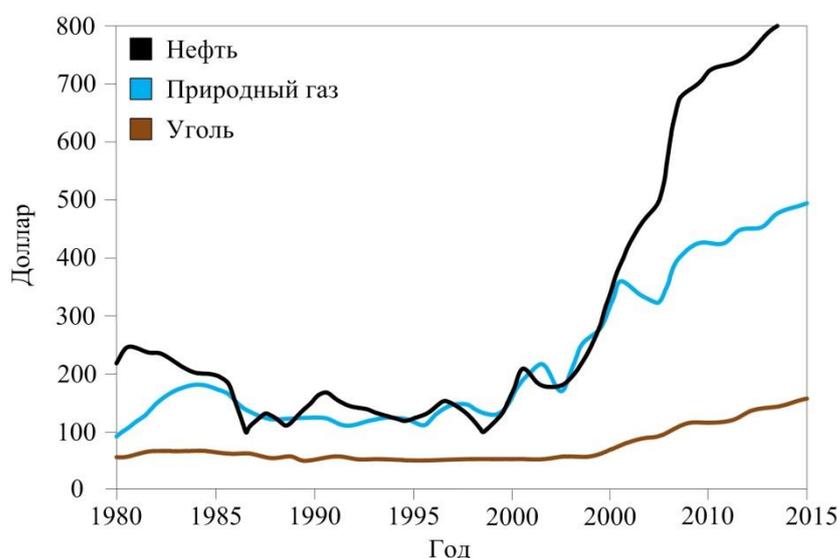


Рисунок 3 – Средняя стоимость твердых, жидких и газообразных углеводородов [37]

По оценкам экспертов [38, 39] во многих странах мира, где расположены месторождения твердых ископаемых топлив, в ближайшие десятилетия

возрастет добыча и экспорт высококачественных марок угля и собственное потребление местных низкокачественных марок угля (рис. 4). Увеличение объемов потребления угля в рамках традиционных технологий сжигания, несомненно, приведет к достаточно существенному ухудшению экологической обстановки в мире. При функционировании угольных тепловых электростанций в окружающую среду в составе дымовых газов поступают парниковые газы CO, CO₂, SO₂, NO_x, летучая зола, которые оказывают существенный вклад в парниковый эффект [40].

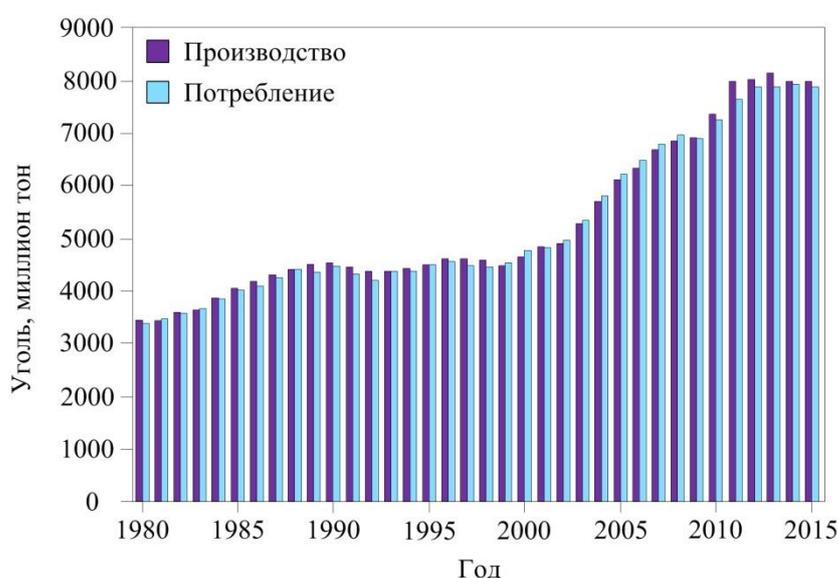


Рисунок 4 – Мировое производство и потребление угля по годам [31]

Одним из перспективных направлений снижения экологической опасности при сжигании угля и технико-экономических проблем вовлечения низкокачественных углей и отходов углеобогащения в топливно-энергетический комплекс является внедрение на тепловых электрических станциях водоугольных [41, 42] и органоводоугольных [43–45] технологий. Эти технологии предполагают сжигание композиционных топлив вместо угля. Такие топлива, как правило, состоят из трех основных компонентов [43–47]: низкокачественного угля или отхода углеобогащения 40–50 %, воды 30–40 % (в том числе сточных или технологических загрязненных вод) и отработанной горючей жидкости 5–20 % (трансформаторные, турбинные, автомобильные масла и т.д.). Процесс сжигания композиционного топлива характеризуется

повышенными экологическими и экономическими показателями по сравнению с процессом сжигания твердого натурального топлива [46, 47]. Причиной этого являются высокая полнота сгорания топлива за счет низкотемпературной активизации реакционной способности топлива на стадии воспламенения и интенсификации процесса горения при взаимодействии углерода топлива с водяным паром, протекающим параллельно с основной реакцией окисления. Композиционное топливо характеризуется не только высокими температурами горения, соизмеримыми с температурами горения твердого натурального топлива, но и относительно низким содержанием вредных веществ в дымовых газах [46, 47].

Наряду с решением проблемы энергодефицита в последнее время актуальной задачей является утилизация бытовых отходов. Твердые бытовые отходы являются ценным ресурсом для промышленной теплоэнергетики, т.к. среднее содержание энергетических фракций (картон, бумага, дерево, текстиль, полимерные материалы и т.д.) составляет около 80 % от общего объема твердых бытовых отходов [48]. Добавление в состав композиционных топлив типичных твердых бытовых отходов (около 10 %) будет способствовать совместному решению проблем восполнения дефицита энергоресурсов и эффективной утилизации твердых бытовых отходов.

1.2. Рост объемов производства ТБО

В настоящее время во всем мире достаточно серьезной экологической проблемой является проблема переработки и утилизации твердых бытовых отходов [49–66]. Ежегодный прирост таких отходов во всем мире составляет 1,3–1,6 млрд. тонн [49–51]. Влияние твердых бытовых отходов на ухудшение экологической ситуации по некоторым показателям соизмеримо с влиянием угольных тепловых электрических станций и автомобильного транспорта [52], т.к. около 60 % бытовых отходов не перерабатывается, а складывается на полигонах. Это ведет к необратимому загрязнению окружающей среды и ухудшению экологической обстановки.

В разных странах достаточно существенно различается глубина переработки отходов [53]. В соответствии с Рамочной директивой по отходам Евросоюза условно можно выделить следующие традиционные подходы (рис. 5) к утилизации твердых отходов [54]: повторное использование, переработка во вторичное сырье, захоронение, компостирование, сжигание без выработки энергии для уменьшения объемов захоронения, производство газа в результате пиролиза, промышленное сжигание с использованием выделившейся энергии.

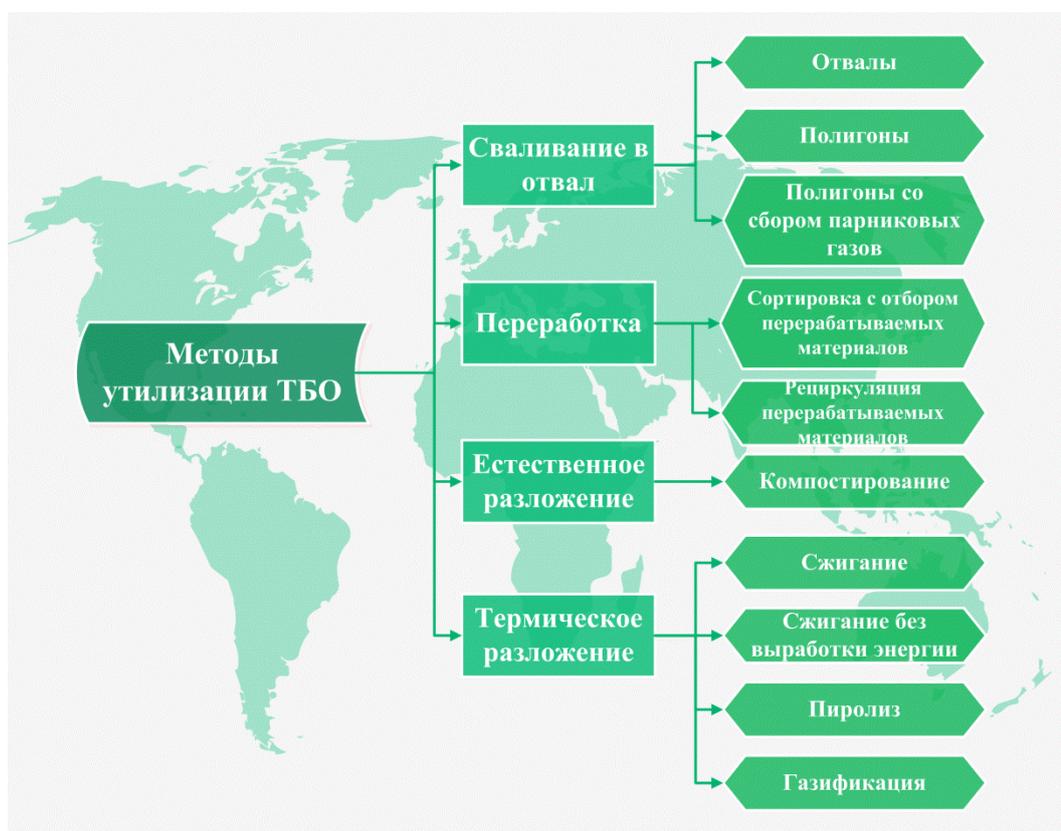


Рисунок 5 – Традиционные способы утилизации ТБО

Наиболее продвинутые промышленные технологии используются в Германии, Австрии и Бельгии [53] (табл. 1), где подавляющее большинство твердых отходов сортируется, перерабатывается и повторно используется в промышленности. В Дании, Швеции, Швейцарии и Японии более 40 % всех отходов сжигают для производства электроэнергии и тепла. В результате сжигания удается извлекать до 80 % энергии, содержащейся в отходах [55]. При этом уменьшаются объемы захоронения твердого несгораемого остатка. Несмотря на это, утилизация отходов путем прямого сжигания характеризуется

достаточно существенными недостатками. Они связаны с необходимостью реализации на мусоросжигательных заводах сложных и дорогостоящих мероприятий, направленных на очистку дымовых газов для снижения концентрации вредных летучих компонентов до уровня предельных допустимых концентраций [56]. Эта проблема является актуальной по следующим причинам. В 2011 г. в Японии было сожжено 64 % твердых бытовых отходов. В настоящее время на территории Франции функционирует 120 мусоросжигательных заводов общей мощностью 12 млн. тонн в год. В Дании таких заводов 34, в Норвегии – 4, по одному заводу в Люксембурге и Финляндии. Всего в мире работает около 2500 мусоросжигательных заводов, из них около 400 – на территории Евросоюза [53], где суммарно сжигается 25 % ТБО от их общего количества.

Не смотря на очевидный прогресс в решении указанных выше проблем, до последнего времени актуальной задачей является переход от модели складирования и захоронения отходов к модели их утилизации и переработки. В Великобритании, Греции, Индии, Ирландии, Испании, Италии, Канаде, Португалии, России, США, Финляндии, Китае большая часть твердых бытовых отходов складировается на полигонах [56–60]. Официальные и неофициальные полигоны расположены на огромных территориях (десятки миллионов гектар). Их площадь ежегодно увеличивается на 6–8 %, особенно интенсивно это происходит в окрестностях крупных городов и мегаполисов. Отрицательное влияние на экологическую обстановку полигонов с отходами состоит в выведении из сельскохозяйственного обращения огромных территорий, а также в загрязнении почвы, грунтовых вод и атмосферы в окрестностях населенных пунктов [61, 62]. Кроме негативного локального влияния выделяющиеся газы в процессе термического разложения материалов и медленного горения на территориях полигонов являются основными компонентами парникового газа. Как известно, увеличение концентрации этого газа в атмосфере ведет к интенсификации глобального потепления [63]. По оценкам специалистов [49–51] в среднем в мире складировается на полигонах более 60 % ТБО (табл. 1).

Таблица 1 – Статистические данные о переработке ТБО [65]

Страна	Отходы, млн. тонн	Сжигание, % мас.	Полигонное хранение, % мас.	Компостир ование, % мас.	Рециклинг, % мас.
Австрия	2,8	11,0	65,0	18,0	6,0
Великобритан ия	30,0	8,0	90,0	0	2,0
Бельгия	3,5	54,0	43,0	0	3,0
Германия	25,0	36,0	46,0	2,0	16,0
Греция	3,2	0	100,0	0	0
Дания	2,6	48,0	29,0	4,0	19,0
Индия	226,6	5,0	85,0	10,0	0
Ирландия	1,1	0	97,0	0	3,0
Испания	13,3	5,0	65,0	17,0	13,0
Италия	17,5	16,0	74,0	7,0	3,0
Канада	16,0	8,0	80,0	2,0	10,0
Китай	300,0	6,4	91,4	2,1	0
Люксембург	0,2	75,0	22,0	1,0	2,0
Нидерланды	7,7	35,0	45,0	5,0	15,0
Португалия	2,7	0	85,0	15,0	0
Россия	150,0	1,2	96,5	1,0	1,3
США	177,5	16,0	67,0	2,0	13,0
Финляндия	2,5	2,0	83,0	0	15,0
Франция	20,0	42,0	45,0	10,0	3,0
Швейцария	3,7	59,0	12,0	7,0	22,0
Швеция	3,2	47,0	34,0	3,0	16,0
Япония	45,4	79,1	1,5	0	19,4

Согласно мировому опыту переход от складирования и захоронения отходов к их полной переработке и повторному использованию требует реализации в среднесрочной перспективе промежуточного этапа – утилизации отходов путем сжигания с выработкой тепловой и электрической энергии [60, 64]. Такие мероприятия позволят утилизировать уже накопленные отходы, которые непригодны для повторного применения. Таким образом, актуальной задачей является разработка мероприятий для полезного использования твердых бытовых отходов с целью снижения загрузки полигонов и улучшения

экологической обстановки в окрестностях этих объектов. Как правило, такие задачи решают путем непосредственного сжигания диспергированной смеси исходных компонентов с получением энергии [58]. Однако, из-за относительно низкой теплотворной способности ТБО около 10 МДж/кг [66] по сравнению с традиционными углеводородными топливами 20–30 МДж/кг [67], а также из-за относительно высокой концентрации вредных газов полноценная замена углеводородного топлива горючими отходами является экономически, экологически и технически нецелесообразной.

Альтернативным вариантом решения этих проблем является применение твердых бытовых отходов в качестве компонентов композиционных жидких топлив, состоящих из отхода углеобогащения (или смеси низкокачественного угля с водой) и отработанной горючей жидкости (трансформаторные, турбинные, автомобильные масла и т.д.). На основании оценок [45] можно предположить, что введение типичных твердых бытовых отходов в состав композиционных топлив в количестве 10–20 % позволит снизить на 20–30 % площадь территорий вновь организуемых полигонов для захоронения ТБО и обеспечить экономию исчерпаемых углеводородных топлив, которые сжигаются для производства электрической и тепловой энергии. Основными компонентами ТБО являются: бумага и картон в количестве 25–30 % от общего объема отходов; органические отходы (включая пищевые) – 26–35 %; металл и стекло – 5–12 %; пластик – 7–10 %; древесина, текстиль и резина – по 2–4 % каждого [49–51]. Таким образом, содержание энергетических фракций (картон, бумага, дерево, текстиль, полимерные отходы) составляет около 80 % от общего объема твердых бытовых отходов.

1.3. Развитие сырьевого потенциала топливно-энергетического сектора Томской, Новосибирской и Кемеровской областей за счет вовлечения ТБО

Как правило, для большинства стран с развитым сырьевым сектором экономики (в первую очередь из-за добычи ископаемых топлив) характерна тенденция, когда регионы, в которых ведется добыча ископаемых топлив, окружают другие регионы с высоким уровнем промышленного и социального развития (рис. 7). Такое соседство создает благоприятные условия, с одной стороны, для увеличения объемов добычи ископаемых топлив, с другой стороны, для развития промышленных предприятий и, соответственно, увеличения численности населения. В таких условиях для регионов с развитым сырьевым сектором экономики, например, за счет добычи и экспорта угля, одной из основных проблем является снижение негативного воздействия углеобогажительных фабрик за счет складирования фильтрата на открытых полигонах на окружающую среду. Для регионов с высоким уровнем промышленного и социального развития одной из основных проблем является переработка и утилизация ТБО, ежегодный объем производства которых сопоставим по масштабам с объемом (миллионы тонн в год) промышленных отходов крупных угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий.



Рисунок 6 – Расположение источников образования промышленных отходов и ТБО

Для комплексного решения этих проблем перспективным направлением является реализация соседними регионами общей стратегии совместной утилизации промышленных и бытовых отходов путем сжигания в составе композиционных топлив на местных тепловых электрических станциях. С одной стороны, это позволит снизить негативное воздействие отходов на окружающую среду, с другой стороны, снизить объем потребления высококачественного угольного топлива для производства тепла и электричества. В данной работе основные положения предлагаемой стратегии разработаны на примере трех соседних регионов Российской Федерации, расположенных на территории Западной Сибири: Кемеровская область (регион

№. 1), Новосибирская область (регион №. 2), Томская область (регион №. 3). Полученные результаты будут являться основой для разработки аналогичных стратегий waste management в других регионах мира с учетом их особенностей (количество и структура отходов).

1.3.1. Общая информация

В Кемеровской области (регион №. 1) ежегодно производится $2,801 \cdot 10^6$ тонн отходов, из которых на долю ТБО приходится $0,9 \cdot 10^6$ тонн. Всего на территории региона расположено 173159 источников ТБО, 139 источников отходов добычи полезных ископаемых, 538 источников отходов обрабатывающей промышленности, 1517 источников производственных и непромышленных отходов (материалы, изделия, утратившие потребительские свойства), 497 источников отходов обеспечения электроэнергией, газом и паром, 294 источников отходов водоснабжения и водоотведения, 176 источников отходов строительства и ремонта, 72 источника отходов сельского хозяйства, лесного хозяйства, рыбоводства и рыболовства, 1073 источника прочих отходов. Структура ТБО приведена на рисунке 7.

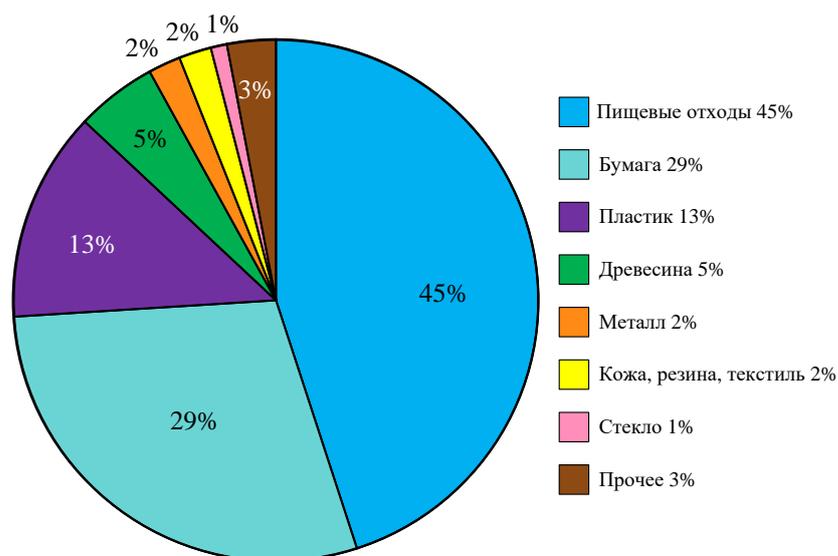


Рисунок 7 – Структура ТБО Кемеровской области (регион №. 1)

Из общего количества ТБО около 98 % подвергается складированию и захоронению на полигонах, лишь около 2 % утилизируется. Особенности

Кемеровской области являются неравномерное распределение ареалов образования ТБО: плотность населения составляет около 28 человека на 1 кв. км, 85 % которого сосредоточено в городской местности. Общая численность населения региона составляет около 2,7 млн. человек. В каждом из пяти крупных городов (Кемерово, Новокузнецк, Прокопьевск, Белово, Междуреченск) проживает более 100 тыс. жителей. Поэтому более 80 % ТБО образуется в крупных городах.

На территории Кемеровской области расположены месторождения угля, железной руды, золота, серебра, марганца, цинка, свинца, меди и др. В промышленных масштабах ведется преимущественно добыча угля (бурого и каменного). Этот уголь используется не только для нужд теплоэнергетики внутри страны, но и экспортируется за рубеж. Поэтому основными источниками горючих промышленных отходов являются угледобывающие и углеперерабатывающие предприятия. Наибольшее количество отходов (фильтр кеков) образуется в местах расположения крупных угольных разрезов в окрестностях г. Кемерово (39,0 %), а также разрезов “Междуреченский” (12,4 %), “Киселевский” (8,9 %), “Березовский” (8,6 %), “Прокопьевский” (7,5 %).

В Новосибирской области (регион No. 2) ежегодно производится $3,9 \cdot 10^6$ тонн отходов, из которых $1,3 \cdot 10^6$ тонн являются ТБО. Основное количество ТБО ($1,2 \cdot 10^6$ тонн – 92,3 %) образуется на территории регионального центра (г. Новосибирск) и в его окрестностях (г. Бердск). Это объясняется тем, что 2,2 млн. из 2,8 млн. жителей проживают в этой местности. Около 78 % ТБО направляется на захоронение. Только третья часть полигонов ТБО отвечает нормативным требованиям безопасности. Количество ТБО, размещаемых на полигонах, ежегодно увеличивается. В окрестностях регионального центра (г. Новосибирск) за последние 15 лет количество отходов, расположенных на полигонах, выросло в 2,5 раза и в настоящее время составляет около $70 \cdot 10^6$ тонн. Структура ТБО приведена на рисунке 8.

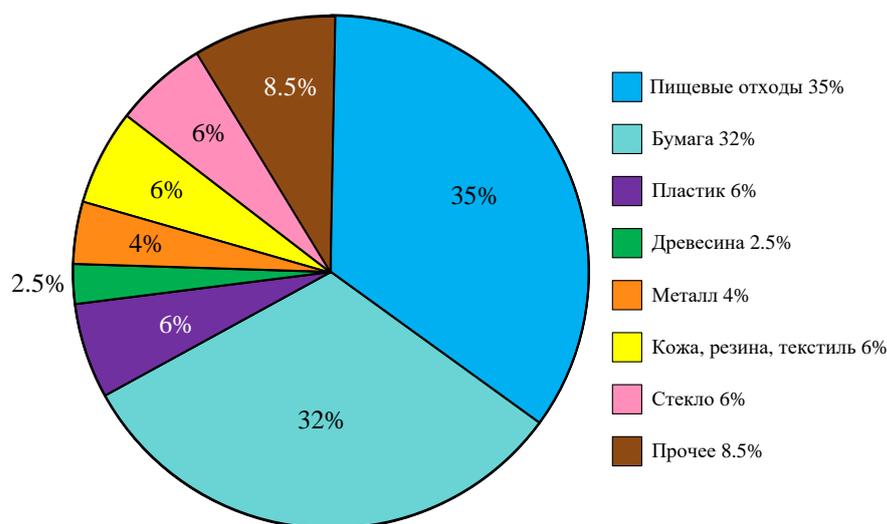


Рисунок 8 – Структура ТБО Новосибирской области (регион No. 2)

Новосибирская область является одним из крупных индустриальных районов Сибири. Основу промышленного комплекса составляют крупные и средние предприятия, на которых осуществляется выпуск более 80 % всей промышленной продукции: сельскохозяйственные продукты, пищевые продукты, электрооборудование, электронное и оптическое оборудование, металлургическое оборудование, металлические и неметаллические изделия, строительные материалы (железобетон). В Новосибирской области ежегодно производится $2,6 \cdot 10^6$ тонн промышленных отходов, из которых наибольшую часть (43,8 %) составляют отходы добычи полезных ископаемых, в частности угля.

В Томской области (регион No. 3) ежегодно производится около $1,3 \cdot 10^6$ тонн отходов, из них $0,4 \cdot 10^6$ тонн ТБО и $0,9 \cdot 10^6$ тонн промышленных отходов. Основное количество ТБО образуется в местах расположения крупных городов: Томск ($0,3 \cdot 10^6$ тонн – 74,7 %), г. Северск ($0,03 \cdot 10^6$ тонн – 7,5 %). Это объясняется тем, что 0,8 млн. из 1,1 млн. жителей проживает в этой местности. Около 98 % ТБО направляется на захоронение на специализированные полигоны. Структура ТБО приведена на рисунке 9.

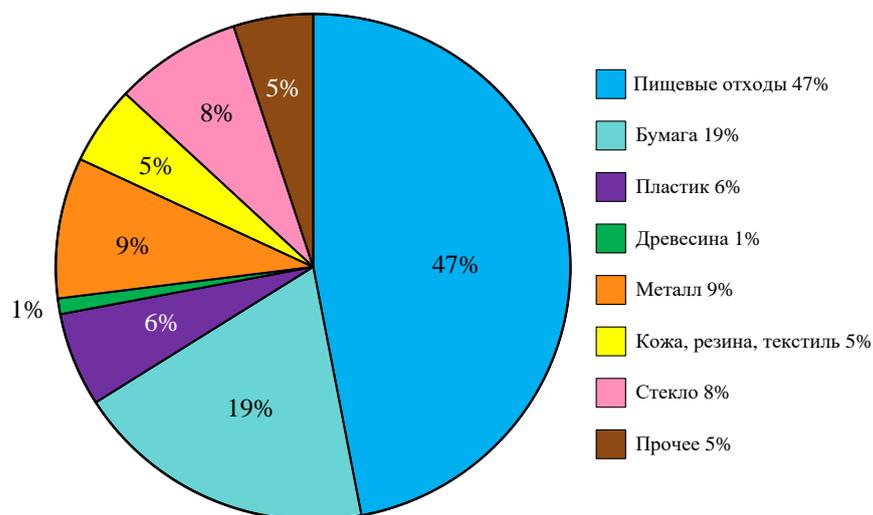


Рисунок 9 – Структура ТБО Томской области (регион No. 3)

Основное количество промышленных отходов образуется в местах расположения крупных промышленных объектов: г. Томск ($0,3 \cdot 10^6$ тонн – 26,8 %), г. Северск ($0,3 \cdot 10^6$ тонн – 24,3 %), и в окрестностях этих городов ($0,1 \cdot 10^6$ тонн – 12,3 %). На территории Томской области расположено около 3500 промышленных предприятий. Структура промышленного производства является многоотраслевой. Основные отрасли промышленности: топливная, электроэнергетика, цветная металлургия, химическая и нефтехимическая, машиностроение и металлообработка, лесная, деревообрабатывающая и пищевая промышленность. Доминирующее положение (более 60 % от общего объема промышленного производства) занимают нефтяная и нефтехимическая промышленности, машиностроение и металлообработки. Из общего количества ежегодно производимых отходов ($0,9 \cdot 10^6$ тонн) $0,2 \cdot 10^6$ тонн повторно используется на предприятиях, $0,2 \cdot 10^6$ тонн передается сторонним организациям в качестве вторичных ресурсов, $0,5 \cdot 10^6$ тонн располагается на территории предприятий на временных хранилищах или захоранивается на специализированных полигонах.

1.3.2. Энергетический потенциал промышленных отходов и ТБО

В таблицах 2–3 приведены данные, используемые при расчетах энергетического потенциала промышленных отходов и ТБО в трех соседних регионах (рис. 6), расположенных на территории Российской Федерации.

Таблица 2 – Характеристики отходов в каждом из трех регионов [98]

Характеристика	Кемеровская обл. (регион No. 1)	Новосибирская обл. (регион No. 2)	Томская обл. (регион No. 3)
1	2	3	4
Общее количество отходов, тонн/год	$2801 \cdot 10^6$	$3,9 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^6$
Промышленные отходы, тонн/год	$2800 \cdot 10^6$	$2,6 \cdot 10^6$	$0,9 \cdot 10^6$
Структура промышленных отходов [68–70]:			
• отходы добычи полезных ископаемых	99,5 %	43,8 %	17,2 %
• отходы обрабатывающей промышленности	0,2 %	8,1 %	32,8 %
• отходы при производстве и распределении электроэнергии, газа и воды	0,1 %	24,5 %	7,2 %
• отходы строительства и ремонта	<0,01 %	0,1 %	1,0 %
• отходы сельского, лесного хозяйства, рыбководства и рыболовства	0,04 %	16,0 %	32,9 %
• прочие отходы	0,15 %	7,5 %	8,9 %
Повторное использование / утилизация, тонн/год [71–73]	$1876,0 \cdot 10^6$ (67,0 %)	$0,9 \cdot 10^6$ (34,1 %)	$0,3 \cdot 10^6$ (28,0 %)
Захоронение / складирование на полигонах, тонн/год	$924,0 \cdot 10^6$ (33,0 %)	$1,7 \cdot 10^6$ (65,9 %)	$0,6 \cdot 10^6$ (72,0 %)
ТБО, тонн / год	$0,9 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^6$	$0,4 \cdot 10^6$

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4
Структура ТБО [69, 70, 74]:			
• пищевые отходы	45 %	35 %	47 %
• бумага	29 %	32 %	19 %
• пластик	13 %	6 %	6 %
• металл	2 %	4 %	9 %
• кожа, резина, текстиль	2 %	6 %	5 %
• стекло	1 %	6 %	8 %
• древесина	5 %	2,5 %	1 %
• прочее	3 %	8,5 %	5 %
Повторное использование / утилизация, тонн/год [71–73]	0,02·10 ⁶ (1,9 %)	0,3·10 ⁶ (22 %)	0,008·10 ⁶ (2,0 %)
Захоронение / складирование на полигонах, тонн/год	0,88·10 ⁶ (98,1 %)	1,0·10 ⁶ (78 %)	0,392·10 ⁶ (98,0 %)

Таблица 3 – Количество сточных вод, образующихся при переработке нефти (в расчете на 1 т нефти) [75]

Тип завода	Количество производственных сточных вод, м ³ /т нефти	
	первой системы	второй системы
Нефтеперерабатывающий завод топливного профиля	0,23–0,25	0,10–0,20
Нефтеперерабатывающий завод топливно- масляного профиля	0,40–1,50	0,10–0,25
Нефтехимический завод	2,00–3,00	1,20–2,00

Таблица 4 – Теплота сгорания типичных ТБО [76]

Наименование	Теплота сгорания, Дж/кг (× 10 ⁶)
Пищевые отходы	5–10
Бумага	15–20
Пластик	20–25
Кожа, резина, текстиль	20–35
Дерево	15–20
Прочее	<10

Исходные данные для расчета энергетического потенциала ТБО [68–74, 77].

К 2017 году уже накоплено и не утилизировано (хранится на полигонах) (величина $G^0_{\text{ТБО}}$) ТБО:

- в Кемеровской области – 54,0·10⁶ тонн;
- в Новосибирской области – 70,0·10⁶ тонн;

- в Томской области – $21,0 \cdot 10^6$ тонн.

Ежегодный объем производства ТБО (величина $G_{\text{ТБО}}$):

- в Кемеровской области – $0,9 \cdot 10^6$ тонн;
- в Новосибирской области – $1,3 \cdot 10^6$ тонн;
- в Томской области – $0,4 \cdot 10^6$ тонн.

Для каждого региона доля переработанных горючих ТБО, складированных на полигонах (коэффициент $k^{\text{ТБО}}$):

- в Кемеровской области – 0,5;
- в Новосибирской области – 0,7;
- в Томской области – 0,6.

Для типичного состава ТБО каждого региона усредненная теплота сгорания (величина $q^{\text{ТБО}}$) составляет (табл. 4):

- в Кемеровской области – 14,1 МДж/кг;
- в Новосибирской области – 12,0 МДж/кг;
- в Томской области – 10,0 МДж/кг.

Энергетический потенциал от сжигания накопленных ТБО в каждом регионе до 2017 года:

$$Q^0_{\text{ТБО}} = G^0_{\text{ТБО}} \cdot q^{\text{ТБО}} \quad (1)$$

- в Кемеровской области $Q^0_{\text{ТБО}} = 54,0 \cdot 10^6 \cdot 10^3 \cdot 14,1 \cdot 10^6 = 76,1 \cdot 10^{16}$ Дж;
- в Новосибирской области $Q^0_{\text{ТБО}} = 70,0 \cdot 10^6 \cdot 10^3 \cdot 12,0 \cdot 10^6 = 83 \cdot 10^{16}$ Дж;
- в Томской области $Q^0_{\text{ТБО}} = 21,0 \cdot 10^6 \cdot 10^3 \cdot 10,0 \cdot 10^6 = 20,9 \cdot 10^{16}$ Дж.

Энергетический потенциал от сжигания ТБО, накапливаемых в течение одного года:

$$Q^{\text{ТБО}} = k^{\text{ТБО}} \cdot G^{\text{ТБО}} \cdot q^{\text{ТБО}} \quad (2)$$

- в Кемеровской области $Q^{\text{ТБО}} = 0,5 \cdot 0,9 \cdot 10^6 \cdot 10^3 \cdot 14,1 \cdot 10^6 = 1,3 \cdot 10^{16}$ Дж;
- в Новосибирской области $Q^{\text{ТБО}} = 0,7 \cdot 1,3 \cdot 10^6 \cdot 10^3 \cdot 12,0 \cdot 10^6 = 1,5 \cdot 10^{16}$ Дж;
- в Томской области $Q^{\text{ТБО}} = 0,6 \cdot 0,4 \cdot 10^6 \cdot 10^3 \cdot 10,0 \cdot 10^6 = 0,2 \cdot 10^{16}$ Дж.

1.3.3. Энергетический потенциал отходы обогащения угля и переработки нефти

Исходные данные для расчета энергетического потенциала фильтр кеков и низкосортных углей [70].

В каждом регионе к 2017 году уже накоплено и никак не утилизировано (хранится на полигонах) фильтр кека (величина G_{fc}^0):

- в Кемеровской области – $368,6 \cdot 10^6$ тонн;
- в Новосибирской области – $5,8 \cdot 10^6$ тонн;
- в Томской области не ведется добыча и обогащение угля.

Ежегодный объем производства фильтр кека (величина G_{fc}) составляет 10–15 % от объема обогащаемого угля:

- в Кемеровской области – $8,1 \cdot 10^6$ тонн;
- в Новосибирской области – $0,4 \cdot 10^6$ тонн;
- в Томской области не ведется добыча и обогащение угля.

Для типичного фильтр кека теплота сгорания (табл. 2) составляет около $24,8 \cdot 10^6$ Дж/кг, (величина q_{fc}).

Энергетический потенциал от сжигания накопленных фильтр кеков до 2017 года:

$$Q_{fc}^0 = G_{fc}^0 \cdot q_{fc} \quad (3)$$

- в Кемеровской области $Q_{fc}^0 = 368,6 \cdot 10^6 \cdot 10^3 \cdot 24,8 \cdot 10^6 \cdot 0,6 = 548,5 \cdot 10^{16}$ Дж;
- в Новосибирской области $Q_{fc}^0 = 5,8 \cdot 10^6 \cdot 10^3 \cdot 24,8 \cdot 10^6 \cdot 0,6 = 8,6 \cdot 10^{16}$ Дж;
- в Томской области $Q_{fc}^0 = 0$ Дж.

Энергетический потенциал от сжигания фильтр кеков, накапливаемых в течение одного года:

$$Q_{fc} = G_{fc} \cdot q_{fc} \quad (4)$$

- в Кемеровской области $Q_{fc} = 8,1 \cdot 10^6 \cdot 10^3 \cdot 24,8 \cdot 10^6 \cdot 0,6 = 20,1 \cdot 10^{16}$ Дж;
- в Новосибирской области $Q_{fc} = 0,4 \cdot 10^6 \cdot 10^3 \cdot 24,8 \cdot 10^6 \cdot 0,6 = 1,0 \cdot 10^{16}$ Дж;
- в Томской области $Q_{fc} = 0$ Дж.

Исходные данные для расчета энергетического потенциала жидких горючих отходов (отработанные масла) [70, 75, 78, 79].

В каждом регионе к 2017 году уже накоплено и никак не утилизировано, а хранится на полигонах (величина G_{oil}^0) отработанных масел, горючих отходов нефтедобычи и нефтепереработки:

- в Кемеровской области отсутствуют запасы жидких горючих отходов;
- в Новосибирской области – $97,3 \cdot 10^3$ тонн;
- в Томской области – $2219,4 \cdot 10^3$ тонн.

Ежегодный объем производства отработанных масел, горючих отходов нефтедобычи и нефтепереработки (величина G_{oil}):

- в Кемеровской области – $0,5 \cdot 10^3$ тонн;
- в Новосибирской области – $0,7 \cdot 10^3$ тонн;
- в Томской области – $11,5 \cdot 10^3$ тонн.

Около 40 % отработанных масел не перерабатывается (коэффициент $l_{oil}=0,4$), которые могут быть использованы для приготовления композиционного топлива.

Для типичных масел теплота сгорания составляет около $44,0 \cdot 10^6$ Дж/кг, (величина q_{oil}).

Энергетический потенциал от сжигания накопленных отработанных масел до 2017 года:

$$Q_{oil}^0 = G_{oil}^0 \cdot q_{oil} \quad (5)$$

- в Кемеровской области $Q_{oil}^0 = 0$ Дж;
- в Новосибирской области $Q_{oil}^0 = 97,3 \cdot 10^3 \cdot 10^3 \cdot 44,0 \cdot 10^6 = 0,4 \cdot 10^{16}$ Дж;
- в Томской области $Q_{oil}^0 = 2219,4 \cdot 10^3 \cdot 10^3 \cdot 44,0 \cdot 10^6 = 9,8 \cdot 10^{16}$ Дж.

Энергетический потенциал от сжигания отработанных масел, накапливаемых в течение одного года:

$$Q_{oil} = l_{oil} \cdot G_{oil} \cdot q_{oil} \quad (6)$$

- в Кемеровской области $Q_{oil} = 0,4 \cdot 0,5 \cdot 10^3 \cdot 10^3 \cdot 44,0 \cdot 10^6 = 0,9 \cdot 10^{13}$ Дж;
- в Новосибирской области $Q_{oil} = 0,4 \cdot 0,7 \cdot 10^3 \cdot 10^3 \cdot 44,0 \cdot 10^6 = 1,2 \cdot 10^{13}$ Дж;

- в Томской области $Q_{oil}=0,4 \cdot 11,5 \cdot 10^3 \cdot 10^3 \cdot 44,0 \cdot 10^6=0,2 \cdot 10^{16}$ Дж.

Результаты выполненных исследований приведены в таблице 5. Можно сделать вывод о том, что уже накопленные и ежегодно производимые промышленные отходы и ТБО имеют достаточно высокий уровень энергетического потенциала. Поэтому в среднесрочной перспективе такие отходы могут быть использованы для удовлетворения потребностей в энергоресурсах при выработке энергии местными угольными тепловыми электрическими станциями.

Таблица 5 – Энергетический потенциал каждого региона за счет накопленных и ежегодно производимых отходов

Энергоресурсы	Суммарно накоплено		Ежегодный прирост	
	G^0 , тонн	Q^0 , Дж	G , тонн	Q , Дж
Кемеровская область (регион No. 1)				
Фильтр кек	$368,8 \cdot 10^6$	$548,5 \cdot 10^{16}$	$8,1 \cdot 10^6$	$12,1 \cdot 10^{16}$
ТБО	$54,0 \cdot 10^6$	$76,1 \cdot 10^{16}$	$0,9 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^{16}$
Нефтепродукты	–	–	$0,5 \cdot 10^3$	$0,9 \cdot 10^{13}$
Новосибирская область (регион No. 2)				
Фильтр кек	$5,8 \cdot 10^6$	$8,6 \cdot 10^{16}$	$0,4 \cdot 10^6$	$0,6 \cdot 10^{16}$
ТБО	$70,0 \cdot 10^6$	$83,0 \cdot 10^{16}$	$1,3 \cdot 10^6$	$1,5 \cdot 10^{16}$
Нефтепродукты	$97,3 \cdot 10^3$	$0,4 \cdot 10^{16}$	$0,7 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^{13}$
Томская область (регион No. 3)				
Фильтр кек	–	–	–	–
ТБО	$21 \cdot 10^6$	$20,9 \cdot 10^{16}$	$0,4 \cdot 10^6$	$0,2 \cdot 10^{16}$
Нефтепродукты	$2,2 \cdot 10^6$	$9,8 \cdot 10^{16}$	$11,5 \cdot 10^3$	$0,2 \cdot 10^{16}$
Общие данные для трех регионов				
Фильтр кек	$374,6 \cdot 10^6$	$557,1 \cdot 10^{16}$	$8,5 \cdot 10^6$	$12,7 \cdot 10^{16}$
ТБО	$145,0 \cdot 10^6$	$180,0 \cdot 10^{16}$	$2,6 \cdot 10^6$	$3,0 \cdot 10^{16}$
Нефтепродукты	$2,3 \cdot 10^6$	$10,2 \cdot 10^{16}$	$12,7 \cdot 10^3$	$0,2 \cdot 10^{16}$

1.3.4. Потребность в энергоресурсах угольной теплоэнергетики

Для рассматриваемых регионов (рис. 6) собственные нужды в тепловой и электрической энергии покрываются преимущественно за счет местных тепловых электрических станций. В Кемеровской и Новосибирской областях основным топливом являются каменные угли, добываемые на местных месторождениях, резервным топливом является природный газ. В Томской области основным энергоресурсом является природный газ, который добывается на территории этого региона. Несмотря на это, все котлы при проектировании и строительстве изначально были рассчитаны на сжигание угля. Их модернизация и перевод на природный газ была выполнена после начала промышленной добычи природного газа в регионе. Основные характеристики тепловых электрических станций приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Характеристики тепловых электрических станций

Тепловая электрическая станция	Установленная электрическая мощность МВт	Установленная тепловая мощность Гкал/ч	Выработка электроэнергии кВт·ч ($\times 10^6$)	Выработка тепловой энергии Гкал ($\times 10^3$)	Удельный расход условного топлива на отпущенную электроэнергию г у.т. /кВт·ч	Удельный расход условного топлива на отпущенную тепловую энергию кг у.т. /Гкал	Топливный баланс			Полученная тепловая энергия от сжигания угля в топке котла Дж ($\times 10^{16}$)	Ссылка –
							Уголь %	Газ %	Мазут %		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Кемеровская область (регион No. 1)											

Продолжение таблицы 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Кем. ГРЭС	485	1540	2053	2524	362	152	76,8	22,8	<0,1	2,5	[80]
Кем. ТЭЦ	80	749	175	725	383	168	91,3	8,7	0	0,5	
Ново-Кем. ТЭЦ	565	1449	1946	2911	370	160	99,4	0,5	<0,1	3,5	
Новосибирская область (регион No. 2)											
ТЭЦ-2	345	920	1122	1899	328,5	146,8	91,1	8,8	0,1	1,7	[81]
ТЭЦ-3	511,5	1115	2246	2390	293,5	143,6	99,7	0	0,3	2,9	
ТЭЦ-4	384	1120	1363	2251	314,8	143,8	80,9	19,1	0	1,8	
ТЭЦ-5	1200	2730	7065	4652	292,9	138	99,5	0,1	0,4	7,9	
Томская область (регион No. 3)											
ТЭЦ-1	14,7	795	3,3	651	326	138	0	99,9	<0,1	0	[82]
ТЭЦ-3	140	780	746	1694	268,5	131	0	99,9	<0,1	0	
ГРЭС-2	331	815	1104	2154	249	159,6	47,6	52,4	0	0,9	
Общие данные для трех регионов											
–	4056,2	12013,0	17823,3	21851,0	–	–	–	–	–	21,7	–

Комбинированная выработка тепловой и электрической энергии в Кемеровской области осуществляется на трех станциях (Кемеровская ГРЭС, Кемеровская ТЭЦ, Ново-Кемеровская ТЭЦ). Малые котельные (около 100 штук), суммарная установленная тепловая мощность которых составляет 904 Гкал/ч, обеспечивают теплом преимущественно жилищно-коммунальный сектор и малые промышленные предприятия. Основными источниками теплоснабжения и электроснабжения в Новосибирской области являются четыре станции (ТЭЦ-2, ТЭЦ-3, ТЭЦ-4, ТЭЦ-5). Суммарная установленная мощность котельных (более 200 штук) составляет 3733 Гкал/ч. Около 93 % этой энергии генерируют котельные, работающие на природном газе, остальную часть энергии генерируют угольные котельные и котельные, работающие на мазуте. Основными источниками теплоснабжения и электроснабжения в Томской области являются 3 станции (ТЭЦ-1, ТЭЦ-3, ГРЭС-2). Суммарная

установленная мощность котельных (52 штуки) составляет 762 Гкал/ч. Около 81 % этой энергии генерируют котельные, работающие на природном газе, остальную часть энергии генерируют угольные котельные и котельные, работающие на мазуте. Основные характеристики углей, используемых в качестве топлива на тепловых электрических станциях, приведены в таблице 7. Это преимущественно каменные угли Кузнецкого и Канско-Ачинского угольных бассейнов.

Таблица 7 – Характеристики углей, используемых для генерации энергии

Угольные ТЭС	Уголь	$Q_{s,v}^a, \text{ J/kg}$ ($\times 10^6$)	$W^a, \%$	$A^d, \%$	$V^{daf}, \%$	Ссылка
Кемеровская область (регион No. 1)						
Кем. ГРЭС	Каменный уголь марки СС	21,8	13,7	17,2	27	[80]
Кем. ТЭЦ	Каменный уголь марки ДР	21,8	14,7	15,4	42,3	
Ново-Кем. ТЭЦ	Каменный уголь марки Д	21,4	14,1	13,1	41,2	
Котельные	Каменный уголь марки Д	21,4	14,1	13,1	41,2	
Новосибирская область (регион No. 2)						
ТЭЦ-2	Каменный уголь марки СС и Т	24,7	8,3	16,9	23,9	[81]
ТЭЦ-3	Каменный уголь марки СС и Т	22,1	17,5	15,5	19,1	
	Бурый уголь марки Б	14,8	35,7	7,6	46,4	
ТЭЦ-4	Каменный уголь марки СС и Т	25	9	15,7	19	
ТЭЦ-5	Каменный уголь марки Г и Д	21,6	14,7	13,1	41,4	
Котельные	Каменный уголь марки СС и Т	24,9	8,3	16,9	23,9	
	Бурый уголь марки Б	14,8	35,7	7,6	46,4	
	Каменный уголь марки Г и Д	21,8	14,7	13,1	41,4	
Томская область (регион No. 3)						
ГРЭС-2	Каменный уголь марки Д	21,4	14,1	13,1	41,2	[82]
Котельные	Каменный уголь марки Д	21,2	13,9	14,5	44,7	
	Каменный уголь марки ДР	21,8	12	15,9	48	

Совместный анализ данных таблиц 6 и 7 позволяет вычислить количество угля, затрачиваемого угольными тепловыми электрическими станциями и котельными трех регионов для производства тепловой и электрической энергии. Ежегодный расход высококачественного угля [82–84] составляет около $10216 \cdot 10^3$ тонн (Кемеровская область – $2664 \cdot 10^3$ тонн, Новосибирская область – $7149 \cdot 10^3$ тонн, Томская область – $403 \cdot 10^3$ тонн). При сжигании такого количества угля выделяется около $21,7 \cdot 10^{16}$ Дж теплоты. Эта энергия с учетом КПД ТЭС 70 % преобразуется в электричество и тепло. Низкий КПД ТЭС является причиной того, что достаточно большое количество энергии, выделяющейся в результате сжигания высококачественного угля, безвозвратно теряется в процессе преобразования. Таким образом, высококачественное твердое топливо используется нерационально. Замена угля на композиционное топливо из отходов углеобогащения (или низкокачественного угля), ТБО, отработанных масел (или горючих отходов нефтедобычи и нефтепереработки) позволит снизить расход высококачественных исчерпаемых ископаемых топлив.

1.3.5. Стратегия совместной утилизации промышленных и бытовых отходов с выработкой энергии

В таблицах 5 и 6 приведены данные по энергетическому потенциалу промышленных отходов и ТБО, а также по количеству тепловой энергии, получаемой от сжигания угля в топках котлов тепловых электрических станций. Сопоставление соответствующих характеристик позволяет сделать вывод о перспективах применения на практике композиционных топлив из отходов углеобогащения, низкосортных углей, ТБО, отработанных масел, горючих отходов нефтедобычи и нефтепереработки, ежегодное производство и запасы которых позволят в среднесрочной перспективе (20–30 лет) обеспечить 100 % потребность угольной теплоэнергетики трех регионов (рис. 6) в энергоресурсах.

Стратегия совместной утилизации промышленных и бытовых отходов путем сжигания в составе композиционных топлив предполагает следующее. Вся (около $21,7 \cdot 10^{16}$ Дж) энергия (табл. 6), генерируемая угольными тепловыми электрическими станциями, будет производиться в результате сжигания композиционного топлива. Типичный состав такого топлива: 85 % фильтр кек (или смесь низкосортного угля с водой) + 10 % ТБО + 5 % отработанное масло. Для замены угля эквивалентным по энерговыделению количеством композиционного топлива потребность в его компонентах в первый год составит (табл. 8): $11,13 \cdot 10^6$ тонн фильтр кека; $1,31 \cdot 10^6$ тонн ТБО; $0,65 \cdot 10^6$ тонн отработанного масла. Предполагается, что в соответствии с общемировыми прогнозами роста энергопотребления в каждый последующий год количество энергии, получаемой от сжигания топлива и необходимой для производства тепла и электричества, будет возрастать на 1 % по сравнению с предыдущим годом (табл. 8). Соответственно расход компонентов, используемых для приготовления композиционного топлива, также будет возрастать. Согласно данным табл. 8 лимитирующим компонентом для приготовления такого состава композиционного топлива в среднесрочной перспективе является горючая жидкость. После первых четырех лет реализации предполагаемой энергетической программы все накопленное отработанное масло или жидкие горючие отходы нефтедобычи и нефтепереработки будут полностью утилизированы, а их ежегодное производство не будет покрывать необходимые для приготовления топлива потребности. Поэтому, начиная с пятого года, в состав композиционного топлива будет входить 85 % фильтр кека и 15 % ТБО. Ежегодная потребность в компонентах такого топлива составит: не менее $11,5 \cdot 10^6$ тонн фильтр кек и не менее $2,0 \cdot 10^6$ тонн ТБО. В таблице 8 по годам приведен состав композиционного топлива и расход каждого его компонента при реализации предлагаемой стратегии утилизации отходов в условиях ежегодного увеличения энергопотребления на 1 % по сравнению с предыдущим годом.

Таблица 8 – Расход компонентов на приготовление композиционного топлива

Год	Энергия от сжигания топлива, Дж ($\times 10^{16}$)	Расход угля, тонн ($\times 10^6$)	Расход композиционного топлива (по компонентам)			
			Фильтр кек, тонн ($\times 10^6$)	ТБО, тонн ($\times 10^6$)	Масло, тонн ($\times 10^6$)	Всего, тонн ($\times 10^6$)
1	21,70	10,22	11,13	1,31	0,65	13,10
2	21,92	10,32	11,24	1,32	0,66	13,23
3	22,14	10,42	11,36	1,34	0,67	13,36
4	22,36	10,53	11,47	1,35	0,67	13,49
5	22,58	10,63	11,58	2,04	–	13,63
6	22,81	10,74	11,70	2,06	–	13,77
7	23,03	10,84	11,81	2,08	–	13,90
8	23,27	10,96	11,94	2,11	–	14,04
9	23,50	11,06	12,05	2,13	–	14,18
10	23,73	11,17	12,17	2,15	–	14,32
11	23,97	11,29	12,30	2,17	–	14,47
12	24,21	11,40	12,42	2,19	–	14,61
13	24,45	11,51	12,54	2,21	–	14,76
14	24,70	11,63	12,67	2,24	–	14,91
15	24,94	11,74	12,79	2,26	–	15,05
16	25,19	11,86	12,92	2,28	–	15,20
17	25,44	11,98	13,05	2,30	–	15,35
18	25,70	12,10	13,18	2,33	–	15,51
19	25,96	12,22	13,32	2,35	–	15,67
20	26,22	12,34	13,45	2,37	–	15,82
21	26,49	12,47	13,59	2,40	–	15,99
22	26,74	12,59	13,72	2,42	–	16,14
23	27,01	12,72	13,86	2,45	–	16,30
24	27,28	12,84	13,99	2,47	–	16,46
25	27,55	12,97	14,13	2,49	–	16,63
Всего:	612,89	288,55	314,39	52,82	2,66	369,87

В течение 25 лет реализации энергетической программы будет утилизировано (табл. 8): $314,39 \cdot 10^6$ тонн фильтр кека; $52,82 \cdot 10^6$ тонн ТБО; $2,66 \cdot 10^6$ тонн отработанного масла. Предлагаемые мероприятия согласно данным таблицы 5 позволят полностью решить проблему утилизации накопленных до 2017 года отработанных масел, жидких горючих отходов нефтедобычи и нефтепереработки, а также проблему утилизации ежегодно производимых отходов углеобогащения и на 84 % уменьшить количество накопленных до 2017 года фильтр кеков. Кроме этого добавление в состав композиционных топлив ТБО позволит решить проблему их утилизации до перехода на новую систему управления отходами с высокой долей переработки и повторного использования ТБО и на 36 % уменьшить количество накопленных на полигонах и не переработанных до 2017 года ТБО.

Стоит отметить, что предлагаемая стратегия совместной утилизации промышленных и бытовых отходов путем сжигания в составе композиционных топлив характеризуется несколькими основными положительными эффектами:

1. Экономия высококачественного твердого натурального топлива (более 280 млн. тонн в течение 25 лет) за счет сокращения объемов его потребления на угольных тепловых электрических станциях в результате замены эквивалентным по энергетическим характеристикам количеством (около 315 млн. тонн) композиционного топлива.

2. Снижение загрязнения окружающей среды за счет утилизации твердых отходов в рамках экологически чистой технологии производства электричества и тепла.

3. Сокращение интенсивности увеличения площадей полигонов за счет плановой утилизации твердых бытовых отходов.

4. Эффективное инвестирование средств, сэкономленных за счет снижения расходов на приобретение энергоресурсов, для развития передовых технологий в промышленной теплоэнергетике и модернизации тепловых электрических станций.

Результаты экспериментальных исследований [85, 86] позволяют сделать вывод о том, что основные экологические характеристики (CO , CO_2 , NO_x , SO_x , зола микронных фракций) дымовых газов при сжигании композиционных топлив, приготовленных из низкосортных углей или отходов углеобогащения, воды и горючей жидкости не хуже, чем аналогичные характеристики дымовых газов при сжигании угольной пыли по традиционной для угольных ТЭС технологии. Возможность варьирования компонентной базы композиционных топлив в широких диапазонах позволяет разрабатывать топливные составы с прогнозируемыми энергетическими, экономическими и экологическими характеристиками.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование характеристик зажигания (времена задержки зажигания) и горения (температуры в процессе горения) одиночных капель для группы составов жидких композиционных топлив, отличающихся как составом дополнительных компонентов из числа типичных горючих ТБО, так и их концентрацией.

2. Экспериментальные исследования

2.1. Приготовление топлива и методика экспериментального исследования

2.1.1. Приготовление топлива

Исследования выполнены для группы составов композиционного топлива на основе фильтр-кека (ФК) коксующегося каменного угля, полученного с обогатительной фабрики “Северная” Кемеровской области в Российской Федерации. Такие горючие отходы являются побочными продуктами углеобогащения, которые могут широко применяться в теплоэнергетике в качестве топлива [87]. ФК представляет собой смесь мелкодисперсного угля (размер частиц около 100 мкм) и воды (массовая концентрация около 50 %). Как правило, на углеобогачительных фабриках ФК складировать на открытых полигонах. После испарения влаги это ведет к загрязнению больших

территорий угольной пылью и ухудшению экологической ситуации в близлежащих регионах.

Для приготовления рассматриваемых в данной работе составов композиционного жидкого топлива использовалась методика [87–91]. Ее схема приведена на рисунке 10. Типичные твердые бытовые отходы (картон, древесина, резина, пластик) измельчались по отдельности при помощи мельницы DM-6 (HT Machinery, Япония-Тайвань). Полученные образцы разных ТБО просеивались через сито со стандартным размером ячеек 140 мкм по ISO 3310:2000. Таким образом, для приготовления топливных составов использовались компоненты (ФК и ТБО) с размерами частиц менее 140 мкм. Далее для проведения экспериментов готовились три группы топливных составов. Первые две группы составов получались при перемешивании ФК и ТБО с разной концентрацией последнего (10 и 20 %). Третья группа составов состояла из ФК, ТБО и отработанного турбинного масла. В качестве жидкого горючего компонента топлива можно использовать любое другое отработанное масло [29, 30, 88, 89], которое способствует повышению температуры и теплового эффекта процесса горения. Также эксперименты проводились с базовыми составами: ФК без добавления каких-либо компонентов, смесь ФК и отработанного турбинного масла (без добавления ТБО). Составы топливных композиций приведены в табл. 8. Компоненты топлив перемешивали в емкости объемом 0,2 л мешалкой DC-600RM (HT Machinery, Япония-Тайвань) при 600 об./мин. в течение 15 минут.

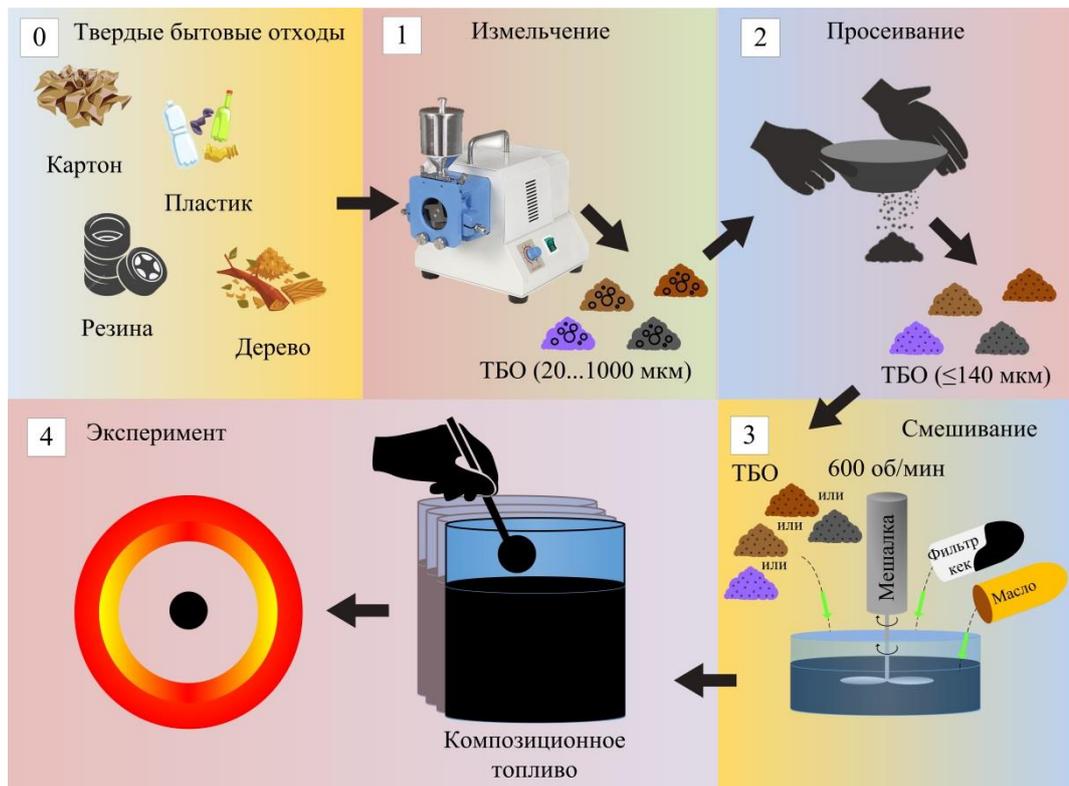


Рисунок 10 – Схема приготовления композиционных жидких топлив

Таблица 9 – Составы композиционных жидких топлив

No.	ФК	масло	древесина	резина	пластик	картон	Q, МДж/кг
1	2	3	4	5	6	7	8
1	100 %	–	–	–	–	–	10,78
2	90 %	–	10 %	–	–	–	11,29
3	90 %	–	–	10 %	–	–	13,05
4	90 %	–	–	–	10 %	–	11,88
5	90 %	–	–	–	–	10 %	11,43
6	80 %	–	20 %	–	–	–	11,80
7	80 %	–	–	20 %	–	–	15,31
8	80 %	–	–	–	20 %	–	12,98
9	80 %	–	–	–	–	20 %	12,07
10	90 %	10 %	–	–	–	–	14,11

Продолжение таблицы 9

1	2	3	4	5	6	7	8
11	70 %	10 %	20 %	–	–	–	15,12
12	70 %	10 %	–	20 %	–	–	18,64
13	70 %	10 %	–	–	20 %	–	16,30
14	70 %	10 %	–	–	–	20 %	15,40

Основные характеристики компонентов композиционного топлива приведены в таблицах 10, 11 [90]. Характеристики ФК получены для образцов в сухом состоянии (предварительно до проведения анализа высушивали при температуре около 105 °С до полного испарения влаги).

Таблица 10 – Характеристики компонентов топлива

компонент	W^a (%)	A^d (%)	V^{daf} (%)	$Q_{s,v}^a$ (МДж/кг)
ФК	–	26,5	23,1	24,83
древесина	20,0	2,0	–	16,45
резина	2,0	1,8	–	33,50
пластик	2,0	0,2	–	22,00
картон	5,0	3,0	–	17,50
масло	0,3	0,8	100,0	44,02

Таблица 11 – Элементный состав компонентов топлива

компонент	C^{daf} (%)	H^{daf} (%)	N^{daf} (%)	S^{daf} (%)	O^{daf} (%)
ФК	87,2	5,1	2,1	1,1	4,5
древесина	50,3	6,0	0,2	0,1	43,4
резина	97,9	1,2	0,3	0,6	–
пластик	66,7	7,9	–	–	25,4
картон	46,3	6,3	0,3	0,2	46,9

2.1.2. Экспериментальная методика

Процессы зажигания и горения одиночных капель композиционных топлив исследованы с использованием экспериментального стенда (рис. 11). Зажигание одиночных капель топлива происходило в высокотемпературной

неподвижной воздушной среде, которая генерировалась в объеме полой керамической трубки (внутренний диаметр 50 мм, длина 500 мм) муфельной печи Loiplf50/500-1200 (ЗАО “Лабораторное оборудование и приборы”, Россия). Диапазон варьирования температуры 20–1200 °С, задаваемые значения контролировались встроенной термопарой type S. Температуры в окрестности верхнего предела указанного диапазона характерны для процессов сжигания топлива в топках котлов. В каждой серии из 5–7 экспериментов, проводимых при идентичных начальных условиях, печь прогревалась до заданной температуры. После ее стабилизации капля топлива размером (диаметр) около 2 мм генерировалась электронным дозатором (диапазон 1–10 мкл, шаг варьирования 0,1 мкл) Finnpiquette Novus (Thermo Scientific, США) и осаждалась на держатель, который вводился в печь при помощи координатного механизма СПШ20-23017/2000Z (ЗАО “Завод мехатронных изделий”, Россия) через одно из торцевых отверстий керамической трубки печи вдоль ее оси симметрии (рис. 11). Процессы, протекающие в течение индукционного периода, регистрировались цветной высокоскоростной видеокамерой Phantom V411 (Vision Research, США), ее основные характеристики: скорость съемки 4200 кадров в секунду при максимальном разрешении 1280×800 пикселей; размер пикселя 20 мкм; минимальная экспозиция 1 мкс; 12 бит глубина; 16 Гб памяти; минимальное время экспозиции 1 мкс; автоматический триггер по изображению.

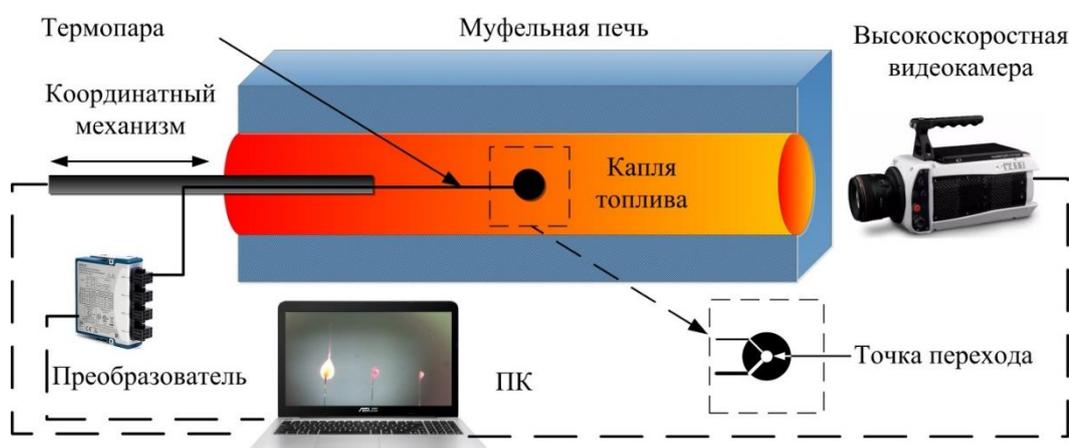


Рисунок 11 – Схема экспериментального стенда

При проведении серий из 5 экспериментов при идентичных начальных условиях контролировались температура (T_g) разогретого воздуха в печи и начальный диаметр капли (D_d). Программно-аппаратный комплекс высокоскоростной видеорегистрации позволял проводить детальный анализ закономерностей процессов зажигания и выгорания топлива, автоматически рассчитывать время задержки зажигания (t_d). Значения t_d определялись по эволюции светимости капли во времени [30, 88, 90] в рамках алгоритма Threshold, реализованного группой процедур программного обеспечения Tema Automotive (Image Systems AB, Швеция). Систематические погрешности определения времен t_d не превышали 3 %. Случайные погрешности для серий экспериментов, проведенных при идентичных условиях, составляли не более 10%.

2.2. Результаты и обсуждение

2.2.1. Характеристики зажигания и горения

Рассмотренные в данной работе составы композиционных топлив условно можно разделить на 3 группы: I – ФК 90 % + ТБО 10 %; II – ФК 80 % + ТБО 20 %; III – ФК 70 % + ТБО 20 % + масло 10 %. На рис. 12 приведены типичные кадры видеограммы процессов зажигания и горения группы капелек композиционного жидкого топлива разного состава (см. табл. 9).

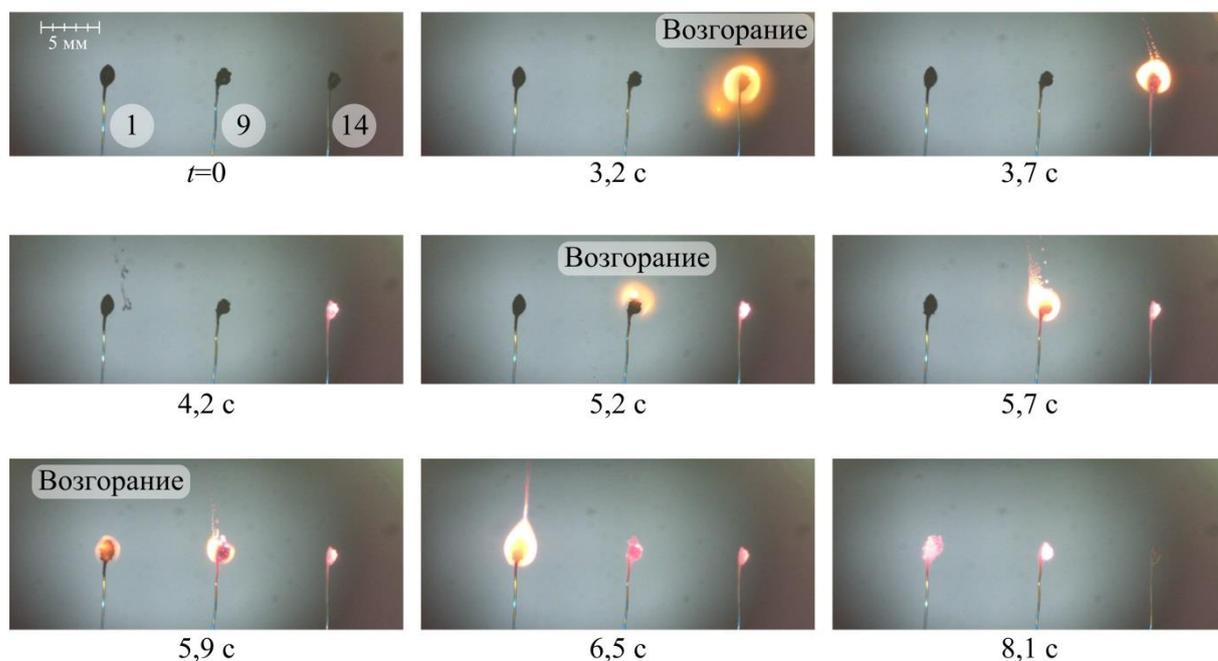


Рисунок 12 – Кадры видеोगраммы зажигания и горения каплеь диаметром 2 мм разных составов композиционного жидкого топлива при $T_g=800\text{ }^{\circ}\text{C}$

Установлено, что для указанных составов характерна идентичная совокупность процессов, протекающих в течение индукционного периода. Ни изменение концентрации горючих ТБО в диапазоне 10–20 %, ни добавление горючей жидкости в количестве до 10 % не ведут к изменению механизма зажигания жидкого композиционного топлива. Анализ высокоскоростных видеозаписей позволил выделить следующие основные стадии процесса взаимодействия одиночной капли композиционного жидкого топлива с неподвижным разогретым воздухом: инертный прогрев, испарение влаги из приповерхностного слоя, термическое разложение твердых горючих компонентов (уголь и бытовые отходы), смешение горючих газов и паров с окислителем, воспламенение газовой смеси и ее выгорание, прогрев твердого остатка, его гетерогенное зажигание и горение. Полученный результат объясняется определяющим влиянием мелкодисперсного твердого горючего компонента (ФК) в составе топливной смеси на закономерности протекания физико-химических процессов при нагревании топлива. Поэтому на рисунке 13 приведена иллюстрация универсальной для трех групп составов физической

модели процесса зажигания одиночной капли композиционного топлива на основе горючих промышленных и бытовых отходов.

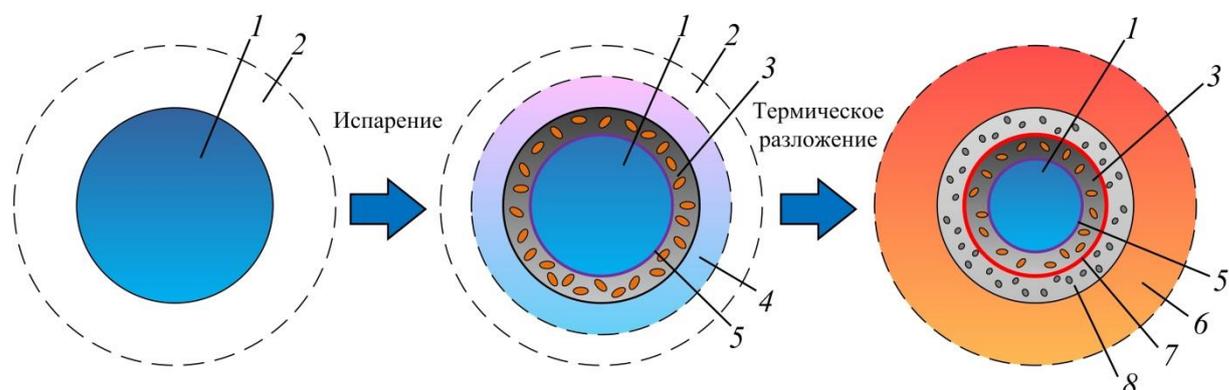


Рисунок 13 – Схема физической модели: 1 – начальное (насыщенное) топливо, 2 – нагретый неподвижный воздух, 3 – смесь ФК и ТБО, 4 – зона диффузии легковоспламеняющихся газов и водяных паров, 5 – фронт испарения, 6 – зона воспламенения газовой фазы, 7 – фронт сгорания, 8 – твердый остаток

На кадрах видеogramм исследуемых процессов видно (рис. 12), что в момент газофазного зажигания горючая газовая смесь, формирующаяся в окрестности капли топлива, имеет сферическую форму. Размер этой зоны эквивалентен 2–3 размерам капли топлива. Размер формирующейся газовой зоны (до момента зажигания) в окрестности капли тем больше, чем больше компонентов с высоким содержанием летучих входит в состав топлива и чем меньше температура окружающей среды. В последнем случае (при близких к предельным условиям зажигания) наиболее явно выражено отличие исследуемых процессов как для трех групп составов с разной концентрацией компонентов, так и для составов в рамках одной группы с разными компонентами из числа ТБО. Установленное отличие состоит в разной длительности протекания отдельных стадий процесса и их совокупности в целом (рис. 14).

На рисунке 14 показаны три области (выделены разным цветом), иллюстрирующие диапазоны изменения основной характеристики процесса –

времени задержки зажигания (t_d) при варьировании температуры воздуха $T_g=600-1000$ °С, когда происходит гарантированное зажигание трех групп составов композиционного жидкого топлива. Полученные результаты (рис. 14) позволяют сделать вывод, что температура окружающей среды $T_g=600$ °С является минимальной, необходимой для инициирования процесса горения композиционного топлива на основе отходов углеобогащения, ТБО и горючей жидкости. Максимальное отличие t_d для трех групп составов не превышает 25 % при температурах воздуха 600–1000 °С. Также установлено, что при $T_g>1000$ °С интенсивность физико-химических процессов, протекающих в течение индукционного периода, настолько высока, что тепломассоперенос в капле и ее окрестностях оказывает менее существенное влияние на характеристики зажигания, чем при температурах 600–1000 °С. При $T_g>1000$ °С времена задержки зажигания как для разных групп топливных составов, так и для одного и того же состава топлива отличаются несущественно.

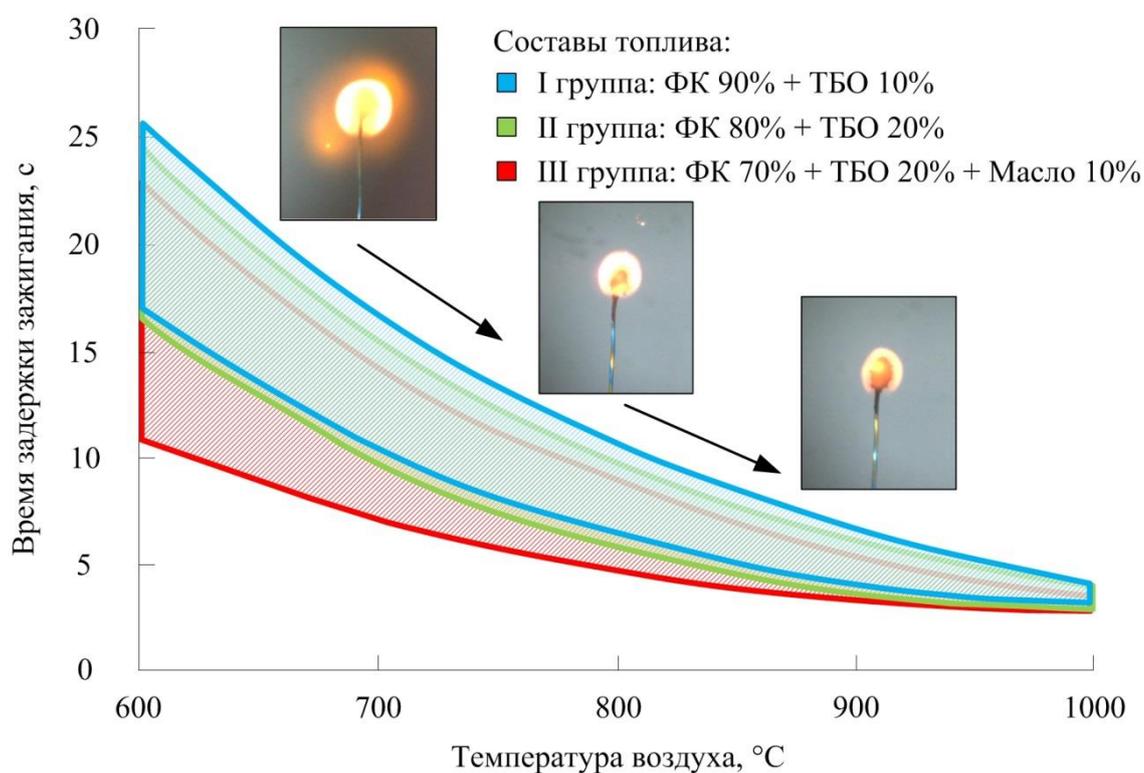


Рисунок 14 – Области (выделены цветом) времен задержки зажигания для трех групп составов композиционного жидкого топлива

Установлено, что интенсивность процесса зажигания для рассмотренных топливных составов возрастает в следующей последовательности (при прочих равных условиях): I группа – ФК 90 % + ТБО 10 %; II группа – ФК 80 % + ТБО 20 %; III группа – ФК 70 % + ТБО 20 % + масло 10 %. То есть для последней группы составов характерны меньшие времена задержки зажигания. Наибольшие значения t_d характерны для ФК в исходном влажном состоянии (без добавления каких-либо твердых или жидких горючих компонентов). Добавление в состав композиционного топлива типичных ТБО в количестве 10 %, увеличение их концентрации до 20 %, а также добавление отработанного турбинного масла до 10 % существенно уменьшает длительность прогрева капли топлива до момента газофазного зажигания (рис. 14) при прочих равных условиях. Полученный результат объясняется меньшим содержанием влаги (химически инертный компонент) в составах композиционного топлива при добавлении ТБО по сравнению с составом No. 1, а также присутствием горючей жидкости. В таких условиях затрачивается меньше энергии и времени на прогрев приповерхностного слоя капли, испарение влаги (эндотермический эффект около 2 МДж/кг) и инициирование горения. Также добавление типичных бытовых отходов в ФК ведет к появлению явно выраженной стадии газофазного горения в окрестности капли из-за относительно высокого содержания летучих компонентов в ТБО.

Кроме установленного отличия времен задержки зажигания для разных составов композиционного топлива характерно отличие температур в процессе горения. Этот параметр имеет важное значение как для анализа энергетических, так и экологических характеристик процесса горения топлива. На рисунке 15 приведены кривые, иллюстрирующие изменение температуры в процессе горения разных составов композиционного жидкого топлива при $T_g=800$ °С. Сплошные кривые иллюстрируют температуру в центре капли (T_1), штриховые кривые – в малой окрестности капли (T_2), где происходит выгорание газовой смеси, формирующейся при испарении жидкого горючего компонента топлива

(при наличии) и при термическом разложении твердых компонентов (ФК и ТБО).

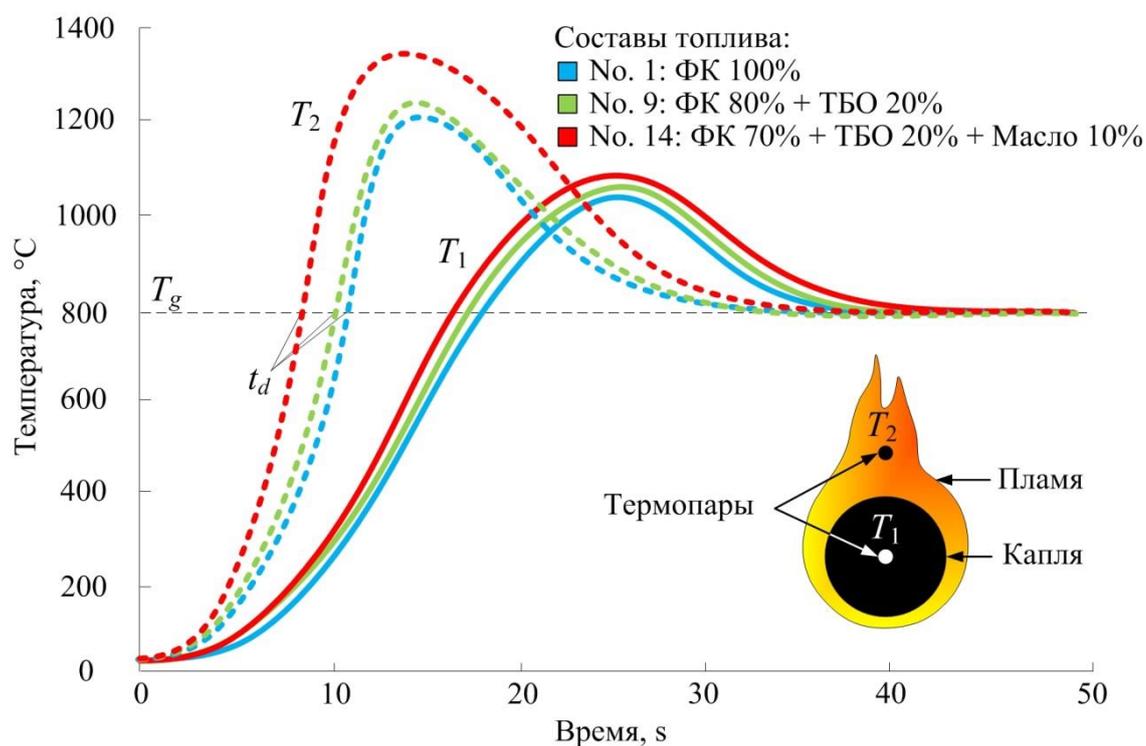


Рисунок 15 – Изменение температуры каплей диаметром 2 мм разных составов композиционного жидкого топлива в течение индукционного периода при $T_g=800\text{ }^\circ\text{C}$

Для визуализации объяснения отличия в расположении сплошных и штриховых кривых на рисунке 15 в правом нижнем углу приведена схема расположения термопар при регистрации температур T_1 и T_2 в течение индукционного периода. В соответствии с разработанной физической моделью процесса (рис. 13) сначала происходит газофазное зажигание продуктов испарения и термического разложения компонентов топлива в малой окрестности капли. На рисунке 15 момент газофазного зажигания (t_d) соответствует точке пересечения соответствующих штриховых кривых с линией $T_g=800\text{ }^\circ\text{C}$. Это означает, что в результате прогрева относительно холодной горючей газовой смеси в окрестности капли топлива интенсивность экзотермического реагирования возрастает. В результате саморозогрева

температура газовой смеси превышает температуру горячего воздуха, что свидетельствует о газофазном зажигании. Максимальные значения температур T_2 достигают $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ для III группы рассмотренных топливных составов с добавлением отработанного масла. Согласно [11] при сжигании ТБО при температурах $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ и выше все опасные вещества разлагаются на простейшие, что исключает присутствие в составе дымовых газов вредных выбросов типа диоксинов или фуранов. Дополнительное введение карбамида в топку котла и смеси реагентов (активированного угля со щелочным сорбентом $\text{Ca}(\text{OH})_2$) в мокро-сухой адсорбер снижает концентрацию вредных веществ в дымовых газах [11]. Их дополнительная очистка происходит в фильтре до значений, соответствующим нормативным показателям.

За счет достаточно интенсивного выделения теплоты при горении газовой смеси происходит прогрев относительно тонкого приповерхностного слоя капли, что ведет к гетерогенному зажиганию твердого остатка (см. рис. 13). Максимум скорости роста температуры капли топлива (сплошные кривые на рис. 15) соответствует промежутку времени, когда скорости выгорания газовой смеси достигают максимальных значений (экстремумы штриховых кривых на рис. 15). В условиях гетерогенного горения твердого остатка происходит его послойное выгорание. Фронт горения движется в направлении глубинных слоев капли (рис. 13). Длительность всей совокупности процессов от момента газофазного зажигания до выгорания твердого остатка при $T_g=600\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляет $15\text{--}35\text{ с}$. Стоит отметить, что снижение температуры T_2 с максимального значения до T_g происходит менее интенсивно по сравнению с T_1 . Это объясняется следующим. После выгорания газовой смеси в процессе горения твердого остатка выделяется теплота, которая из зоны гетерогенного экзотермического разложения отводится в окружающую среду. По этой причине температура T_2 превышает значение T_g в течение достаточно длительного промежутка времени. Сплошные кривые на рисунке 15 иллюстрируют, что максимальные температуры в процессе выгорания твердого

остатка рассмотренных составов композиционного топлива имеют близкие значения, которые не превышают 1200 °С.

Результаты выполненного исследования (рис. 15) позволяют сделать вывод о том, что вследствие возможности варьирования в широких диапазонах компонентного состава композиционных топлив на основе горючих промышленных и бытовых отходов для практического использования могут быть рекомендованы составы с достаточно высокой концентрацией ТБО. Добавление в такие топливные композиции отработанных масел будет положительно влиять на снижение концентрации диоксинов и фуранов в дымовых газах [11] вследствие повышения температуры горения. Однако в таких условиях прогнозируемо повышение концентрации основных антропогенных выбросов (оксидов углерода, азота, серы) в составе дымовых газов по сравнению с аналогичными характеристиками при сжигании композиционных топлив без добавления отработанных масел [89].

2.2.2. Экологические характеристики

С целью оценки масштабов увеличения концентраций антропогенных выбросов при сжигании топливных композиций с добавлением отработанного масла, а также для анализа влияния ТБО в составе композиционного топлива на изменение указанных характеристики выполнены экспериментальные исследования в рамках хорошо апробированной методики [89, 90, 91]. Анализ состава газообразных продуктов сгорания топлива выполнен с использованием экспериментального стенда (рис. 11). Газоанализатор Testo 340 монтировался на стенде вместо высокоскоростной видеокамеры. Этот газоанализатор имеет четыре сенсора: O₂ (диапазон 0–25 %, погрешность ±0,2 %, разрешение 0,01 %), CO (диапазон 0–10000 ppm, погрешность ±10 %, разрешение 1 ppm), NO_x (диапазон 0–4000 ppm, погрешность ±5 %, разрешение 1 ppm), SO₂ (диапазон 0–5000 ppm, погрешность ±10 %, разрешение 1 ppm). Концентрации CO₂ (диапазон 0–25 %, погрешность ±0,2 %, разрешение 0,1 %) рассчитывались газоанализатором автоматически по значениям концентраций O₂. Образец

топлива массой не менее 1 г вводился в полость муфельной печи, предварительно разогретой до заданной температуры. Такое минимально допустимое количество топлива обусловлено техническими характеристиками используемого газоанализатора. Для получения достоверных результатов измерений необходимо выполнение условия по минимальному объему анализируемых дымовых газов. Одновременно с образцом топлива в полость печи вводился зонд газоанализатора для забора дымовых газов. При проведении экспериментов оба отверстия керамической трубки (рис. 11) герметично закрывались теплоизоляционным материалом для предотвращения утечки дымовых газов в окружающую среду. При идентичных начальных условиях проводились серии из 3–5 экспериментов. Полученные результаты (рис. 16) представлены в виде средних значений экспериментальных данных.

В рамках экспериментальных исследований [87, 89, 91] установлено, что концентрации типичных антропогенных выбросов при сжигании жидких композиционных топлив меньше аналогичных характеристик при сжигании угля в исходном (сухом) состоянии: 40 % ниже для CO_2 , 20 % ниже для NO_x , и 40 % ниже для SO_x . Свойства и концентрации компонентов композиционных топлив, способы приготовления топливных суспензий, тонина помола твердых горючих компонентов позволяют варьировать основные экологические характеристики дымовых газов при сжигании композиционных топлив в широких диапазонах: CO_2 – от 0,5 до 18 %, CO – от 150 до 650 ppm, NO_x – от 0 до 800 ppm, SO_2 – от 0 до 120 ppm.

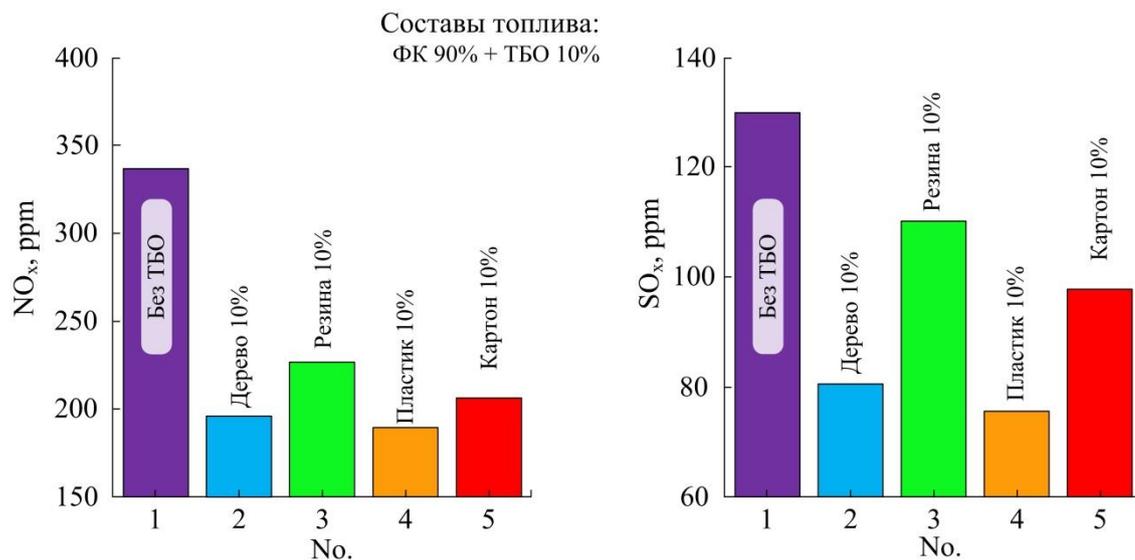
Улучшение экологических характеристик газообразных продуктов сгорания композиционных топлив по сравнению с аналогичными характеристиками при сжигании угля объясняется следующим [87, 89, 90, 91]. При сжигании угольного топлива выбросы NO_x и SO_x имеют прямую связь с содержанием азота и серы в топливе. Добавка любого количества воды в топливную суспензию ведет к очевидному снижению общего содержания азота и серы в топливной композиции, что положительно влияет на снижение концентраций соответствующих оксидов в дымовых газах. Кроме того, при

горении композиционного топлива вода, входящая в состав топлива (30–50 %), является окислителем, что интенсифицирует процесс выгорания угля. Интенсивное испарение воды способствуют более тонкому распылению углеродной основы за счет микровзрывов суспензионных капель. В результате этих эффектов увеличивается поверхность реагирования частиц топлива с продуктами диссоциации паров воды и оксидом углерода, что может способствовать снижению концентраций NO_x и SO_x . В ходе термической диссоциации паров воды при $T > 1000$ °C освобождаются свободные молекулы кислорода и водорода: $2\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightleftharpoons 2\text{H}_2(\text{g}) + \text{O}_2(\text{g})$ [93, 94]. Кислород, образовавшийся в ходе реакции, интенсифицирует процесс горения, а водород и монооксид углерода участвуют в реакциях восстановления азота и серы: $2\text{NO} + 4\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{N}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$ (температура реакции выше 200 °C) [95]; $2\text{NO} + 2\text{CO} \rightarrow \text{N}_2 + 2\text{CO}_2$ (температура реакции выше 1000 °C) [96]; $\text{SO}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{S} + 2\text{H}_2\text{O}$ (температура реакции выше 600 °C) [97]; $\text{SO}_2 + 3\text{CO} \rightarrow 2\text{CO}_2 + \text{COS}$ (температура реакции выше 500 °C) [97].

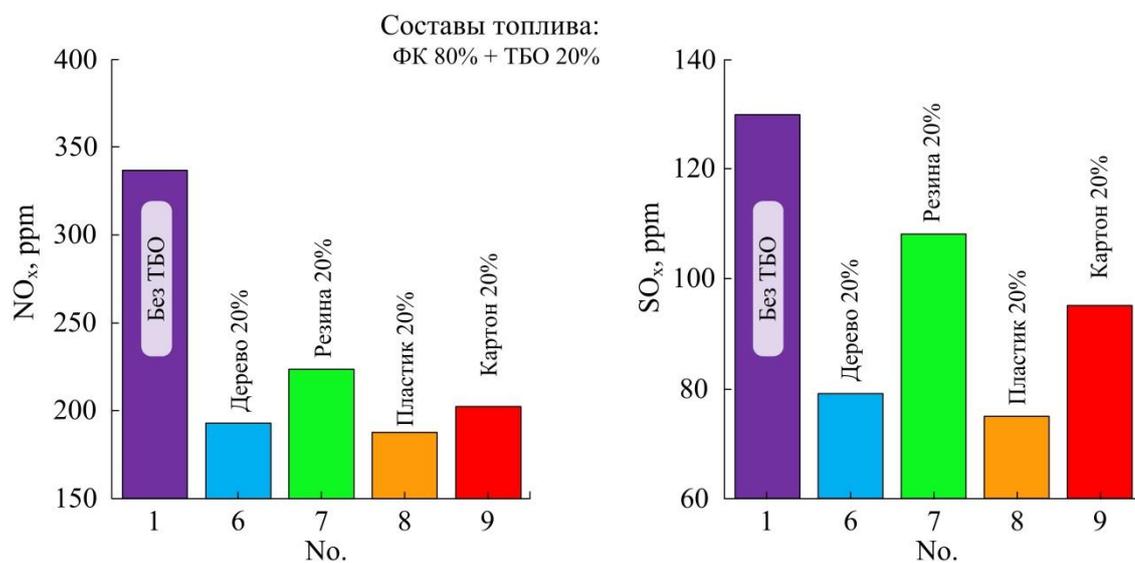
В данной работе анализ концентраций вредных газов в продуктах сгорания композиционного топлива выполнен для двух основных компонентов (рис. 16): NO_x и SO_x . Концентрации оксидов углерода в дымовых газах при сжигании топлива с разными компонентами из числа типичных твердых бытовых отходов отличаются менее существенно и составляют: CO_2 – 16–18 %, CO – не более 370 ppm. Эти значения не превышают значения аналогичных характеристик при сжигании сухого угля в топке котла.

Установлено, что концентрации NO_x и SO_x в продуктах сгорания разных топливных составов при добавлении мелкодисперсных твердых компонентов из числа ТБО в исходный ФК снижаются в следующей последовательности (рис. 16): резина, картон, древесина, пластик. Для топливных составов с добавлением пластика характерны минимальные концентрации оксидов азота и серы в дымовых газах по сравнению с другими составами при идентичных условиях сжигания (рис. 16). Установлено, что для составов No. 1 и No. 4 (или No. 8) максимальное отличие концентраций NO_x составляет 50 %, SO_x – 40 %, в

абсолютных единицах – 150 ppm и 50 ppm, соответственно. Такие отличия являются достаточно существенными, т.к. максимальные концентрации NO_x и SO_x в газообразных продуктах сгорания исходного ФК составляют 340 ppm и 130 ppm (рис. 16a), соответственно.



(a)



(b)

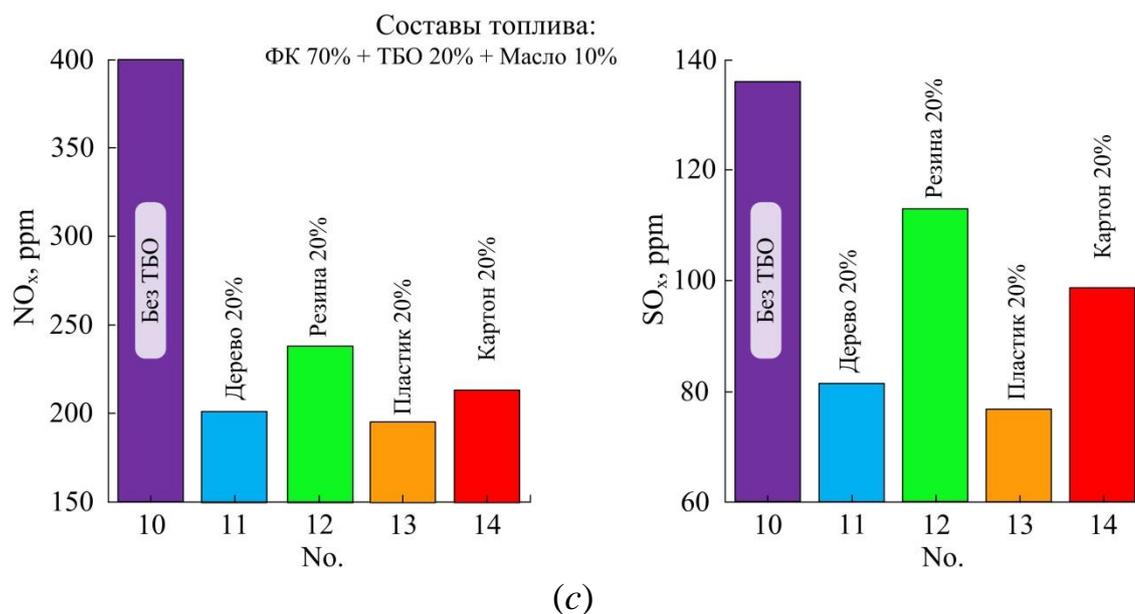


Рисунок 16 – Концентрации NO_x и SO_x в газообразных продуктах сгорания для трех групп составов композиционного жидкого топлива: *a* – I группа; *b* – II группа; *c* – III группа

Согласно элементному составу компонентов топлива (табл. 11) содержание азота и серы в типичных ТБО в 2–10 раз меньше, чем в исходном ФК. Таким образом, при приготовлении I и II групп топливных составов массовая концентрация ФК снижается за счет добавления твердого горючего компонента (древесины, резины, пластика, картона), содержащего меньшее количество азота и серы. Соответственно в результате сжигания такого топлива при условиях, идентичных условиям сжигания состава No. 1 (ФК 100 %) уменьшается концентрация основных антропогенных выбросов NO_x и SO_x в атмосферу (рис. 16*a*, *b*). Для составов с 20 %-й добавкой ТБО (II группа топливных составов) концентрации NO_x и SO_x меньше на 5–10 % по сравнению с соответствующими топливными составами при 10 %-й добавке ТБО (I группа топливных составов).

Стоит отметить, что при добавлении твердых бытовых отходов (например, древесины, пластика, картона) в состав топлива теплота, выделяющаяся в процессе его горения, сопоставима со значением аналогичной характеристики при сжигании ФК без каких-либо добавок (табл. 10). В некоторых случаях,

например, при добавлении резины, тепловой эффект процесса горения топлива существенно превосходит это значение при сжигании исходного ФК (табл. 10). Можно сделать вывод, что при добавлении типичных твердых бытовых отходов в состав композиционного топлива в процессе горения образца идентичной массы выделяется эквивалентное количество энергии с меньшей концентрацией основных антропогенных выбросов.

В случае добавления в топливо отработанного масла (III группа топливных составов) концентрации NO_x и SO_x больше на 18–22 % и на 10–12 % соответственно (рис. 16с) по сравнению с аналогичными характеристиками для топливных составов (рис. 16b) без добавления горючей жидкости (II группа топливных составов). Отрицательный экологический эффект от добавления отработанного масла обусловлен его химическим составом, в частности соединениями серы и азота, а также повышением температур горения, в результате которого происходит интенсификация реакций окисления топливных серы и азота. Однако 10 % концентрация, например, турбинного масла в составе топлива приводит к уменьшению времен задержки зажигания коксового остатка за счет прогрева от газофазного горения не только продуктов разложения угля, но и паров горючей жидкости, а также к снижению температуры зажигания на 20–50 °С. Как следствие, можно за счет снижения температуры компенсировать возможный рост концентраций выбросов NO_x и SO_x на начальном этапе процесса горения. К тому же, добавление жидкого горючего компонента приводит к росту температуры в зоне горения, что оказывает положительное влияние как на снижение содержания диоксинов и фуранов в газообразных продуктах сгорания, так и на характеристики зольного остатка.

Проводя обобщение результатов выполненного в данной работе исследования и известных результатов экспериментальных исследований [87, 89, 91] можно сделать вывод о том, что добавление в композиционное топливо жидкого горючего компонента может способствовать значительному росту концентраций антропогенных выбросов – оксидов серы и азота (иногда на 30–

40 % по сравнению с топливными составами на основе угля и воды). Но если проводить сравнение с сухими углями или исходным ФК, то ухудшение экологических характеристик за счет добавления отработанных масел не является масштабным (табл. 12). Поэтому композиционные жидкие топлива на основе горючих промышленных и бытовых отходов являются перспективными энергоресурсами для промышленной теплоэнергетики. Применение таких топлив на практике, с одной стороны, способствует снижению потребления высококачественного твердого топлива, которое вместо теплоэнергетики может использоваться в химической промышленности для синтеза новых материалов, с другой стороны, способствует решению экологических проблем утилизации ТБО и снижению антропогенных выбросов в атмосферу объектами угольной теплоэнергетики.

Таблица 12 – Нормативные выбросы загрязняющих веществ энергетическими установками [11] и результаты выполненного исследования

наименование загрязняющих веществ	энерготехнологические установки для сжигания ТБО (EU 94/67/ЕЕС), среднесуточные значения	энергетические установки для сжигания твердого топлива (ГОСТ 50831-95), значения при $\alpha=1.4$	результаты выполненного исследования*
1	2	3	4
твердые частицы	10 мг/нм ³	150–250 мг/нм ³	не исследовалось
монооксид углерода, СО	50 мг/нм ³ (43 ppm)	300–400 мг/нм ³ (258–344 ppm)	180–370 ppm
оксиды азота, NO _x	200 мг/нм ³ (160 ppm)	300–640 мг/нм ³ (340–513 ppm)	190–400 ppm
оксиды серы, SO _x	50 мг/нм ³ (19 ppm)	1200–1400 мг/нм ³ (450–526 ppm)	75–135 ppm
хлористый водород, HCl	10 мг/нм ³	не нормируются	не исследовалось
фтористый водород, HF	1 мг/нм ³	не нормируются	не исследовалось

Продолжение таблицы 12

1	2	3	4
тяжелые металлы: ртуть, Hg кадмий таллий, Cd, Tl	среднее по пробам 0,05 мг/нм ³ 0,05 мг/нм ³	не нормируются	не исследовалось
другие металлы (общее значение): Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V	0,5 мг/нм ³	—	не исследовалось

* – приведены диапазоны, полученные путем обобщения результатов (рис. 16) для трех групп составов композиционного жидкого топлива.

2.2.3. Относительные показатели эффективности композитных топлив добавлением отходов

Для оценки целесообразности применения типичных твердых бытовых отходов в качестве компонентов композитных жидких топлив выполнен комплексный анализ, учитывающий экономические, экологические и энергетические аспекты. Авторами [92] представлены два подхода к оценке основных преимуществ применения композитных жидких топлив вместо углей. В рамках этих оценок использовались относительные экологические, технико-экономические и энергетические индикаторы использования таких топлив по сравнению с углем.

Первый подход основан на одновременном учете вычисленных весовых коэффициентов (экология, экономика и энергетика). Определялись отношения антропогенных выбросов при сжигании углей и перспективных композитных жидких топлив [92]. Затем определялись результирующие отношения по всем вредным выбросам. Также были получены зависимости этих отношений от температуры сжигания, рассчитаны отношения теплот сгорания разных образцов топлива. При расчете экономических индикаторов учитывалась средняя рыночная стоимость компонентов исследованных составов топлива.

Второй подход заключался в вычислении комплексного коэффициента, характеризующего выделение энергии (МДж) в процессе горения в расчете на стоимость (\$) топливной суспензии и концентрацию основных вредных выбросов (ppm). Именно такой подход использован в данной работе для оценки перспектив применения на практике композитных топлив на основе кека с добавлением твердых бытовых отходов.

Расчеты выполнены для пяти составов топлива с использованием выражений [92]:

$$D_{CF+MSW}^{NOx} = Q_{s, V}^{a, CF+MSW} / (C_{CF+MSW} \cdot NO_{x_CF+MSW});$$

$$D_{CF+MSW}^{SOx} = Q_{s, V}^{a, CF+MSW} / (C_{CF+MSW} \cdot SO_{x_CF+MSW});$$

$$D_{CF+MSW}^{NOx\&SOx} = D_{CF+MSW}^{NOx} \cdot D_{CF+MSW}^{SOx},$$

где D – показатель эффективности;

$Q_{s, V}^a$ – тепловой эффект процесса горения топлива (табл. 11), МДж/кг;

C – стоимость, \$/кг;

NO_x – концентрация оксида азота (рис. 16), ppm;

SO_x – концентрация оксида серы (рис. 16), ppm;

индексы CF+MSW – композитное топливо с добавлением твердых бытовых отходов, NO_x – оксид азота, SO_x – оксид серы.

Максимальные значения концентраций антропогенных выбросов (рис. 17 и 18) при $T_g=1000$ °C использованы в расчетах. Стоимости разных составов топлива вычислялась пропорционально концентрации компонентов. Предполагалось, что основной вклад в стоимость отхода углеобогащения (кек) и твердых бытовых отходов (древесина, резина, пластик, картон) составляют затраты на их транспортировку от места складирования до места приготовления топлива – 0,0058 \$/кг.

Для наглядной иллюстрации преимуществ применения топлив с добавлением твердых бытовых отходов введен относительный показатель эффективности, равный отношению показателя эффективности композитного топлива с добавлением твердых бытовых отходов к показателю эффективности композитного топлива без каких-либо добавок:

$$D_{relative} = D_{CF+MSW}^{NOx\&SOx} / D_{CF}^{NOx\&SOx}.$$

Результаты расчетов приведены на рисунке 19. Для состава No. 1 (кек 100 %) $D_{relative} = 1$, т.к. для анализа эффективности добавления твердых бытовых отходов в состав композитных жидких топлив сравнение показателей эффективности составов топлива No. 2–4 выполнено с аналогичной характеристикой для чистого кека. Значения $D_{relative} > 1$ для составов топлива No. 2–4 иллюстрируют перспективность применения на практике технологии утилизации твердых бытовых отходов путем сжигания в составе жидких композитных топлив.

Полученные результаты (рис. 17) позволяют сделать вывод, что с точки зрения комплексного показателя эффективности, учитывающего экономический, экологический и энергетический аспекты, более приоритетными являются составы No. 3 (кек К 90 % + резина 10 %); No. 5 (кек К 90 % + картон 10 %). Тем не менее, эффективность всех составов композитных жидких топлив с добавлением твердых бытовых отходов выше аналогичного показателя для кека в 1,5–3 раза (рис. 17).

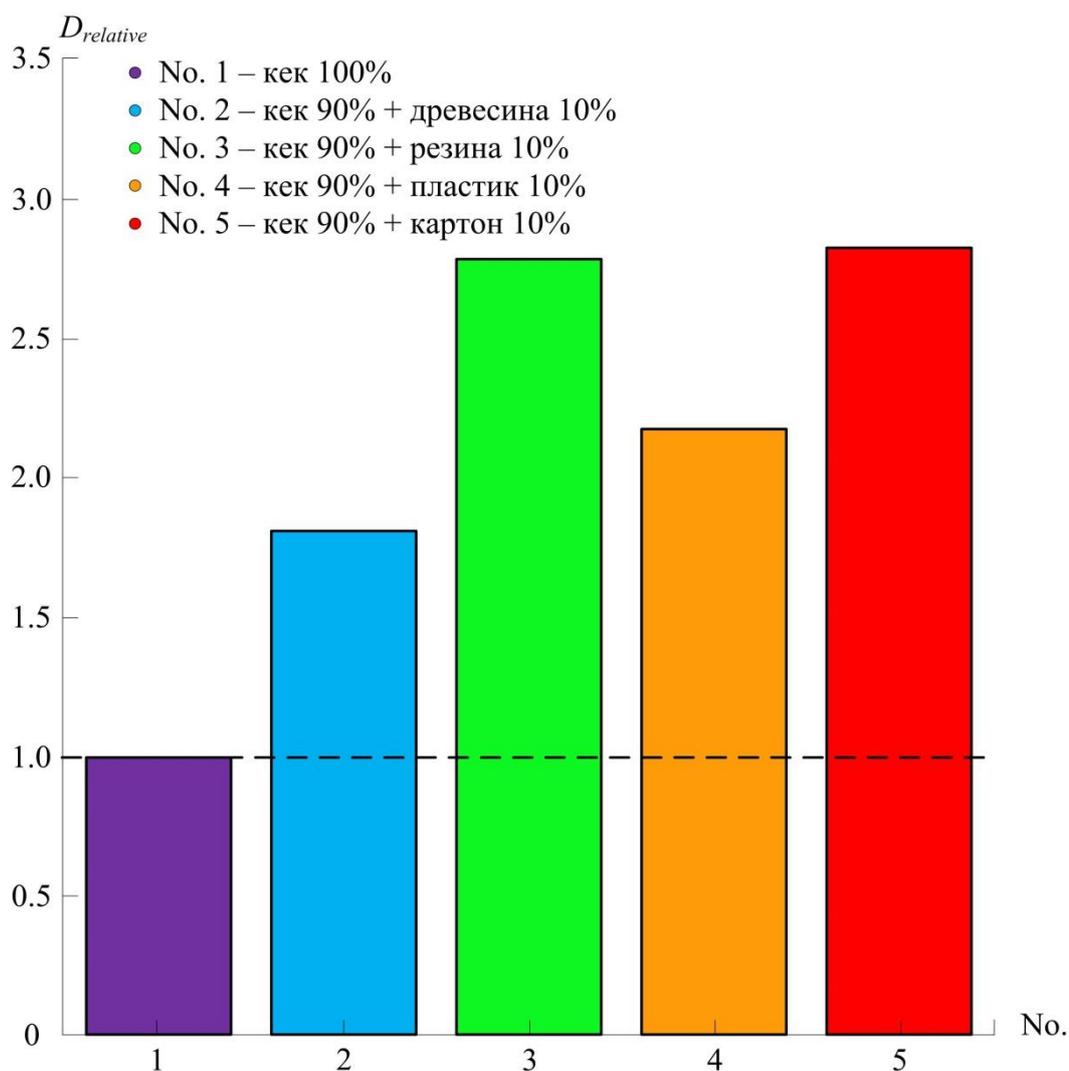


Рисунок 17 – Относительные показатели эффективности применения на практике композитных топлив с разным компонентным составом

2.3. Основные результаты выполненного исследования

1. На основании результатов выполненного экспериментального исследования с использованием метода высокоскоростной видеорегистрации установлен механизм зажигания и горения одиночных капель трех групп составов композиционного жидкого топлива на основе ФК с добавлением в качестве горючих компонентов мелкодисперсных частиц типичных ТБО (древесины, резины, пластика, картона), а также отработанного турбинного масла.

2. Разработана и представлена схема физической модели процесса. Выделена совокупность взаимосвязанных основных стадий процесса взаимодействия одиночной капли композиционного жидкого топлива с неподвижным разогретым воздухом: инертный прогрев, испарение влаги из приповерхностного слоя, термическое разложение твердых горючих компонентов (уголь и бытовые отходы), смешение горючих газов и паров с окислителем, воспламенение газовой смеси и ее выгорание, прогрев твердого остатка, его гетерогенное зажигание и горение.

3. Обоснована устойчивость зажигания и горения капель композиционного топлива на основе горючих промышленных и бытовых отходов до полного выгорания в условиях, характерных для топок котлов. Установлены области гарантированных времен задержки зажигания трех групп топливных композиций разного состава при температурах окружающей среды 600–1000 °С. Минимальные значения времен задержки зажигания составляют около 3 с, максимальные – около 25 с.

4. Для разных составов композиционного топлива установлены отличия (до 20 %) времен задержки зажигания, которые более явно выражены при близких к предельным условиям зажигания, а также отличия температур в процессе горения, максимальные значения которых достигают 1300 °С для составов с добавлением 10 % отработанного турбинного масла. Достаточно высокие температуры в процессе горения композиционных топлив, содержащих ТБО, положительно влияют на снижение концентрации диоксинов и фуранов в дымовых газах.

5. Выполнен анализ основных антропогенных выбросов в газообразных продуктах сгорания. Концентрации оксидов углерода при сжигании топлива с разными компонентами из числа типичных ТБО отличаются менее существенно по сравнению с оксидами азота и серы и составляют: CO_2 – 16–18 %, CO – не более 370 ppm. Чем больше ТБО в составе композиционного топлива, тем меньше концентрации NO_x и SO_x в газообразных продуктах сгорания по сравнению с исходным ФК. Добавление же отработанного масла в

такие топливные композиции ведет к увеличению концентрации антропогенных выбросов. Для составов с 20 %-й добавкой ТБО концентрации NO_x и SO_x меньше на 4–7 % по сравнению с топливными составами при 10 %-й добавке ТБО. В случае добавления в топливо отработанного масла концентрации NO_x и SO_x больше на 18–22 % и на 10–12 % по сравнению с аналогичными топливными составами без добавления горючей жидкости.

6. При добавлении в состав композиционного топлива разных ТБО максимальное отличие концентраций NO_x составляет 50 %, SO_x – 40 %. В абсолютных единицах значения этих отличий составляют 150 ppm и 50 ppm, соответственно. Такие отличия являются достаточно существенными, т.к. максимальные концентрации NO_x и SO_x в газообразных продуктах сгорания исходного ФК составляют 340 ppm и 130 ppm, соответственно.

7. Добавление в композиционное топливо жидкого горючего компонента может способствовать росту концентраций антропогенных выбросов – оксидов серы и азота (иногда на 30–40 % по сравнению с топливными составами на основе угля и воды). Но по сравнению с сухими углями или исходными ФК, ухудшение экологических характеристик не превышает предельно допустимые нормативные выбросы загрязняющих веществ энергетических установок для сжигания твердого топлива. Поэтому полученные результаты являются основой для разработки экологически, энергетически и экономически эффективной технологии утилизации твердых бытовых отходов путем сжигания в составе композиционных топлив на тепловых электрических станциях вместо угля.

3. Разработка АСР

3.1 Описание объекта автоматизации

Котельный агрегат типа БКЗ-420-140 Таганрогского котельного завода – это однобарабанный котел с естественной циркуляцией, предназначенный для получения пара высокого давления при сжигании Азейских бурых углей.

Компоновка пылеугольного котла выполнена по П-образной схеме. Топочная камера является первым восходящим газоходом. В верхней части топки размещен ширмовый пароперегреватель. В горизонтальном газоходе расположены конвективные поверхности нагрева пароперегревателя. В опускном газоходе расположены экономайзер и воздухоподогреватель.

Также на котлоагрегате типа БКЗ-420-140 (рис. 18) в качестве основного топлива используется уголь Переясловского разреза, марки “ЗБР”, который можно сжигать как в чистом виде, так и в смеси в любой пропорции с Азейским, Ирша-Бородинским, Ирбейским бурым углем.

Котел спроектирован для работы с параметрами:

- 1) паропроизводительность котлоагрегата 420 т/ч;
- 2) минимальная нагрузка при номинальных параметрах пара 210 т/ч;
- 3) давление перегретого пара на выходе из котлоагрегата 13,8 МПа;
- 4) расчетное давление в барабане парового котла 15,3 МПа;
- 5) температура перегретого пара 560 °С;
- 6) температура питательной воды 233 °С;
- 7) температура уходящих газов 139 °С.

Таблица 13 – Основные характеристики применяемых углей

Характеристики угля	Уголь Азейский	Уголь Ирша-Бородинский	Уголь бурый Ирбейский
W^a , %	25	33	28,9
A^d , %	16,5	11	10,3
V^{daf} , %	48	47	47
Q_s^a , МДж/кг	16,9	15,3	16,7

Для котельного агрегата БКЗ-420 в качестве растопочного топлива предусмотрен мазут марки М100, характеристики приведены в таблице 14.

Таблица 14 – Физико-химические показатели мазута марки М-100

Наименование показателей Мазута М-100	Значение
Массовая доля механических примесей, %	1,0
Кинематическая вязкость при 80 °С, м ² /с (сСт)	118·10 ⁻⁶ (118,0)
Массовая доля серы в мазуте	3,5
Температура застывания, °С	25
Зольность, %	0,05
Температура вспышки в открытом тигле, °С	110
Содержание водорастворимых кислот и щелочей	Отсутствие
Плотность при 20 °С, кг/м ³	Не нормируется, определяется обязательно
Теплота сгорания (низшая в пересчете на сухое топливо (небраковочная)), МДж/кг	39,9

Котлоагрегат оборудован индивидуальной системой пылеприготовления, с прямым вдуванием пыли в топку, в состав системы входит четыре молотковые мельницы типа ММТ–1550/2510/740, два дымососа типа Д–21,5×2 и два дутьевых вентилятора типа ВДН–24–2У.

При процессе регулирования подачи топлива в паровой котел, а именно в режимах растопки горелочных устройств, важно не допустить снижения давления топлива до уставки, при которой срабатывает система защиты на останов котельного агрегата. В практике эксплуатации и наладки регулирующие устройства топлива часто оснащаются устройствами, блокирующими действие самого регулятора на закрытие клапана при пониженном значении давления. Низкая эффективность работы таких блокировок заключается в устранении только последствия первопричины, которая привела к понижению давления. Реализация подобных защитных мероприятий требует специальной алгоритмической подготовки, а их внедрение будет возможна только на базе микропроцессорных систем управления.

В топливных трактах обычно устанавливаются по два клапана (основной и пусковой) поворотного типа.

На рисунке 19 представлена схема регулирования процесса горения в топочной камере котла, который работает с переменным составом горелок, при отсутствии измерения расхода воздуха. Регулирующее устройство РОВ поддерживает заданное значение давления в перемычке за РВП в соответствии с уставкой давления сжигаемого топлива. Соотношение этих значений давлений подбирается из режимной карты и остается постоянным для данного типа котлоагрегата, который зависит только от вида энергоносителя и числа работающих горелочных устройств. Статические характеристики давления мазута и давления воздуха при переходе от шести горелок к восьми изменяются, но их крутизна примерно сохраняется.

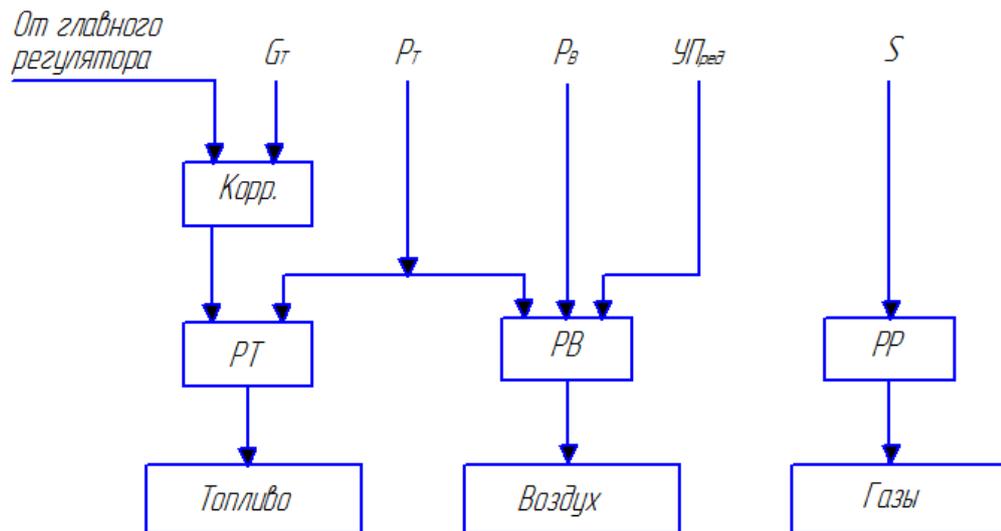


Рисунок 19 – Схема регулирования процесса горения в топке котла, работающего с переменным составом горелок

Регулирующее устройство топлива реализовано по каскадной схеме. Стабилизирующий контур поддерживает значение давления топлива за регулирующим клапаном согласно уставке, которая поступает от корректирующего регулятора по кислороду. Корректор поддерживает расход жидкого топлива пропорционально заданной нагрузке котла. Так как отключение-включение горелочных устройств является сильным возмущением по топливу и имеет небольшое количество горелок, стабилизация давления в подобных режимах весьма необходима. Особенно это относится к включению горелочных устройств, где сопровождающий этот процесс провал давления топлива может затруднить параллельной работой регулятора расхода.

Следовательно, в такой схеме формируется автоматическое задание регулирующему устройству давления топлива, которое определяется нагрузкой котельного агрегата.

3.2 Разработка структурной схемы АСР горения композиционного топлива в топке котла типа БКЗ-420-140

Оптимизация процессов горения в паровых котельных агрегатах осуществляется посредством внедрения автоматизированной системы контроля и управления процессом горения топлива в топке котла.

Автоматизированная система регулирования процесса горения топлива в топке котла выполнена на основе микропроцессорной техники, представляет собой систему, реализующую принцип функционально-группового управления и реализована в трёх уровнях. Структурная схема представлена на листе с шифром ФЮРА.421000.001 С1.

Нижний уровень представляет собой совокупность первичных средств измерения температуры, давления и расхода местных показывающих приборов, а также другого оборудования, необходимого для контроля всех технологических параметров системы. Все оборудование нижнего уровня должно быть размещено на технологическом объекте или в непосредственной близости от него, на приборных щитах.

Технические средства среднего уровня включают в себя шкаф управления. Оборудование среднего уровня автоматизированной системы выполняет функции сбора информации с датчиков (расхода, температуры, давления и т.д.), линеаризации, фильтрации и масштабирования входных аналоговых сигналов, автоматический контроль над технологическим оборудованием топки котельного агрегата. Также средства среднего уровня необходимы для передачи информации о состоянии технологического оборудования на верхний уровень системы автоматизации.

К верхнему уровню АСУ ТП относится автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора. Верхний уровень предназначен для приема и отображения информации со среднего уровня станции, визуализации технологического процесса, централизованного хранения текущих и архивных параметров, предоставления отчетности эксплуатирующему персоналу. Контроль над технологическим процессом осуществляется оператором с пульта

управления через персональный компьютер с мнемосхемой АСУ ТП. Обслуживающий персонал только даёт команды на «Пуск» или «Стоп» того или иного оборудования или вносит свои корректировки в технологический процесс работы источника тепловой энергии.

АРМ оператора представляет собой персональный компьютер офисного исполнения с комплектной клавиатурой, мышью, монитором и принтером. Все АРМ обычно идут комплектно с системным, офисным и прикладным программным обеспечением. Станция инженера позволяет с помощью специализированного программного обеспечения (ПО) изменять конфигурацию, логику выполнения ПЛК.

Подсистема технологических защит обеспечивает возможность нормальной эксплуатации оборудования во всех режимах работы, включая пусковые, без вмешательства оперативного персонала в работу технологических защит. Интерфейсная часть подсистемы технологических защит и блокировок выполнена в удобном для понимания алгоритма виде и позволяет оперативно и быстро разобраться в причинах включения защиты или блокировки.

Технологические защиты предусматривают:

- 1) автоматическое и ручное включение/отключение;
- 2) санкционированную корректировку заданных уставок защиты;
- 3) регистрацию и контроль действия первопричины срабатывания;
- 4) формирование протоколов аварийных ситуаций, которые регистрируют изменения аналоговых и дискретных параметров до и после аварии.

Организация сетей передачи данных осуществляется посредством сетей Ethernet, RS-485.

Входными параметрами при розжиге являются: расход воздуха Q_v , расход $Q_{\text{конт}}$ теплоносителя контура, давление дутьевого воздуха P_v , разрежение в топке P_t , датчики температуры в топочной камере котла, дискретные датчики

состояния. Выходные параметры: температура теплоносителя контура $T_{тн}$, температура дымовых газов $T_{дг}$.

Датчики нижнего уровня передают сигналы в программируемый логический контроллер, после ПЛК обрабатывает поступающие сигналы. На основании полученных данных формируются управляющие воздействия на регулирующие органы системы автоматизации.

Для обеспечения устойчивого воспламенения угольной пыли требуется текущий контроль температуры топочной камеры, которая должна находиться в пределах 800–1700 °С.

Контроллер обеспечивает оптимальное изменение подачи топлива для получения переходного процесса с заданными показателями качества.

3.3 Разработка функциональной схемы и составление заказной спецификации приборов и средств автоматизации

3.3.1 Разработка функциональной схемы

Измерительная информация о ходе технологического процесса и о состоянии основного и вспомогательного оборудования содержит в основном сведения о теплотехнических величинах, измеренных приборами или измерительными системами. Процесс измерения величин и совокупность средств, осуществляющих эти измерения, носят название теплотехнического контроля.

При разработке функциональной схемы автоматизации и выборе технических средств были учтены основные особенности технологического процесса, параметры и физико-химические свойства технологических сред, агрессивность и токсичность окружающей среды, условия взрывоопасности, расстояние от мест установки датчиков, отборных и приёмных устройств до постов контроля, требуемая точность и быстродействие средств данной АСУ ТП.

Функциональная схема автоматизированной системы регулирования процессом горения композиционного топлива в топке котла представлена на листе с шифром ФЮРА.421000.001 С2.

Автоматизация процессов горения топлива приводит к:

- 1) снижению предельно-допустимых выбросов вредных веществ (ПДВ);
- 2) повышению надежности, безопасности процесса выработки тепловой энергии потребителям;
- 3) устранению проблемы, связанной с перерасходом пылеугольного топлива.

Процесс сжигания топлива начинается с подачи композиционного топлива насосом 14а в топку котла через растопочные вихревые горелки. В топке котла температура измеряется при помощи датчиков температуры 1а.

При помощи датчика давления-разрежения 7а поддерживается разрежение в топочной камере, путем изменения мощности вентилятора дымовых газов.

Поддержание заданной температуры в топочной камере осуществляется путем регулирования подачи воздуха в топку исполнительным механизмом 16а по сигналу от датчика наличия свободного кислорода в дымовых газах 13а.

Разрежение в топке поддерживают до полного выгорания топлива и остывания топки до заданной температуры работой вентиляторов дымовых газов 16а.

Управление мельничными вентиляторами и дымососами осуществляется через ПЛК, которое активизируется при срабатывании аналоговых датчиков давления-разрежения, температуры или расхода.

Перечень входных и выходных сигналов, представлен в таблице 15.

Таблица 15 – Перечень входных/выходных сигналов

N	Наименование параметра (единица измерения)	Поз.	Тип датчика, прибора	AI	AO	DI	DO
1	Расход воздуха	2	ЭЛЕМЕР 100 ДД	+			
2	Расход воды	3	ЭЛЕМЕР 100 ДД	+			
3	Расход пара потребителю	4	FLONET FS10XX	+			
4	Температура в топке котла	5	ТСП-012	+			
5	Температура вторичного воздуха	6					
6	Температура пылеугольного тракта	8					
7	Температура дымовых газов	9					
8	Температура питательной воды	10					
9	Давление-разрежение в топке	11	Элемер АИР-10Н	+			
10	Давление топливного тракта	12					
11	Давление пара	13					
12	Давление вторичного воздуха	14					
13	Кислород в дымовых газах	15	GD-77	+			

3.4 Выбор оборудования нижнего уровня автоматизации

3.4.1 Выбор датчиков температуры

Температуры в топочной камере парового котла БКЗ-420-140 могут достигать до 1600 °С, и поэтому в качестве датчиков температур рекомендуется использовать термопреобразователи с НСХ ПР и ПП. Рассмотрим модели наиболее популярных производителей термопар. Характеристики некоторых термопар приведены в таблице 16.

Таблица 16 – Технические характеристики некоторых термопар

Наименование	ТПУ 0304/М1 ПП (S)	ТПР-0192	Rosemount 3144Р 1075 ПП (S)
Диапазон измерений	0...+1700 °С	+600...+1600 °С	-40...+1800 °С
Выходные сигналы	4...20 мА	4...20 мА	4...20 мА
Класс допуска	1	1	1

Выберем термоэлектрические преобразователи серии ТПУ 0304/М1 ПП (S) (рис. 20), которые зарекомендовали себя как надежные и долговечные приборы.

В клеммную головку первичного преобразователя встроен измерительный преобразователь. В состав данных ТЭП входит компенсатор температуры «холодного спая».

Термопреобразователи используются для работы с жидкими, твердыми и газообразными средами. Также использование термопреобразователей допускается для контроля температуры сыпучих сред, неагрессивных, а также агрессивных, по отношению к которым материалы, контактирующие с измеряемой средой, являются коррозионностойкими к материалу, из которого изготовлен корпус прибора.



Рисунок 20 – Внешний вид термоэлектрического преобразователя серии ТПУ 0304/М1

3.4.2 Выбор датчиков давления-разрежения

Необходимо поддерживать давление-разрежение в высокотемпературной среде. В соответствии с этим рассмотрим модели датчиков различных производителей и сравним их технические характеристики.

Интеллектуальные датчики давления серии Метран-150 предназначены для измерения и непрерывного преобразования в унифицированный аналоговый токовый сигнал и/или цифровой сигнал в стандарте протокола HART, или цифровой сигнал на базе интерфейса RS-485 давления-разрежения. Датчики Метран-150 имеют компактную конструкцию, имеют поворотный электронный блок и ЖКИ. Датчики Метран-150 изготавливаются в соответствии с самыми высокими требованиями к контрольно-измерительным приборам. Данные типы датчиков сохраняют работоспособность при кратковременном повышении токов или напряжений сверх установленных величин, также имеют высокую перегрузочную способность, обладают защитой от переходных процессов. Отдельная внешняя кнопка установки "нуля" и диапазона. Постоянная самодиагностика датчика дает необходимый уровень надежности и защищенности технического процесса.

Датчик давления Rosemount 2051 также предназначен для измерения давления разрежения и непрерывного преобразования значения измеряемого параметра в аналоговый, либо цифровой выходной сигнал. Датчик изготавливается из различных материалов и с разными вариантами технологических соединений. Различные варианты исполнения – фланец Coplanar, традиционное фланцевое соединение, штуцерное исполнение, фланцы уровня – позволяют выбрать прибор, соответствующий конкретным условиям эксплуатации.

Датчики АИР-10Н предназначены для непрерывного преобразования избыточного давления-разрежения в унифицированный выходной токовый сигнал равный 4...20 мА и цифровой сигнал в стандарте протокола HART. Датчики оснащены современными тензорезистивными сенсорами с металлическими и керамическими мембранами. Тензорезистивные сенсоры с

металлической разделительной мембраной из нержавеющей стали 316L, выполненные по технологии КНК, имеют высокую перегрузочную способность до 300 % от верхнего предела измерений. Примененные в датчиках керамические сенсоры обладают высокой стойкостью к перегрузкам (до 600 %) и особо высокой стойкостью к агрессивным средам.

Технические характеристики некоторых датчиков давления-разрежения приведены в таблице 17.

Таблица 17 – Технические характеристики некоторых датчиков давления-разрежения

Наименование	Элемер АИР-10Н	Метран-150	Rosemount 2051
Диапазон измерений	±5 кПа	0,25...6,30 кПа	±5 кПа
Выходные сигналы	4...20 мА, HART;	4...20 мА, HART; 0...5 мА	4...20 мА, HART
Пылевлагозащита	IP65	IP66	IP66

Выберем датчик давления-разрежения Элемер АИР-10Н, который является достаточно надежным средством измерения давления-разрежения в топке котла, а также стоимость такого типа датчика ниже, чем у остальных. Датчики давления данного типа являются малогабаритными (рис. 21)



Рисунок 21 – Датчик давления-разрежения Элемер АИР-10Н

3.4.3 Выбор расходомеров

В процессе работы котельных агрегатов необходимо измерять расходы не только несжимаемых жидкостей, таких как питательная вода, но и расход первичного, вторичного воздуха, подающегося в топочную камеру парового котлоагрегата, также расхода пара потребителю. Обязательно требуется учитывать характеристики и особенности данных измеряемых сред при выборе расходомеров.

В качестве датчика расхода питательной воды можно использовать датчики дифференциального давления, как наиболее распространённый и дешёвый вариант. Датчик должен обеспечивать высокую точность измерения.

Датчик типа ЭЛЕМЕР-100 является одним из лучших российских интеллектуальных датчиков давления с широкими функциональными возможностями. Датчики предназначены для непрерывного преобразования в унифицированный токовый выходной сигнал и/или цифровой сигнал в стандарте протокола HART, или цифровой сигнал на базе интерфейса RS-485 по протоколу Modbus RTU входных измеряемых величин. Датчики оснащены современными тензорезистивными или емкостными сенсорами. Датчики оснащены многофункциональным 5-разрядным ЖК-индикатором с подсветкой и графической шкалой.

Расходомеры Метран-350SFA на базе осредняющей напорной трубки Annubar предназначены для измерения расхода жидкости, газа, пара в системах автоматического контроля, регулирования и управления технологическими процессами в различных отраслях промышленности, а также в системах технологического и коммерческого учета.

Технические характеристики некоторых датчиков дифференциального давления приведены в таблице 18.

Таблица 18 – Технические характеристики датчиков дифференциального давления

Наименование	Метран-350SFA	ЭЛЕМЕР-100 ДД	Rosemount 3051
Диапазон измерений	до 25 МПа	0,063 кПа...16 МПа;	до 25 МПа
Выходные сигналы	4...20 мА, HART;	0...5 мА; 0...20 мА; 4...20 мА; HART; Modbus RTU;	4...20 мА HART
Погрешность	± 0,75 %	± 0,15 %	± 0,025 %
Пылевлагозащита	IP65	IP65, IP54	IP66

Выберем преобразователь давления ЭЛЕМЕР-100-ДД, так как обладает достаточно высокой точностью измерения и подходящими эксплуатационными характеристиками.

Для измерения расхода воздуха также выберем аналогично преобразователь давления ЭЛЕМЕР-100-ДД (рис. 22), но во взрывозащищенном исполнении.



Рисунок 22 – Датчик давления ЭЛЕМЕР-100-ДД

3.4.4 Выбор газоанализатора

Подача пылеугольного топлива производится по сигналу от датчика наличия свободного кислорода в дымовых газах, присутствующего в

большинстве газоанализаторов. Существует много типов газоанализаторов, наиболее распространенные из них это:

- электрохимические;
- термохимические;
- оптические.

Термохимические газоанализаторы имеют низкую стоимость, но вместе с этим низкую избирательность; маленький диапазон измеряемой концентрации; непродолжительный срок службы сенсора; низкое быстродействие и чувствительность; для работы требует наличие кислорода.

Электрохимические газоанализаторы позволяют обнаруживать даже мельчайшие частицы вредных газов; имеют широкий диапазон определения загрязняющих органических и неорганических веществ; низкое энергопотребление; однако вместе с этим имеют низкую селективность; крупные массогабариты.

Оптические газоанализаторы имеют высокую чувствительность; высокое быстродействие; селективность и чувствительность; они позволяют определять практически все загрязняющие газы и вещества, но имеют высокую стоимость.

В таблице 19 приведены разные модели газоанализаторов.

Таблица 19 – Технические характеристики газоанализаторов

Производитель	Модель	Определяемые вещества	Количество каналов
1	2	3	4
НПП «ОРИОН»	Дозор-С	NH ₃ , CO, O ₂ , CO ₂ , NO ₂ , CL ₂ , SO ₂	1-5 (IP 65), 1-8(IP 40)
НПП «ЭЛЕКТРОСТАНДАРТ»	ЭГС	CH ₄ , C ₃ H ₈ , CO ₂ , C ₂ H ₅ OH, H ₂ , O ₂ , CO, H ₂ S, NH ₃ , SO ₂	1-2, 1-64
ООО «ЛИФОТ»	Testo 350	CO, O ₂ , C _x H _y , SO ₂ , NO ₂ , NO	4-6

Так как требуется измерять только процент содержания кислорода в дымовых газах, выберем газоанализатор АКВТ-01 (рис. 23).



Рисунок 23 – Газоанализатор АКВТ-01

3.4.5 Выбор преобразователя частоты

Регулирование числа оборотов электродвигателей дымососа, дутьевого и мельничного вентиляторов осуществляется с помощью таких устройств, как преобразователей частоты (ПЧ). Приведем описание основных технических характеристик, выбранных в данной работе ПЧ от компании «Siemens» (рис. 24).

ПЧ типа «Micromaster 420» используются для решения широкого круга задач, которые требуют применение приводов с варьируемыми скоростями вращения. Данный тип преобразователей часто используют для приводов вентиляторов и насосов.

Преимуществами устройства являются:

- 1) простота в эксплуатации;
- 2) модульное исполнение (гибкая конфигурация);
- 3) высокая производительность;
- 4) широкий диапазон сетевых напряжений питания;
- 5) автоматический повторный запуск после нарушений режима работы ПЧ.



Рисунок 24 – Внешний вид преобразователя частоты «Micromaster 420»

3.4.6 Выбор программируемого логического контроллера

Для выбора оптимального контроллера для системы автоматизации рассмотрим требования, которые обычно предъявляются к его устройству и эксплуатации:

- автоматизированная система должна быть построена на микропроцессорных контроллерах промышленного назначения (ГОСТ Р МЭК 61508-1-2007);
- программируемый контроллер, который входит в состав системы автоматизации должен иметь модульную архитектуру, а также предусматривать возможность замены аппаратных коммуникационных модулей и модулей ввода/вывода без остановки работы контроллера;
- ПЛК, входящий в состав системы автоматизации, должен поддерживать стандарт МЭК 61131-3;
- прикладное программное обеспечение (ПО) должно сопровождаться специализированной программной средой для визуальной конфигурации прикладных данных ПЛК, диагностики всех модулей, тестирования всех функций;

– в ПЛК должна функционировать операционная система реального времени, обеспечивающая обработку критически важных прерываний за заданное время;

– ПЛК должен реализовывать функции самодиагностики всех модулей и целостности ПО.

Проведем сравнение ПЛК разных производителей.

Программируемый логический контроллер ЭЛСИ-ТМ используется для решения задач автоматизированных систем средней и высокой степени сложности. Удобная модульная конструкция контроллера ЭЛСИ-ТМ, расширенные коммуникационные возможности, возможность применения структур локального и распределенного ввода-вывода, работа с естественным охлаждением, множество функций, которые поддерживаются на уровне операционной системы, достаточно высокое удобство эксплуатации и обслуживания обеспечивают возможность получения оптимальных решений для построения систем управления технологическими процессами в различных отраслях промышленности.

Использование разных типов центральных процессоров, отличающихся производительностью, наличие большого выбора модулей ввода-вывода аналоговых и дискретных сигналов, функциональных модулей и коммуникационных процессоров повышает эффективность применения контроллеров ЭЛСИ-ТМ.

Программируемые контроллеры ЭЛСИ-ТМ имеют модульную конструкцию и состоят из таких элементов:

- 1) центральные процессоры (CPU). В зависимости от сложности задачи в ПЛК могут быть использованы различные типы центральных процессоров, которые отличаются производительностью, размером памяти, количеством и типом встроенных коммуникационных интерфейсов, наличием или отсутствием встроенных входов-выходов и специальных функций и т.д.

2) блоки питания (PS), обеспечивают бесперебойное питание ПЛК от сети переменного тока напряжением 120/230 В или от источника постоянного тока напряжением 24/48/60/110 В.

3) сигнальные модули (SM), которые предназначены для ввода и вывода дискретных или аналоговых сигналов с различными электрическими и временными параметрами.

4) коммуникационные модули (CP) обеспечивают возможность подключения к сетям Industrial Ethernet, PROFIBUS или организации связи по PtP (point to point) интерфейсу.

5) функциональные модули (FM), решающие самостоятельно задачи автоматического регулирования обработки сигналов, позиционирования. Такие модули снабжены встроенным микропроцессором и выполняют встроенные в них функции даже в случае отказа центрального процессора программируемого логического контроллера.

б) интерфейсные модули (IM), обеспечивают возможность подсоединения к базовому блоку (стойка с CPU) стоек расширения ввода-вывода. Программируемые контроллеры ЭЛСИ-ТМ также позволяют использовать в своем составе до 32 сигнальных и функциональных модулей, коммуникационных процессоров, распределенных по 4 монтажным стойкам.

Центральные процессоры контроллера ЭЛСИ-ТМ оснащены набором встроенных входов и выходов, а также набором встроенных функций, что позволяет применять эти процессоры в качестве готовых блоков управления.

Рассмотрим для сравнения программируемый логический контроллер фирмы Schneider Electric (Франция). Серия данных программируемых контроллеров типа Modicon M340 также является подходящим вариантом решения для задач управления, на базе высокопроизводительных совместимых программируемых контроллеров. Данный тип ПЛК хорошо сочетает в себе мощь с инновационными технологиями, всецело удовлетворяя требованиям производителей оборудования. Данный контроллер идеально подходит для использования совместно с Modicon Quantum и Modicon Premium в качестве

мощного инструмента для разработки автоматизированной системы для определенных технологических процессов и инфраструктуры.

Воспользуемся контроллером ЭЛСИ-ТМ (рис.25), который обеспечивает надежность, гибкость и функциональность системы управления.

Все необходимые технические характеристики о приборах и технических средствах автоматизации для реализации автоматизированной системы регулирования процесса горения композиционного топлива в топке котла представлены в заказной спецификации приборов и средств автоматизации.



Рисунок 25 – Внешний вид программируемого логического контроллера ЭЛСИ-ТМ

3.5 Составление заказной спецификации

Спецификация представляет собой техническую документацию, в которой отображены все необходимые сведения о контрольно-измерительных приборах и технических средствах автоматизации для реализации системы контроля и управления.

Спецификация предназначена для: составления сводных заказных ведомостей, чтения проектной документации, подготовки и организации

монтажных работ и т.д. По ней производится закупка приборов и средств автоматизации, необходимых для реализации решений, принятых при разработке технического проекта.

Заказная спецификация на оборудование автоматизированной системы регулирования процесса горения композиционного топлива в топке котла типа БКЗ-420-140 представлена в приложении Б.

3.6 Разработка принципиальной электрической схемы соединений шкафа управления

Принципиальная электрическая схема отображает все устройства и элементы, которые входят в состав изделия, их входные и выходные элементы (т.е. соединители, зажимы, платы), а также показывается соединение между всеми этими устройствами и элементами. По принципиальной схеме осуществляется проверка правильности электрических соединений при монтаже и наладке электрооборудования. От качества разработки принципиальной электрической схемы зависит корректность работы производственного механизма, также его надежность и производительность при эксплуатации.

В процессе разработки автоматизированных систем различных технологических процессов принципиальные электрические схемы разрабатывают в следующем порядке:

- 1) на основании функциональной схемы составляют технические требования, предъявляемые к принципиальной электрической схеме;
- 2) согласно этим требованиям задают условия и последовательность действия схемы;
- 3) каждое из заданных условий действия схемы отображают в виде тех или иных элементарных цепей, которые отвечают данному условию действия;
- 4) осуществляют выбор аппаратуры и электрический расчет параметров некоторых отдельных элементов;
- 5) корректировка схемы осуществляется в соответствии с

возможностями принятой аппаратуры;

б) проверяется возможность возникновения ложных или обходных цепей в схеме или ее некорректной работы при повреждениях элементарных цепей и контактов;

7) далее, рассматривают все возможные варианты решения и принимают окончательную схему применительно к имеющейся аппаратуре.

Принципиальная электрическая схема соединений шкафа управления (ШУ) представлена на листах ФЮРА.421000.001 Э4.

Питание шкафа управления автоматизированной системы контроля и управления процессом горения композиционного топлива в топке котла осуществляется от двухфазной цепи с переменным напряжением 220 В. Через клеммы ХТ0 и ХТ01 осуществляется питание ШУ системы.

Для защиты всего оборудования от перегрузок и токов короткого замыкания, которое устанавливается внутри ШУ, все питающие напряжения подаются через отдельные автоматические выключатели.

На входе цепи питания 220 В предусмотрена защита от перенапряжения РТ 2-РЕ/S-230АС-ST (Z01). Для резервирования питания и преобразования напряжения сети переменного тока 220 В в постоянное напряжение 24 В используется импульсный источник питания типа EF UPS EF UPS 1AC/24DC-4 (G1) с блоком аккумуляторной батареи АБ-24М (G2), который обеспечивает автономную работу всех устройств, входящих в состав ШУ. Также данные блоки питания G1 и G2 поддерживают неизменным напряжение при некотором значении перезагрузки, выпрямляют его и отсекают его при коротком замыкании на выходе.

В шкафу предусмотрено внутреннее рабочее освещение (лампа EL1) для обслуживания и ремонта. Концевой выключатель SQ1 предназначен для автоматического включения лампы при открытии и выключения при закрытии дверцы ШУ.

Для удобства обслуживания оборудования в шкафу управления предусмотрена розетка (XS1).

Температура воздуха внутри шкафа контролируется термореле типа ЕТА WI 282*1140 (КК1), уставка которой равна 40 °С. В шкафу также установлен вентилятор, который включается при срабатывании КК1 и отводит тепло от элементов схемы.

Перечень элементов принципиальной электрической схемы соединений шкафа управления представлен в приложении В.

3.7 Разработка и расчет АСР расхода топлива

Регулирование процесса горения в топке котла сводится к управлению подачи топлива, воздуха и разрежения вверху в топке. Автоматика процесса горения состоит из следующих автоматических систем регулирования (АСР):

- АСР тепловой нагрузки (топлива);
- АСР воздуха;
- АСР разрежения.

Качество работы АСР топлива должно удовлетворять следующим требованиям:

– устойчивую работу автоматических регуляторов (отсутствие автоколебаний) и ограниченную частоту их включения, которая при постоянной нагрузке не должна превышать шести включений в минуту;

– поддержание в базовом режиме работы котла по расходу пара с отклонением не более $\pm 3\%$ заданного;

– поддержание в регулирующем режиме работы котла давления пара перед турбиной или в главной паровой магистрали с отклонением не более $\pm 2\%$ номинального.

– при исходной номинальной нагрузке $D_{n.n}$ и ступенчатом изменении задания по нагрузке в 10 % от номинальной, процесс регулирования должен обеспечить величину интегральной квадратичной оценки при работе в базовом режиме $I \leq 1200 (\%^2).c$, при работе в регулирующем режиме $I \leq 1000 (\%^2).c$, где

$$I = \int_0^{\infty} (\Delta D_{n.n})^2 dt$$

Экономически и технологически обоснованным критерием качества работы АСР тепловой нагрузки является минимум интегрального критерия

$$I_2 = \int_0^{\infty} (\Delta P)^2 dt \Rightarrow \min$$

при апериодическом переходном процессе.

Разработка и подробный расчет АСР расхода топлива представлен в приложении Г.

3.8 Разработка общего вида шкафа управления

Чертеж общего вида шкафа управления поясняет принцип его работы, показывает его конструкцию и как взаимодействуют его составные части. Общий вид шкафа представлен на листе с шифром ФЮРА.42100.001 ОВ.

Шкаф управления предназначен для оперативного управления и контроля объектами автоматизации. В шкафу размещают технические средства контроля и управления технологическим процессом, контрольно-измерительные приборы, элементы сигнализации, блокировки, защиты и другие элементов, которые предоставляют необходимую информацию на верхний уровень АСУ. Все приборы, расположенные в шкафу управления, имеют наклейки с обозначениями, соответствующими перечню элементов принципиальной электрической схемы соединений шкафа управления. Другими словами, шкаф является связующим звеном между объектом управления и человеком-оператором.

При проектировании ШУ решаются следующие задачи:

- 1) производится выбор необходимого типа шкафа управления и его размеров, корпусов пультов, панелей с каркасом, стоек и вспомогательных элементов;
- 2) определение размеров монтажных зон щита шкафного, панельного с каркасом, штативов, пультов;
- 3) компоновка приборов и вспомогательной аппаратуры, а также изделий для их монтажа на фасаде и внутри ШУ.

Конструкции ШУ должны обеспечивать комфортные условия эксплуатации, ремонта с минимально возможными затратами времени и безопасное обслуживание приборов. Также должны быть предусмотрены замки для устранения несанкционированного доступа и шина заземления с местом под приварку ее к главной заземляющей шине.

В чертеже общего вида шкафа управления отображаются вид спереди, вид на внутренние плоскости и таблицу надписей на табло, в рамках.

На виде спереди ШУ показывают приборы, технические средства автоматизации, отображают габаритные размеры шкафа, размеры, которые координируют установку приборов и всех средств автоматизации.

На чертеже вида на внутренние плоскости ШУ боковые стенки, крышки, поворотные конструкции, размещенные в разных плоскостях, изображают условно развернутыми в плоскости чертежа.

На внутренней плоскости шкафа представлены:

- установленные приборы и электроаппаратура;
- изделия из монтажа электропроводок (блоки зажимов, колодки маркировочные, упоры и др.).

В нижней части шкафа для подключения проводов установлены клеммные сборки. Также в нижней части расположены элементы цоколя. Цоколь имеет центральное отверстие, обеспечивающее циркуляцию воздуха и подвод силовых, коммуникационных кабелей снизу из пространства под фальшполом.

При разработке ШУ были выбраны габаритные размеры: высота – 1200 мм, ширина – 600 мм, глубина – 300 мм.

Конструктивно шкаф имеет закрытое исполнение и одностороннее обслуживание.

В данной выпускной квалификационной работе был выбран шкаф распределительный типа АЕ 1200х600х300 производства фирмы Rittal (Германия).

3.9 Разработка SCADA-системы

Процесс разработки SCADA-систем включает в себя следующие операции:

- разработка графического интерфейса (графики, всплывающие окна, мнемосхемы, таблицы, элементы ввода команд оператором и прочее);
- процесс отладки алгоритмов работы системы промышленной автоматизации АСУ ТП. В большинстве SCADA-систем отладку можно выполнить двумя вариантами – в режиме эмуляции оборудования или при подключенном оборудовании;
- произведение настройки систем промышленной коммуникации (модемов, промышленных сетей и коммуникационных контроллеров);
- процесс создания баз данных с дальнейшим подключением к ним SCADA-системы.

SCADA-система должна выполнять следующие задачи:

- осуществление взаимодействия с оператором (представление визуальной информации, трансляция системе команд оператора);
- оказание помощи оператору в процессе выработки необходимого решения (выполнение функций экспертной системы);
- автоматическое сигнализирование об аварии и случившихся критических ситуациях;
- вывод на пульт оператора информации о состоянии процесса;
- ведение журнала событий;
- поиск и извлечение архивной информации, и предоставление её оператору в удобном для него варианте;
- создание отчетов (графики смены операторов, таблицы температур, перечень необходимых действий оператора в определенной ситуации и прочее);
- учет наработки технологического оборудования.

В качестве SCADA-пакета, в котором должна проходить разработка мнемосхем была выбрана Simple SCADA, исходя из ее доступности, простоты, большой применимости и отечественного производства.

Разработанная мнемосхема для автоматизированной системы контроля и управления процессом горения композиционного топлива в топке котла представлена на рисунке 26.

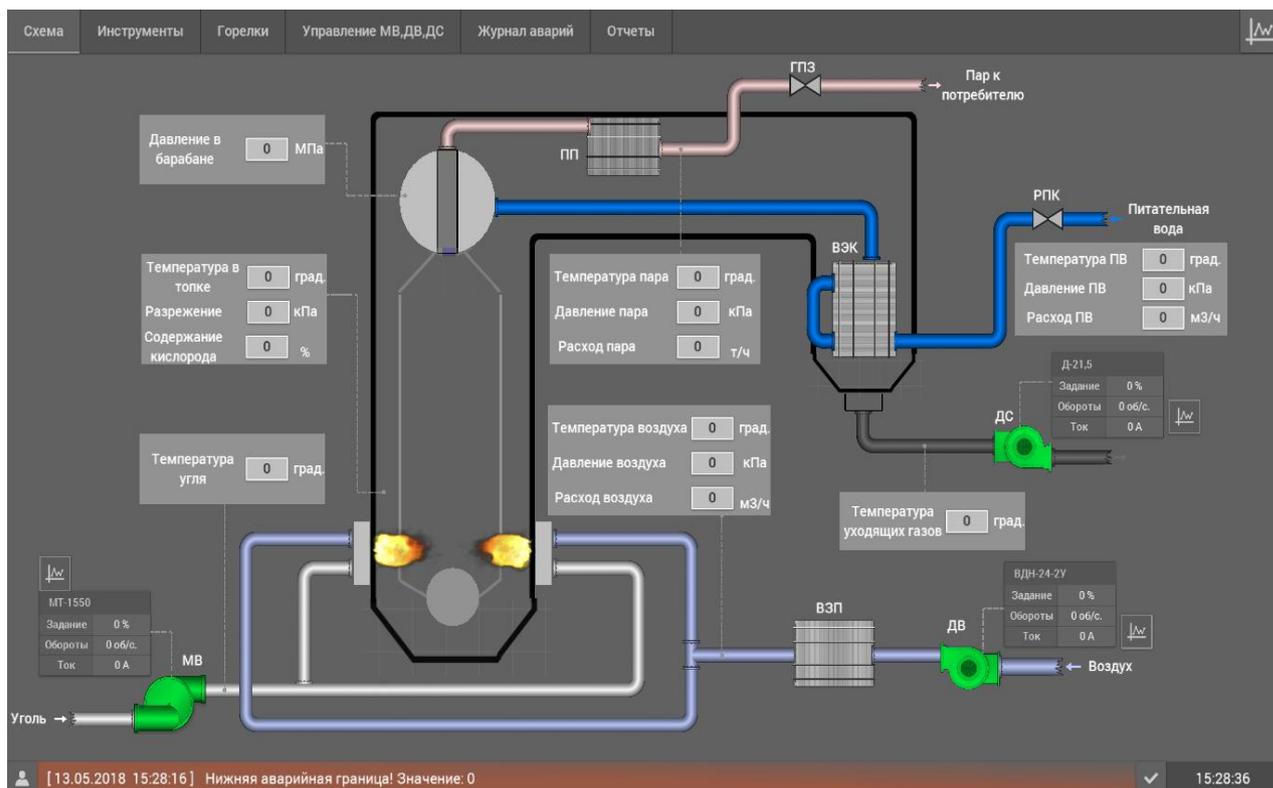


Рисунок 26 – Основная мнемосхема автоматизированной системы регулирования процесса горения композиционного топлива в топке котла

На основной мнемосхеме отображаются все необходимые технологические параметры системы. Также на основной мнемосхеме аварийные и нештатные режимы работы технологического оборудования отображаются посредством ярких цветовых схем и мигания (например, при безаварийном режиме работы, вентиляторы мигают зеленым цветом, а при аварии – красным). Если перейти во вкладку «Журнал аварий» можно увидеть список зафиксированных аварий за определенное время работы системы,

фрагмент данной вкладки представлен на рисунке 27. Выбор управляющего окна осуществляется оперативным персоналом.



Рисунок 27 – Фрагмент вкладки «Журнал аварий»

На панели сигнализации отображаются сигналы о превышении значений давлений, расходов, температуры, а также аварийных состояниях технологического оборудования данной системы. Необходимые значения параметров задаются во вкладке «Инструменты», далее «Окно индикации и задания уставки». Смена значения уставки осуществляется прикосновением к надписи «Уставка» и последующим набором требуемого значения. Набор осуществляется на клавиатуре, которая появляется на экране терминальной панели. На панели трендов отображаются зависимости основных технологических параметров от времени. Ручное управление исполнительными механизмами и вентиляторами становится доступным при смене автоматического режима работы во вкладке «Управление МВ, ДВ, ДС». В этой вкладке отображается подробная информация о параметрах и режимах работы ПЧ каждого дутьевого вентилятора и дымососа.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ7Э	Беляев Савелий Викторович

Школа	ИШЭ	НОЦ	И.Н. Бутакова
Уровень образования	Магистратура	Направление	Теплоэнергетика и теплотехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>НИ выполняется на базе ТПУ с использованием оборудования университета, количество исполнителей НИ – 2 человека (Руководитель и инженер)</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>ГОСТ 14.322-83 Нормирование расхода материала. Основные положения; ГОСТ 51541-99 Энергосбережение. Энергетическая эффективность. Состав показателей. Общие положения.</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Отчисления по страховым взносам составляют 28% от ФОТ.</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	<i>1. Планирование работ и оценка времени на их выполнение.</i>
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	<i>2. Смета затрат на проект</i>
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	<i>3. Смета затрат на оборудование и монтажные работы</i>
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	<i>4. Анализ полученных результатов</i>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	8.12.2018 г.
---	--------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН, ШБИП	Подопригора Игнат Валерьевич	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ7Э	Беляев Савелий Викторович		

4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

4.1. Перспективы совместного использования промышленных и муниципальных отходов из нескольких регионов путем сжигания с выработкой энергии

В данной работе предложена стратегия совместной утилизации соседними регионами (на примере Российской Федерации) промышленных и бытовых отходов путем сжигания в составе композиционных жидких топлив на местных тепловых электрических станциях (ТЭЦ). Реализация на практике такой стратегии, с одной стороны, снизит негативное воздействие отходов на окружающую среду, с другой стороны, уменьшит потребление высококачественного угольного топлива для производства тепла и электричества.

Основные положения стратегии разработаны на примере трех соседних регионов Российской Федерации, расположенных на территории Западной Сибири: Кемеровская область (регион No. 1), Новосибирская область (регион No. 2), Томская область (регион No. 3). Эти регионы являются типичным примером модели взаимодействия сырьевого и промышленного секторов экономики. Как правило, для большинства стран с развитым сырьевым сектором экономики (в первую очередь из-за добычи ископаемых топлив) характерна тенденция, когда регионы, в которых ведется добыча ископаемых топлив, окружают другие регионы с высоким уровнем промышленного и социального развития. Такое соседство создает благоприятные условия, с одной стороны, для увеличения объемов добычи ископаемых топлив (в данном примере регион No. 1 – добыча твердых углеводородов, регион No. 3 – добыча жидких углеводородов), с другой стороны, для развития промышленных предприятий и, соответственно, увеличения численности населения (в данном примере регион No. 2). В таких условиях для регионов с развитым сырьевым сектором экономики, например, за счет добычи и экспорта угля и нефти, одной из основных проблем является снижение негативного воздействия на окружающую среду углеобогащательных фабрик и нефтеперерабатывающих

предприятий за счет складирования горючих твердых и жидких отходов на промышленных площадках (полигонах). Для регионов с высоким уровнем промышленного и социального развития одной из основных проблем является переработка и утилизация ТБО, ежегодный объем производства которых сопоставим по масштабам с объемом (миллионы тонн в год) промышленных отходов крупных угле- и нефтеперерабатывающих предприятий.

Стратегия совместной утилизации промышленных и бытовых отходов путем сжигания в составе композиционных топлив предполагает перевод трех крупных угольных ТРР (как минимум по одной в каждом из трех регионов) на композиционное жидкое топливо. Тепловая и электрическая энергия будут генерироваться этими ТЭС в полном объеме в результате сжигания композиционного жидкого топлива. Приготовление топливных суспензий и их транспортировка до потребителей предполагает строительство соответствующего завода и трубопроводов.

Далее будут рассмотрены технические и экономические аспекты реализации разработанной стратегии в рамках трех сценариев, каждый из которых предполагает сжигание всеми ТЭС одной из трех групп топливных составов, исследованных в данной работе (табл. 2): I группа – ФК 90 % + ТБО 10 %; II группа – ФК 80 % + ТБО 20 %; III группа – ФК 70 % + ТБО 20 % + масло 10 %. Полученные результаты будут являться основой для разработки аналогичных стратегий waste management в других регионах мира с учетом их особенностей (количества и структуры отходов).

4.2. Структура и объемы промышленных отходов и ТБО

В таблице 20 приведены основные статистические данные о количестве и структуре образующихся промышленных и бытовых отходах и о способах их утилизации в настоящее время.

4.3. Потребность в энергоресурсах угольных теплоэлектростанций

Для рассматриваемых регионов собственные нужны в тепловой и электрической энергии удовлетворяются преимущественно за счет местных тепловых электрических станций. Комбинированная выработка тепловой и электрической энергии в каждом из трех регионов осуществляется группой тепловых электрических станций, часть из которых работает на твердом топливе, а часть на газообразном топливе. В таблице 20 приведены основные характеристики типичных для каждого региона угольных ТРР.

Таблица 20 – Характеристики типичных угольных тепловых электрических станций в каждом из трех регионов

Станция*	Количество котельных агрегатов	Установленная электрическая мощность	Установленная тепловая мощность	Выработка электроэнергии	Выработка тепловой энергии	Удельный расход условного топлива на опущенную электроэнергию	Удельный расход условного топлива на опущенную тепловую энергию	Полученная тепловая энергия от сжигания угля в топке котла
	шт.	МВт	Гкал/ч	кВт·ч ($\times 10^6$)	Гкал ($\times 10^3$)	г у.т. /кВт·ч	кг у.т. /Гкал	Дж ($\times 10^{16}$)
ТРР 1	9	565	1449	1946	2911	370	160	3,5
ТРР 2	6	1200	2730	7065	4652	292,9	138	7,9
ТРР 3	10	331	815	1104	2154	249	159,6	0,9
Всего	25	2096	4994	10115	9717	911,9	457,6	12,3

* – нумерация ТРРs соответствует номерам регионов.

В качестве основного топлива на рассмотренных тепловых электрических станциях используется каменный уголь марки Д Кузнецкого угольного бассейна (Российская Федерация) с характеристиками: теплота сгорания $Q_{s,v}^a=21,4$ МДж/кг; влажность $W^a=14,1$ %; зольность $A^d=13,1$ %; содержание летучих $V^{daf}=41,2$ %.

Совместный анализ данных таблицы 20 и теплотехнических характеристик твердого топлива позволил установить количество угля, затрачиваемого тремя тепловыми электрическими станциями для производства тепловой и электрической энергии. Ежегодный расход высококачественного угля [99–101] составляет около $5,75 \cdot 10^6$ тонн (ТРР 1 – $1,64 \cdot 10^6$ тонн, ТРР 2 – $3,69 \cdot 10^6$ тонн, ТРР 3 – $0,42 \cdot 10^6$ тонн). При сжигании такого количества угля выделяется около $12,3 \cdot 10^{16}$ Дж теплоты (табл. 20). Эта энергия с учетом КПД (70%) ТЭС преобразуется в электричество и тепло. Относительно низкий КПД является причиной того, что достаточно большое количество энергии, выделяющейся в результате сжигания высококачественного угля, безвозвратно теряется в процессе преобразования. Таким образом, высококачественное твердое топливо используется нерационально. Замена угля на композиционное топливо из отходов углеобогащения (или низкокачественного угля), ТБО, отработанных масел (или горючих отходов нефтедобычи и нефтепереработки) позволит существенно снизить расход высококачественных исчерпаемых углеводородов.

4.4. Стратегия совместной утилизации промышленных и бытовых отходов с выработкой энергии

Предполагается, что вся энергия (около $12,3 \cdot 10^{16}$ Дж в течение 1 года), выделяющаяся в результате сжигания угля тремя ТРР (табл. 13), будет генерироваться при сжигании одной из трех групп топливных составов (табл. 9): I группа – ФК 90 % + ТБО 10 %; II группа – ФК 80 % + ТБО 20 %; III группа – ФК 70 % + ТБО 20 % + масло 10 %. Для замены угля эквивалентным по энерговыделению количеством композиционного топлива потребность в его компонентах будет отличаться для разных групп топливных составов вследствие отличия их теплотехнических характеристик (табл. 9). В таблице 21 приведены расходы разных групп топливных составов и их отдельных компонентов в течение 1 года и в течение 25 лет (период реализации предлагаемой стратегии) при средних значениях теплоты сгорания для каждой

группы топливных составов в соответствии с данными таблицы 9: I группа – 11,91 МДж/кг; II группа – 13,04 МДж/кг; III группа – 16,36 МДж/кг.

Таблица 21 – Расход композиционного топлива и его компонентов

Период		В течение 1 года				В течение 25 лет			
TRP		TRP 1	TRP 2	TRP 3	Всего	TRP 1	TRP 2	TRP 3	Всего
Полученная тепловая энергия от сжигания угля в топке котла, J ($\times 10^{16}$)		3,5	7,9	0,9	12,3	87,50	197,50	22,50	307,50
Потребление угля, t ($\times 10^6$)		1,64	3,69	0,42	5,75	40,89	92,29	10,51	143,69
Потребление топлива, t ($\times 10^6$)	I группа:	2,94	6,63	0,76	10,33	73,45	165,79	18,89	258,13
	ФК	2,65	5,97	0,68	9,30	66,10	149,21	17,00	232,31
	ТБО	0,29	0,66	0,08	1,03	7,35	16,58	1,89	25,82
	II группа:	2,68	6,06	0,69	9,43	67,10	151,45	17,25	235,80
	ФК	2,14	4,85	0,55	7,54	53,68	121,16	13,80	188,64
	ТБО	0,54	1,21	0,14	1,89	13,42	30,29	3,45	47,16
	III группа:	2,14	4,83	0,55	7,52	53,47	120,69	13,75	187,91
	ФК	1,50	3,38	0,39	5,27	37,43	84,48	9,63	131,54
	ТБО	0,43	0,97	0,11	1,51	10,69	24,14	2,75	37,58
	Oil	0,21	0,48	0,06	0,75	5,35	12,07	1,38	18,80

В течение 25 лет реализации перспективной стратегии управления отходами тремя TRPs в зависимости от состава топлива будет суммарно утилизировано (табл. 14): $(130-260) \cdot 10^6$ тонн ФК; $(25-38) \cdot 10^6$ тонн ТБО; до $19 \cdot 10^6$ тонн отработанных масел. Предлагаемые мероприятия для трех соседних регионов Российской Федерации позволят полностью решить проблему утилизации накопленных отработанных масел, жидких горючих отходов нефтедобычи и нефтепереработки, а также проблему утилизации ежегодно производимых отходов углеобогащения. Кроме этого добавление в состав композиционных топлив ТБО позволит решить проблему их промышленной утилизации до перехода на новую систему управления отходами с высокой долей переработки и повторного использования ТБО.

4.5. Технико-экономический анализ

Экономический эффект от практической реализации разработанной стратегии совместной утилизации промышленных и бытовых отходов путем

сжигания в составе композиционных топлив можно условно разделить на 2 части: доходную – экономия от сжигания дешевого топлива на основе промышленных и бытовых отходов вместо дорогостоящего высококачественного угля; расходную – затраты на строительство единого центрального завода топливоприготовления и модернизацию технологического оборудования TPPs (системы топливоподачи в топку котла) при переводе с твердого топлива на суспензионное топливо.

Оценка экономического эффекта выполнена по алгоритму [46,47], разработанному для анализа перспектив перевода угольных TPPs на композиционные жидкие топлива. Результаты данной работы и результаты выполненных ранее исследований [30,91,98] позволяют сделать вывод о том, что закономерности и характеристики факельного сжигания твердых натуральных топлив и композиционных жидких топлив на основе промышленных и бытовых отходов с добавлением отходов нефтепереработки аналогичны. Поэтому для сжигания последних могут быть использованы функционирующие угольные котлы. Существенная модернизация необходима в основном для систем хранения топливного сырья, топливоприготовления, и топливоподачи в топку котла. Для снижения затрат на модернизацию этих систем функционирующих угольных TPPs предлагается для трех TPPs, расположенных в трех соседних регионах, построить единый центральный завод топливоприготовления, от которого по трубопроводам топливные суспензии будут транспортироваться до потребителей [46]. Этот завод будет предназначен для хранения исходных компонентов топлива с необходимым резервом, приготовления топливных составов и распределения готовых топливных суспензий между тремя TPPs в зависимости от их потребностей, в том числе в условиях удовлетворения общей 100% нагрузки всех TPPs. На территории TPPs предполагается размещение только баков с гомогенизаторами для обеспечения нормативного резерва готового топлива в течение 5 суток и поддержания его эксплуатационных характеристик при подаче в топку котла.

Анализ технико-экономических характеристик в рамках алгоритма [47], учитывающего исходные данные о составе топлива, его энергетических

характеристиках, расходе и стоимости, позволяет сделать вывод о экономической эффективности перевода угольной ТРР на композиционное жидкое топливо при сопоставлении следующих основных затрат.

Топливные затраты (S_1) рассчитываются в соответствии со стоимостью компонентов композиционного топлива (с учетом предполагаемых расходов на их транспортировку до места приготовления топливных композиций). Следует отметить, что среднерыночные цены на различные отходы (ФК, ТБО, отработанные масла) не фиксированы и могут меняться в зависимости от региона и поставщика. В данной работе приняты следующие цены на топлива: уголь 60 \$/т; I группа композиционного топлива 8,11 \$/т; II группа композиционного топлива 7,42 \$/т; III группа композиционного топлива 15,71 \$/т. Выражение для расчета топливных затрат:

$$S_1 = C_{fuel} \cdot B_{fuel},$$

где C_{fuel} – среднерыночная цена топлива, \$/т; B_{fuel} – количество сжигаемого топлива (табл. 14), т.

Капитальные затраты на строительство единого центрального завода топливоприготовления (S_2) являются одной из основных статей единовременных расходов при переводе угольных ТРР на композиционное топливо. Расчеты выполнены на основе среднерыночной стоимости технологического оборудования, необходимого для ввода в эксплуатацию новой системы топливоприготовления [47]. Данная статья расходов также включает затраты на хранение исходных компонентов топлива с учетом необходимого резерва в течение 5 суток [47] на территории единого центрального завода топливоприготовления. Основные затраты на приобретение технологического оборудования, его монтаж и выполнение строительных работ приведены в таблице 22.

Таблица 22 – Затраты на строительство единого центрального завода топливоприготовления

Секция	Количество	Унитарная стоимость, \$	Всего, \$
Накопительный бак для ФК	1	424757,3	424757,3
Резервуар для отработанного масла*	1	849514,6	849514,6
Бак с гомогенизатором	3	379247,6	1137742,8
Мельница для ТБО	1	33000,0	33000,0
Резервуар с мешалкой для приготовления топливной суспензии	1	50910,2	50910,2
Строительно-монтажные работы	1	230000,0	230000,0
Всего			2725924,9

* – учитывается только для III группы композиционного топлива (ФК 70 % + ТБО 20 % + масло 10 %),

Затраты на модернизацию системы топливоподачи ТРП (S_3). На основе данных (табл. 20) о количестве котлов на каждой из трех ТРП (ТРП 1 – 9 котлов, ТРП 2 – 6 котлов, ТРП 3 – 10 котлов) и конструкции типичных систем топливоприготовления (для угольных станций, как правило, применяются индивидуальные системы топливоприготовления с шаровыми барабанными мельницами и промежуточным бункером угольной пыли для каждого котла) были рассчитаны затраты на модернизацию соответствующего технологического оборудования [47]. Результаты (табл. 23) получены при учете повторного использования части имеющегося вспомогательного оборудования (трубопроводов, задвижек, клапанов, насосов) в составе новых систем при переводе котлов на композиционное жидкое топливо, а также с учетом хранения необходимого резерва приготовленного композиционного топлива на территории ТРП в течение 5 суток [47].

Таблица 23 – Расходы на модернизацию TPPs

Секция	Количество	Унитарная стоимость, \$	Всего, \$
TPP 1			
Бак с гомогенизатором	9	45510	409590
Расширенная печь	9	22755	204795
Устройство подачи топлива (горелки, насос, трубопровод)	9	53095	477855
Всего для TPP 1			1092240
TPP 2			
Бак с гомогенизатором	6	45510	273060
Расширенная печь	6	22755	136530
Устройство подачи топлива (горелки, насос, трубопровод)	6	53095	318570
Всего для TPP 2			728160
TPP 3			
Бак с гомогенизатором	10	45510	455100
Расширенная печь	10	22755	227550
Устройство подачи топлива (горелки, насос, трубопровод)	10	53095	530950
Всего для TPP 3			1213600
Всего для всех TPPs			3034000

Эксплуатационные затраты (S_4) выражены в стоимости электроэнергии, затраченной на функционирование системы топливоприготовления. Эти затраты вычислены на основе средних данных [47] о стоимости электрической энергии и ее расходе на единицу готового к сжиганию в топке котла топлива:

$$S_2 = C_{electricity} \cdot G_{electricity} \cdot B_{fuel}$$

где $C_{electricity}$ – стоимость электроэнергии, 0,052 \$/(кВт·ч); $G_{electricity}$ – расход электроэнергии на топливоприготовление, 38,58 (кВт·ч)/т для угля и 21,55 (кВт·ч)/т для композиционного топлива; B_{fuel} – количество сжигаемого топлива (табл. 21), т.

Затраты на складирование и утилизацию золошлаковых отходов (S_5). В соответствии с результатами анализа [47] переход на композиционное топливо не ведет к увеличению золошлаковых отходов. Поэтому эти затраты не влияют на анализируемый экономический эффект.

Затраты на экологические мероприятия и уплату штрафов (S_6). Согласно результатам выполненного исследования (рис. 16) и результатам [45,46,47,92]

концентрации основных антропогенных выбросов при сжигании композиционных топлив на основе промышленных и бытовых отходов не превышают соответствующие нормативные характеристики для дымовых газов угольных котлов (табл. 12). Поэтому эти затраты не влияют на анализируемый экономический эффект.

Сводные результаты выполненных расчетов приведены в таблице 24. Экономический эффект (экономия за 25 лет) рассчитывался как разность между всей стоимостью за 25 лет при эксплуатации трех существующих угольных ТРPs и всей стоимостью за 25 лет при переводе этих ТРPs на композиционное жидкое топливо из промышленных и бытовых отходов.

Таблица 24 – Денежные потоки при переходе на композиционное топливо

Расходы	Список расходов, \$ ($\times 10^6$)			
	Уголь	I группа топливного состава	II группа топливного состава	III группа топливного состава
1	2	3	4	5
Топливные затраты (S_1) в течение 1 года / 25 лет	344 / 8600	84 / 2100	70 / 1750	119 / 2975
ТРP 1	98 / 2450	24 / 600	20 / 500	34 / 850
ТРP 2	221 / 5525	54 / 1350	45 / 1125	76 / 1900
ТРP 3	25 / 625	6 / 150	5 / 125	9 / 225
Капитальные затраты на строительство единого центрального завода топливоприготовления (S_2) одновременно	–	1,876	1,876	2,726
Затраты на модернизацию системы топливоподачи ТРP (S_3) одновременно:	–	3,034	3,034	3,034
ТРP 1	–	1,092	1,092	1,092
ТРP 2	–	0,728	0,728	0,728
ТРP 3	–	1,214	1,214	1,214

Продолжение таблицы 24

1	2	3	4	5
Эксплуатационные затраты (S_4) в течение 1 года / 25 лет	11,5 / 288	11,5 / 288	10,6 / 265	8,4 / 210
TRP 1	3,3 / 83	3,3 / 83	3,0 / 75	2,4 / 60
TRP 2	7,4 / 185	7,4 / 185	6,8 / 170	5,4 / 135
TRP 3	0,8 / 20	0,8 / 20	0,8 / 20	0,6 / 15
Вся стоимость за 25 лет	8888	2393	2020	3191
Экономия за 25 лет	–	6495	6868	5697

Данные таблицы 24 наглядно иллюстрируют определяющее значение (85–95%) топливной составляющей (приобретение энергоресурсов) в типичной структуре вся стоимость за 25 лет. Суммарные затраты на строительство нового современного единого центрального завода топливоприготовления и модернизацию систем топливоподачи трех TRPs несопоставимо малы по сравнению с затратами на приобретение энергоресурсов для генерации тепла и электричества. Поэтому перевод угольных TRPs на композиционное жидкое топливо на основе промышленных и бытовых отходов заведомо характеризуется положительным экономическим эффектом даже в краткосрочном периоде, т.к. в среднем стоимость энергоресурсов (угля и композиционного топлива из отходов) отличается в 2,5–3,5 раза (в пересчете на единицу энергии, выделяющейся при сжигании топлива). В течение 25 лет реализации разработанной стратегии утилизации промышленных и бытовых отходов в зависимости от состава композиционного топлива экономический эффект составит от 5,7 до 6,9 млрд. долларов (табл. 24). Относительно затрат на функционирование угольных TRPs экономический эффект составит от 65 до 78%, соответственно. Наименьшее значение характерно для III группы топливного состава, которая состоит из влажного ФК, ТБО, отработанного масла. Но выше было показано, что именно такие составы композиционных топлив являются предпочтительными по сравнению с другими двумя группами топливного состава (без добавления отработанных масел), т.к. позволяют утилизировать широкую номенклатуру

промышленных и бытовых отходов с экологическими характеристиками газообразных продуктов сгорания не хуже, чем аналогичные характеристики для дымовых газов при сжигании высококачественного угля. Сэкономленные средства целесообразно инвестировать в развитие промышленной теплоэнергетики для проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, направленных на развитие передовых технологий и модернизацию тепловых электрических станций для повышения их эффективности. Повышение КПД угольных ТРPs позволит в перспективе рационально расходовать исчерпаемые углеводороды для генерации тепла и электричества.

Положительный экономический эффект с учетом модернизации систем топливоподачи трех ТРPs и строительства единого центрального завода топливоприготовления составит от 5,7 до 6,9 млрд. долларов или 65–78%, соответственно, от основных затрат при функционировании трех ТРPs в течение 25 лет на угле. Это объясняется определяющим значением (85–95%) топливной составляющей (приобретение энергоресурсов) в типичной структуре всей стоимости и стоимостью энергоресурсов, которая отличается в 2,5–3,5 раза для угля и композиционного топлива из отходов (в пересчете на единицу энергии, выделяющейся при сжигании топлива).

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ7Э	Беляеву Савелию Викторовичу

Школа	ИШЭ	НОЦ	И.Н. Бутакова
Уровень образования	Магистратура	Направление	Теплоэнергетика и теплотехника

Тема ВКР:

Разработка автоматической системы регулирования процесса горения топлива в топке котла при переводе с угля на композиционное топливо.

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования и области его применения	Объектом исследования в данной работе является автоматическая система регулирования процесса горения композиционного топлива в топке котла.
---	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: – Специальные правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	Отражены правовые нормы: – ГОСТ 12.0.004-2015 – ТК РФ N 197-ФЗ – Конституция РФ
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Выявлены вредные и опасные факторы: – электромагнитное излучение; – шумы и вибрации; – повышенная запыленность и загазованность; – повышенная концентрация СО в помещении. – поражение электрическим током; – тепловое воздействие; – механическое воздействие.
3. Экологическая безопасность:	Потенциальным негативным воздействием на окружающую среду является воздействие на атмосферный воздух (выбросы CO ₂ , NO _x , SO ₂ при работе оборудования).
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Указаны возможные ЧС, а также меры по предупреждению и оповещению о случившемся ЧС, приведены требования по поведению персонала при возникновении ЧС и обязательной эвакуации.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	8.12.2018 г.
--	--------------

Задание выдал консультант:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ7Э	Беляев Савелий Викторович		

5. Социальная ответственность

К социальным вопросам на производстве относятся работы по охране труда, окружающей среды и в чрезвычайных ситуациях.

Охрана труда - система сохранения жизни и здоровья работников в процессе трудовой деятельности, включающая в себя правовые, социально-экономические, организационно-технические, санитарно-гигиенические, лечебно-профилактические, реабилитационные и иные мероприятия. Главной задачей охраны труда является создание условий для безопасной трудовой деятельности человека, т. е, создание таких условий труда, которые исключают воздействия вредных факторов производства на рабочих.

В данной работе была спроектирована система горения топлива в топке котла. Предполагается, что данная система будет устанавливаться в котельных, и работать в полуавтоматическом режиме. Для обеспечения работоспособности системы необходим оператор, который будет отслеживать расход композиционного топлива в топку котла, и производить обслуживание системы. При выполнении этих работ на оператора могут воздействовать следующие вредные факторы:

- 1) повышенная температура воздуха рабочей зоны;
- 2) повышенная влажность;
- 3) повышенная загазованность воздуха;
- 4) недостаточная освещенность рабочего места;
- 5) физические перегрузки;
- 6) воздействие открытого огня.

5.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Основой правового законодательства является Конституция [102], т. е, законы и правовые акты, принимаемые в РФ, не должны противоречить ей. Существуют принятые нормы в области охраны труда:

- 1) на первом месте жизнь и здоровье работника, а потом уже результат производственной деятельности предприятия;

- 2) единые нормативные требования по охране труда;
- 3) защита интересов работников, пострадавших в результате несчастных случаев на производстве.

Действующим нормативом по охране труда является ГОСТ 12.0.004-2015.

5.1.1. Специальные правовые нормы трудового законодательства

Оператор котельной обязан проходить инструктаж по технике безопасности раз в 3 месяца, так же соблюдать правила пожарной безопасности, не оставляя котел без присмотра. Предприятие, к которому относится котельная, должно обеспечить оператора спецодеждой, спец-обувью и другими средствами защиты. Остановка котла во всех случаях, кроме аварийной остановки, должна производиться после получения распоряжения администрации предприятия. В конце рабочего дня оператор должен сдать дежурство, сделав отметку в журнале. Также оператору должны выдаваться средства индивидуальной защиты дыхательных путей.

5.1.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

Основным объектом в производственных условиях является рабочее место, представляющее собой в общем случае пространство, в котором может находиться человек при выполнении производственного процесса. Рабочее место является основной подсистемой производственного процесса.

Согласно ТК РФ, N 197-ФЗ каждый работник имеет право на охрану труда, в том числе:

- 1) на рабочее место, защищенное от воздействия вредных или опасных производственных факторов;
- 2) на возмещение вреда, причиненного увечьем, профессиональным заболеванием либо иным повреждением здоровья, связанным с исполнением им трудовых обязанностей;
- 3) на обучение безопасным методам и приемам труда за счет

работодателя и др.

Поэтому рабочая зона сконструирована в соответствии с трудовым кодексом РФ и на рисунке 28 представлен внешний вид основных элементов экспериментального стенда.

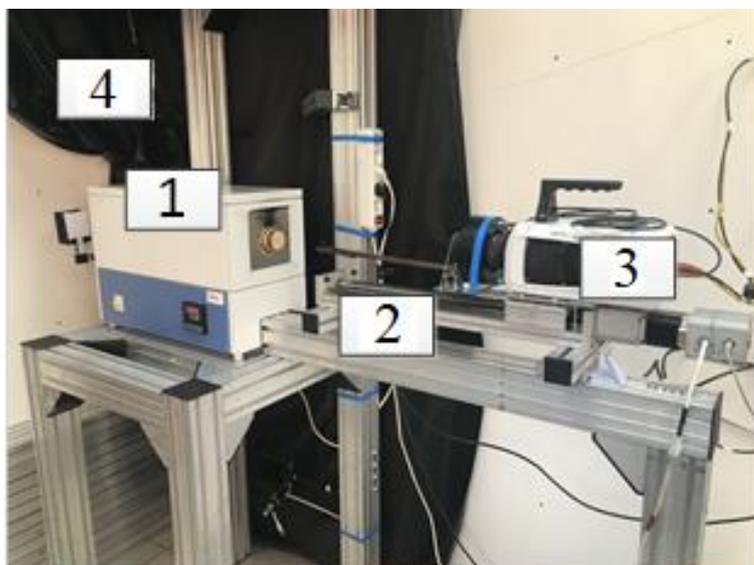


Рисунок 28 – Внешний вид основных элементов экспериментального стенда:

- 1 – трубчатая муфельная печь; 2 – модуль линейного перемещения;
- 3 – высокоскоростная камера; 4 – вытяжная вентиляция

5.2. Производственная безопасность

Производственная безопасность – система организационных мероприятий и технических средств, предотвращающих или уменьшающих вероятность воздействия на работающих опасных травмирующих производственных факторов, возникающих в рабочей зоне в процессе трудовой деятельности.

К работе с экспериментальным стендом допускаются лица, обученные правилам техники безопасности и изучившие Руководство по эксплуатации.

При проведении исследований и дальнейшей разработки проектируемого решения согласно ГОСТ 12.0.003-2015, в таблице 25 приведен перечень возможных опасных и вредных факторов.

Таблица 25 – Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разрабо тка	Изготов ление	Эксплуа тация	
1.Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95*[59]. Требования к освещению устанавливаются СП 52.13330.2016 ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов. ГОСТ Р 30331.4-95. Защита от тепловых воздействий. ГОСТ Р 56257-2014 Характеристика факторов внешнего природного воздействия. Общая классификация
2.Превышение уровня шума		+	+	
3.Отсутствие или недостаток естественного света	+	+	+	
4.Недостаточная освещенность рабочей зоны		+	+	
5.Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека	+	+	+	
6.Тепловое воздействие		+	+	
7.Механическое воздействие		+	+	

5.2.1. Анализ опасных и вредных производственных факторов

Котлоагрегат на композиционных топливах представляет опасность, как и котлы на привычных видах топлив, таких как уголь, мазут и газ. Опасными факторами при использовании котла: является количество выбросов, как в

атмосферу, так и в помещении, где установлен агрегат. Для уменьшения количества концентрации выбросов проводят операции: установка очистительного оборудование для дымовых газов, герметизация технологических отверстий котельного агрегата, добавление способствующих для снижения концентрации выбросов, составляющих топлива.

Так как для сжигания топлива необходимы высокие температуры, то в помещении, где установлен котел, нужна вентиляция, для нормальных условий работы персонала. Так же вентиляция позволит решить проблему повышенной влажности. Для защиты от высокой температуры, при проведении профилактических работ необходима специализированная одежда.

Шум ухудшает условия труда, оказывая воздействия на организм человека. Процесс подачи топливоздушнoй смеси является шумным, так как необходимо создать высокое давление.

5.2.2. Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований

По результатам таблицы 1, можно провести анализ восьми возможных вредных и опасных факторов.

Микроклимат

Находясь на рабочем месте в производственном помещении человек подвержен влиянию определённых метеоусловий, или микроклимату рабочих помещений. Окружающая среда влияет на тепловое состояние организма. Основными параметрами производственного микроклимата являются действующими на организм человека температура влажность и скорость движения воздуха, а также температура окружающих поверхностей [103].

Работа на ПК в офисном помещении относится к классу легких работ с энергозатратами 150 ккал/час, т.е. к классу работ Ib. Для данного типа работ допустимые величины микроклиматы должны обеспечиваться при следующих условиях:

- перепад температуры воздуха по высоте должен быть не более 3 °С;

– перепад температуры воздуха по горизонтали, а также ее изменения в течение смены не должны превышать 4 °С.

Согласно СанПиН 2.2.4.548-96 оптимальные параметры микроклимата должны соответствовать данным таблицы 26:

Таблица 26 – Оптимальные параметры микроклимата на рабочем месте

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодное	21-23	60-40	< 0,1
Теплое	22-24	60-40	< 0,1

В таблице 27 приведены допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах.

Таблица 27 – Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С		Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с	
		ниже оптимальных величин	выше оптимальных величин		ниже оптимальных величин, не более	выше оптимальных величин, не более**
Холодный	Iб (140–174)	19,0–20,9	23,1–24,0	15–75	0,1	0,2
Теплый	Iб (140–174)	20,0–21,9	24,1–28,0	15–75*	0,1	0,3

* При температурах воздуха 25 °С и выше максимальные величины относительной влажности воздуха должны приниматься в соответствии со специальными требованиями.

** При температурах воздуха 26–28 °С скорость движения воздуха в теплый период года должна приниматься в соответствии со специальными требованиями

Для поддержания соответствующих микроклиматических параметров на рабочем месте используются системы вентиляции и отопления [104].

Вредным веществом, содержащимся в воздухе, является углекислый газ, CO₂. Предельная норма содержания CO₂ в воздухе, согласно ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны» составляют 20 мг/м³. Проблему уменьшения содержания CO₂ в воздухе также можно решить с помощью системы кондиционирования.

Шум

Одним из методов уменьшения воздействия шума на объектах энергетического производства является снижение или ослабление шума в его источниках – генераторы, турбины, электрические машины, трансформаторы, компрессорные и вентиляторы. Ненормальный повышенный шум, создаваемый трансформаторами и электрическими машинами, часто бывает по причине неплотного стягивания пакетов стального сердечника. Своевременное устранение этих причин позволяет снизить уровень шума. В качестве индивидуальных средств защиты от шума используют специальные наушники, вкладыша в ушную раковину, противошумные каски, защитное действие которых основано на изоляции и поглощения шума.

Таблица 28 – Допустимые уровни шума (ГОСТ 12.1.003-2014)

Рабочие места	Уровни звукового давления (ДБ) в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц								Уровни звука и эквивалентные уровни звука, по дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
ОРУ	99	92	86	83	80	78	76	74	85

Освещение

Рациональное освещение имеет большое значение в процессе эксплуатации тепловой электростанции.

Освещение должно быть таким, чтобы работающие могли без напряжения зрения выполнять свою работу. Неудовлетворительное освещение может искажать информацию: кроме того, оно не только утомляет зрение, но вызывает также утомление всего организма в целом. Применяют два вида освещения: естественное и искусственное. Для искусственного освещения применяют электрические люминесцентные лампы.

Для участков, где требуемая освещенность, превышающая 3 лк (СНиП 23.05-95) это вводы трансформаторов и выключателей, генераторы, разрядники,

указатели масла, газовое реле, не достигается путем общего равномерного освещения, необходимо предусмотреть общее локализованное освещение. Общее локализованное освещение следует осуществлять осветительными приборами, устанавливаемыми на порталах, конструкциях и мачтах равномерного освещения. В качестве осветительных приборов применяют газоразрядные лампы.

Освещение на станции подразделяется на рабочее, аварийное и охранное. Рабочее освещение включает в себя общее стационарное, ремонтное и местное освещение. Охранное освещение предусматривается по периметру. Ремонтное освещение необходимо выполнять от понижающего трансформатора 12-42 В.

Таблица 29 – Нормы освещенности открытых участков территории ПС

Место, площадка	Плоскость в которой нормируется освещенность	Разряд и подразряд СанПиН 2.2.1/2.1.1.1 278-03	Освещенность рабочей поверхности, лк
Помещения мастерских	горизонтальная	В-1	150
Шкафы и панели устройств РЗА	вертикальная	Е	150

Поражение электрическим током

В помещении с большим количеством аппаратуры, использующей однофазный электрический ток, промышленной частоты напряжением 220 В, есть вероятность электропоражения.

Во время нормального режима работы оборудования опасность электропоражения крайне мала, однако, возможны аварийные режимы работы, когда происходит случайное электрическое соединение частей оборудования, находящегося под напряжением с заземленными конструкциями.

Поражение человека электрическим током может произойти в следующих случаях:

- при прикосновении к токоведущим частям во время ремонта ПЭВМ;

- при однофазном (однополюсном) прикосновении незащищенного от земли человека к незащищенным токоведущим частям электроустановок, находящихся под напряжением;
- при прикосновении к незащищенным частям, находящимся под напряжением, то есть в случае нарушения изоляции;
- при соприкосновении с полом и стенами, оказавшимися под напряжением.

Основными мероприятиями по обеспечению электробезопасности являются [105]:

- изолирование (ограждение) токоведущих частей, исключающее возможность случайного прикосновения к ним;
- установки защитного заземления;
- наличие общего рубильника;
- своевременный осмотр технического оборудования, изоляции.

Тепловое воздействие

Во время работы с муфельной печью некоторые части оборудования сильно нагреваются (верхняя крышка муфельной печи, дверца, торцевые пробки). Неосторожное обращение с нагретым оборудованием может привести к ожогам. Согласно ГОСТ Р 30331.4-95, мерами предосторожности являются:

- не прикасайтесь к нагретым частям оборудования во время его работы (или после завершения работы при остывании печи);
- соблюдайте осторожность при работе с исследуемыми нагретыми образцами;
- выполняйте все работы по обслуживанию и чистке оборудования только при полностью отключенном от сети питания оборудовании и после остывания нагретых частей;
- используйте верхонки для защиты рук от ожогов.

Механическое воздействие

Существует опасность получения травмы подвижными элементами модуля линейного перемещения. Перед включением модуля следует убедиться в отсутствии каких-либо препятствий на пути каретки.

Согласно ГОСТ Р 56257-2014, мерами предосторожности являются:

- при эксплуатации модуля необходимо соблюдать все общие правила техники безопасности работы с механизмами;
- запрещается эксплуатация модуля при обнаружении неисправностей в работе механических или электрических компонентов. Продолжать работу разрешается только после устранения причин неисправностей специалистами;
- при эксплуатации необходимо следить за чистотой всех механизмов модуля и двигателя, периодически очищать их от пыли и грязи. Обтирочные материалы, которыми очищается модуль, не должны оставлять следов и ворса на протираемых поверхностях.

5.2.3. Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на исследователя (работающего)

Для предотвращения ожога при работе возле котельного агрегата необходима специализированная одежда, и выполнение техники безопасности для котельной.

Для предотвращения возможности поражения электрическим током соблюдаются требования:

- при производстве монтажных работ используются только исправные инструменты, аттестованные службой КИПиА;
- с целью защиты от поражения электрическим током, возникающим между корпусом приборов и инструментом при пробое сетевого напряжения на корпус, корпуса приборов и инструментов были заземлены;
- при включенном сетевом напряжении работы на задней панели были запрещены;

- все работы по устранению неисправностей производятся квалифицированным персоналом;

- постоянное наблюдение за исправностью электропроводки.

Для уменьшения воздействия шума на организм человека были проведены следующие мероприятия:

- проверена точность сборки деталей при ремонте;

- предотвращена работа с перегрузкой и обрыв одной фазы электродвигателей, что обычно приводит к шуму.

Для уменьшения загазованности и влажности в помещении устанавливается вытяжная система. Помещение оборудовано приточно-вытяжной вентиляцией с нижним и верхним отсосом, обеспечивающей равномерный приток свежего воздуха и удаление загрязненного. Приточно-вытяжная вентиляция во всех помещениях работает постоянно, кроме летнего периода времени, что связано с остановкой котельной.

5.3. Экологическая безопасность

Загрязнение (окружающей среды, природной среды, биосферы) – это привнесение в окружающую среду (природную среду, биосферу) или возникновение в ней новых, обычно не характерных физических, химических или биологических агентов (загрязнителей), или превышение их естественного среднесуточного уровня в различных средах, приводящее к негативным воздействиям.

По результатам таблицы 12, и следуя ГОСТ 50831-95, выявлено, что среди опасных загрязняющих выбросов, таких как: монооксид углерода CO, оксидов азота NO_x, оксидов серы SO_x – нет превышения антропогенных выбросов.

5.3.1. Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду

Выбросы загрязняющих веществ предприятий теплоэнергетики, обусловленные процессами сгорания органического топлива, являются одним из основных источников загрязнения атмосферы. Объемы вредных выбросов связаны с качеством и количеством сжигаемого топлива, полнотой его использования, а также эффективностью в целом работы источника теплоснабжения.

Наибольшую опасность для биосферы и для здоровья человека представляют не имеющие средств очистки дымовых газов многочисленные теплоисточники малой мощности, размещаемые, как правило, в пределах небольших населенных пунктов.

5.3.2. Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду

Антропогенные выбросы парниковых газов и загрязняющих веществ – один из основных факторов, обуславливающих изменение химического состава атмосферы и ее теплового баланса. Как показано в исследованиях, процессы добычи, переработки и сжигания органического топлива являются источником 80 % суммарных объемов выбросов в атмосферу, в том числе 90 % диоксида углерода, изменения содержания которого называют основной причиной современного повышения температуры.

Негативное влияние вредных компонентов на здоровье населения, флору и фауну, объекты и сооружения не ограничивается территорией, прилегающей к источникам выбросов, а распространяется на сотни и тысячи километров. Поэтому в настоящее время загрязнение окружающей среды приобретает глобальный характер, а расходы на ее охрану стали соизмеримы с величиной экологического ущерба.

5.3.3. Обоснование мероприятий по защите окружающей среды

Для снижения количества выбросов необходимо контролировать расход воздуха в топку котла. Ведь при нехватке окислителя, возникает большой недожог, что приводит к увеличению количества золовидных отходов процесса сжигания топливной композиции. А при избытке воздуха образуются оксиды азота.

Регулирование температуры в топке котла является одним из важных аспектов в системе сжигания топлива, так как наибольшее влияние на образование оксида азота оказывает температура. Улавливание сернистых соединений в выбросах тепловых станций и различных производств является одним из наиболее сложных и трудоемких процессов по следующим причинам: количество выбрасываемых газов очень велико; поглощение сернистых соединений сопровождается отложением солей кальция и магния на стенках труб, т.е, забиванием аппаратуры. Сероочистка угля и мазута разработана недостаточно и применяется в ограниченном объёме. Поэтому в мировой практике, как правило, очищают от серы дымовые газы, для чего применяют различные процессы. Их можно разделить на три главные группы: процессы с применением жидких поглотителей – абсорбционные (мокрые) и процессы, основанные на взаимодействии газа с твердым веществом – адсорбционные и каталитические (сухие). Преимущественно в этих процессах поглотителем служат известняк или известь.

5.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайная ситуация – это обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которая может повлечь или повлекла за собой человеческие смерти, а также ущерб здоровью людей или окружающей среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

Основные положения действий при чрезвычайных ситуациях описаны в ГОСТ Р 22.0.01-2016 и ГОСТ Р 22.3.03-97.

В настоящее время основными способами защиты населения, в том числе и производственного персонала, являются:

- 1) Укрытие в защитных сооружениях.
- 2) Проведение эвакуационных мероприятий.
- 3) Использование средств индивидуальной защиты.

Существует ряд возможных чрезвычайных ситуаций:

- возгорание угля на складе;
- нарушение процесса горения в топке котла;
- поломка АСР, разница показаний в подаче угля и топлива;
- загорание сажистых отложений в газоходах котла.

Действия оператора:

В соответствии с «Правилами безопасности в газовом хозяйстве» (ст. 3.7.8), в случаях загорания горючих отложений в газоходах, оператор должен немедленно прекратить подачу газа на установку и произвести её аварийную остановку:

1. Немедленно прекратить подачу топлива и воздуха в топку; и снизить до нуля тягу, для этого:

1.1. остановить вентилятор и дымосос

1.2. закрыть шиберы за котлом, направляющие аппараты дымососа и вентилятора

2. Подать пар в топку и газоход котла через обдувочные устройства и (или) через форсунки

3. Отключить котёл от паропровода

4. После прекращения горения в газоходе котла включить в работу дымосос и вентилятор

5. После выхода пара из газоходов провентилировать котёл в течение 15 минут при полностью открытых направляющих аппаратах вентилятора и дымососа

6. В случае последующего включения котла в работу, растопить его и работать при малых нагрузках, создать в газоходах повышенное разрежение и тщательно обдуть конвективные поверхности, экономайзер и газоходы котла.

5.4.1. Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований

В котельной наибольшую опасность представляет возникновение возгорания. Поскольку топливо необходимо складировать, для дальнейшего сжигания, то существует вероятность воспламенения.

При эксплуатации необходимо контролировать состояние штабелей путем внешнего осмотра и измерения температуры в штабелях. Признаками самовозгорания являются повышение температуры, наличие пятен на увлажненной поверхности штабеля. Если появились признаки самовозгорания топлива, то необходимо в первую очередь начать подачу топлива из этого штабеля в бункера котлов, но без очагов огня во избежание пожара в котельном цехе.

Самой распространенной причиной возникновения пожара в котельных является нарушение противопожарных правил. Поэтому обслуживающий персонал должен эти правила хорошо знать и выполнять.

5.4.2. Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований

При установке оборудования автоматизации, особое требование предъявляется к качеству монтажа технических средств. Поэтому такой монтаж производят слесари КИПиА с разрядом не ниже 4, ведь от их квалификации и качества выполнения монтажных работ зависит жизни людей. Помимо риска обслуживающего персонала, существует риск оставить людей в зимней период времени без теплоснабжения, что приведет к плачевным последствиям.

5.4.3. Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС

Были проведены следующие противопожарные мероприятия:

- помещение было оборудовано: средствами тушения пожара (огнетушителями, ящиком с песком, стендом с противопожарным инвентарем); средствами связи; проверена исправность электрической проводки осветительных приборов и электрооборудования;
- каждый сотрудник знает место нахождения средств пожаротушения и средств связи; помнит номера телефонов для сообщения о пожаре; умеет пользоваться средствами пожаротушения.

При невозможности самостоятельно потушить пожар необходимо вызвать пожарную команду, после чего поставить в известность о случившемся инженера по технике безопасности.

Ни в коем случае нельзя допускать применения при растопках котлоагрегатов керосина, бензина или других пожароопасных жидкостей, так как применение вышеуказанных жидкостей при растопках приводит к возникновению пожара. К возникновению пожара приводят неисправная электропроводка в котельной, а также оседающая на пол, стены, на котлы и в другие места топливная горячая пыль, которая может в любое время загореться, и пламя быстро распространится по всему помещению.

Не следует заливать очаги горения в штабеле водой, так как это интенсифицирует процесс самовозгорания. Для ликвидации очагов горения штабель вскрывают, переносят очаги горения на специальную площадку и на ней заливают водой. Запасы топлива на резервных складах необходимо все время обновлять, расходуя в первую очередь штабеля, в которых температура поднялась до 40–60 °С.

5.5. Выводы по разделу

Как итог проделанной работы по разделу «Социальная ответственность» можно отметить следующее:

- в работе рассмотрена социальная ответственность предприятий (корпоративная социальная ответственность) и указаны задачи по сохранению и улучшению окружающей среды;

- рассмотрена личная социальная ответственность индивида;

- выявлены и описаны вредные и опасные факторы, возникающие на производстве;

- указаны методики и средства борьбы с этими факторами;

- описаны возможные ЧС и меры по их предупреждению и оповещению, а также приведены регламентированные требования по поведению персонала при ЧС;

- отражены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности рабочего персонала.

Заключение

При выполнении магистерской диссертации было проведено экспериментальное исследование условий и характеристик зажигания и горения одиночных капель трех групп составов композиционного жидкого топлива на основе ФК с добавлением в качестве горючих компонентов мелкодисперсных частиц типичных ТБО (древесины, резины, пластика, картона), а также отработанного турбинного масла.

Установлены области гарантированных времен задержки зажигания трех групп топливных композиций разного состава при температурах окружающей среды 600–1000 °С в условиях, соответствующих условиям сжигания топлив в топках энергетических котлов.

Для разработки методики исследований выполнен анализ современных методов исследования процессов зажигания и горения топлив в топках котельных агрегатов. Экспериментальное исследование процесса зажигания образцов композиционного топлива выполнено с использованием экспериментального стенда, содержащего современные средства видеорегистрации быстропротекающих процессов и анализа продуктов химического реагирования.

Результаты экспериментальных исследований позволяют сделать вывод о том, что основные экологические характеристики (CO , CO_2 , NO_x , SO_x , зола микронных фракций) дымовых газов при сжигании композиционных топлив, приготовленных из низкосортных углей или отходов углеобогащения, воды и горючей жидкости не хуже, чем аналогичные характеристики дымовых газов при сжигании угольной пыли по традиционной для угольных ТЭС технологии. Установлено, что в зависимости от состава композиционного топлива температуры в топке котла в процессе горения могут достигать 1300 °С, что способствует снижению содержания диоксинов и фуранов в дымовых газах. Возможность варьирования компонентной базы композиционных топлив в широких диапазонах позволяет разрабатывать топливные составы с

прогнозируемыми энергетическими, экономическими и экологическими характеристиками.

На основе сформулированных по результатам экспериментальных исследований рекомендаций разработана автоматическая система регулирования процесса горения композиционного топлива в топке котла. Спроектированы структурная и функциональная схемы, составлена заказная спецификация приборов и средств автоматизации, разработаны принципиальная электрическая схема соединений щита управления, перечень элементов, общий вид щита управления. К основным достоинствам разработанной АСР относятся ее трехуровневый принцип организации, оснащение современным микропроцессорным оборудованием и средствами автоматизации, минимизация участия диспетчеров в ведении технологического процесса, возможность дистанционной передачи информации и управляющих воздействий.

Также выполнена оценка экономической эффективности реализации данного проекта и экологических показателей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Jimenez, L., Mate, M.J., Lopez-Arevalo, I., Oms, T.M., 2011. Operational predictive model for a municipal waste incinerator: A Spanish case study, *International Journal of Environmental Research* 5(3), 639–650.
2. Moskvichev, V.F., Tugov, A.N., 2012. Analysis of operating experience with steam air preheaters at Russian municipal solid waste thermal power plants. *Power Technology and Engineering* 46(1), 46–51.
3. Wang, H., Wang, C., 2013. Municipal solid waste management in Beijing: Characteristics and challenges. *Waste Management and Research* 31(1), 67–72.
4. Jeswani, H.K., Smith, R.W., Azapagic, A., 2013. Energy from waste: Carbon footprint of incineration and landfill biogas in the UK. *International Journal of Life Cycle Assessment* 18(1), 218–229.
5. De Souza, S.N.M., Horttanainen, M., Antonelli, J., Lindino, C.A., Nogueira, C.E.C., 2014. Technical potential of electricity production from municipal solid waste disposed in the biggest cities in Brazil: Landfill gas, biogas and thermal treatment. *Waste Management and Research* 32(10), 1015–1023.
6. Funari, V., Braga, R., Bokhari, S.N.H., Dinelli, E., Meisel, T., 2015. Solid residues from Italian municipal solid waste incinerators: A source for “critical” raw materials. *Waste Management* 45, 206–216.
7. Dong, J., Tang, Y., Nzihou, A., Ni, M., Zhou, Z., 2018. Comparison of waste-to-energy technologies of gasification and incineration using life cycle assessment: Case studies in Finland, France and China. *Journal of Cleaner Production* 203, 287–300.
8. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050.
9. Block, C., Van Caneghem, J., Van Brecht, A., Wauters, G., Vandecasteele, C., 2015. Incineration of hazardous waste: A sustainable process? *Waste and Biomass Valorization* 6(2), 137–145.

10. Messerle, V.E., Mosse, A.L., Ustimenko, A.B., 2018. Processing of biomedical waste in plasma gasifier. *Waste management* 79, 791–799.
11. Tugov, A.N., 2015. Experience of using municipal solid waste in the energy industry (An Overview) *Thermal Engineering* 62(12), 853–861.
12. Pasek, A.D., Gultom, K.W., Suwono, A., 2013. Feasibility of recovering energy from municipal solid waste to generate electricity. *Journal of Engineering and Technological Sciences* 45(3), 241–256.
13. Khandelwal, H., Dhar, H., Thalla, A.K., Kumar, S., 2019. Application of life cycle assessment in municipal solid waste management: A worldwide critical review. *Journal of Cleaner Production* 209, 630–654.
14. Tugov A.N., Ryabov G.A., Shtegman A.V., Ryzhii I.A., Litun D.S. 2016. All-Russia Thermal Engineering Institute experience in using difficult to burn fuels in the power industry. *Thermal Engineering*. 63(7), 455–462.
15. Zagrutdinov, R.Sh., Negutorov, V.N., Malykhin, D.G., Senachin, P.K., Nikishanin, M.S., Filipchenko, S.A., 2013. Preparation and gasification of solid household waste in two-zone direct-gas process gas generators operating as part of mini-CHP and complexes for the production of synthetic liquid fuels. *Polzunovskiy vestnik* (4/3), 47–62 (in Russian).
16. Istrate, I.-R., García-Gusano, D., Iribarren, D., Dufour, J., 2019. Long-term opportunities for electricity production through municipal solid waste incineration when internalising external costs. *Journal of Cleaner Production* 215, 870–877.
17. Santos, R.E.D., Santos, I.F.S.D., Barros, R.M., Tiago Filho, G.L., Silva, F.D.G.B.D., 2019. Generating electrical energy through urban solid waste in Brazil: An economic and energy comparative analysis. *Journal of Environmental Management* 231, 198–206.
18. Chen, Y.-C., 2018. Evaluating greenhouse gas emissions and energy recovery from municipal and industrial solid waste using waste-to-energy technology. *Journal of Cleaner Production* 192, 262–269.

19. Makarichi, L., Jutidamrongphan, W., Techato, K.-A., 2018. The evolution of waste-to-energy incineration: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 91, 812–821.
20. Singh, A., Basak, P., 2018. Economic and environmental evaluation of municipal solid waste management system using industrial ecology approach: Evidence from India. *Journal of Cleaner Production* 195, 10–20.
21. Hu, Y., Cheng, H., Tao, S., 2018. The growing importance of waste-to-energy (WTE) incineration in China's anthropogenic mercury emissions: Emission inventories and reduction strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 97, 119–137.
22. Mancini, E., Arzoumanidis, I., Raggi, A., 2019. Evaluation of potential environmental impacts related to two organic waste treatment options in Italy. *Journal of Cleaner Production* 214, 927–938.
23. Messerle, V.E., Mosse, A.L., Nikonchuk, A.N., Ustimenko, A.B., Baimuldin, R.V. Mancini, E., Arzoumanidis, I., Raggi, A., 2019. Plasma processing of model residential solid waste. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics* 90(5), 1192–1197.
24. Banke, K., Hegner, R., Schröder, D., Schulz, C., Atakan, B., Kaiser, S.A., 2019. Power and syngas production from partial oxidation of fuel-rich methane/DME mixtures in an HCCI engine. *Fuel* 243, 97–103.
25. Park, S.-W., Lee, S.-Y., Jeong, Y.-O., Han, G.-H., Seo, Y.-C., 2018. Effects of oxygen enrichment in air oxidants on biomass gasification efficiency and the reduction of tar emissions. *Energies* 11(10), Article number 2664.
26. Liu, Z., 2019. Gasification of municipal solid wastes: a review on the tar yields. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects* 41(11), 1296–1304.
27. Arena, U., 2012. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. *Waste Management* 32(4), 625–639, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.025>.

28. Consonni, S., Viganò, F., 2012. Waste gasification vs. conventional waste-to-energy: A comparative evaluation of two commercial technologies. *Waste Management* 32(4), 653–666. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.12.019>.
29. Kurgankina, M.A., Nyashina, G.S., Strizhak, P.A., 2019. Advantages of switching coal-burning power plants to coal-water slurries containing petrochemicals. *Applied Thermal Engineering* 147, 998–1008.
30. Glushkov, D.O., Shabardin, D.P., Strizhak, P.A., Vershinina, K.Yu., 2016. Influence of organic coal-water fuel composition on the characteristics of sustainable droplet ignition. *Fuel Processing Technology* 143, 60–68.
31. International Energy Agency, 2017. Coal Information. <http://www.iea.org>.
32. Stigka, E.K., Paravantis, J.A., Mihalakakou, G.K., 2014. Social acceptance of renewable energy sources: A review of contingent valuation applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 32, 100–106.
33. Panwara, N.L., Kaushik, S.C., Kothari, S., 2011. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15, 1513–1524.
34. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC.
35. Khan, M.M.U.H., Jain, S., Vaezi, M., Kumar, A., 2016. Development of a decision model for the techno-economic assessment of municipal solid waste utilization pathways. *Waste Management*. 48, 548–564.
36. Rizwan, M., Saif, Y., Almansoori, A., Elkamel, A., 2018. Optimal processing route for the utilization and conversion of municipal solid waste into energy and valuable products. *Journal of Cleaner Production*. 174, 857–867.
37. International Energy Agency, 2017. Key world energy statistics. <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2017.pdf>

38. BP, 2017. Statistical Review of World Energy. <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf>
39. U.S. Energy Information Administration, 2017. International Energy Outlook. [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2017).pdf).
40. Stegenta, S., Dębowski, M., Bukowski, P., Randerson, P.F., Białowiec, A., 2018. The influence of perforation of foil reactors on greenhouse gas emission rates during aerobic biostabilization of the undersize fraction of municipal wastes. *Journal of Environmental Management*. 207, e10.
41. Zasyplin, I.M., Murko, V.I., Fedyaev, V.I., Baranova, M.P., 2012. Systems of ignition and combustion stabilization for water-coal fuel. *Thermal Science*. 16(4), 1229–1238.
42. Syrodoy, S.V., Kuznetsov, G.V., Zhakharevich, A.V., Gutareva, N.Yu., Salomatov, V.V., 2017. The influence of the structure heterogeneity on the characteristics and conditions of the coal–water fuel particles ignition in high temperature environment. *Combustion and Flame*. 180, 196–206.
43. Glushkov, D.O., Strizhak, P.A., Chernetskii, M.Y., 2016. Organic coal-water fuel: Problems and advances (Review). *Thermal Engineering*. 63(10), 707–717.
44. Glushkov, D.O., Strizhak, P.A., 2017. Ignition of composite liquid fuel droplets based on coal and oil processing waste by heated air flow. *Journal of Cleaner Production*. 165, 1445–1461.
45. Dmitrienko, M.A., Strizhak, P.A., Tsygankova, Y.S., 2017. Technoeconomic analysis of prospects of use of organic coal-water fuels of various component compositions. *Chemical and Petroleum Engineering*. 53(3-4), 195–202.
46. Nyashina, G.S., Kuznetsov, G.V., Strizhak, P.A., 2018. Energy efficiency and environmental aspects of the combustion of coal-water slurries with and without petrochemicals. *Journal of Cleaner Production*. 172, 1730–1738.
47. Dmitrienko, M.A., Strizhak, P.A., 2018. 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*. 613-614, 1117–1129.

48. Tang, X., Song, M., Lei, Y., Wang, X., 2017. Comparison and application of different component municipal solid wastes based carbon on adsorption of carbon dioxide. *International Journal of Green Energy*. 14(2), 135–140.

49. Hoornweg, D., Bhada-Tata, P., 2012. *What a Waste: a Global Review of Solid Waste Management*. The World Bank. Washington.

50. Moriguchi, Y., Hashimoto, S., 2015. Material Flow Analysis and Waste Management, in: Clift, R., Druckman, A. (Eds.), *Taking Stock of Industrial Ecology*. Springer International Publishing. pp. 247–262.

51. Edjabou, M.E., Martín-Fernández, J.A., Scheutz, C., Astrup, T.F., 2017. Statistical analysis of solid waste composition data: Arithmetic mean, standard deviation and correlation coefficients. *Waste Management*. 69, 13–23.

52. Wang, Y., Liang, S., 2013. Carbon dioxide mitigation target of China in 2020 and key economic sectors. *Energy Policy*. 58, 90–96.

53. Malinauskaite, J., Jouhara, H., Czajczyńska, D., Stanchev, P., Katsou, E., Rostkowski, P., Thorne, R.J., Colón, J., Ponsá, S., Al-Mansour, F., Anguilano, L., Krzyżyńska, R., López, I.C., Vlasopoulos, A., Spencer, N., 2017. Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe. *Energy*. 141, 2013–2044.

54. Smith, M.M., Aber, J.D., 2018. Energy recovery from commercial-scale composting as a novel waste management strategy. *Applied Energy*. 211, 194–199.

55. Teixeira, S., Monteiro, E., Silva, V., Rouboa, A., 2014. Prospective application of municipal solid wastes for energy production in Portugal. *Energy Policy*. 71, 159–168.

56. Nizami, A.S., Shahzad, K., Rehan, M., Ouda, O.K.M., Khan, M.Z., Ismail, I.M.I., Almeelbi, T., Basahi, J.M., Demirbas, A., 2017. Developing waste biorefinery in Makkah: A way forward to convert urban waste into renewable energy. *Applied Energy*. 186, 189–196.

57. Tanguy, A., Villot, J., Glaus, M., Laforest, V., Hausler, R., 2017. Service area size assessment for evaluating the spatial scale of solid waste recovery chains: A territorial perspective. *Waste Management*. 64, 386–396.
58. Song, J., Song, D., Zhang, X., Sun, Y., 2013. Risk identification for PPP waste-to-energy incineration projects in China. *Energy Policy*. 61, 953–962.
59. Urbancl, D., Zlak, J., Anicic, B., Trop, P., Goricanec, D., 2016. The evaluation of heat production using municipal biomass co-incineration within a thermal power plant. *Energy*. 108, 140–147.
60. Touš, M., Pavlas, M., Putna, O., Stehlík, P., Crha, L., 2015. Combined heat and power production planning in a waste-to-energy plant on a short-term basis. *Energy*. 90, 137–147.
61. Milutinović, B., Stefanović, G., Đekić, P.S., Mijailović, I., Tomić, M., 2017. Environmental assessment of waste management scenarios with energy recovery using life cycle assessment and multi-criteria analysis. *Energy*. 137, 917–926.
62. Tan, H., Zhao, Y., Ling, Y., Wang, Y., Wang, X., 2017. Emission characteristics and variation of volatile odorous compounds in the initial decomposition stage of municipal solid waste. *Waste Management*. 68, 677–687.
63. Islam, K.M.N., 2018. Municipal solid waste to energy generation: An approach for enhancing climate co-benefits in the urban areas of Bangladesh. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 81, 2472–2486.
64. Sun, R., Ismail, T.M., Ren, X., Abd El-Salam, M., 2015. Numerical simulation of gas concentration and dioxin formation for MSW combustion in a fixed bed. *Journal of Environmental Management*. 157, 111–117.
65. Bikbau, M.Ya., 2009. New approaches to MSW processing. *Ecological Herald of Russia*. 12, 48–51 (in Russian).
66. Faitli, J., Magyar, T., Erdélyi, A., Murányi, A., 2015. Characterization of thermal properties of municipal solid waste landfills. *Waste Management*. 36, 213–221.

67. Tabakaev, R., Shanenkov, I., Kazakov, A., Zavorin, A., 2017. Thermal processing of biomass into high-calorific solid composite fuel. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 124, 94–102.

68. Сведения об образовании, использовании, обезвреживании, транспортировании и размещении отходов производства и потребления по форме 2-ТП (отходы), по субъектам РФ и видам экономической деятельности за год <http://rpn.gov.ru/opendata/7703381225-rpnstatf2tpperVEDandSUBJ>

69. Постановление № 367 от 26 сентября 2016 г. «Об утверждении территориальной схемы обращения с отходами производства и потребления, в том числе с твердыми коммунальными отходами, Кемеровской области».

70. Проект постановления Правительства Новосибирской области «Об утверждении территориальной схемы обращения с отходами, в том числе с твердыми коммунальными, Новосибирской области».

71. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды Кемеровской области в 2016 году».

72. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Новосибирской области в 2016 году».

73. Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды Томской области в 2016 году».

74. Постановление Администрации города Томска № 798/1 от 24 июля 2013 г. «Об утверждении муниципальной программы «Развитие коммунальной инфраструктуры муниципального образования город Томск на 2014–2019 годы».

75. Галиев М.А., Шаретдинов Э.Ф. Экология Башкортостана. – Уфа: Изд-во “Республиканский учебно-научный методический центр Госкомитета РБ по науке, высшему и среднему профессиональному образованию”, 2001. – 344 с.

76. Faitli J., Magyar T., Erdélyi A., Murányi A. Characterization of thermal properties of municipal solid waste landfills. *Waste Management*. 2015. V. 36. P. 213–221.

77. Постановление № 477 от 21 октября 2011 г. «Об утверждении комплексной инвестиционной программы «Обращение с отходами производства и потребления на территории Кемеровской области на 2011–2016 годы и на период до 2020 года».

78. «Об утверждении комплексной инвестиционной программы «Обращение с отходами производства и потребления на территории Кемеровской области на 2011–2016 годы и на период до 2020 года» (с изменениями на: 30.12.2014).

79. Региональная программа «Развитие системы обращения с отходами производства и потребления на территории Томской области на 2012–2014 годы и на период до 2020 года».

80. Схема теплоснабжения города Кемерово до 2033 года (Актуализация на 2019 год) Обосновывающие материалы Книга 1. Существующее положение в сфере производства, передачи и потребления тепловой энергии для целей теплоснабжения, Кемерово, 2018.

81. Обосновывающие материалы к схеме теплоснабжения города Новосибирска до 2031 года (Актуализация на 2017 год) Книга 1. Существующее положение в сфере производства, передачи и потребления тепловой энергии для целей теплоснабжения, Новосибирск, 2016.

82. Обосновывающие материалы к схеме теплоснабжения города Томска до 2033 года (Актуализация на 2019 год) Книга 1. Существующее положение в сфере производства, передачи и потребления тепловой энергии для целей теплоснабжения, Томск, 2018.

83. Обосновывающие материалы к схеме теплоснабжения города Новосибирска до 2031 года (Актуализация на 2017 год) Книга 9. Перспективные топливные балансы, Новосибирск, 2016.

84. Схема теплоснабжения города Кемерово до 2033 года (Актуализация на 2019 год) Обосновывающие материалы Книга 9. Перспективные топливные балансы, Кемерово, 2018.

85. Nyashina G.S., Vershinina K.Yu., Dmitrienko M.A., Strizhak P.A. Environmental benefits and drawbacks of composite fuels based on industrial wastes and different ranks of coal. *Journal of Hazardous Materials*. 2018. V. 347. P. 359–370.
86. Dmitrienko M.A., Nyashina G.S., Strizhak P.A. Major gas emissions from combustion of slurry fuels based on coal, coal waste, and coal derivatives. *Journal of Cleaner Production*. 2018. V. 177. P. 284–301.
87. Nyashina, G.S., Legros, J.C., Strizhak, P.A., 2017. Environmental potential of using coal-processing waste as the primary and secondary fuel for energy providers. *Energies* 10(3), Article number 405, 1–11.
88. Glushkov, D.O., Strizhak, P.A., 2017. Ignition of composite liquid fuel droplets based on coal and oil processing waste by heated air flow. *Journal of Cleaner Production* 165, 1445–1461.
89. Nyashina, G.S., Kuznetsov, G.V., Strizhak, P.A., 2018. Energy efficiency and environmental aspects of the combustion of coal-water slurries with and without petrochemicals. *Journal of Cleaner Production* 172, 1730–1738.
90. Glushkov, D.O., Paushkina, K.K., Shabardin, D.P., Strizhak, P.A., 2018. Environmental aspects of converting municipal solid waste into energy as part of composite fuels. *Journal of Cleaner Production* 201, 1029–1042.
91. Nyashina, G.S., Strizhak, P.A., 2018. Impact of forest fuels on gas emissions in coal slurry fuel combustion. *Energies* 11(9), Article number en11092491.
92. Dmitrienko M.A., Nyashina G.S., Strizhak P.A. Environmental indicators of the combustion of prospective coal water slurry containing petrochemicals. *Journal of Hazardous Materials*. 2017. V. 338. P. 148–159.
93. Jellinek, H., Kachi, H., 1984. The catalytic thermal decomposition of water and the production of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy* 9(8), 677–688.
94. Nernst, W., 1926. *Theoretische Chemie (Theoretical Chemistry)*, 11th–15th ed., Verlag von Ferdinand Enke, Stuttgart, Germany.

95. Efstathiou, A.M., Olympiou, G.G., 2017. Industrial NO_x control via H₂-SCR on a novel supported-Pt nanocatalyst. *Chemical Engineering Journal* 170(2-3), 424–432.
96. Daood, S.S., Ord, G., Wilkinson, T., Nimmo, W., 2014. Fuel additive technology – NO_x reduction, combustion efficiency and fly ash improvement for coal fired power stations. *Fuel* 134, 293–306.
97. Feng, T., Huo, M., Zhao, X., T. Wang, T., 2017. Reduction of SO₂ to elemental sulfur with H₂ and mixed H₂/CO gas in an activated carbon bed. *Chemical Engineering Research* 121, 191–199.
98. Glushkov D, Kuznetsov G, Paushkina K, Shabardin D. The main elements of a strategy for combined utilization of industrial and municipal waste from neighboring regions by burning it as part of composite fuels. *Energies* 2018;11.
99. Обосновывающие материалы к схеме теплоснабжения города Томска до 2033 года (актуализация на 2019 год) книга 1. существующее положение в сфере производства, передачи и потребления тепловой энергии для целей теплоснабжения. Tomsk: 2018.
100. Обосновывающие материалы к схеме теплоснабжения города Новосибирска до 2031 года (Актуализация на 2017 год) Книга 9. Перспективные топливные балансы. Novosibirsk: 2016.
101. Схема теплоснабжения города Кемерово до 2033 года (Актуализация на 2019 год) Обосновывающие материалы Книга 9. Перспективные топливные балансы. Кемерово: 2018.
102. Конституция Российской Федерации (принята всенародным голосованием 12.12.1993) (с учетом поправок, внесенных Законами РФ о поправках к Конституции РФ от 30.12.2008 N 6-ФКЗ, от 30.12.2008 N 7-ФКЗ, от 05.02.2014 N 2-ФКЗ, от 21.07.2014 N 11-ФКЗ) / Собрание законодательства РФ, 04.08.2014, N 31, ст. 4398.
103. 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.

104. 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.

105. Правила устройства электроустановок. Минэнерго СССР, 6-е издание – Энергоатомиздат, 1996. – 640с.

106. Bazyn, T., Krier, H., Glumac, N., 2006. Combustion of nanoaluminum at elevated pressure and temperature behind reflected shock waves. *Combustion and Flame*. 145(4), 703–713.

107. Ilinykh, G.V., 2013. Evaluation of thermotechnical properties of solid waste from their morphological composition. *Vestnik Permskogo Natsionalnogo Issledovatel'skogo Politekhnicheskogo Universiteta. Urbanistika*. 11(3), 125–137 [in Russian].

108. Zhou, H., Meng, A., Long, Y., Li, Q., Zhang, Y., 2014. Classification and comparison of municipal solid waste based on thermochemical characteristics. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 64(5), 597–616.

109. Hoornweg, D., Bhada-Tata, P., 2012. *What a Waste: a Global Review of Solid Waste Management*. The World Bank, Washington.

110. IEA (International Energy Agency), 2017a. *Coal Information*. <http://www.iea.org> (accessed 22 May 2018).

111. IEA (International Energy Agency), 2017b. *Key world energy statistics*. <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2017.pdf> (accessed 22 May 2018).

112. World energy council, 2016. *World energy resources. Coal*. https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2017/03/WEResources_Coal_2016.pdf (accessed 07 May 2018).

113. UNSD (United Nations Statistics Division), 2015. *Lubricants total production*. <http://data.un.org/Data.aspx?q=Lubricants&d=EDATA&f=cmID%3aLU> (accessed 07 May 2018).

114. BP (British Petroleum), 2017. Statistical Review of World Energy 2017. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> (accessed 07 May 2018).

115. Pandey, D.S., Das, S., Pan, I., Leahy, J.J., Kwapinski, W., 2016. Artificial neural network based modelling approach for municipal solid waste gasification in a fluidized bed reactor. *Waste Management*. 58, 202–213.

116. Nyashina, G.S., Vershinina, K.Yu., Dmitrienko, M.A., Strizhak, P.A., 2018b. Environmental benefits and drawbacks of composite fuels based on industrial wastes and different ranks of coal. *Journal of Hazardous Materials*. 347, 359–370.

117. Андык В.С. Теория автоматического управления. Учебное пособие к практическим занятиям: – Томск: Изд. ТПУ, 2000. – 108 с.

118. Стефани Е.П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. – М.: Энергия, 1972. – 376 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Municipal solid waste utilization by burning as a part of composite fuel with energy generation

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ7Э	Беляев Савелий Викторович		

Консультант ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ИШФВП	Глушков Д.О	к.ф.-м.н.		

Консультант – лингвист отделения иностранных языков:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ, ШБИП	Даминава Е.С	к.п.н.		

Abstract

This work is devoted to the analysis of the prospects of a practical implementation of one of the directions for solving the actual worldwide problem of the typical municipal solid waste (MSW) utilization with energy generation by burning them as a part of the composite fuels, the main components of which are wastes of coal enrichment and oil refining. It is shown that the involvement of such fuels in thermal power engineering will allow utilizing of both industrial and municipal combustible wastes with fossil fuel saving. The annual world growth of the MSW is about 1.5 billion tons to the already accumulated quantity of about 50 billion tons. As a result of the analysis, it is found that partial replacement of coal (50% of energy generation) by the equivalent (in terms of energy generation) quantity of composite fuel will save about 1 billion tons/year of high-quality solid fossil fuel during 20 years (the regulated period of a safe operation of the boiler in the thermal power engineering). The development and implementation of the appropriate technologies will be characterized by the positive social, environmental and economic effects. Utilization of the municipal and industrial waste will help improve an environmental situation in the vicinity of the industrial centers and megalopolises. A partial replacement of coal by the composite fuel will save solid fossil fuels and reduce greenhouse gas emissions (primarily NO_x and SO_x) in the atmosphere from the coal thermal power plants. Expansion of the fuel base in the thermal power engineering will save money for the acquisition of energy resources and direct them to the development of the promising technologies for energy production. The stability of ignition and combustion of the composite fuel drops is experimentally substantiated to full burn-out under the conditions typical for boiler furnaces, on the example of several fuel compositions with additives of wood, food waste, plastic, and cardboard. The values of the guaranteed delay times for the drops ignition with dimensions of about 1 mm are established for the considered fuel compositions in the wide range of the ambient temperature variation 600–1000 °C. The minimum values of ignition delay times are about 3 s, the maximum values are about 25 s. It is established experimentally that the concentration of nitrogen and sulfur oxides in flue

gases is lower for the fuel compositions with the addition of MSW in comparison with the composite fuel without adding of MSW. The maximum difference between the concentrations of NO_x and SO_x for such fuel compositions is about 60% and 35% (in absolute units about 110 ppm and 45 ppm).

A.1. Introduction

A.1.1. Consumption of hydrocarbons in thermal power engineering

The intensive development of the world economy has a direct impact on the increase in energy consumption. Over the past five years, the annual increase in the energy generation at the international level is 2–3% (Figure 1), which is quite significant within the global electricity consumption (about 25 PW·h/year).

Despite the development of the alternative energy sources and the increase more than 10 times in the last 50 years their share in the structure of the global energy balance, the relative value of this characteristic is currently only about 7% (Figure 2). This is almost 9 times less in comparison with the energy generation by TPPs during the combustion of fossil fuels and almost 4 times less than in the energy generation by nuclear power plants and hydroelectric power plants. An increase in the share of renewable energy sources (RES) in practice is hampered by the significant weaknesses [32, 33]:

(i) The low density of the energy flow is the reason for the large size and weight of the RES plants, as a result, the large specific capital costs are required for their construction (from 2 to 15 thousand USD/kW).

(ii) The low efficiency of RES plants to convert primary energy to electricity or heat (12–16% for photoconverters, 30–40% for most RES, 60–70 for hydro power plant).

(iii) The large diurnal and seasonal instability of the main RES requires the development and construction of rather complex technical systems that integrate power plants at different RES, energy storage facilities and installations that generate energy by burning fossil fuels.

All these weaknesses complicate significantly and increase the cost of energy production, reduce the reliability of the energy supply system.

The countries with a limited supply of the traditional energy resources took in practice the incentive programs for the development of RES. These programs, on the one hand, are to encourage the development of the renewable energy sources and expand their nomenclature, on the other hand, they impose restrictions on the combustion of hydrocarbons for energy production. The European Union in 2008 adopted the program [34], according to which by 2020 the share of the RES in the world balance of energy production should be 20%. In 2017, this value was about 15%. The International Energy Agency predicts that the share of the RES will be 46% in the global electricity production balance by the year 2050. A fairly significant increase in capacity is due to the complex application of RES, including biomass, sun, wind, terrestrial subsoil, watercourses (small rivers, canals), waters of seas and oceans containing the potential energy of temperature gradients, kinetic energy of tides, waves and flows, and also the chemical energy of the gradients of salinity. In the recent years, there has been growing interest in combustible municipal and industrial wastes, which have a great potential for energy production at their utilization [35, 36].

For these reasons, as well as in the conditions of the volatility of production volumes and prices (Figure 3) for the liquid and gaseous fossil fuels, the role of coal in thermal power engineering is increasing.

According to experts' estimates [38, 39] in many countries of the world where deposits of solid fossil fuel are located, production and export of high-quality coal brands and own consumption of local low-quality coal brands will increase in the coming decades (Figure 4). Increasing coal combustion by traditional technologies will lead to a significant deterioration of the ecological situation in the world. Coal-fired thermal power plants pollute the atmosphere by gases of CO, CO₂, SO₂, NO_x and fly ash, which contribute significantly to the greenhouse effect [40].

One of the most promising methods for reducing the environmental pollution by coal combustion is the using of new combustion technologies of coal-water slurry [41, 42] and coal-water slurry containing petrochemicals [43-45].

These technologies involve the combustion of the composite fuels instead of coal. Such fuels, as a rule, consist of three main components [43-47]: low-quality coal or coal enrichment waste 40–50%, water 30–40% (including sewage or process polluted water) and waste combustible liquid 5–20% (used transformer, turbine, automotive oils, etc.). The combustion process of composite fuel is characterized by better environmental and economic indicators compared to the process of solid fossil fuel combustion [46, 47]. It is explained by the high completeness of fuel combustion due to low-temperature activation of fuel reactivity during the ignition stage and the intensification of the combustion process. The composite fuel is characterized not only by high combustion temperatures commensurate with the burning temperatures of solid fossil fuel, but also by the relatively low content of greenhouse gases in the flue gases [46, 47].

In recent years, in addition to solving the problem of energy shortage, the urgent task is the utilization of municipal solid waste. MSW is a valuable resource for thermal power engineering as the average content of energy fractions (cardboard, paper, wood, textiles, polymer materials, etc.) is about 80% of the total quantity of municipal solid waste [48]. The addition about 10% of the typical MSW to the composite fuels will contribute to the joint solution of the problems of energy deficit and effective utilization of municipal solid waste.

A.1.2. Utilization of municipal solid waste

At present, the problem of processing and recycling of municipal solid waste is a serious environmental problem all over the world [49-66]. The annual worldwide production of such wastes is 1.3–1.6 billion tons [49-51]. The influence of MSW on the deterioration of the ecological situation in some indicators is commensurate with the effect of coal thermal power plants and transport [52], because about 60% of

MSW is not recycled and dumping in landfills. This leads to irreversible pollution of the environment and deterioration of the ecological situation.

The depth of waste recycling differs significantly in different countries [53]. In accordance with the EU Waste Framework Directive, the following traditional approaches (Figure 5) to MSW recycling and utilization can be distinguished conventionally [54]: recirculation, recycling, dumping, composting, burning without energy generation to reduce landfill area, gas production as a result of pyrolysis, industrial burning with using the released energy.

The most advanced industrial technologies are used in Germany, Austria and Belgium [53] (Table 1), where the vast majority of MSW is recycled and reused in industry. In Denmark, Sweden, Switzerland and Japan, more than 40% of all waste is burned for the production of electricity and heat. As a result of combustion, it is possible to extract up to 80% of the energy contained in the waste [55]. At the same time, the landfill areas are reduced for dumping of solid non-combustible residue. Despite this fact, direct combustion of waste has certain drawbacks. Incineration plants must be equipped with complex and expensive filters for cleaning flue gases to reduce the concentration of the harmful volatile components to the level of maximum permissible concentrations [56]. This problem is relevant for the following reasons. In 2011, 64% of municipal solid waste was burned in Japan. Currently, there are 120 incineration plants with a total capacity of 12 million tons MSW/year in France. There are 34 incineration plants in Denmark, 4 plants in Norway, 1 plant in Luxembourg, and 1 plant in Finland. About 2500 incineration plants operate in the world, of which about 400 are in the EU [53], where 25% of total MSW are burnt.

Despite the obvious progress in solving the above-mentioned problems, until recently, the urgent task is to move from a model of storage and disposal of waste to a model for their utilization and recycling. Most of the MSW is stored in the landfills in the UK, Greece, India, Ireland, Spain, Italy, Canada, Portugal, Russia, the USA, Finland, China [56-60]. The official and unofficial polygons are located in huge territories (tens of millions of hectares). Their area is increased annually by 6–8%, especially in the vicinity of large cities. The negative impact on the ecological

situation consists in removing large areas from agriculture, as well as in soil, groundwater and atmospheric pollution in the vicinity of locality [61, 62]. In addition to the negative local influence, the released gases in the process of thermal decomposition of the MSW and slow burning in the territories of the polygons are the main components of the greenhouse gas. As it has been known, increasing the concentration of this gas in the atmosphere leads to the intensification of global warming [63]. According to specialists' estimations [49-51], more than 60% of MSW is stored in the landfills in the world (Table 1).

According to the world experience, the transition from storage and disposal of waste to their full processing and reuse requires the intermediate stage – the utilization of waste by burning with the generation of electricity and heat [60, 64]. Such measures will allow recycling already accumulated waste that is unsuitable for reuse. Thus, the topical task is to develop measures for the use of MSW in order to reduce the pollution and improve the environmental situation near the landfills. As a rule, such problems are solved by directly burning a dispersed mixture of the initial components with energy generation [58]. However, the complete replacement of fossil fuels by combustible MSW is economically, environmentally and technically inexpedient due to the relatively low heat content of MSW (about 10 MJ/kg [66]) in comparison with the solid fossil fuels of 20–30 MJ/kg [67]. Also due to the relatively high concentration of the greenhouse gases in the MSW flue gases.

An alternative solution to these problems is the use of MSW as components of the composite liquid fuels consisting of waste of coal enrichment (or a mixture of low-quality coal with water) and waste of oil refining (used oils: transformer, turbine, automotive, etc.). It can be assumed on the basis of the estimates [45] that the adding of the typical MSW in the composite fuels in an amount of 10–20% will reduce by 20–30% the area of the newly organized landfills. The main components of MSW are: paper and cardboard in an amount of 25–30% of the total quantity of waste; organic waste (including food) 26–35%; metal and glass 5–12%; plastic 7–10%; wood, textiles and rubber 6–12% [49–51]. Thus, the content of the energy fractions (cardboard, paper, wood, textiles, plastic) is about 80% of the total quantity of MSW.

A.1.3. Purpose and tasks of the research

The purpose of the present work is to analyze the potential quantity of energy production by burning the typical MSW as a component of the composite fuels consisting of waste of coal enrichment and oil refining.

To achieve the purpose, we have solved the following tasks:

(i) Ignition of drops of the composite fuel of different compositions has been investigated experimentally to justify the possibility of the fuel combustion under the conditions typical for boiler furnaces.

(ii) The analysis of the structure, volumes and energy potential has been carried out for the most widespread MSW, low-grade coals, wastes of coal enrichment and oil refining.

(iii) The concept of involving the promising composite fuels (consisting of low-grade coals, waste of coal enrichment and oil refining, MSW) into the thermal power engineering has been proposed with the justification of positive environmental, economic and social effects within the framework of the world energy production by coal combustion.

A.2. Experimental setup, procedure and results

A.2.1. Experimental setup

The processes of ignition and combustion of single drops of the composite fuel were investigated with using an experimental setup (Figure A1). Its advantage consists in the possibility of varying the temperature of the heating air in a wide range of 400–1000 °C. Such values correspond to the temperatures of the processes of fuel combustion in boiler furnaces of different configurations.

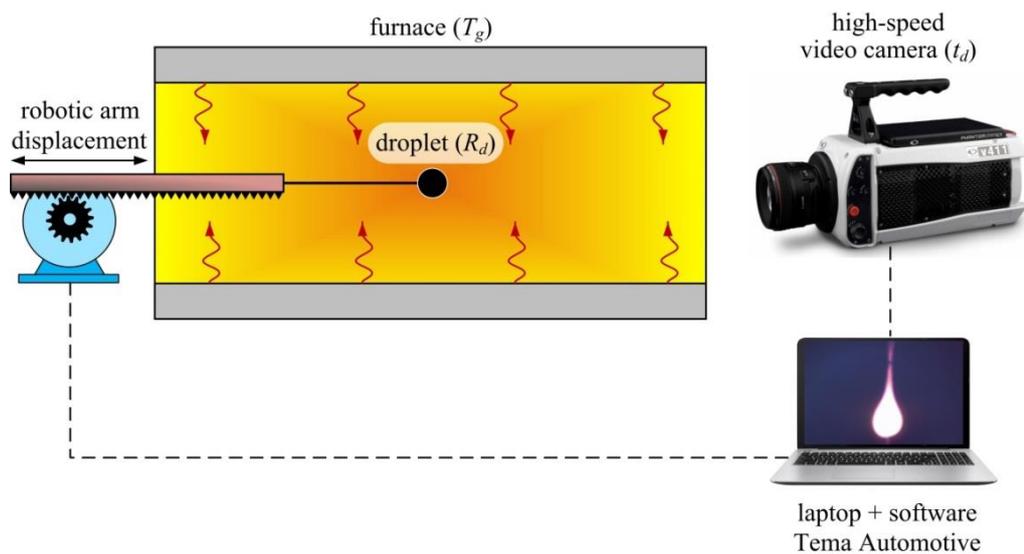


Figure A1 – Schematic of experimental setup

The main part of the setup (Figure A1) is a tubular muffle furnace Nabertherm R 50/250/13. The internal diameter of the ceramic tube is 0.04 m, its length is 0.45 m; range of temperature variation 20–1200 °C. The fuel drops of the size (radius) about 1 mm were generated by the Finnpiquette Novus electronic dispenser (range 1–10 μ l, variation step 0.1 μ l) and were deposited on a ceramic holder. That was introduced into the furnace with the assistance of the robotic arm (Figure 6) through one of the end holes of the ceramic tube along its axis of symmetry. On the side of the opposite end hole a high-speed video camera was installed for registering the occurring processes. A color video camera Phantom V411 was used (4200 frames per second at maximum resolution 1280×800 pixels; pixel size 20 μ m; minimal exposure 1 μ s; 12 bit depth; 16 Gb memory).

During a series of five experiments with the identical initial conditions, the temperature (T_g) of the heated air in the furnace and the initial radius (R_d) of the drop was monitored. The using of a high-speed video recording complex made it possible to conduct a detailed analysis of the regularities of the combustion process and calculate automatically the ignition delay time (t_d). The values of t_d were determined from the evolution of the luminosity of the drop in time [106] within the framework of the Threshold algorithm. Realized by the group of the procedures of the software Tema Automotive. The systematic errors in t_d determining were not exceeded 3%.

The random errors for the series of the experiments conducted under identical conditions were less than 10%.

A.2.2. Materials

The research was carried out for five fuel samples based on the filter cake of coking coal obtained from the enrichment plant “Severnaya” of the Kemerovo region in the Russian Federation. Such combustible wastes are by-products of coal enrichment that can be used in the thermal power engineering as a fuel. The filter cake is a mixture of finely divided coal (particle size not more than 80 μm) and water (mass concentration about 50%). As a rule, at the coal enrichment plants, the filter cake is stored in the open landfills. This leads to the pollution of large areas by coal dust and environmental degradation.

The investigation was performed for the following fuel compositions: No. 1 – filter cake 100%; No. 2 – filter cake 90% + wood 10%; No. 3 – filter cake 90% + food waste (potato peelings) 10%; No. 4 – filter cake 90% + plastic 10%; No. 5 – filter cake 90% + cardboard 10%. The fuel compositions were prepared first in this work by a promising method of electrically-pulse activation of the suspension fuels. It differs from the known mechanical methods by using the electric discharge channel as an instrument for the solid components dispersing. The results of the analysis of the granulometric composition of the fuel compositions allowed us to conclude that the sizes of the MSW particles are comparable with the size of the coal particles. The main characteristics of the composite fuel components are given in Tables A1, A2. The characteristics of the filter cake were obtained for the samples in a dry state. The filter cake was dried at a temperature of about 105 $^{\circ}\text{C}$ until the moisture evaporates.

Table A1 – Characteristics of fuel components [43; 66; 107; 108]. Proximate analysis

component	W^a (%)	A^d (%)	V^{daf} (%)	$Q_{s,v}^a$ ($\times 10^6$ J/kg)
filter cake	–	26.5	23.1	24.83
wood	20.0	2.0	–	16.45
food waste	78.6	1.0	–	16.91
plastic	2.0	0.2	–	22.00
cardboard	5.0	3.0	–	17.50

Table A2 – Characteristics of fuel components [43; 66; 107; 108]. Ultimate analysis

component	C^{daf} (%)	H^{daf} (%)	N^{daf} (%)	S^{daf} (%)	O^{daf} (%)
filter cake	87.2	5.1	2.1	1.1	4.5
wood	50.3	6.0	0.2	0.1	43.4
food waste	42.1	6.5	2.1	0.2	49.1
plastic	66.7	7.9	–	–	25.4
cardboard	46.3	6.3	0.3	0.2	46.9

A.3. Prospects for utilization of municipal and industrial wastes by burning with energy generation

A.3.1. Municipal solid waste

The initial data for the calculation of the energy potential of MSW [108; 109]:

- it has already been accumulated about 50 billion tons of municipal solid waste (nomenclature G_{MSW}^0) in the whole world by 2017 and it has been stored at the landfills;

- the annual quantity of the world production of MSW is about 1.5 billion tons (nomenclature G_{MSW});

- about 60% of MSW is not recycled or utilized, but it has been stored in the landfills (coefficient $k_{\text{MSW}}=0.6$);

- about 80% of non-processed MSW is combustible (coefficient $l_{\text{MSW}}=0.8$);

- the average heat of combustion is about $11.8 \cdot 10^6$ J/kg for a typical morphological composition of MSW (nomenclature q_{MSW}).

The energy potential from the burning of MSW accumulated worldwide by 2017 is calculated by the equation:

$$Q_{\text{MSW}}^0 = l_{\text{MSW}} \cdot G_{\text{MSW}}^0 \cdot q_{\text{MSW}} = 0.8 \cdot 50 \cdot 10^{12} \cdot 11.8 \cdot 10^6 = 472 \cdot 10^{18} \text{ J.} \quad (\text{A1})$$

The energy potential from the burning of MSW accumulated during one year is calculated by the equation:

$$Q_{\text{MSW}} = k_{\text{MSW}} \cdot l_{\text{MSW}} \cdot G_{\text{MSW}} \cdot q_{\text{MSW}} = 0.6 \cdot 0.8 \cdot 1.5 \cdot 10^{12} \cdot 11.8 \cdot 10^6 = 8.5 \cdot 10^{18} \text{ J.} \quad (\text{A2})$$

3.2. Wastes of coal enrichment and oil refining

The initial data for the calculation of the energy potential of filter cakes and low-grade coals [110; 111; 112]:

- it has already been accumulated about 9.5 billion tons of filter cakes (nomenclature G_{fc}^0) all over the world from 1980 to 2017 and it has been stored at the landfills;

- the annual quantity of the world production of filter cakes is about 0.2 billion tons (nomenclature G_{fc}). It is 10–15% of the quantity of coal exported all over the world;

- the annual consumption of coal around the world is about 7.4 billion tons (nomenclature G_c);

- about 15% of consuming coal is low-grade (coefficient $l_c=0.15$), which can be used for the preparation of the composite fuel;

- the heat of combustion is about $20 \cdot 10^6$ J/kg for a typical filter cake (nomenclature q_{fc});

- the heat of combustion is about $25 \cdot 10^6$ J/kg for a typical low-grade coal (nomenclature q_{lc}).

The energy potential from the burning of filter cakes accumulated all over the world from 1980 to 2017 is calculated by the equation:

$$Q_{fc}^0 = G_{fc}^0 \cdot q_{fc} = 9.5 \cdot 10^{12} \cdot 20 \cdot 10^6 = 190 \cdot 10^{18} \text{ J.} \quad (\text{A3})$$

The energy potential from the burning of filter cakes accumulated during one year is calculated by the equation:

$$Q_{fc} = G_{fc} \cdot q_{fc} = 0.2 \cdot 10^{12} \cdot 20 \cdot 10^6 = 4 \cdot 10^{18} \text{ J.} \quad (\text{A4})$$

The energy potential from the burning of low-grade coals mined during one year is calculated by the equation:

$$Q_{lc} = l_c \cdot G_c \cdot q_{lc} = 0.15 \cdot 7.4 \cdot 10^{12} \cdot 25 \cdot 10^6 = 27.8 \cdot 10^{18} \text{ J.} \quad (\text{A5})$$

The initial data for calculating the energy potential of the liquid combustible wastes (used oils) [113]:

- it has already been accumulated about 0.3 billion tons of used oils (nomenclature G_{oil}^0) all over the world from 1990 to 2017;

- the annual quantity of the world production of used oils is about 0.02 billion tons (nomenclature G_{oil});

- about 40% of the used oils is not utilized (coefficient $l_{oil}=0.4$), which can be used for the preparation of the composite fuel;

- the heat of combustion is about $44 \cdot 10^6$ J/kg for a typical oil (nomenclature q_{oil}).

The energy potential from the burning of used oils accumulated all over the world from 1990 to 2017 is calculated by the equation:

$$Q_{oil}^0 = G_{oil}^0 \cdot q_{oil} = 0.3 \cdot 10^{12} \cdot 44 \cdot 10^6 = 13.2 \cdot 10^{18} \text{ J.} \quad (A6)$$

The energy potential from the burning of used oils accumulated during one year is calculated by the equation:

$$Q_{oil} = l_{oil} \cdot G_{oil} \cdot q_{oil} = 0.4 \cdot 0.02 \cdot 10^{12} \cdot 44 \cdot 10^6 = 0.4 \cdot 10^{18} \text{ J.} \quad (A7)$$

A.3.3. Coal-fired thermal power engineering

According to the statistical data [114], it is generated annual all over the world at coal burning:

- about $9.5 \cdot 10^{15}$ W·h of electricity or $34.3 \cdot 10^{18}$ J. It is required to burn about 22% of coal consumed during one year for the generation of such quantity of energy;

- about $5.9 \cdot 10^{18}$ J of heat. It is required to burn about 3.8% of coal consumed during one year for the generation of such quantity of energy.

The average global coal consumption is about 7.5 billion tons during one year (Fig. 4). It means that about 1.9 billion tons of high-quality coal with a calorific value of about $30 \cdot 10^6$ J/kg is burnt for the electricity and heat production. When burning such quantity of coal, about $57 \cdot 10^{18}$ J of heat is released. According to the efficiency of the TPP about 70%, this energy is converted into electricity and heat. Low efficiency of thermal power plants leads to the loss a sufficiently large quantity of energy during the conversion process that released as a result of coal burning. Thus, the high-grade solid fossil fuel is consumed irrationally. A partial replacement of coal by the composite fuel consisting of waste of coal enrichment, used oils and municipal

solid waste will reduce the consumption of the high-grade exhaustible energy resources.

Table A3 shows the data on the production and the energy potential of filter cakes, low-grade coals, used oils, as well as coal consumption and energy generation at the burning by TPPs.

Table A3 – The energy potential and energy consumption

energy resources	totally accumulated		annual growth / consumption	
	G^0 , tons	Q^0 , J	G , tons	Q , J
filter cake	$9.5 \cdot 10^9$	$190 \cdot 10^{18}$	$0.2 \cdot 10^9$	$4 \cdot 10^{18}$
low-grade coal	–	–	$1.1 \cdot 10^9$	$27.8 \cdot 10^{18}$
MSW	$50 \cdot 10^9$	$472 \cdot 10^{18}$	$0.7 \cdot 10^9$	$8.5 \cdot 10^{18}$
used oil	$0.3 \cdot 10^9$	$13.2 \cdot 10^{18}$	$0.01 \cdot 10^9$	$0.4 \cdot 10^{18}$
coal for thermal power engineering	–	–	$1.9 \cdot 10^9$	$57 \cdot 10^{18}$

According to the results given on Table A3, it is possible to draw a conclusion about the prospects for using the composite fuels consisting of coal-enrichment waste, low-grade coals, used oils, MSW. The annual production and accumulated quantity of which will allow providing up to 100% of the needs in the energy resources of coal-fired thermal power engineering at least 20 years.

A.3.4. A perspective composite fuel

With the purpose of expanding the fuel base for thermal power engineering, it is possible to implement a program that suggests the following. About 50% (or $28.5 \cdot 10^{18}$ J) of energy (Table A3) generated by the coal-fired thermal power plants for the production of electricity and heat will be generated by burning of the composite fuel. The typical composition of this fuel: 80% filter cake (or a mixture of low-grade coal with water) + 15% MSW + 5% used oil. The annual demand for the components of such a fuel is: $1.1 \cdot 10^9$ tons of filter cake; $0.2 \cdot 10^9$ tons of MSW; $0.09 \cdot 10^9$ tons of used oil. According to the data on Table A3, the limiting component

for the preparation of such fuel composition in the medium term is used oil. All quantities of accumulated used oil will be disposed completely after the first four years realization of the proposed energy program. Its annual production will not cover the requirements necessary for the fuel preparation. Therefore, starting from the fifth year, composite fuel will consist of 80% of the filter cake and 20% of the MSW. The annual requirement for the components of such a fuel is: $1.24 \cdot 10^9$ tons of the filter cake and $0.31 \cdot 10^9$ tons of MSW. The composition of fuel and the consumption of each fuel component during the implementation of the proposed program of waste management is given on Table A4.

Table A4 – Consumption of the components for the preparation of the composite fuel

year	filter cake, tons	MSW, tons	used oil, tons
1	$1.1 \cdot 10^9$	$0.2 \cdot 10^9$	$0.09 \cdot 10^9$
2	$1.1 \cdot 10^9$	$0.2 \cdot 10^9$	$0.09 \cdot 10^9$
3	$1.1 \cdot 10^9$	$0.2 \cdot 10^9$	$0.09 \cdot 10^9$
4	$1.1 \cdot 10^9$	$0.2 \cdot 10^9$	$0.09 \cdot 10^9$
5	$1.24 \cdot 10^9$	$0.31 \cdot 10^9$	–
6	$1.24 \cdot 10^9$	$0.31 \cdot 10^9$	–
7	$1.24 \cdot 10^9$	$0.31 \cdot 10^9$	–
8	$1.24 \cdot 10^9$	$0.31 \cdot 10^9$	–
9	$1.24 \cdot 10^9$	$0.31 \cdot 10^9$	–
10	$1.24 \cdot 10^9$	$0.31 \cdot 10^9$	–
11	$1.24 \cdot 10^9$	$0.31 \cdot 10^9$	–
12	$1.24 \cdot 10^9$	$0.31 \cdot 10^9$	–
13	$1.24 \cdot 10^9$	$0.31 \cdot 10^9$	–
14	$1.24 \cdot 10^9$	$0.31 \cdot 10^9$	–
15	$1.24 \cdot 10^9$	$0.31 \cdot 10^9$	–
16	$1.24 \cdot 10^9$	$0.31 \cdot 10^9$	–
17	$1.24 \cdot 10^9$	$0.31 \cdot 10^9$	–
18	$1.24 \cdot 10^9$	$0.31 \cdot 10^9$	–
19	$1.24 \cdot 10^9$	$0.31 \cdot 10^9$	–
20	$1.24 \cdot 10^9$	$0.31 \cdot 10^9$	–
total:	$24.24 \cdot 10^9$	$5.76 \cdot 10^9$	$0.36 \cdot 10^9$

Within 20 years (boiler lifetime in the thermal power engineering) the implementation of the energy program, it will be utilized $24.24 \cdot 10^9$ tons of filter cake; $5.76 \cdot 10^9$ tons of MSW; $0.36 \cdot 10^9$ tons of used oil. The proposed activities according to the data on Table A4 will allow solving completely the problem of

utilization of the used oils accumulated up to 2017, as well as the problem of utilization of the annual waste of coal enrichment and reduce by 10% the quantity of filter cakes accumulated up to 2017. Besides adding MSW into the composite fuels will allow utilizing up to 50% of MSW from the annual production quantity.

The proposed energy program is characterized by several positive effects:

(i) Saving of high-quality solid fossil fuel (annually about $1 \cdot 10^9$ tons) by reducing its consumption (by 50%) at thermal power plants as a result of coal replacing by the equivalent (in terms of energy generation) quantity (about $1.5 \cdot 10^9$ tons) of the composite fuel.

(ii) Reducing environmental pollution due to the utilization of solid waste within the framework of an environmentally friendly technology for the production of electricity and heat.

(iii) Reduction in the intensity of the landfill sites increase due to planned utilization of MSW (up to 50% of annual production or up to $0.31 \cdot 10^9$ tons).

(iv) Efficient use of saved money for investments to develop cutting-edge industrial thermal power technologies and upgrading thermal power plants.

The point of the latter statement is that the utilization of MSW by burning with energy production is an intermediate step in the transition from direct waste burning without energy generation to waste recirculation, recycling as raw materials. Therefore, the development and implementation of the new technologies, the construction of new industrial facilities (incineration plants), which will be in demand for a relatively short period of time (15–30 years), are economically inexpedient.

In recent years, a considerable attention has been paid to the study of gasification processes of various substances and materials (low-quality fossil fuels, biomass, municipal solid wastes, etc.) and the development of the appropriate industrial technologies for syngas production [115]. The technology of generation of electricity and heat by the combustion of syngas is characterized by the minimum content of the greenhouse gases (CO , CO_2 , NO_x , SO_x) in flue gases. The concentration of harmful gases does not exceed the same value when burning natural gas. Therefore, according to the environmental indicators, the efficiency of burning

the syngas obtained by gasification of MSW is higher than the combustion efficiency of the typical composite liquid fuels with the addition of finely dispersed solid components of MSW. However, the practical application of syngas production technologies is limited. “The major barrier that has prevented the widespread uptake of advanced gasification technologies for treating MSW has been the higher ash content in the feed making the gasification operation difficult. In addition, high amounts of tar and char contaminants in the produced gas make it unsuitable for power production using energy efficient gas engines or turbines” [115].

It should be mentioned that the use of syngas at existing TPPs instead of widespread solid fossil fuel will require the implementation of additional rather costly measures for the retrofitting of the technological process. By industrial gasification setup of waste or installing communications and storage tanks for supplying TPPs by syngas produced in the special gasification plants. Besides high rate of fire safety management should be taken into account. In addition, quite a large amount of energy is required for the implementation of MSW gasification technology. As a rule, a sufficiently high temperature of about 900 °C [115] is maintained in the reactor in an inert gas atmosphere for intensive thermal decomposition of solid materials. The provision of such conditions requires a significant consumption of the energy resources. For these reasons, the utilization of MSW by burning as a part of composite liquid fuel is promising for practical application.

The results of the experimental studies [47; 116] allow us to conclude that the main ecological characteristics (CO, CO₂, NO_x, SO_x, ash) of flue gases at the combustion of composite fuels is not worse than the similar characteristics of flue gases at the combustion of coal dust by a traditional burning technology for TPPs. The ability to vary the component base of the composite fuels over a wide range allows developing the fuel compositions with predicted energy, economic and environmental characteristics.

A.4. Conclusions

(i) The energy potential (more than $650 \cdot 10^{18}$ J) of the industrial and municipal wastes determines the prospects for their utilization by burning as a component of the composite fuels. It has been accumulated $9.5 \cdot 10^9$ tons of coal enrichment wastes; $50 \cdot 10^9$ tons of MSW; $0.3 \cdot 10^9$ tons of used oils all over the world by 2017. Their annual production is $0.2 \cdot 10^9$ tons; $0.7 \cdot 10^9$ tons (the quantity of combustible MSW left after recycling of about 40% of all MSW); $0.01 \cdot 10^9$ tons, respectively. The development of the efficient combustion technologies for the composite fuels consisting of waste is characterized by the positive environmental and economic effects. Therefore, within the framework of the completed research, the regularities and necessary conditions for drops ignition of composite fuels based on filter cake with the addition of the typical MSW (wood, food waste, plastic, cardboard) in the amount of 10% were established experimentally under heating conditions corresponding to the conditions of fuel burning in boiler furnaces.

(ii) The main stages of the interconnected physical and chemical processes were distinguished: inert heating, evaporation of moisture from the near-surface layer, thermal decomposition of the solid combustible components (coal and MSW), mixing of the combustible gases with an oxidizer, ignition of the gas mixture and its burnout, heating of the solid residue, its heterogeneous ignition and combustion.

(iii) The stability of the ignition and combustion of fuel drops to the complete burnout of combustible components was justified experimentally for different fuel compositions (filter cake with additives of wood, food waste, plastic, cardboard) under the conditions typical for the boiler furnaces. The delay time zone of guaranteed ignition was established for the composite fuels with the addition of MSW at ambient temperatures 600–1000 °C. Minimum and maximum values of ignition delay times are 3 s and 25 s for drops about 1 mm in size. The maximum difference in ignition delay times for the compositions with different components of MSW is less than 25% in the area of the relatively low air temperatures (600–700 °C). At ambient temperatures over 900 °C, the difference in ignition delay times for different fuel compositions does not exceed 5–10%.

(iv) When typical MSW are added into a composite fuel, it yields an equivalent amount of energy during combustion, while the concentration of main anthropogenic emissions in flue gases is lower. The maximum difference in the concentrations of NO_x and SO_x for such fuels reaches 60% and 35%, respectively. In absolute units, these differences are 110 ppm and 45 ppm. This result characterizes rather a significant impact of additives made of MSW on the reduction of the concentration of nitrogen and sulfur oxides in flue gases. This is because maximum NO_x and SO_x concentrations in the gaseous products of filter cake combustion are about 300 ppm and 130 ppm, respectively.

(v) The obtained results are the basis for the development of the energy program to introduce a promising technology for the burning of the composite fuels consisting of industrial and municipal wastes at TPPs. One of the main advantages of such technology is the possibility to optimize the operating modes of the main technological equipment while varying the fuel composition and the concentration of the combustible components. As a result of the analysis, it is found that partial replacement of coal (50% of energy generation) by the equivalent (in terms of energy generation) quantity of composite fuel will save about 1 billion tons/year of high-quality solid fossil fuel during 20 years (the regulated period of a safe operation of the boiler in the thermal power engineering). During the same period, it will be utilized $24.24 \cdot 10^9$ tons of filter cakes; $5.76 \cdot 10^9$ tons of MSW; $0.36 \cdot 10^9$ tons of used oils. The proposed energy program will solve completely the problem of used oils utilization accumulated up to 2017, as well as the problem of utilization of coal enrichment waste produced annually and reduce by 10% the quantity of filter cakes accumulated up to 2017. The addition of MSW in the composite fuels will allow them to be disposed of up to 50% of the annual production.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Заказная спецификация приборов и средств автоматизации

Поз.	Наименование, техническая характеристика приборов и средств автоматизации	Тип и марка прибора	Кол
1	2	3	4
1а	Термопреобразователь сопротивления, погружаемый, НСХ ПП (S), монтажная длина 500 мм, диапазон измеряемых температур 0...1700 °С, выходной сигнал 4...20 мА, класс точности 0,25. НПП «Элемер», г. Зеленоград.	ТПУ 0304/М1	1
2а	Термопреобразователь сопротивления, погружаемый, НСХ 100М, монтажная длина 250 мм, диапазон измеряемых температур -50...+100 °С, выходной сигнал 4...20 мА. НПП «Элемер», г. Зеленоград.	ТС-1288/1	1
3а	Термопреобразователь сопротивления, общепромышленного применения, монтажная длина 320 мм, диапазон измеряемых температур -50...100 °С, выходной сигнал 4...20 мА, суммарная приведенная погрешность 1,1 %. СИБ «Термоприбор», г. Москва.	ТСПУ 014.11.ИНД-Оп- 4/20	1
4а	Термопреобразователь сопротивления, погружаемый, НСХ 100П, монтажная длина 500 мм, диапазон измеряемых температур -50...350 °С, выходной сигнал 4...20 мА, класс точности 0,25. НПП «Элемер», г. Зеленоград.	ТС-1288/5	1
5а	Термопреобразователь сопротивления, погружаемый, НСХ ХА (К), монтажная длина 320 мм, диапазон измеряемых температур -50...1300 °С, выходной сигнал 4...20 мА, класс точности 0,25. НПП «Элемер», г. Зеленоград.	ТПУ 0304/М1-Н	1
6а	Термопреобразователь сопротивления, погружаемый, НСХ 100М, монтажная длина 500 мм, диапазон измеряемых температур -50...+200 °С, выходной сигнал 4...20 мА. НПП «Элемер», г. Москва.	ТС-1288/2	1
7а	Преобразователь дифференциального давления, предел допускаемой основной погрешности ± 0,15 %, верхний предел измерений 4 МПа, предельно-допускаемое рабочее избыточное давление 16 МПа, избыточное давление-разрежение ±5кПа... (-0,1...+2,4) МПа, выходной сигнал 4...20 мА, взрывобезопасное исполнение. НПП «Элемер», г. Зеленоград.	Элемер АИР- 10Н	1
8а... 10а	Датчик абсолютного давления, общепромышленный, диапазон измерений 0...25 МПа, выходной сигнал 4...20 мА с цифровой связью (HART протокол), (перенастраиваемый), наружная резьба М20х1,5, класс безопасности 2, монтажные части ниппель с накидной гайкой М20х1,5 (материал накидной гайки – углеродистая сталь), температура окружающей среды -55...+85 °С, погрешность ± 0,2 %. ПГ «Метран», г. Челябинск.	Метран-150 TAR	3
		ФЮРА.421000.001 СО1	
Исп.	Беляев С.В.	Стад	Лист
Пров	Глушков Д.О.	П	1
Н.к	Вагнер М.А.	Листов 2	
Спецификация приборов и средств автоматизации		НИ ТПУ Группа ИШЭ 5БМ7Э	

УТВ.	Губин В.Е.			
------	------------	--	--	--

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(продолжение)

1	2	3	4
11а, 12а	Сужающее устройство быстросменное, общепромышленный, рабочее давление до 16 МПа, условный диаметр 200 мм, температура окружающей среды -60...+50 °С, ООО «Технопром», г. Оренбург.	ТП-39-06-07-ТУ	2
11б, 12б	Датчик разности давлений, общепромышленный, диапазон измерений 0...16 МПа, выходной сигнал 4...20 мА с цифровой связью (HART протокол), (перенастраиваемый), предельно-допускаемое рабочее избыточное давление 25 МПа, температура окружающей среды -55...+85 °С, погрешность ± 0,1 %. ПГ «Метран», г. Челябинск.	Метран-150 CDR	2
13а	Газоанализатор, выходной сигнал 4...20 мА, класс точности 1. верхний предел измерений 50%, «Аналитприбор», г. Смоленск.	АКВТ-01	1
	Программируемый логический контроллер ЭЛСИ-ТМ. В состав ПЛК входят:		1
	Модуль питания	TP 503 024 DC	1
	Модуль процессорный	TC 507 E	1
	Модуль коммуникационный	TN 502 485 230	1
	Модуль аналогового ввода	TA 505 24IDC	1
	Модуль дискретного ввода	TD 501L 32I 024DC	2
	Модуль дискретного вывода	TD 502L 32O 024DC	1
ФЮРА.421000.001 СО1			2

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

Перечень элементов принципиальной электрической схемы соединений

Поз.	Наименование, техническая характеристика приборов и средств автоматизации	Кол-во	Прим.		
1	2	3	4		
EL1	Светильник Rittal SZ 4103.350	1			
FU1...FU4	Предохранитель 5X20T 200 mA	4			
G1	Модуль EF UPS 1AC/24DC-16	1			
G2	Блок питания АБ-24М	1			
KO1	Реле Finder 40.52.8.230	1			
1-K1...4-K1, 1-K2...4-K2	Реле PLC-PRIT-24DC/21 2900299	8			
KK1	Термореле KTS 1141	1			
M1	Вентилятор Rittal SK 3240.100	1			
QF1	Выключатель автоматический С60А 23850 1/10 С	1			
QF2, QF3	Выключатель автоматический С60А 23849 1/6 С	1			
R1	Резистор PR 01 5% 120R	1			
RC01	Вставка RC Finder 99.02.0.230.09	1			
1-SH1...4-SH1	Кнопка X85-AW33B5	4			
1-SH2...4-SH2	Кнопка X85-AW34B5	4			
SQ1	Выключатель концевой Rittal SZ 4127.010	1			
1-U1	Блок БС-118-12/24	1			
UY1...UY18	Преобразователь измерительный разделительный ET 491	18			
XO1	Кабель питания Rittal SZ 4315.100	1			
XP1, XP2	Вилка IMC 1,5/5-ST-3,81 AU DB:5-1	2			
XS1	Розетка Legrand 042 85	1			
XT0-1	Сборка шинная защитная Rittal SZ 2364.000	1			
Z01	Защита РТ 2-РЕ/S-230АС	1			
Z1	Штекер РТ 4X1-12АС-ST 2838348	1			
Z2	Устройство защиты BZ16-24DC-P	1			
ФЮРА.421000.001 ПЭ					
Разраб.	Беляев С.В.	Щит управления	Стад	Лист	Листов
Пров.	Глушков Д.О.		ТРП	1	2
Н.контр.	Вагнер М.А.		НИ ТПУ НОЦ И.Н. Бутакова		
Утв.	Губин В.Е.		Группа 5БМ7Э		

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Параметрический синтез системы управления

Г.1 Структурная схема АСР

На рисунке Г.1 приведена структурная схема АСР расхода топлива.

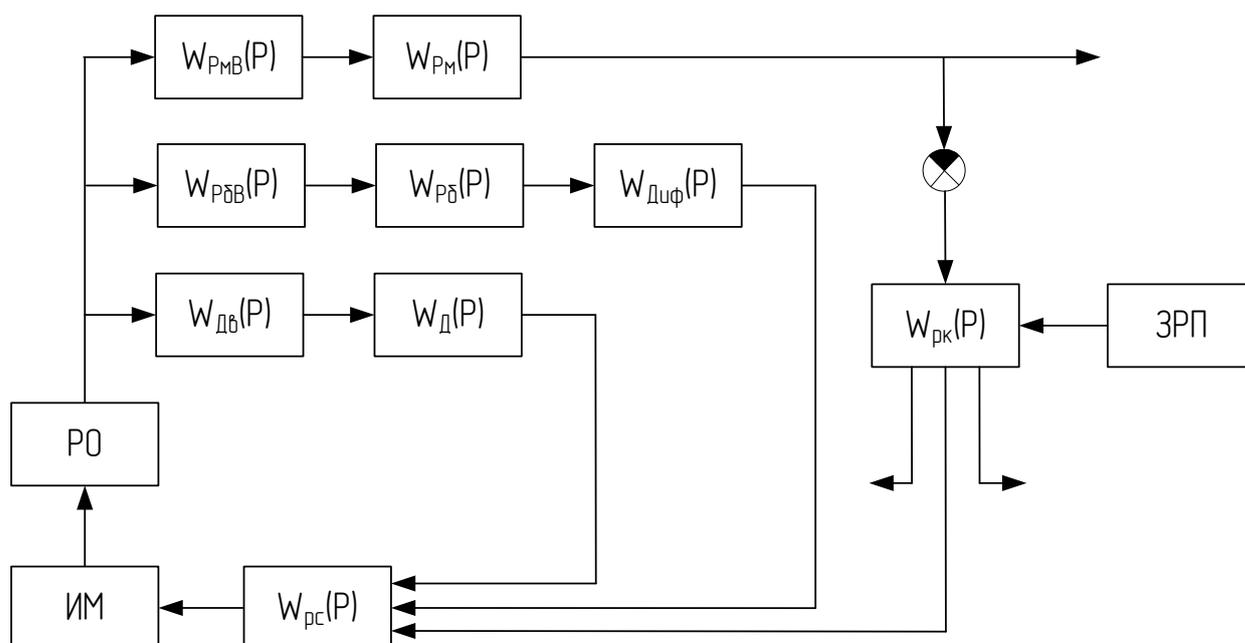


Рисунок Г.1 – Структурная схема АСР расхода топлива

На структурной схеме (рисунок Г.1) приняты следующие обозначения:

$W_{P_{\delta B}}(P)$ - передаточная функция по каналу “расход топлива - давление в барабане котла”;

$W_{P_{MB}}(P)$ - передаточная функция по каналу “расход топлива - давление в магистрали”;

$W_{D_B}(P)$ - передаточная функция по каналу “расход топлива – расход пар”;

$W_{P_{\delta}}(P)$ - передаточная функция датчика давления в барабане котла;

$W_{P_M}(P)$ - передаточная функция датчика давления в магистрали;

$W_D(P)$ - передаточная функция измерительного комплекса расхода пара;

- $W_d(P)$ - передаточная функция дифференциатора;
 $W_{PC}(P)$ - передаточная функция стабилизирующего регулятора;
 $W_{PK}(P)$ - передаточная функция корректирующего регулятора;
 PO - регулирующий орган;
 $ИМ$ - исполнительный механизм;
 $ЗД$ - задатчик.

Г.2 Расчетный метод определения динамических характеристик котла

При аналитических расчетах динамических характеристик каждый из регулируемых участков представляют последовательным соединением звеньев с сосредоточенными параметрами: топливоподающих устройств, топки, испарительных и пароперегревательных участков, первичных измерительных преобразователей (датчиков). Хотя такая замена участков регулирования с распределенными параметрами и не является строго корректной, она вполне достаточна для инженерных расчетов на стадии предварительной оптимизации параметров, подлежащих при наладке АСР.

Исходные данные для расчета представлены в таблице Г.1.

Таблица Г.1 – Исходные данные

№ п/п	Наименование величины	Обозначение	Размерность	Значение
1	2	3	4	5
1	Лучевоспринимающая поверхность трубных экранов	H_d	m^2	1550
2	Приведенный коэффициент термического сопротивления слоя загрязнения	ε	$m^2 \cdot c \cdot C / \text{кДж}$	8
3	Лучистая теплота воспринимаемая поверхностями топки (номинальный режим)	$Q_{лн}$	$\text{кДж}/C$	4575
4	Расчетный расход топлива	$B_{рн}$	$\text{кг}/c$	44
5	Потери с механическим недожогом	q_4	---	0,02
6	Объем продуктов сгорания на 1 кг топлива, приведенным к нормальным условиям	V_g	$m^3/\text{кг}$	2,9
7	Удельная теплоемкость продуктов сгорания	c_g	$\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ C)$	1,57
8	Плотность продуктов сгорания	ρ_g	$\text{кг}/m^3$	0,89
9	Приведенный коэффициент излучения топки	a_m	---	0,4

Продолжение таблицы Г.1

1	2	3	4	5
10	Коэффициент излучения абсолютно черного тела	σ_0	$\text{кДж}/\text{м}^2 \cdot \text{С}^4$	$5,67 \cdot 10^{-8}$
11	Коэффициент K	K	---	0,13
12	Температура газов на выходе из топки	T_n	K	1340
13	Средняя температура слоев загрязнения	T_{zn}	K	1250
№ п/п	Наименование величины	Обозначение	Размерность	Значение
14	Масса слоев загрязнения	G_z	кг	8700
15	Удельная теплоемкость слоев загрязнения	c_z	$\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С})$	0,3
16	Объем воды в парогенерирующей части котла	V_v	м^3	175
17	Объем пара в парогенерирующей части котла	V_n	м^3	54
18	Плотность воды в парогенерирующей части котла	ρ_v	$\text{кг}/\text{м}^3$	632
19	Плотность пара в парогенерирующей части котла	ρ_n	$\text{кг}/\text{м}^3$	52
20	Теплота парообразования	r	$\text{кДж}/\text{кг}$	1047
21	Масса металла парогенерирующей части котла	G_m	кг	307000
22	Теплоемкость металла	c_m	$\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С})$	0,553
23	Коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности экранных труб	α_2	$\text{кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{С})$	5900
24	Коэффициент теплопроводности металла экранных труб при его средней температуре	λ_m	$\text{кДж}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{С})$	126
25	Внутренний диаметр экранных труб	$d_{вн}$	м	0,028
26	Наружный диаметр экранных труб	d_n	м	0,038
27	Внутренняя поверхность экранных труб	H_v	м^2	870
28	Энтальпия котловой воды	i'	$\text{кДж}/\text{кг}$	1585
29	Энтальпия пара в барабане	i''	$\text{кДж}/\text{кг}$	2710
30	Температура насыщения	t'	$^\circ\text{С}$	314
31	Энтальпия питательной воды	$i_{пе}$	$\text{кДж}/\text{кг}$	950
32	Объем паропроводов от барабана котла до регулирующих клапанов турбины	Φ	м^3	99
33	Потеря давления на паропроводах в номинальном режиме	ΔP_1	Па	10^6
34	Потеря давления на регулирующих клапанах турбины в номинальном режиме	ΔP_2	Па	$7 \cdot 10^5$
35	Паропроизводительность котлоагрегата	D_n	$\text{т}/\text{с}$	420

Г.2.1 Участок давление в барабане – расход топлива

Передаточная функция этого участка $W_{p6B}(p)$ может быть представлена последовательным соединением звеньев: топливоподающее устройство $W_{m.y}(p)$,

тепловосприятие испарительных поверхностей – расход топлива $W_{QB}(p)$,
 давление в барабане – тепловосприятие испарительных поверхностей $W_{P_0Q}(p)$.
 Таким образом

$$W_{P_0B}(p) = W_{m,y}(p) \cdot W_{QB}(p) \cdot W_{P_0Q}(p) . \quad (\Gamma.1)$$

Передаточная функция топливоподающего устройства

$$W_{m,y}(p) = e^{-p\tau_{m,y}} . \quad (\Gamma.2)$$

Значение $\tau_{m,y}$ для котлов с прямым вдуванием пыли $\tau_{m,y} \approx 5-10$ с.

Принимаем $\tau_{m,y} = 10$ с.

Передаточная функция котла по каналу тепловосприятие испарительных
 поверхностей – расход топлива имеет вид

$$W_{QB}(p) = \frac{H_{л}}{\varepsilon} \cdot \frac{\kappa_Q \cdot \kappa_z}{1 - \kappa_z \cdot \kappa_z} \cdot \frac{1}{T_m p + 1} , \quad (\Gamma.3)$$

где $H_{л}$ – лучевоспринимающая поверхность трубных экранов, м²;

ε – приведенный коэффициент термического сопротивления слоя
 загрязнения, м²·К/кДж;

$$\kappa_Q = \frac{Q_{л,н} / B_n}{B_n V_z c_z \rho_z + 4a^* K^4 T_n^3} , \left[\frac{\text{кДж} \cdot \text{с} \cdot \text{с} \cdot \text{кг} \cdot \text{кг} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^3}{\text{с} \cdot \text{кг} \cdot \text{кг} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{кДж} \cdot \text{кг}} = \text{с}^2 \right] \quad (\Gamma.4)$$

$Q_{л,н}$ – лучистая теплота, воспринимаемая поверхностями нагрева топки,
 кДж/К;

$$B_n = \frac{B_{p,н}}{1 - q_4} , \left[\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right] \quad (\Gamma.5)$$

$B_{p,н}$ – расчетный расход топлива, кг/с;

q_4 – потери с механическим недожогом;

$V_{г}$ – объем продуктов сгорания на единицу топлива, приведенный к
 нормальным условиям, м³/кг;

$c_{г}$ – удельная теплоемкость продуктов сгорания, кДж/(кг·°С);

$\rho_{г}$ – плотность продуктов сгорания, кг/м³;

$$a^* = a_m \cdot H_{л} \cdot \sigma_0 , \left[\frac{\text{м}^2 \cdot \text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4} = \frac{\text{кДж}}{\text{К}^4} \right] \quad (\Gamma.6)$$

a_T – приведенный коэффициент излучения топки;

σ_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, $\text{кДж}/\text{м}^2 \cdot \text{К}^4$;

K – коэффициент, определяющийся в зависимости от вида топлива, способа его сжигания, вида горелочного устройства и угла его наклона к горизонту;

T_H – температура газов на выходе из топки, К ;

$$\kappa_2 = \frac{4a^* K^4 T_H^3}{\frac{H_{л}}{\varepsilon} + 4a^* T_{3.H}^3}, \left[\frac{\text{кДж} \cdot \text{К}^3 \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{К}^4 \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кДж}} = 1 \right] \quad (\text{Г.7})$$

$T_{3.H}$ – средняя температура загрязнения (золы, шлака, футеровки, обмазки) на наружной поверхности, К ;

$$\kappa_3 = \frac{4a^* K^4 T_{3.H}^3}{B_H V_z c_z \rho_z + 4a^* K^4 T_H^3}, \left[\frac{\text{кДж} \cdot \text{К}^3 \cdot \text{К}^4}{\text{К}^4 \cdot \text{кДж} \cdot \text{К}^3} = 1 \right] \quad (\text{Г.8})$$

$$T_m = \frac{G_3 c_3}{\frac{H_{л}}{\varepsilon} + 4a^* T_{3.H}^3}, \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{кДж} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К}}{\text{кг} \cdot \text{К} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кДж}} = \text{с} \right] \quad (\text{Г.9})$$

G_3 – масса слоя загрязнения, кг ;

c_3 – удельная теплоемкость слоя загрязнения, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{С})$.

Передаточная функция котла по каналу давление в барабане – тепловосприятие испарительных поверхностей имеет вид

$$W_{P_0 Q}(p) = \frac{1}{A \cdot (TP + 1)}, \quad (\text{Г.10})$$

$$A = A' + A'' + A_m, \quad [\text{м}^3]$$

(Г.11)

$$\text{где} \quad T = \frac{A' + A''}{A} \cdot T_m, \quad [c] \quad (\text{Г.12})$$

$$A' = V_g \cdot \left(\frac{\rho_g r}{\rho_g - \rho_n} \cdot \frac{\partial \rho_g}{\partial P} + \rho_g \cdot \frac{\partial i'}{\partial P} \right), \left[\frac{\text{м}^3 \cdot \text{кг} \cdot \text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{кг} \cdot \text{Па}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2}{\text{с}^2 \cdot \text{кг}} = \text{м}^3 \right] \quad (\text{Г.13})$$

$$A'' = V_n \cdot \left(\frac{\rho_n r}{\rho_g - \rho_n} \cdot \frac{\partial \rho_n}{\partial P} + \rho_n \cdot \frac{\partial i''}{\partial P} \right), \left[\frac{\text{м}^3 \cdot \text{кг} \cdot \text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{кг} \cdot \text{Па}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2}{\text{с}^2 \cdot \text{кг}} = \text{м}^3 \right] \quad (\text{Г.14})$$

$$A_m = G_m \cdot c_m \cdot \frac{\partial t''}{\partial P}, \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{кДж} \cdot ^\circ\text{С}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С} \cdot \text{Па}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2}{\text{с}^2 \cdot \text{кг}} = \text{м}^3 \right] \quad (\text{Г.15})$$

$$T_m = \frac{G_m \cdot c_m}{\alpha_g^* \cdot H_g}, \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{кДж} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кДж}} = \text{с} \right] \quad (\text{Г.16})$$

V_B, V_{II} – объемы воды и пара в парогенерирующей части котла, м³;

ρ_B, ρ_{II} – плотности воды и пара, кг/м³;

r – теплота парообразования, кДж/кг;

G_m – масса металла экранов, кг;

c_m – теплоемкость металла экранов, кДж/(кг·°С);

α_B^* – условный коэффициент теплоотдачи от металла к воде, определяется по формуле

$$\alpha_g^* = \frac{\alpha_g}{1 + \frac{0,2 \cdot d_{вн} \cdot \alpha_g}{\lambda_m} \cdot \ln \frac{d_n}{d_{вн}}}, \left[\frac{\text{кДж} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{С} \cdot \text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{С} \cdot \text{м} \cdot \text{кДж} \cdot \text{м} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{С}} = \frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{С}} \right] \quad (\text{Г.17})$$

α_B – коэффициент теплоотдачи металла к воде, кДж/(м²·с·°С);

λ_m – коэффициент теплопроводности металла труб экрана, кДж/(м·с·°С);

$d_{вн}, d_n$ – внутренний и наружный диаметры труб экрана, м;

H_B – внутренняя поверхность трубных экранов, м²;

i', i'' – энтальпия воды и пара, кДж/кг;

t'' – температура насыщения, °С;

$\partial \rho_g / \partial P, \partial \rho_n / \partial P, \partial i' / \partial P, \partial i'' / \partial P, \partial t'' / \partial P$ – частные производные по давлению от соответствующих величин.

Г.2.2 Участок расход пара – расход топлива

Передаточная функция этого участка $W_{DB}(p)$ может быть представлена последовательным соединением звеньев: запаздывание в топливоподающих устройствах $W_{т.у}(p)$, тепловосприятие испарительных поверхностей – расход топлива $W_{QB}(p)$, расход пара – тепловосприятие испарительных поверхностей $W_{DQ}(p)$. Таким образом

$$W_{DB}(p) = W_{т.у}(p) \cdot W_{QB}(p) \cdot W_{DQ}(p). \quad (\text{Г.18})$$

Передаточная функция топливоподающего устройства

$$W_{m,y}(p) = e^{-p\tau_{m,y}}. \quad (\Gamma.19)$$

Значение $\tau_{m,y}$ для котлов с прямым вдуванием пыли $\tau_{m,y} = 5 - 10$ с.

Принимаем $\tau_{m,y} = 10$ с.

Передачная функция расход пара – тепловосприятие испарительных поверхностей

$$W_{DQ}(p) = \frac{D_n / Q_{л.н.}}{T_D p + 1}, \quad (\Gamma.20)$$

$$T_D = \frac{A \cdot \rho_n}{D_n \cdot (i'' - i_{n,в})}, \left[\frac{M^3 \cdot \kappa_2 \cdot c \cdot \kappa_2}{M^3 \cdot \kappa_2 \cdot \kappa_{Джс}} = \frac{c \cdot \kappa_2 \cdot c^2}{\kappa_2 \cdot c^2} = c \right] \quad (\Gamma.21)$$

$i_{n,в}$ – энтальпия питательной воды, кДж/кг.

Г.2.3 Участок давление в барабане - расход пара – внешнее возмущение

Для парообразующих поверхностей нагрева передаточная функция котла по каналу давление в барабане – расход пара с достаточной для практических расчетов точностью может быть представлена в виде

$$W_{P_0 D}(p) = -\frac{\beta}{A \cdot p}, \quad (\Gamma.22)$$

где
$$\beta = \frac{\rho_в r}{\rho_в - \rho_n} \cdot \left[\frac{\kappa_{Джс}}{\kappa_2} \right] \quad (\Gamma.23)$$

Из условия материального баланса расхода пара в паропроводе линеаризованное уравнение его динамики для малых отклонений параметров может быть представлено в виде

$$\Delta D \kappa_D (T_D p + 1) - \Delta P_0 \kappa_0 (T_0 p + 1) = f, \quad (\Gamma.24)$$

где f – возмущение расходом пара на турбину;

$$\kappa_D = 1 + \frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} + \frac{\Delta P_1}{\rho_n} \cdot \frac{\partial \rho_n}{\partial P}, \quad (\Gamma.25)$$

$$T_{D_1} = \frac{\Phi}{\kappa_D} \cdot \frac{\partial \rho_n}{\partial P} \cdot \frac{2 \cdot \Delta P_1}{D_n}, \left[\frac{M^3 \cdot \kappa_2 \cdot Pa \cdot c}{M^3 \cdot Pa \cdot \kappa_2} = c \right] \quad (\Gamma.26)$$

$$\kappa_0 = \frac{D_n}{2 \cdot \Delta P_2} + \frac{D_n}{2 \cdot \rho_n} \cdot \frac{\partial \rho_n}{\partial P}, \left[\frac{\kappa_2}{c \cdot Pa} = \frac{\kappa_2 \cdot M \cdot c^2}{c \cdot \kappa_2} = M \cdot c \right] \quad (\Gamma.27)$$

$$T_{\sigma} = \frac{\Phi}{\kappa_{\sigma}} \cdot \frac{\partial \rho_n}{\partial P}, \left[\frac{M^3 \cdot \kappa_{\mathcal{L}}}{M^3 \cdot M \cdot c \cdot \text{Па}} = \frac{\kappa_{\mathcal{L}} \cdot c^2 \cdot M}{M \cdot c \cdot \kappa_{\mathcal{L}}} = c \right] \quad (\text{Г.28})$$

Φ – объем паропроводов от барабана котла до регулирующего клапана, м^3 ;

ΔP_1 – потеря давления на паропроводах в номинальном режиме, Па;

ΔP_2 – потеря давления на регулирующих клапанах, Па;

Из совместного решения (7.22) и (7.24) находим передаточные функции:

– по каналу давление в барабане – внешнее возмущение расходом пара

$$W_{P_{\sigma f}}(p) = -\frac{\kappa_{pf}}{T_0^2 p^2 + T_1 p + 1}, \quad (\text{Г.29})$$

– по каналу расход пара из котла – внешнее возмущение

$$W_{Df}(p) = \frac{\kappa_{Df} \cdot P}{T_0^2 p^2 + T_1 p + 1}, \quad (\text{Г.30})$$

где
$$T_0^2 = \frac{A \cdot \kappa_D \cdot T_{D_1}}{\beta \cdot \kappa_{\sigma}}, \left[\frac{M^3 \cdot c \cdot \kappa_{\mathcal{L}}}{\kappa_{\mathcal{L}} \cdot M \cdot c} = \frac{M^2 \cdot \kappa_{\mathcal{L}} \cdot c^2}{\kappa_{\mathcal{L}} \cdot M^2} = c^2 \right] \quad (\text{Г.31})$$

$$T_1 = T_{\sigma} + \frac{A \cdot \kappa_D}{\beta \cdot \kappa_{\sigma}}, \left[\frac{M^3 \cdot \kappa_{\mathcal{L}}}{\kappa_{\mathcal{L}} \cdot M \cdot c} = \frac{M^2 \cdot \kappa_{\mathcal{L}} \cdot c^2}{\kappa_{\mathcal{L}} \cdot M^2 \cdot c} = c \right] \quad (\text{Г.32})$$

$$\kappa_{pf} = \frac{1}{\kappa_{\sigma}}, \left[\frac{1}{M \cdot c} \right] \quad (\text{Г.33})$$

$$\kappa_{Df} = \frac{A}{\beta \cdot \kappa_{\sigma}} \cdot \left[\frac{M^3 \cdot \kappa_{\mathcal{L}}}{\kappa_{\mathcal{L}} \cdot M \cdot c} = \frac{M^2 \cdot \kappa_{\mathcal{L}} \cdot c^2}{\kappa_{\mathcal{L}} \cdot M^2 \cdot c} = c \right] \quad (\text{Г.34})$$

Г.2.4 Участок давление в магистрали - расход топлива

Передаточную функцию участка давление в магистрали – расход топлива можно представить в виде

$$W_{P_{MB}}(p) = \frac{\kappa_p}{T_2 \cdot p + 1} \cdot W_{P_{\sigma B}}(p), \quad (\text{Г.35})$$

где
$$\kappa_p = \frac{1}{\frac{\Delta P_1 + \Delta P_2}{\Delta P_2} + \frac{\Delta P_1}{\rho_n} \cdot \frac{\partial \rho_n}{\partial P}}, \quad (\text{Г.36})$$

$$T_2 = \frac{2 \cdot \Phi \cdot \kappa_p \Delta P_1}{\Delta D} \cdot \frac{\partial \rho_n}{\partial P} \cdot \left[\frac{m^3 \cdot Pa \cdot кг \cdot c}{m^3 \cdot кг \cdot Pa} = c \right] \quad (Г.37)$$

Г.3 Расчет оптимальных параметров настроек регуляторов асп расхода топлива

Расчёт настроек предусматривает определение численных значений параметров настройки регуляторов, обеспечивающих достижение выбранного критерия управления – соотношения, характеризующего качество работы объекта управления в целом и принимающего числовые значения в зависимости от используемых управляющих воздействий.

Любая АСР проектируется для достижения определенной цели, направленной на улучшения технико-экономических показателей работы оборудования. Близость достижения поставленной цели характеризуется некоторым целевым функционалом, который называется критерием оптимальности.

Задача выбора оптимальных параметров настройки связана с поиском экстремума критерия оптимальности в области допустимых значений параметров. На практике наладки АСР парогенераторов преобладает детерминистский подход, связанный с минимизацией интегральных оценок качества регулирования вдоль границы заданного запаса устойчивости.

По заданию курсового проекта имеем котёл, работающий на пылеугольном топливе. Главной особенностью АСР расхода топлива такого объекта регулирования является применение импульса по “теплу”, что позволяет увеличить быстродействие АСР, исключить перераспределение нагрузок между парогенераторами в переходных режимах при внутренних возмущениях.

АСР расхода топлива является каскадной с корректирующим и стабилизирующим регулятором. При теоретических исследованиях предпочтительным является метод расчёта по контурам регулирования.

Определение динамических характеристик регулируемых объектов возможно двумя методами: экспериментальным и аналитическим. В курсовом

проекте определение параметров настройки регуляторов осуществляется аналитическим методом.

Г.3.1 Метод расширенных амплитудно-фазовых характеристик

Рассматриваемый корневой метод параметрического синтеза систем автоматического управления основан на понятии расширенных амплитудно-фазочастотных характеристик (РАФЧХ). РАФЧХ какого-либо звена можно получить подстановкой в передаточную функцию этого звена $W(p)$ оператора $p = (i - m) \cdot \omega$ или $p = -\eta + i\omega$. В первом случае расчётные формулы метода обеспечивают получение границы заданной степени колебательности системы m , а во втором – получение границы заданной степени устойчивости η в пространстве параметров настройки регулятора. Дальнейший поиск параметров настройки регулятора осуществляется вдоль границы заданного запаса устойчивости системы регулирования до достижения экстремума принятого критерия качества. Расчётные формулы корневого метода для ПИ-регулятора

$$\begin{cases} \frac{k_p}{T_u} = -\frac{\omega \cdot (m^2 + 1) \cdot \text{Im}_{об}(m, \omega)}{A_{об}^2(m, \omega)} \\ k_p = -\frac{m \cdot \text{Im}_{об}(m, \omega) + \text{Re}_{об}(m, \omega)}{A_{об}^2(m, \omega)} \end{cases}, \quad (\text{Г.38})$$

где $\text{Re}_{об}(m, \omega)$ – расширенная вещественная частотная характеристика объекта;

$\text{Im}_{об}(m, \omega)$ – расширенная мнимая частотная характеристика объекта;

m – заданная величина колебательности;

ω – частота;

$A_{об}(m, \omega)$ – расширенная амплитудно-частотная характеристика объекта

$$A_{об}(m, \omega) = \sqrt{\text{Re}_{об}^2(m, \omega) + \text{Im}_{об}^2(m, \omega)}. \quad (\text{Г.39})$$

Из этих уравнений определяются значения настроечного параметра k_p , T_u и частоты ω , на которой будет “работать” система регулирования.

Порядок применения расчетных формул, следующий [117]:

- 1) задаются величиной m , диапазоном и шагом изменения частоты ω ;
- 2) по передаточной функции объекта рассчитываются значения расширенной частотной характеристики объекта и в явном виде определяются настройки регулятора в заданном диапазоне частот;
- 3) для П, И-регуляторов решение системы расчетных уравнений сразу дает параметр настройки и резонансную частоту замкнутой системы;
- 4) для ПД-, ПИ-, ПИД-регулятора расчетные формулы дают в пространстве параметров настройки границу заданного запаса устойчивости;
- 5) на границе заданного запаса устойчивости ищут значения параметров, минимизирующих принятый критерий качества работы системы.

Расчётные формулы имеют общий характер. На одной и той же частоте ω величины η и m связаны однозначной зависимостью $m \cdot \omega = \eta$. Поэтому, подставив в расчетные формулы $m = \eta/\omega$, получим формулы, которыми можно пользоваться для построения границы заданной степени устойчивости η . Если требуется построить границу заданных η и m , то в диапазоне частот $0 \leq \omega \leq \eta/m$ используются формулы с η , а в диапазоне $\eta/m \leq \omega \leq \infty$ – формулы с m . При $\eta = 0$ или $m = 0$ формулы позволяют построить границу устойчивости.

Г.3.2 Определение параметров настройки стабилизирующего регулятора

Для пылеугольных котлов с сигналом по “теплоте” передаточная функция эквивалентного объекта для стабилизирующего регулятора образуется параллельным соединением передаточной функции измерительного канала расхода пара и передаточной функции измерительного канала давления в барабане котла

$$W_{\text{обл}}(P) = W_{DB}(P) \cdot W_D(P) + W_{P_0B}(P) \cdot W_{P_0}(P) \cdot W_d(P). \quad (\text{Г.40})$$

Рассчитаем передаточную функцию измерительного комплекса расхода пара $W_D(P)$. При применении измерительного преобразователя Сапфир-22М-ДД-2450, коэффициент передачи датчика K_D найдется как отношение выходного токового сигнала (5 мА) к величине 0,25 МПа (перепад давления на

диафрагме). Поскольку инерционность датчика мала, считаем его усилительным звеном и $W_D(P) = K_D$,

$$\text{т.е.} \quad W_D(P) = \frac{5}{0,25} = 20. \quad (\text{Г.41})$$

Рассчитаем передаточную функцию датчика давления пара в магистрали $W_{PM}(P)$. При применении измерительного преобразователя Сапфир-22М-ДИ-2170, коэффициент передачи датчика K_{PM} найдется как отношение выходного токового сигнала (5 мА) к величине 16 МПа (перепад давления). Поскольку инерционность датчика мала, считаем его усилительным звеном и $W_{PM}(P) = K_{PM}$,

$$W_{PM}(P) = \frac{5}{16} = 0,313. \quad (\text{Г.42})$$

Рассчитаем передаточную функцию датчика давления пара в барабане котла $W_{PB}(P)$. При применении измерительного преобразователя Сапфир-22М-ДИ-2170, коэффициент передачи датчика K_{PB} найдется как отношение выходного токового сигнала (5 мА) к величине 16 МПа (перепад давления). Поскольку инерционность датчика мала, считаем его усилительным звеном и $W_{PB}(P) = K_{PM}$

$$W_{PB}(P) = \frac{5}{16} = 0,313. \quad (\text{Г.43})$$

В качестве метода расчета ОПН стабилизирующего регулятора примем метод РАФЧХ.

Введём расчёт координат линии равной степени затухания по формулам

$$\frac{K_P}{T_u} = - \frac{\omega \cdot (m^2 + 1) \cdot \text{Im}_{o\delta 1}(m, \omega)}{A_{o\delta 1}^2}, \quad (\text{Г.44})$$

$$K_P = - \frac{m \cdot \text{Im}_{o\delta 1}(m, \omega) + \text{Re}_{o\delta 1}(m, \omega)}{A_{o\delta 1}^2}. \quad (\text{Г.45})$$

Строим линию равной степени затухания в среде MathCAD (приложение В) и согласно первому интегральному критерию находим ОПН стабилизирующего регулятора: $k_p = 7,493$, $T_i = 2,416$ с.

Г.3.3 Расчет параметров настройки дифференциатора

Передаточная функция дифференциатора $W_{\delta}(p) = \kappa_{\delta} \cdot T_{\delta} p / (T_{\delta} p + 1)$.

При формировании сигнала по “теплоте” должно выполняться равенство

$$W_{Df}(p) = |W_{P_{\delta f}}(p)| \cdot W_{\delta}(p) \quad (\text{Г.46})$$

$$\text{или} \quad \frac{k_{Df} p}{T_0^2 p^2 + T_1 p + 1} = \frac{k_{Pf} \cdot k_{\delta} \cdot T_{\delta} p}{(T_0^2 p^2 + T_1 p + 1) \cdot (T_{\delta} p + 1)}. \quad (\text{Г.47})$$

Из полученного выражения следует, что абсолютного равенства на всем временном интервале получить невозможно, так как порядок знаменателей правой и левой частей равенства различные. Поэтому можно ставить вопрос лишь о лучшем приближении равенства на всем временном интервале.

Для решения этой задачи найдем переходные характеристики $h_1(\tau)$ и $h_2(\tau)$, соответствующие передаточным функциям $W_{Df}(p) = |W_{P_{\delta f}}(p)| \cdot W_{\delta}(p)$.

По ним определяется разность $\Delta h(\tau) = h_1(\tau) - h_2(\tau)$. Оптимальным параметрам κ_{δ} и T_{δ} соответствует значение

$$F = \int_0^{\infty} \Delta h(\tau) \cdot d\tau = \min. \quad (\text{Г.48})$$

Из равенства (Г.48) видно, что F достигает минимума равное нулю при $T_{\delta}=0$, $k_{Pf} \cdot k_{\delta} \cdot T_{\delta} \rightarrow k_{Df}$, $k_{\delta} \rightarrow \infty$. В этом случае $h_1(\tau) = h_2(\tau)$. Установить такие параметры на дифференциаторе не представляется возможным. Поэтому их подбираем так, чтобы значение F было близко к нулю.

Такой подбор параметров дифференциатора проведём в среде MathCAD.

Процедура подбора состоит в следующем. Задаёмся значением T_{δ} . Вычисляем k_{δ} и F , строим графики $h_1(\tau)$ и $h_2(\tau)$. Визуально по графику оценим выбранные значения параметров дифференциатора $k_{\delta} = 7,846 \cdot 10^{-3}$, $T_{\delta} = 1$ с.

Г.3.4 Определение параметров настройки корректирующего регулятора

Путем структурных преобразований, изложенных ранее находим передаточную функцию эквивалентного объекта. Для корректирующего регулятора в нашем случае она имеет вид

$$W_{об2}(P) = \frac{W_{PMB}(P) \cdot W_{PM}(P) \cdot W_{CP}(P)}{1 + W_{об1}(P) \cdot W_{CP}(P)}. \quad (\text{Г.49})$$

В качестве метода расчета ОПН корректирующего регулятора примем метод РАФЧХ.

Для нахождения ОПН корректирующего регулятора повторим расчёты, описанные в п. Г.3.2. Определение ОПН корректирующего регулятора проведём в среде MathCAD : $k_p = 1,369$, $T_i = 408,779$ с.

Г.4.1 Расчёт и построение переходного процесса

Как видно из структурной схемы (рисунок Г.1), возмущающее воздействие по расходу топлива или по тепловосприятию приложены непосредственно на вход корректирующего регулятора, поэтому АСР исследуется только по управляющему воздействию. Передаточная функция замкнутой системы по управляющему воздействию будет равна

$$W_{зс}(p) = \frac{W_{рк}(p) \cdot W_{об2}(p)}{1 + W_{рк}(p) \cdot W_{об2}(p)}. \quad (\text{Г.50})$$

Переходный процесс можно построить с помощью трапецеидальных вещественных частотных характеристик. При использовании метода надо знать вещественную частотную характеристику замкнутой системы. Тогда переходный процесс при единичном внешнем воздействии для нулевых начальных условий можно получить, определив интеграл

$$y(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\text{Re}(\omega)}{\omega} \cdot \sin \omega t \cdot d\omega. \quad (\text{Г.51})$$

Расчёт переходного процесса по задающему воздействию произведём в среде MathCAD . В результате получим переходный процесс рисунок Г.2.

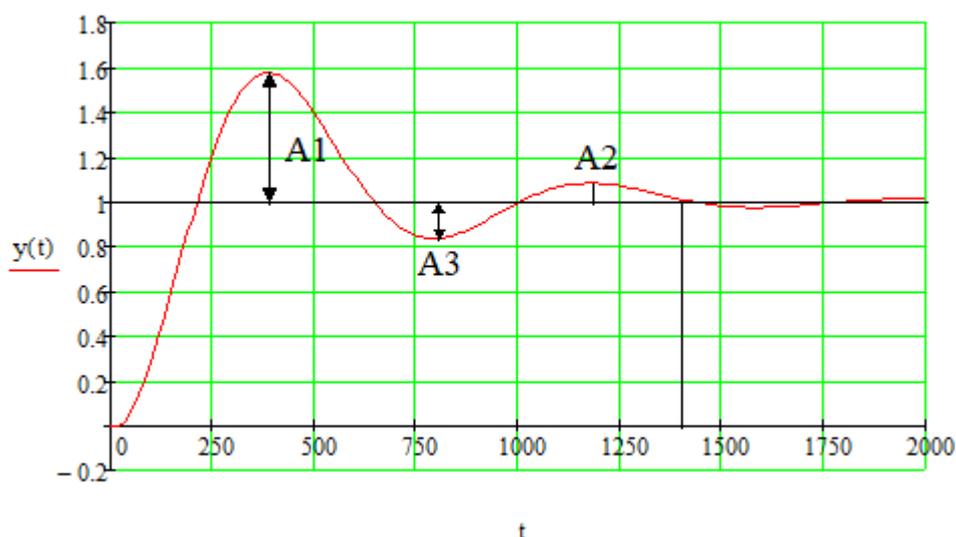


Рисунок Г.2 – Переходный процесс замкнутой системы относительно задающего воздействия

Г.4.2 Оценка качества переходного процесса замкнутой системы

Любая промышленная АСР кроме устойчивости должна обеспечивать определенные качественные показатели процесса регулирования. Т.е. процессы автоматического регулирования должны удовлетворять ряду дополнительных требований, по степени выполнения, которых судят о качестве АСР. В реальных системах под качеством понимают совокупность показателей или критериев, позволяющих оценить характер отклонения регулируемой величины под действием изменяющихся возмущений и судить о том, насколько система удовлетворяет поставленным требованиям при заданных конкретных ограничениях.

О качестве АСР можно судить либо по форме процесса регулирования при наиболее характерном или однократном возмущении по одному из каналов воздействия, так называемому единичному процессу, либо по данным статистики.

Для оценки качества переходных процессов в замкнутой системе при нанесении ступенчатого возмущения со стороны задатчика регулятора и со стороны регулирующего органа используют следующие показатели [118]:

1) Перерегулирование σ – отношение максимального абсолютного отклонения отрицательного знака A_3 к максимальному отклонению положительного знака A_1

$$\sigma = (A_3 / A_1) \cdot 100 \%,$$

$$\sigma = (0,16/0,55) \cdot 100 = 29 \%.$$

2) Максимальная динамическая ошибка A_1 – максимальное отклонение регулируемой величины от её установившегося значения.

$$A_1 = 0,55.$$

3) Время регулирования t_p – время, по истечении которого, отклонение регулируемой величины от установившегося состояния не будет превышать некоторой, наперёд заданной величины δ . Обычно $\delta = 0,05 \cdot K_{об} = 0,05 \cdot 1 = 0,05$. Отсюда время регулирования $t_p = 1295$ с.

4) Степень затухания Ψ – отношение разности двух соседних амплитуд, одного знака, к большей из них:

$$\Psi = (A_1 - A_2) / A_1,$$

$$\Psi = (0,55 - 0,06) / 0,55 = 0,9.$$

Полученной в результате расчётов степени затухания $\Psi = 0,9$ соответствует согласно таблице Г.2 степень колебательности $m = 0,366$.

Таблица Г.2 – Таблица соответствия оценок запаса устойчивости

Ψ	0	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	0,998	1
m	0	0,221	0,265	0,305	0,366	0,478	1	∞
M	∞	2,38	2,09	1,8	1,55	1,29	1	1

Заключение

В данном разделе выполнено детальное проектирование локальной системы управления расходом топлива. Для данной системы разработана структурная схема и определена математическая модель объекта управления по каналам основных и управляющих и возмущающих воздействий.

Динамические свойства объекта регулирования получены в аналитической форме и представлены в виде передаточных функций для различных регулируемых участков. С помощью этих передаточных функций рассчитаны оптимальные параметры настройки регуляторов по методу РАФЧХ. Оптимальные настройки регуляторов приведены в таблице Г.3.

Таблица Г.3 – ОПН регуляторов

стабилизирующий регулятор	дифференциатор	корректирующий регулятор
$k_p = 7,493, T_n = 2,416 \text{ с}$	$k_d = 7,846 \cdot 10^{-3}, T_d = 1 \text{ с}$	$k_p = 1,369, T_n = 408,779 \text{ с}$

Произведён расчёт и построение переходного процесса и выполнена оценка качества работы системы. Результаты оценки качества приведены в таблице Г.4.

Таблица Г.4 – Оценка качества переходного процесса

Оценки качества	Значение
Степень затухания Ψ	0,9
Перерегулирование $\sigma, \%$	29
Время регулирования $t_p, \text{ с}$	1295
Макс. дин. ошибка $A1$	0,55