

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа: ИШЭ

Специальность: Теплоэнергетика и теплотехника

ООП/ОПОП: ООП: Экологически чистые технологии преобразования энергоносителей

Отделение школы (НОЦ): И.Н.Бутакова

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА**

Тема работы
<b>Исследование горения смесевых топлив на основе углей и отходов лесопромышленного комплекса</b>

УДК: 662.61:[662.63+662.71]

Обучающийся:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ01	Янковский Станислав Александрович		

Руководитель ВКР:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ	Ларионов К.Б.	к.т.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Якимова Т.Б.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ООД	Сечин А.И.	д.т.н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
«Экологически чистые технологии преобразования энергоносителей»	Губин В.Е.	к.т.н., доцент		

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

<b>Код компетенции</b>	<b>Наименование компетенции</b>
<b>Универсальные компетенции</b>	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>	
ОПК(У)-1	Способен формулировать цели и задачи исследования, выявлять приоритеты решения задач, выбирать критерии оценки
ОПК(У)-2	Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы
<b>Профессиональные компетенции</b>	
ПК(У)-1	Способен проектировать технологические системы и отдельные элементы систем преобразования энергоносителей
ПК(У)-2	Способен производить прогностическую оценку воздействия технологий энергетики на окружающую среду, применять знания нетехнических ограничений инженерной деятельности
ПК(У)-3	Способен проектировать и организовывать образовательный процесс с использованием современных технологий
ПК(У)-4	Способен применять современные методы и средства практической инженерной деятельности в сфере создания и эксплуатации современного оборудования и установок для экологически чистого преобразования энергоносителей
ПК(У)-5	Способен осуществлять управление технологическими процессами и энергетическими установками
ПК(У)-6	Способен определять потребности производства в ресурсах, обоснованию мероприятий по экономии энергоресурсов
ПК(У)-7	Способен производить сравнительный анализ технологий преобразования энергоносителей
ПК(У)-8	Способен формировать решения профессиональных задач путем интеграции фундаментальных разделов технических наук и прикладных знаний в сфере теплоэнергетики

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа: Инженерная школа энергетики  
 Направление: 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника  
 Отделение школы (НОЦ): Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова

УТВЕРЖДАЮ:  
 руководителем ООП  
 \_\_\_\_\_ Губин В.Е.  
 (Подпись)     (Дата)     (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

магистерской диссертации
--------------------------

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ01	Янковскому Станиславу Александровичу

Тема работы:

Исследование горения смесевых топлив на основе углей и отходов лесопромышленного комплекса	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	18.04.2022, №108-14

Срок сдачи студентом выполненной работы:	1 июня 2022 года
--	------------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b>  <i>(название объекта исследования и его характеристик; описание режима работы объекта; обозначение состава сырья, особенностей процесса или наименования типа изделия, а также требований прикреплённых к нему; формирование правил безопасности при работе с объектом ив ходе исследовательского процесса; определение энергозатрат ипроведение экономического анализа и т.д.).</i></p>	<p>Объект аналитического исследования – Смесевые топлива на основе угля и биомассы.          Предмет исследования – топливо.          Цель работы – обоснование возможности сжигания смесевых топлив в энергетических котлах</p>
<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>  <i>(определение научных достижений в мире за счёт проведение обзора и анализа различных литературных источников в соответствующей области; определение задач исследование; формирование методики исследования; анализ полученных результатов; написание специальных разделов, требующих разработки;</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Представить описание, характеристики, достоинства и недостатки смесевых топлив.</li> <li>2. Сформулировать цели и задачи работы.</li> <li>3. Представить описание проблем системы сжигания смесевых топлив.</li> <li>4. Выполнить экспериментальные исследования.</li> <li>5. Определить экономические затраты на выполнение выпускной работы.</li> </ol>

<i>формирование выводов по результатам исследования, определение дальнейших планов на исследование).</i>	6. Проанализировать рабочие места на предмет выявления основных опасностей и вредностей, оценить степень воздействия их на человека и природную среду. 7. Сформулировать основные выводы.
<b>Перечень графического материала</b> <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Презентационный материал.
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> <i>(с указанием разделов)</i>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Якимова Татьяна Борисовна, к.э.н., доцент ОСГН
«Социальная ответственность»	Сечин Александр Иванович, д.т.н., профессор ООД
<b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b>	

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ	Ларионов К.Б.	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ01	Янковский С.А.		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа энергетики  
 Направление подготовки 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника  
 Уровень образования Магистратура  
 Отделение школы (НОЦ) Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова  
 Период выполнения осенний / весенний семестр 2021 /2022 учебного года

Форма представления работы:

магистерская диссертация (бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)
--

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН  
выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	1 июня 2022 года
--	------------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
25.01.2022	Сбор литературных данных и проведение анализа литературы и нормативно-технической документации	15
01.03.2022	Разработка математической модели	20
05.04.2022	Проведение расчетов и анализ полученных результатов	20
10.05.2022	Финансовый менеджмент	10
17.05.2022	Социальная ответственность	10
24.05.2022	Выполнение раздела на иностранном языке	10
31.05.2022	Заключение	5
07.06.2022	Презентация	10
	<b>Итого</b>	<b>100</b>

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ	Ларионов К.Б.	к.т.н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ	Губин В.Е.	к.т.н., доцент		

## РЕФЕРАТ

**Отчет 105 с., 25 рис., 19 табл., 49 источн.**

**Ключевые слова:** уголь, древесная биомасса, топливная смесь, термическое разложение, горение, элементный состав, термический и масс-спектрометрический анализы, газовая хроматография.

В краткосрочной и среднесрочной (10 – 15 лет) перспективе уголь останется одним из основных источников энергии. Возможно, мировое сообщество не сможет полностью отказаться от угольной энергетики еще лет 30 – 40. В этой связи актуальнейшими задачами энергетики являются задачи снижения негативного воздействия угольных электростанций на окружающую среду (выбросы антропогенных оксидов и летучей золы, в первую очередь). Эффективным решением данных задач в энергетике является совместное сжигание отходов переработки древесины в смеси с углем. Как известно, биомасса считается возобновляемым источником энергии. Формирование отходов переработки различных видов биомассы постоянно увеличивается. Ежегодно отходы переработки сельхозпродуктов и древесины формируются на уровне 11,4 млрд тонн, из которых 40 % это отходы сельского хозяйства, 30 % животноводческие отходы, 18 % древесные отходы, прочие отходы составляют 12 %. Эффект применения в энергетике смесевых топлив на основе углей и биомассы приводит к существенному снижению масштабов негативного воздействия угольных электростанций на окружающую среду, но до выполнения проектных исследований не был установлен однозначно механизм секвестирования оксидов серы при таком сжигании. Недопонимание физики и химии процессов, протекающих при термическом разложении смесей частиц угля и биомассы, а также газообразных и твердых продуктов пиролиза, существенно ограничивало возможности проведения опытно-конструкторских работ по созданию технологий сжигания углей с существенным снижением выхода антропогенных оксидов и летучей золы в атмосферу.

Целью работы являлось установление по результатам экспериментальных и теоретических исследований фундаментальных закономерностей процессов совместного термического разложения смеси измельченного угля и диспергированной древесины в диапазоне высоких (до 1000 К) температур нагрева и механизмов взаимодействия газообразных и твердых продуктов пиролиза между собой.

Для достижения поставленной цели были разработаны методики исследований и ряд экспериментальных установок, которые позволили установить механизмы взаимодействия газообразных и твердых продуктов совместного пиролиза углей восьми различных месторождений РФ, Казахстана и Монголии в смеси с отходами переработки древесины.

При выполнении проекта определены технические характеристики исследовавшихся смесей (калорийность, зольность, влажность и выход летучих). Результаты анализа теплоты сгорания, влажности, зольности, выхода летучих веществ и элементный анализ показали, что увеличение доли древесной биомассы до 50 % в смеси с углями приводит к незначительному снижению калорийности таких топлив (максимальное снижение составило менее 9 % для смесей на основе каменного угля марки Д).

Анализ выхода антропогенных оксидов при совместном термическом разложении древесной компоненты с широко распространёнными и применяемыми по всему миру углями: одного бурого угля марки 2Б, четырех бурых углей марки 3Б, одного каменного угля марки Т и двух углей марки Д (угли пяти месторождений РФ, двух месторождений Казахстана и одного Монгольского месторождения) показал существенно не аддитивное снижение концентрации антропогенных газов (оксидов серы от 10 % до 95,8 %, оксидов азота от 7 % до 57,7 % и диоксида углерода от 17 % до 65,5 %) в продуктах термического разложения смесей углей с отходами переработки древесины. Установлено, что состав образующихся при термическом разложении смесей исследовавшихся марок углей с древесиной газообразных продуктов зависит от реакционной способности исходного угля, что необходимо учитывать при

формировании смесевых топлив, применяемых для сжигания на тепловых электрических станциях.

Анализ результатов термогравиметрического анализа смесевых топлив на основе углей и древесины показал, что увеличение доли древесной биомассы в смеси с углями всех исследовавшихся марок приводит к снижению температуры начала термического разложения. Установлено, что в большинстве случаев термическое разложение углей мономодальное, а термическое разложение смесевых топлив является бимодальным. Результаты термогравиметрического анализа подтвердились многочисленными экспериментами по исследованию времен задержек зажигания смесей. Установлено, что времена задержки зажигания с увеличением доли древесной биомассы до 50 % в смеси с углями (восьми месторождений) существенно в 1,5 – 3,5 раза снижаются по сравнению с воспламенением однородных углей.

Элементный анализ золы исследовавшихся топливных смесей показал существенное увеличение доли алюминия, кальция и серы в продуктах пиролиза этих топлив. Зафиксировано значительное увеличение доли сульфатов алюминия и кальция в золе древесно-угольных смесевых топлив на основе угля марки Т (сульфатов алюминия на 52,5 %, сульфатов кальция на 54,8 %), в золе смеси на основе угля марки Д (сульфатов алюминия на 28,4 %, сульфатов кальция на 63,13 %) и для угля марки ЗБ (сульфатов алюминия на 35,4 %, сульфатов кальция на 38,64 %). В золе смесевых топлив из Экибастузского угля и древесных отходов установлено увеличение концентрации сульфатов алюминия на 44,3 %, сульфатов кальция на 33,41 %, в золе смеси с углем месторождения Майкубен (сульфатов алюминия на 37,61 % и сульфатов кальция на 40,45 %), для золы древесно-угольной смеси на основе Монгольского угля увеличение концентрации сульфатов алюминия составило на 36,64 % и сульфатов кальция на 39,56 %. Выполненные экспериментальные исследования показали, что совместный пиролиз смесей счетной совокупности частиц восьми углей (например, марок Б, Т и Д как Российских месторождений, так и Казахстана, Монголии) и древесины сосны также приводит к увеличению



концентрации сульфатов кальция и алюминия в золе смесей с увеличением доли древесной компоненты по отношению к однородным углям на единицу массы последних.

При выполнении проекта разработана математическая модель термохимических и физических процессов, протекающих при совместном пиролизе угля и древесины в виде системы нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных с соответствующими краевыми условиями. Выполнена верификация разработанной математической модели, метода и алгоритма решения соответствующих нелинейных задач математической физики путем сравнения результатов математического моделирования с результатами экспериментов, проведенных при выполнении проекта. Выполнено математическое моделирование процессов термического разложения смеси частиц угля и древесины в диапазоне температур до начала их горения при учете взаимодействия газообразных и твердых продуктов термического разложения углей и древесины с целью обоснования возможности достижения синергетического эффекта таких взаимодействий, проявляющегося в существенном снижении (на 30 % – 60 %) концентрации оксидов серы и азота в газообразных продуктах сгорания смесей угля и древесины. По результатам численного моделирования показана возможность образования солей кислот в пористой структуре частиц топлива на начальной стадии горения. Разработанная математическая модель процессов тепломассопереноса и физико-химических превращений при пиролизе смеси частиц угля и древесины на настоящее время является самой подробной по описанию теплофизических и термохимических процессов, протекающих как в частицах топлив (угля и древесины), так и в их малой окрестности.

По результатам проектных экспериментальных исследований можно сделать вывод о существенном влиянии древесины на формирование в золе смесевых топлив на основе типичных энергетических углей (восьми месторождений как Российских, так и зарубежных) сульфатов кальция и алюминия. Сравнение результатов экспериментальных исследований смесевых

топлив, сформированных из группы пяти частиц угля и одной частицы древесины в различном соотношении по массе (от 0 % до 50 %) двух компонент в смеси, с результатами, полученными при анализе навесок смесевых топлив массой до 15 г. с учетом размера частиц в навесках (менее 80 мкм и остатка на сите 200 – 1000 мкм) показало их хорошее соответствие.

Результаты экспериментальных исследований подтверждают эффективность сжигания отходов деревообрабатывающих производств в составе топливных смесей на основе угля и древесины в топках котельных агрегатов большой (теплоэлектростанции и теплоэлектроцентрали) и малой (котельные) энергетики с целью минимизации экологического воздействия угольных ТЭС на окружающую среду и энергоресурсоэффективной экологически безопасной утилизации техногенных отходов переработки древесины.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	12
1. Материалы и методика экспериментальных исследований и основные результаты .....	17
2. Разработка экспериментального стенда по определению времен задержек зажигания.....	18
3. Разработка экспериментального стенда по определению состава газообразных продуктов термического разложения топлив. ....	33
4. Результаты исследований газового анализа при термическом разложении углей, древесины и смесевых топлив на их основе.....	35
5. Разработка экспериментального стенда по пиролизу топливных смесей навеской по массе до 20 грамм с целью последующего определения элементного состава продуктов термического разложения топлив.....	38
6. Результаты термогравиметрического анализа угля, древесины и смесевых топлив на их основе. ....	42
7. Результаты элементного анализа золы угля, древесины и зольного остатка смесевых топлив на их основе.....	44
Заключение по разделам.....	61
Участие в научных мероприятиях по тематике проекта за период обучения ....	62
Библиографический список всех публикаций по проекту, опубликованных за весь период реализации проекта .....	63
8. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение....	68
9. Социальная ответственность .....	87
Заключение .....	99
Список литературы: .....	101

## Введение

Ископаемый уголь многие сотни лет наряду с другими традиционными топливами является одним из основных источников сырья для выработки тепла и электроэнергии [1]. В долгосрочной перспективе, согласно статистическим данным [2,3], доля угля в производстве тепла и электроэнергии в мировой структуре топливно – энергетического комплекса будет составлять (по разным оценкам) от 31 % (горизонт планирования – 2040 г.) [2] до 38 % (горизонт планирования – 2050 г.) [3]. Ключевыми предпосылками к этому являются значительные запасы углей, их невысокая стоимость, а также развитая инфраструктура добычи, доставки и хранения. Однако, применение углей в энергетике сопряжено со значительными выбросами оксидов серы, углерода, азота, а также летучей золы [4,5] в продуктах сгорания углей.

Многочисленные попытки заменить ископаемые виды топлив альтернативными (возобновляемыми) источниками энергии [6] (например, солнечными [7], ветряными [8], геотермальными) не привели в последние два десятилетия к глобальному изменению доли угля в мировом энергетическом балансе [9,10]. Однако, многими странами (в первую очередь странами Европейского союза) биомасса рассматривается в качестве отдельного, экологически чистого вида топлива [9,10,11]. Повышенное внимание к применению в энергетике биомассы обусловлено тем, что последняя практически не содержит в своём минеральном составе серы и является углерод – нейтральным топливом [11]. Важно отметить, что мировая экономика в значительной степени зависит от цен на энергоносители, в связи с чем использование возобновляемого источника энергии – биомассы [12] должно положительным образом отразиться на энергетической устойчивости каждого отдельно взятого государства. Кроме того, следует подчеркнуть, что только накопленный объем древесных отходов в мире значителен (составляет от 7 % до 40 % объемов лесопереработки в год) [13], в связи с чем ведется активный поиск способов их эффективной утилизации и перевод в устойчивый энергоноситель [14,15]. Виды биомассы, имеющей потенциал применения в энергетике,

различны в зависимости от региона. Например, рисовая шелуха или солома [16] типичны для стран азиатского региона, кукуруза [17] Северной Америки, пальмовая биомасса [18], виноградный жмых [19] и оливковые косточки [20] для стран Южной Европы и Средиземноморского региона.

Прямое сжигание больших объемов биомассы в топках мощных энергетических установок электростанций затруднено ввиду её неоднородности и более низкой, относительно углей и газа, теплотворной способности [21]. В связи с этим, перспективным направлением эффективного применения биомассы в энергетике является её использование как компоненты смесевых топлив в составе с углями, например, органоводоугольных [22,23] или смесей твердых топлив [24,25]. В качестве второй компоненты [26] в смесевых топливах используются [27], в основном, биомасса [28] и коммунальные отходы [29,30].

Установлено [5,28,29], что наиболее перспективной энергетической биомассой является древесина и отходы ее переработки – опилки. Попытки эффективного использования опилок в энергетике [30,31] предпринимались неоднократно (например, [32,33]).

В настоящее время известны [34,35] примеры котельных агрегатов, разработанных для совместного сжигания угля и биомассы [36]. При анализе эффективности применения древесных опилок (или пеллет на их основе) в качестве основного вида биомассы в смесевом топливе одной из наиболее перспективных технологий является прямое сжигание смеси измельченных угля и древесины в псевдосжиженном слое. Наиболее ярким примером такого совместного сжигания угля и древесных отходов является электростанция мощностью 550 МВт [33], расположенная в г. Хельсинки, Финляндия.

К настоящему времени результатов экспериментального анализа влияния древесной биомассы на концентрацию парниковых газов в продуктах сгорания ее смеси с углями опубликовано достаточно много (например, [37–40]). Но не установлены достоверно механизмы физико-химических процессов, протекающих при взаимодействии продуктов термического разложения основных компонент смесевых топлив (угля и древесины) [22,41]. Поэтому не

разработаны и теоретические основы технологий совместного сжигания угля и биомассы.

Основная проблема заключается в том, что анализ газообразных продуктов сгорания во многих экспериментах (например, [42,43]) проводился после полного сжигания смесей диспергированных углей и биомассы. Но состав дымовых газов изменяется по мере завершения процесса горения исходных топлив достаточно существенно в зависимости от условий горения. Поэтому важным является объективная (статистически обоснованная) оценка состава продуктов пиролиза смесей частиц угля и биомассы на стадии их интенсивного пиролиза.

Целью магистерской диссертации является установление по результатам экспериментальных и теоретических исследований фундаментальных закономерностей процессов совместного термического разложения смеси измельченного угля и диспергированной древесины в диапазоне высоких (до 1000 К) температур нагрева и механизмов взаимодействия газообразных и твердых продуктов термического разложения между собой.

Установление этих закономерностей и механизмов обеспечит условия для обоснования эффективности сжигания отходов деревообрабатывающих производств в составе топливных смесей на основе угля и древесины в топках котельных агрегатов большой (теплоэлектростанции и теплоэлектроцентрали) и малой(котельные) энергетики. Для достижения цели проекта предполагается выполнить программу экспериментальных и теоретических исследований, которые включают группу взаимосвязанных задач.

1. Разработка методики экспериментального исследования процессов термического разложения навесок (массой до 10 г) смеси измельченного угля и диспергированной древесины в диапазоне температур до 1000 К с целью определения состава газообразных и твердых продуктов термического разложения в зависимости от температуры среды и концентрации компонент.

2. Проведение экспериментальных исследований процессов термического разложения смесей измельченных углей (восемь марок углей) и древесины

(отходов деревообработки – сосновых опилок) при разных (от 5% до 50% ) концентрациям древесной компоненты в инертной (аргон) и окислительной среде (воздух) атмосфере с определением состава газообразных и твердых продуктов термического разложения и концентраций компонент в диапазоне температур до 1000К (с шагом 50К) при скорости подъема температуры 10 К/с.

3. Установление по результатам экспериментальных исследований механизмов секвестирования оксидов серы и азота при взаимодействии газообразных и твердых продуктов термического разложения углей и древесины между собой.

4. Разработка методики экспериментального исследования процессов термического разложения счетного множества смеси частиц угля и древесины (общее число от 10 до 200) в диапазоне температур до 1000К с целью определения состава газообразных и твердых продуктов термического разложения в зависимости от температуры среды и концентрации компонент.

5. Проведение экспериментальных исследований процессов термического разложения счетного множества смеси частиц угля и древесины (общее число от 10 до 200) в диапазоне температур до 1000К с целью определения состава газообразных и твердых продуктов термического разложения в зависимости от температуры среды и концентрации компонент.

6. Обобщение результатов проведенных экспериментов на навесках смесей угля и древесины с разной начальной массой и уточнение механизма секвестирования оксидов азота и серы при взаимодействии газообразных и твердых продуктов термического разложения углей и древесины между собой.

7. Экспериментальное определение калорийности всех исследующихся смесей с разными концентрациями угольной и древесной компоненты с целью оценки энергетических характеристик таких смесевых топлив (древесноугольных смесей).

8. Обобщение результатов проведенных при выполнении проекта экспериментальных и теоретических исследований и выработка рекомендаций

по практическому использованию этих результатов при разработке технологий сжигания смесей угля и древесины в топках паровых и водогрейных котлов.



## **1. Материалы и методика экспериментальных исследований и основные результаты**

В качестве базовых компонент исследовавшихся смесевых твердых топлив были выбраны типичные для энергетики угли: одного каменного угля марки Т, и каменного угля марки Д (угли месторождений РФ). Эти угли обладают относительно низким содержанием серы и высокой теплотворной способностью, в связи с чем используются на крупных тепловых электростанциях. Их аналоги по составу и основным характеристикам (угли марок Хунъян, Ханьдань и Хуайбэй, Северный Китай, Сан-Хуан в США) [44,45]. В качестве биомассы использовалась измельченная древесина – отходы переработки сосны (ООО Дзержинский ЛПК, г.Томск, Россия). Эксперименты проводились при стандартных условиях в лаборатории (при температуре воздуха 20 °С, давлении 760 мм.рт.ст.).

Перед началом экспериментальных исследований проводилась подготовка топлив. Крупный кусковой уголь измельчался в двухступенчатой помольной системе, состоящей из щековой дробилки и диспергатора (помол до фракции менее 500 мкм). Измельченный уголь просеивался через систему сит. Отобранная для экспериментов фракция частиц составляла от 80 мкм до 200 мкм. Отходы обработки древесины предварительно очищали от коры и мусора, в течении суток просушивались для удаления избыточной влаги при температуре 293 К и в дальнейшем также просеивались для выделения частиц фракцией от 80 до 200 мкм.

Выполнен полный технический анализ исходных топливных компонент и смесей на их основе (определены теплота сгорания, зольность, влажность и выход летучих) согласно методикам ГОСТ 147-2013 (ISO 1928-2009), ГОСТ 11022-95, ГОСТ 27314-91 (ISO 589-81), ГОСТ 6382-2001. Выполнен CHNSO анализ исходных топливных компонент. Результаты анализа приведены в таблице 1.

Таблица 1 Результаты анализа элементного состава и других характеристик исходных топливных компонент (теплота сгорания, влажность, зольности и выход летучих исследовавшихся топливных смесей).

Топливо (древесина/уголь_марка), %	Теплота сгорания, Q, МДж/кг	Технический анализ, %			Элементный анализ, % (на горючую массу топлива)				
		W <sup>a</sup>	A <sup>d</sup>	V <sup>daf</sup>	C	H	N	S	O
0 / 100 Д	26,2	5,83	15,76	12,36	74,20	3,60	1,60	0,100	20,5
10 / 90 Д	24,92	5,42	14,00	14,55	63,20	4,50	1,80	0,117	30,38
25 / 75 Д	24,31	5,23	11,91	38,89	60,60	4,70	1,50	0,107	33,09
50 / 50 Д	23,84	5,35	10,44	40,96	56,20	5,20	1,00	0,103	37,5
0 / 100 Т	25,72	5,52	18,37	25,56	84,30	6,40	2,90	0,600	5,8
10 / 90 Т	25,6	5,42	14,24	26,46	53,50	4,10	1,40	0,410	40,59
25 / 75 Т	25,22	5,34	13,65	28,33	52,20	4,40	1,20	0,320	41,88
50 / 50 Т	24,79	5,41	11,08	39,95	51,00	4,90	0,80	0,230	43,07

Приведенные в таблице 1 результаты позволяют сделать выводы о том, что смешение частиц таких видов углей с древесиной в процентном (по массе) соотношениях (уголь / древесина) компонент 90 % / 10 %, 75 % / 25 % и 50 % / 50 % приводит к значительному росту общей массы зольного остатка. Это увеличение не является аддитивным по отношению к расчетной зольности базовых компонент и смесей, сформированных на их основе. Фактические значения зольности смесей двух исследовавшихся каменных углей с древесиной превышают теоретические. Например, если считать процессы пиролиза и горения угля с древесиной в смеси независимыми, теоретическая зольность таких топлив, например, на основе угля марки Т (при доле опилок 50 %) должна составить 9,34 %, а на основе угля марки Д при той же доле опилок в смеси – 8,03 %. По результатам же экспериментальных исследований зольность таких смесей составила 11,08 % и 10,44 %, соответственно [46]. Эти результаты дают основания для вывода о химическом реагировании газообразных и твердых продуктов пиролиза углей и древесины с образованием солей металлов, входящих в состав углей (кальций, алюминий) и древесины (кальций).

## **2. Разработка экспериментального стенда по определению времен задержек зажигания.**

Важнейшей характеристикой, как было отмечено выше, иллюстрирующей эффективность сжигания любых смесевых топлив в топках паровых и

водогрейных котлов, является [39-48] время задержки их зажигания. Поэтому основной задачей проведенных исследований было определение времен задержки зажигания исследовавшихся топливных смесей на специальном экспериментальном стенде, обеспечивающем условия теплообмена высокотемпературной среды с частицами топлив, соответствующими условиям топочного пространства паровых и водогрейных котлов. Основными элементами стенда являются: камера сгорания (цилиндрической формы, с рабочей максимальной температурой 1280 °С) с цифровым терморегулятором (погрешность измерений  $\pm 1$  °С); высокоскоростная видеокамера с форматом изображения – 1024×1024 пикселей, частотой кадров – до  $10^5$  в секунду. Система топливоподачи ручная с применением специального дозатора.

Внешний вид экспериментальной установки и ее принципиальная схема представлены на рисунках 1, 2.



Рисунок 1. Экспериментальная установка по определению времен задержки зажигания витающих частиц смесевых топлив.

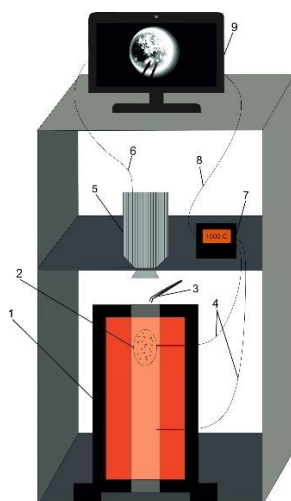


Рисунок 6. Принципиальная схема установки для определения времен задержки зажигания витающих частиц смесевых топлив.

1 – камера сгорания с регулируемой температурой; 2 – витающие частицы находящиеся в камере сгорания; 3 – дозатор топливных частиц; 4 – линия связи между термопарами и преобразователем сигнала; 5 – скоростная видеокамера; 6 – линия связи моноблока со скоростной видеокамерой; 7 – преобразователь сигналов термопар; 8 – линия связи преобразователя сигнала от термопар с моноблоком; 9 – моноблок;

Методика исследования процессов зажигания смесевых топлив на основе мелкодисперсных углей марок Д, Т и измельченных отходов лесопиления (сосновые опилки) включала несколько этапов. В расположенной вертикально цилиндрической камере устанавливалась требуемая температура воздуха (от 600 °С до 1200 °С). Контроль температурного поля в терморегулируемой камере осуществлялся двумя термопарами (термоэлектрические преобразователи платинородий-платина, рабочий диапазон температур 0-1350°С) непрерывно в течение всего эксперимента с методической погрешностью не более  $\pm 1\%$ . Все экспериментальные исследования выполнены в среде окисления (воздуха). Продувка камеры сгорания не осуществлялась потому, что в реальной топочной среде скорости движения частиц угля и древесины незначительно отличаются от скорости потока в точках, соответствующих положению частиц топлив. Чем меньше характерный размер частиц (и, соответственно их масса), тем меньше разность скоростей частиц топлив и потока газов (смесь воздуха и продуктов сгорания). Малые по размерам частицы практически не отклоняются от линии тока несущей их среды. Поэтому нагрев частиц топлив осуществляется в основном в результате воздействия излучения. Конвективные тепловые потоки к поверхности топливных частиц в топочной среде пренебрежительно малы по сравнению с лучистыми. Поэтому в экспериментах в качестве источника нагрева топливных частиц использовался неподвижный, но разогретый до высоких температур, воздух. Топливная навеска помещалась над камерой сгорания на расстоянии 1 – 2 сантиметров на специальной плоской подложке. Счетное количество топливных частиц составляло около 100 шт. Перед каждым экспериментом топливная навеска взвешивалась на аналитических весах ViBRA NT 224RCE (дискретность измерений  $10^{-4}$  г). Ее масса составляла  $5 \pm 0,001$  мг.

Готовая смесь топливных частиц в определенный момент времени сбрасывалась в печь. Этот момент являлся начальной точкой отсчёта времени зажигания. Одновременно с вводом топливной навески в камеру сгорания начиналась видеорегистрация. Временем задержки зажигания считалось время от момента начала попадания первых частиц топлива в печь до появления свечения (первой частицы или группы частиц), соответствующего началу процесса горения. Эксперименты для каждой топливной смеси проводились не менее пяти раз, результаты экспериментов показали хорошую повторяемость, систематические погрешности составили менее 2 %, случайные погрешности менее 3,5 %. Типичные видеокadres частиц топливных смесей приведены на основе двух исследовавшихся углей в момент воспламенения представлены на рисунках 3,4, по остальным углям результаты исследований получились близки представленным. Светящиеся частицы топлив на видеокadres зарегистрированы в момент воспламенения.

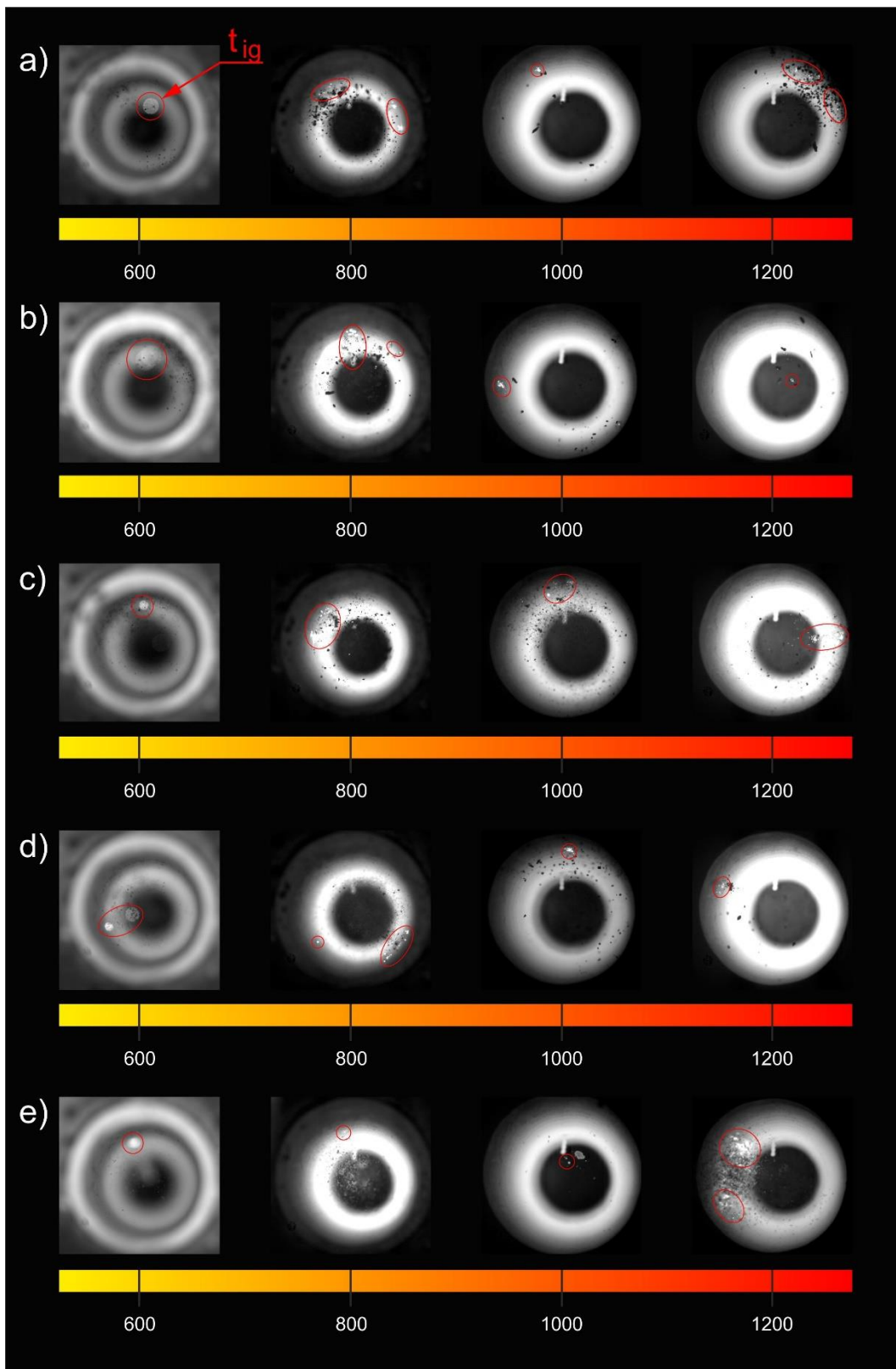


Рисунок 3. Видеокадры (вид сверху) частиц топливных смесей в момент воспламенения ( $t_{ig}$ ) при температурах среды 600 °C, 800 °C, 1000 °C, 1200 °C.

а) однородный уголь марки Д; б) топливная смесь с содержанием древесины 10%; в) топливная смесь с содержанием древесины 25%; г) топливная смесь с содержанием древесины 50%; д) однородная древесина

На кадрах частицы группы (от 100 до 150 шт.) видны по-разному потому, что фокус объектива при различных температурах настраивался на то расстояние, на котором в

данном температурном режиме происходило воспламенение большей части сброшенных в печь частиц.

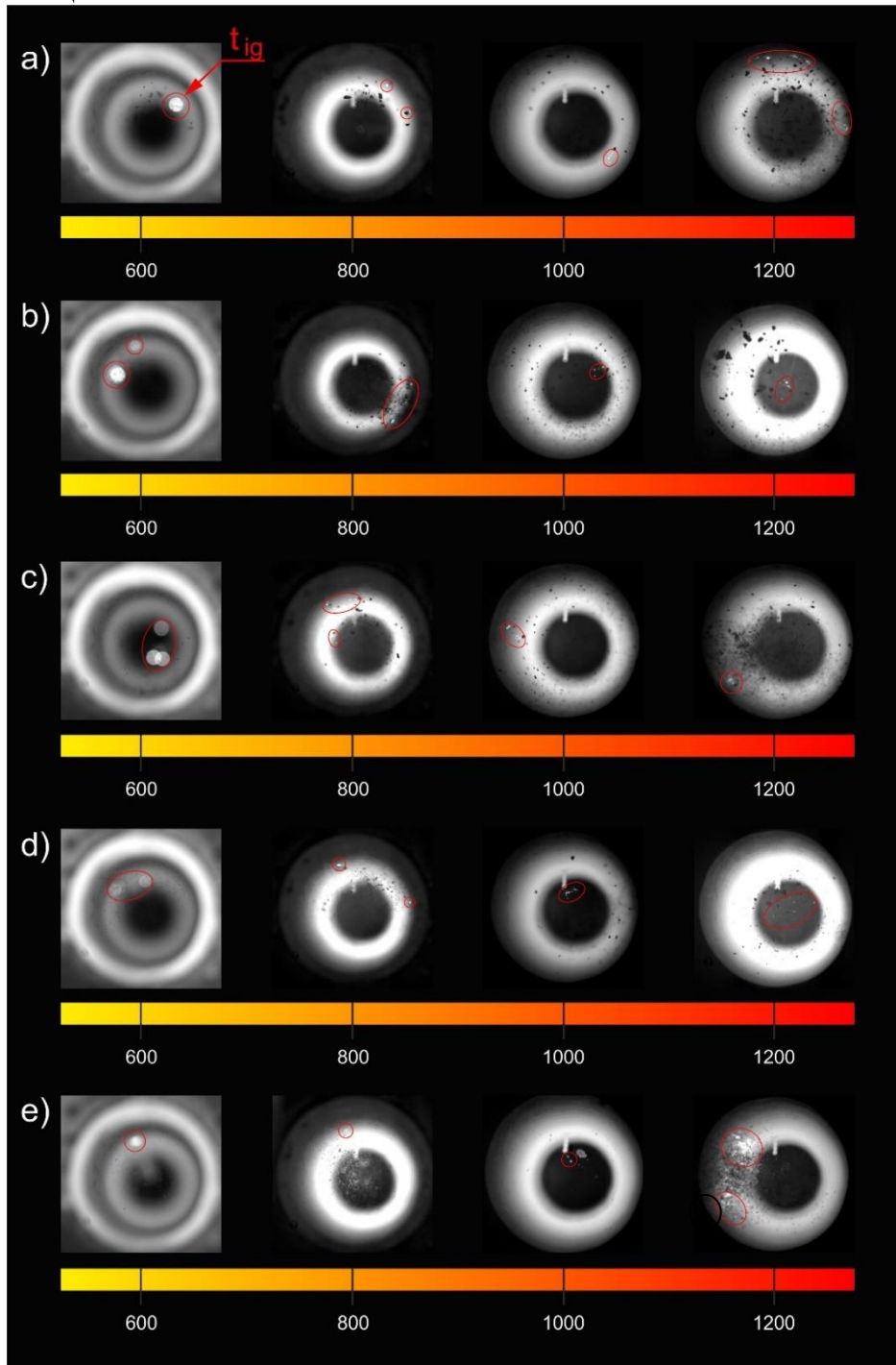


Рисунок 4. Видеокадры топливных смесей в момент воспламенения ( $t_{ig}$ ) (вид сверху) при температурах среды 600 °С, 800 °С, 1000 °С, 1200 °С.

а) однородный уголь марки Т; б) топливная смесь с содержанием древесины 10%; в) топливная смесь с содержанием древесины 25%; г) топливная смесь с содержанием древесины 50%; д) однородная древесина

Экспериментальные исследования проведены в диапазоне температур (внешней по отношению к топливной смеси) среды от 600 °С до 1200 °С. На рисунках 5,6 приведены зависимости времен задержки зажигания частиц топливных смесей на основе двух исследовавшихся достаточно типичных

каменных углей (марки Д и Т) от концентрации биомассы (древесины) по остальным углям результат.

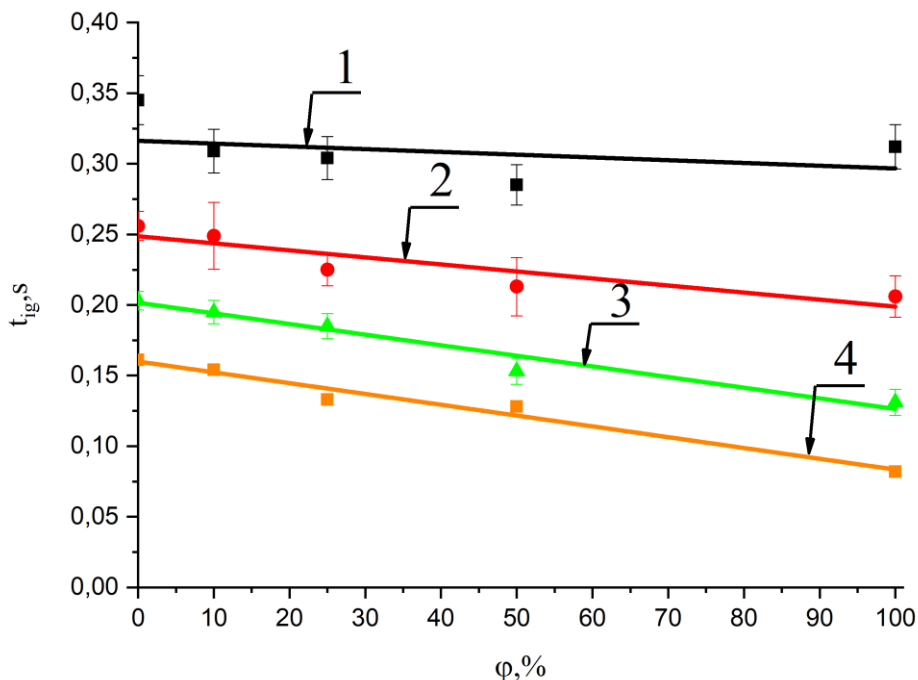


Рисунок 5. Зависимость времени задержки зажигания частиц смесевых топлив на основе угля марки Д от концентрации древесной компоненты при температурах в печи: 1 – 600 °C; 2 – 800 °C; 3 – 1000 °C; 4 – 1200 °C

Анализ зависимостей рисунка 9 показывает незначительное влияние доли древесной компоненты на времена задержки зажигания витающих частиц смесевых топлив на основе каменного угля марки Д и биомассы.

Зависимости, приведенные на рис.9, могут быть аппроксимированы с небольшими погрешностями выражениями:

Зависимость 1

$$t_{ig} = -0,0002\varphi + 0,3191;$$

Зависимость 2

$$t_{ig} = -0,0005\varphi + 0,2481;$$

Зависимость 3

$$t_{ig} = -0,0007\varphi + 0,201;$$

Зависимость 4



$$t_{ig} = -0,0008\varphi + 0,1599.$$

Следует отметить, что при температуре воздуха в камере сгорания ниже 600 °С зажигания частиц смесевых топлив происходит неустойчиво (может, как и произойти за время движения по каналу цилиндра высотой 0,6 м, так и не произойти). При T=800 °С снижение времени задержки зажигания частиц смесевых топлив на основе угля марки Д с увеличением доли древесной компоненты до 50 % составило 17,1 % (с 0,35 сек до 0,29 сек), а при T=1200 °С 18,8 % (с 0,16 сек до 0,13 сек). Полученные результаты позволяют сделать вывод о незначительном влиянии древесных отходов лесопиления в качестве добавки к углю на время задержки зажигания топливной смеси на основе диспергированных углей и древесной биомассы. В целом отклонения значений  $t_{ig}$  малы. При  $t_{ig} < 0,35$  с влияние древесины на процесс зажигания смеси можно считать малозначимым, т.к. абсолютные значения  $t_{ig}$  находятся в интервале  $0,1 \leq t_{ig} \leq 0,35$  с для всех значений ( $\varphi$ ) и температуры.

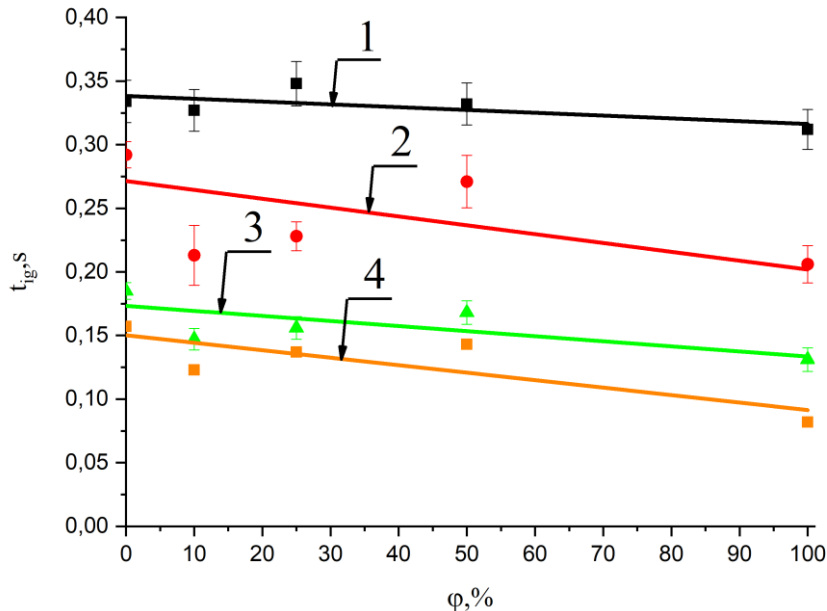


Рисунок 6. Изменение времени задержки зажигания частиц смесевых топлив на основе угля марки Т с увеличением концентрации древесной компоненты при температурах среды: 1 – 600 °С; 2 – 800 °С; 3 – 1000 °С; 4 – 1200 °С

Стоит отметить, что зависимости  $t_{ig}(\varphi)$  для витающих частиц топливных смесей на основе двух разных каменных углей во всем диапазоне концентраций  $\varphi$  практически (в пределах доверительных интервалов  $t_{ig}$ ) идентичны.

Зависимости, приведенные на рис.10, могут быть аппроксимированы с небольшими погрешностями выражениями:

Зависимость 1

$$t_{ig} = -0,0002\varphi + 0,3387;$$

Зависимость 2

$$t_{ig} = -0,0004\varphi + 0,2582;$$

Зависимость 3

$$t_{ig} = -0,0004\varphi + 0,1704;$$

Зависимость 4

$$t_{ig} = -0,0006\varphi + 0,1501.$$

Можно сделать вывод, что условия и характеристики зажигания таких топливных смесей на основе двух разных каменных углей при любых концентрациях древесной компоненты (отходов лесопиления) определяются, в основном, свойствами углей. Такие закономерности обусловлены скорее всего, тем, что частицы мелкодисперсного угля (характерный размер не более 80 мкм) прогреваются до температур, соответствующих началу процесса термического разложения органической части существенно быстрее частиц древесины. Последние в экспериментах использовались в естественном состоянии после хранения при комнатной температуре 20 °С несколько дней. При характерных размерах отдельных опилок не более 200 мкм времена нагрева частиц древесины почти в пять раз больше характерных времен прогрева частиц угля. Поэтому времена задержки зажигания угольных частиц даже при самом малом соотношении размеров частиц этих двух топлив меньше. Такое соотношение размеров достигается если уголь размалывается до регламентного для угольных ТЭС дисперсного состава и опилки, остающиеся после лесопиления дополнительно не измельчаются. В этом случае затраты энергии на подготовку единицы массы древесно-угольной смеси будет даже ниже, чем для однородного

угля. При соотношении масс древесина/уголь 1:9 затраты энергии на подготовку древесно-угольной смеси к сжиганию будут на 10 % ниже по сравнению с однородным углем. Также можно сделать вывод, что времена задержек зажигания всех исследовавшихся смесей частиц угля и древесины не превышают 0,35 с. Следует подчеркнуть, что такие значения  $t_{ig}$  при достаточно типичном фракционном составе древесно-угольной смеси приемлемы для любых технологий топливосжигания и конструкций топок паровых и водогрейных котлов.

На рисунках 7,8,9 приведены результаты экспериментов в виде зависимости  $t_{ig}$  от температуры внешней среды (температуры в камере сгорания) для каменных углей марок Д, Т и древесины в пылевидном состоянии, а также смесевых топлив на их основе. Левая граница по температуре ( $T=600$  °С) соответствует предельным условиям устойчивого зажигания взвешенных частиц смесевых топлив.

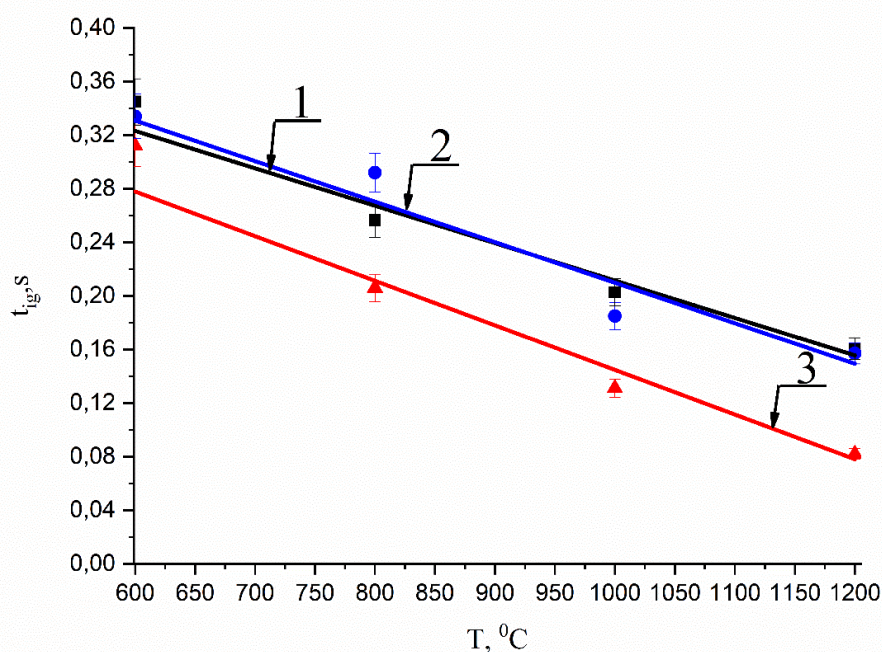


Рисунок 7. Зависимости времен задержки зажигания основных топливных компонент от температуры среды: 1 – уголь Д; 2 – уголь Т; 3 – древесина

Анализ рисунка 7 позволяет сделать вывод, что, хотя зажигание однородных углей марок Д и Т в среде горячего воздуха осуществляется с

большими временами задержки зажигания по сравнению с древесиной даже при высоких температурах в камере сгорания, эти отличия очень малы по абсолютным значениям (не превышают 0,1 с). Поэтому при разработке технологий сжигания древесно-угольных смесей в топках паровых и водогрейных котлов для всего возможного в реальной практике диапазона изменения температур среды разность времен задержки зажигания частиц угля и древесины при исследованном (важном для практики) составе смеси можно не принимать во внимание.

Зависимости, приведенные на рис.7, могут быть аппроксимированы с небольшими погрешностями выражениями:

Зависимость 1

$$t_{ig} = -0,0003\varphi + 0,5291;$$

Зависимость 2

$$t_{ig} = -0,0003\varphi + 0,5138;$$

Зависимость 3

$$t_{ig} = -0,0004\varphi + 0,527.$$

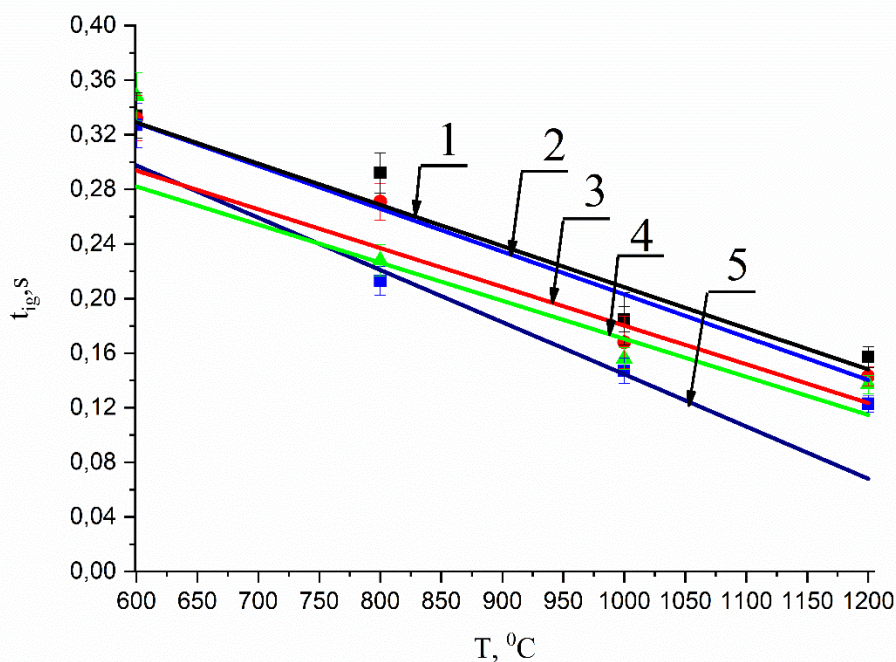


Рисунок 8. Зависимости времен задержки зажигания витающих частиц угля, древесины и топливных смесей на основе угля марки Д от температуры среды при разных концентрациях

древесной компоненты: 1 – однородный уголь; 2 – смесь с содержанием угля 90 %; 3 – смесь с содержанием угля 75 %; 4 – смесь с содержанием угля 50 %; 5 – однородная древесина

Как видно из рисунка 8 при температуре 1200°С значения  $t_{ig}$  витающих частиц всех топливных смесей незначительно отличаются от времен задержки зажигания однородной древесины и составляют 1 – 0,161с, 2 – 0,154с, 3 – 0,133с, 4 – 0,128с, 5 – 0,082с.

Зависимости, приведенные на рис.8, могут быть аппроксимированы с небольшими погрешностями выражениями:

Зависимость 1

$$t_{ig} = -0,0003\varphi + 0,5138;$$

Зависимость 2

$$t_{ig} = -0,0003\varphi + 0,4603;$$

Зависимость 3

$$t_{ig} = -0,0003\varphi + 0,4606;$$

Зависимость 4

$$t_{ig} = -0,0003\varphi + 0,4337;$$

Зависимость 5

$$t_{ig} = -0,0004\varphi + 0,527.$$

Установленные в экспериментах отклонения по значениям  $t_{ig}$  угля, древесины и смесей не выходят за интервал 0,1 с, что незначительно превышает погрешность определения этой характеристики процесса зажигания.

Аналогичные результаты получены для витающих частиц топливной смеси на основе угля марки Т (рис.9).

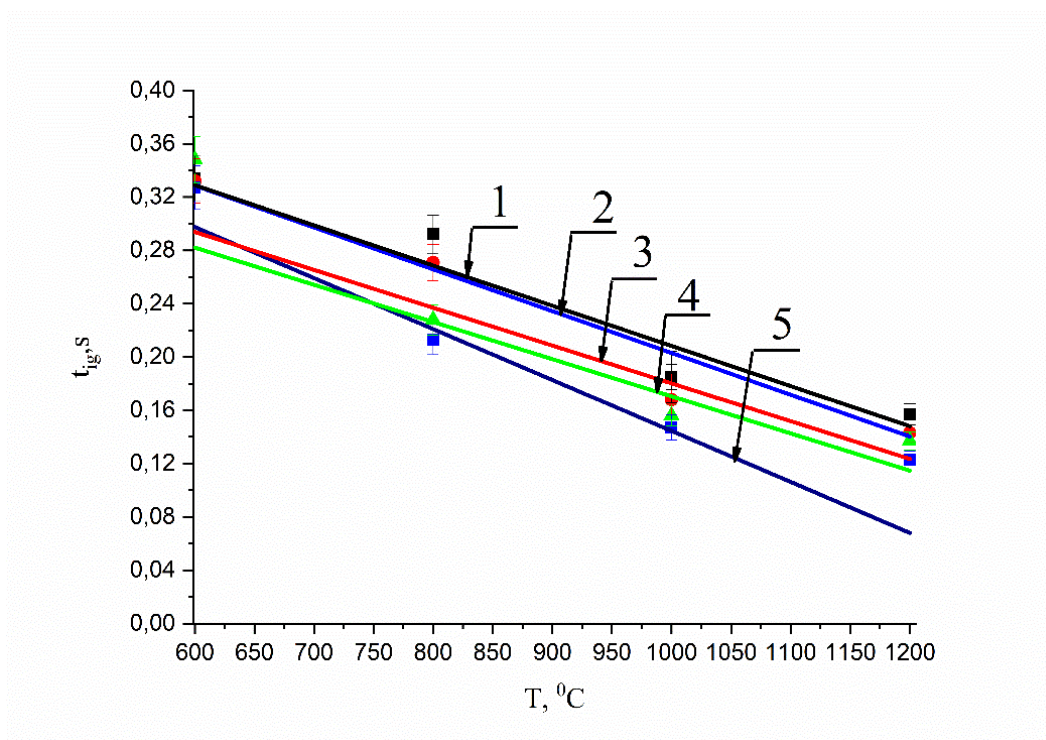


Рисунок 9. Зависимости времен задержки зажигания витающих частиц угля, древесины и смесей топлив на основе угля марки Т от температуры среды при разных концентрациях древесной компоненты: 1 – однородный уголь; 2 – смесь с содержанием угля 90 %; 3 – смесь с содержанием угля 75 %; 4 – смесь с содержанием угля 50 %; 5 – однородная древесина

Анализ рисунка 9 позволяет оценить влияние температуры на времена задержки зажигания витающих частиц смесевых топлив в пылевидном состоянии на основе угля марки Т и отходов лесопиления.

Зависимости, приведенные на рис.9, могут быть аппроксимированы с небольшими погрешностями выражениями:

Зависимость 1

$$t_{ig} = -0,0003\varphi + 0,5291;$$

Зависимость 2

$$t_{ig} = -0,0003\varphi + 0,5300;$$

Зависимость 3

$$t_{ig} = -0,0004\varphi + 0,5345;$$

Зависимость 4

$$t_{ig} = -0,0003\varphi + 0,5076;$$

Зависимость 5

$$t_{ig} = -0,0004\varphi + 0,527.$$

Увеличение температуры в камере сгорания до 1200 °С приводит к снижению значения времен задержки зажигания до 0,157с для однородного угля и до 0,123с смесевого топлива при соотношении компонент 50 % / 50 %.

Основным результатом проведенных экспериментальных исследований является обоснование возможности сжигания в топках паровых и водогрейных котлов древесно-угольных смесей без существенных изменений технологий приготовления топлива, его подачи в топку и сжигания. Введение в угольную пыль сосновых опилок изменяет времена задержки зажигания смеси не более чем на 0,1 с по сравнению с однородным углем. Такие отклонения времен задержки зажигания не оказывают сколько-нибудь значимого влияния на процесс сжигания топлива. При этом следует отметить, что введение добавок древесины [49] снижает не только концентрацию оксидов серы и азота в дымовых газах, но и стоимость единицы вырабатываемой тепловой электростанцией энергии (отходы лесопиления не являются в подавляющем большинстве случаев товаром, и многие деревообрабатывающие предприятия готовы их поставлять без оплаты).

Полученные результаты отражают возможность использования смесевых топлив на основе измельченных углей и древесины при совместном поточном сжигании в котлоагрегатах угольных ТЭС, а также водогрейных котлов не только без существенных изменений технологий топливоприготовления, но и без дополнительных затрат энергии. Применение древесной компоненты в смесевом топливе также существенно снижает затраты на предварительный нагрев топочного пространства при незначительном снижении энергетических характеристик используемых смесевых топлив по отношению к однородным углям.

Результаты выполненных экспериментальных исследований дают основания и для объяснения причин, по которым на многих тепловых электростанциях не удалось реализовать технологии совместного сжигания измельченных углей и биомассы даже при доле последней в смеси менее 15 %.



Скорее всего негативные результаты попыток совместного сжигания углей и биомассы обусловлены недостаточным измельчением последней. В этом случае крупные фрагменты, например, соломы или отходов переработки подсолнечника могли просто не измельчаться специально перед вводом в топку. В результате такие фрагменты, например, той же соломы, которая к тому же из соображений пожарной безопасности могли не проходить стадию сушки, не начинали гореть долго (секунды, возможно, даже десятки секунд при высокой начальной влажности). Присутствие же таких негорящих частиц биомассы в продуктах сгорания углей в течение некоторого периода времени, сопоставимого с характерным временем горения угля в целом, приводит неизбежно не только к снижению температуры газов, но и изменению режима течения топочных газов. Последнее даже при относительно малых (10 – 20%) концентрациях биомассы могло приводить к кардинальному изменению режима циркуляционного движения топочных газов и прекращению горения.

В этой связи есть основания для вывода о том, что наиболее безопасным и эффективным вариантом широкого использования биомассы в теплоэнергетике является сжигание отходов лесопиления (опилок), характерные размеры которых обеспечивают их безусловное зажигание в топочной среде паровых и водогрейных котлов и полное сгорание за характерное время горения углей. Использование же влажных отходов сельскохозяйственных производств, скорее всего сопряжено с решением большого комплекса задач топливоподготовки (измельчения, сушки и смешения). Соответственно, можно сделать вывод, что сжигание древесных опилок в топках паровых и водогрейных котлов возможно без каких-либо серьезных изменений технологии сжигания измельченных углей. Для сжигания же отходов сельскохозяйственного производства необходимы кардинальные изменения технологии подготовки топлива на угольных электростанциях.

Результаты выполненных экспериментальных исследований обосновывают возможность утилизации отходов лесопиления на энергетических установках путем сжигания в топках паровых и водогрейных котлов древесно-



угольных топливных смесей без изменения технологий подготовки топлива, его распыления и сжигания. Введение в угольную пыль отходов лесопиления (измельченной древесины) незначительно изменяет времена задержки зажигания в сравнении с однородными углями. Установлены предельные (по температуре топочной среды) условия устойчивого зажигания топливных частиц и их последующего горения.

### 3. Разработка экспериментального стенда по определению состава газообразных продуктов термического разложения топлив.

Экспериментально определены концентрации оксидов серы в газообразных продуктах термического разложения смесевых топлив на основе углей марок Д, Т и отходов переработки древесины (сосновых опилок). Анализ газообразных продуктов пиролиза смесевых топлив выполнен с применением газоанализатора марки ТЕСТ-1 фирмы ООО «Бонэр» г.Новосибирск, входящим в состав экспериментального стенда. Схема стенда приведена на рисунке 1.

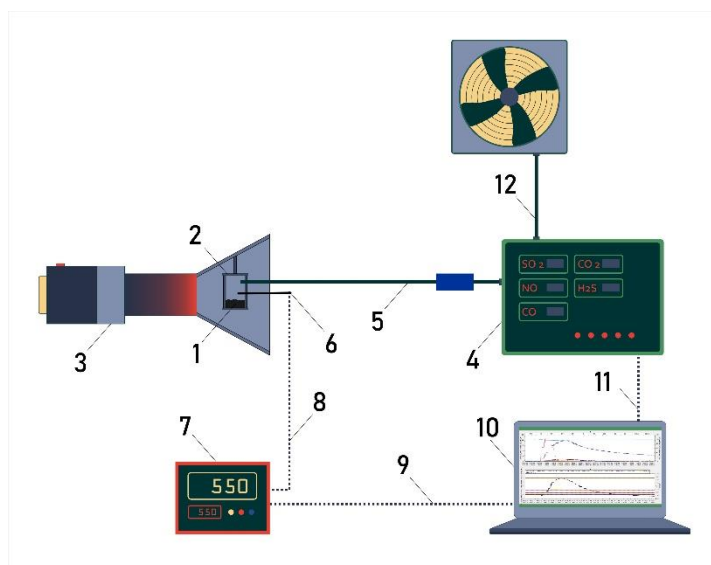


Рисунок 10. Схема экспериментального стенда по определению состава газообразных продуктов термического разложения топлив

1 – топливная навеска; 2 –реактор с топливной навеской; 3 – нагреватель воздуха; 4 – газоанализатор; 5 – канал подачи газообразных продуктов термического разложения топлив в газоанализатор с системой фильтрации; 6 – термопара; 7 – преобразователь сигнала термопары; 8 – линия связи между термопарой и преобразователем сигнала; 9 – линия связи от преобразователя сигнала термопары к ноутбуку; 10 – ноутбук; 11 – линия связи от

газоанализатора к ноутбуку, 12 – канал вывода газообразных продуктов термического разложения навески топлива.

Эксперименты проводились по следующей схеме. В реактор цилиндрические формы (2) помещалась топливная навеска (1) массой 5 грамма (дискретность аналитических весов составляет  $10^{-4}$  грамм). Реактор, в свою очередь, устанавливался в цилиндрическую теплоизолированную полость, закрепленную на «горячем» конце терморегулируемого воздухонагревателя (3) марки LHS 61L PREMIUM (LEISTER, Швейцария) мощностью 16 кВт. Воздух к термонагревателю подводился с помощью нагнетателя AIRPACK (LEISTER, Швейцария). В ходе эксперимента реактор с навеской топлива нагревался потоком воздуха, разогретого до температуры 873 К. Процесс нагрева осуществлялся непрерывно до достижения минимума концентраций регистрируемых оксидов. После этого осуществлялся процесс охлаждения реактора до комнатной температуры (293 К). В реакторе высверливались при подготовке стенда два отверстия. Первое предназначалось для отвода продуктов термического разложения навесок исследовавшихся топлив в газоанализатор (4) через канал и систему фильтров (5). Фильтрация газообразных продуктов термического разложения исследовавшихся топлив и их смесей осуществлялась с целью осушения газов и предотвращения адсорбции парогазовой смеси на стенках канала, а также с целью улавливания летучей золы твердых продуктов пиролиза на входе в газоанализатор. Второе технологическое отверстие предназначалось для контроля температуры нагреваемой среды в реакторе с помощью термопары (6). Регистрация и последующая графическая визуализация регистрируемых газоанализатором и термопарой параметров осуществлялась с помощью преобразователя сигнала термопары (7) и ноутбука (10). Опрос датчиков вышеуказанного оборудования осуществлялся каждые 3 секунды. В целях минимизации случайных погрешностей для каждого вида топлива проводилось не менее пяти экспериментов в идентичных условиях (при фиксированных основных факторах). Эксперименты продолжались до полного

завершения процесса пиролиза исследовавшихся топлив и их смесей (основной индикатор процесса – прекращение процесса образования  $\text{SO}_2$ ).

#### 4. Результаты исследований газового анализа при термическом разложении углей, древесины и смесевых топлив на их основе.

Непрерывный газовый анализ выполнялся в условиях нагрева реактора (с топливной навеской) горячим воздухом в диапазоне температур от 293 К до 873 К. На рисунке 11 приведены типичные результаты регистрации состава оксидов серы при термическом разложении угля марки Д и древесины, а также смесевых топлив, приготовленных на их основе в период времени от начала нагрева до полного завершения формирования газовых компонент.

Экспериментально установлено снижение доли оксидов серы на 95,8 % при концентрации древесной компоненты 50 % в смесевом топливе на основе Длиннопламенного угля.

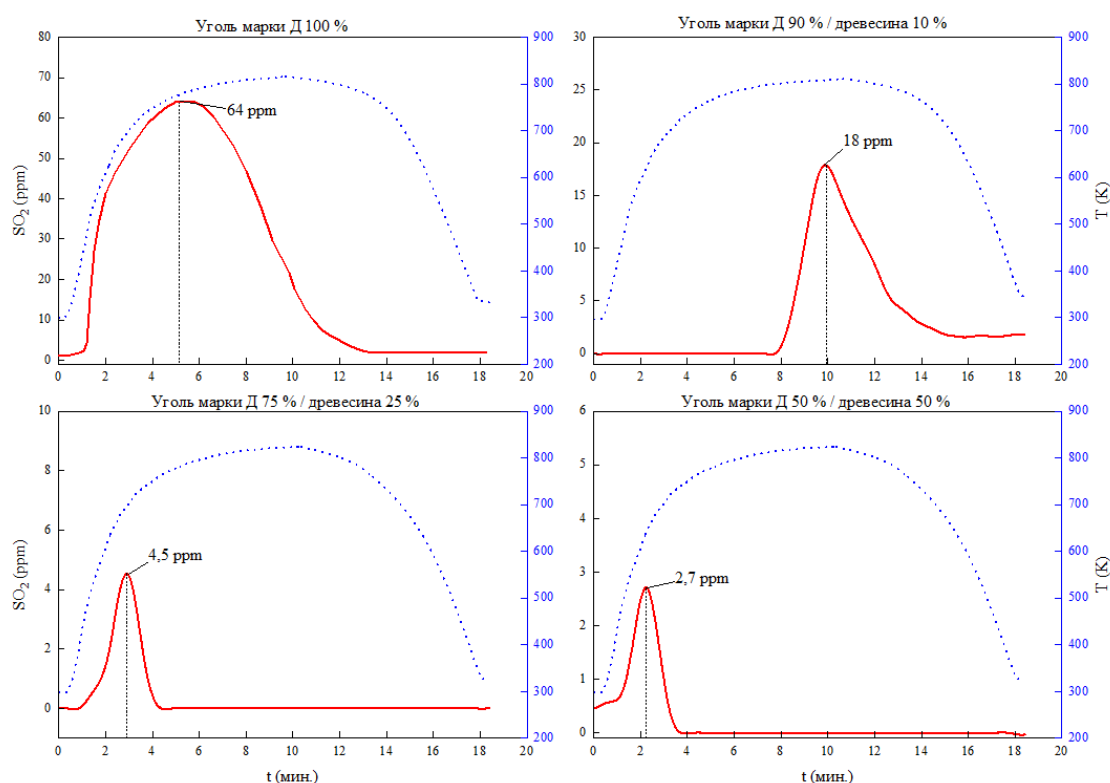


Рисунок 11. Изменение концентрации оксидов серы в газообразных продуктах термического разложения смесевых топлив на основе угля марки Д и древесины в период времени полного термического разложения основных компонент и смесевых топлив на их основе.

Анализ рисунка 2 позволяет установить существенное снижение концентрации оксидов серы в газообразных продуктах пиролиза смесевых топлив при увеличении доли древесных опилок относительно концентрации оксидов серы в дымовых газах исходного угля марки Д. Также установлено, что снижение концентрации оксидов серы не является аддитивным, даже при условии отсутствия связанной серы в составе сосновых опилок. Полученные данные являются подтверждением результатов анализа полного элементного состава золы исследовавшихся топлив и их смесей. Увеличение доли древесной компоненты на 25 % в смеси с углем также приводит к существенному (на 93 %) снижению концентрации оксидов серы.

На рисунке 12 приведены результаты анализа формирования оксидов серы при термическом разложении угля марки Т, древесины и смесевых топлив, сформированных на их основе в период времени от начала нагрева до полного завершения термической реакции разложения топлив.

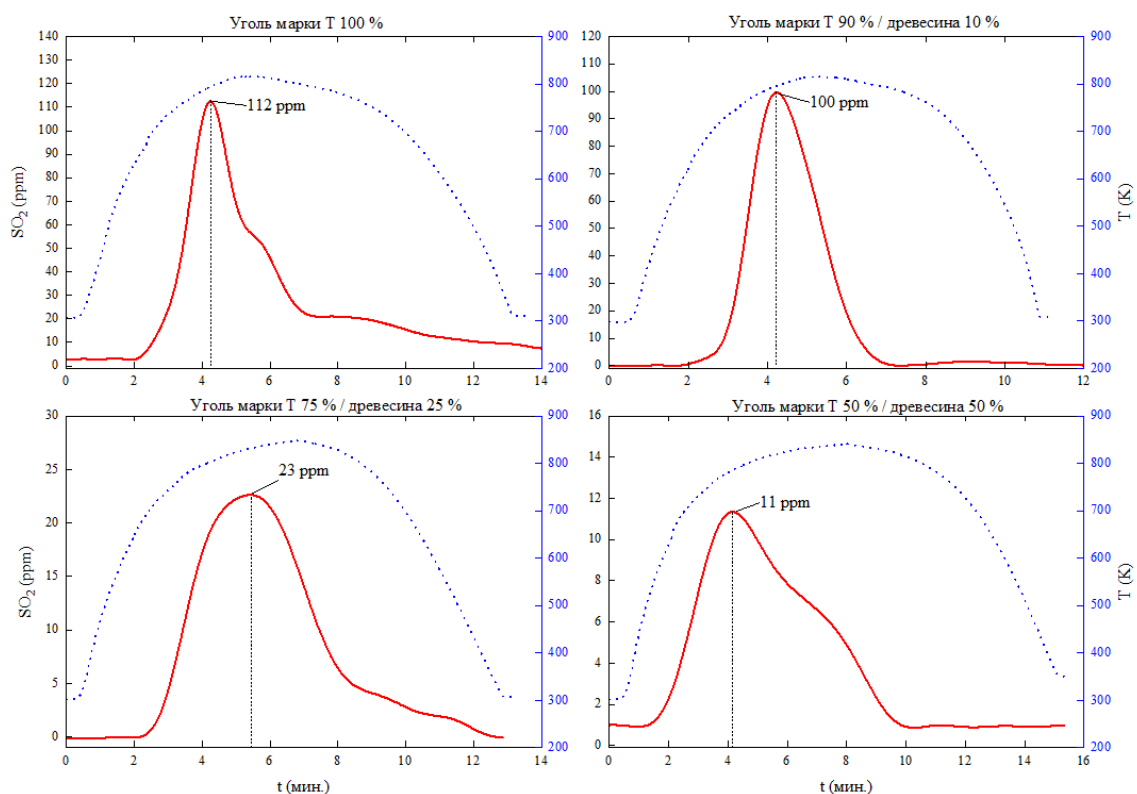


Рисунок 12. Изменение концентрации оксидов серы в газообразных продуктах термического разложения смесевых топлив на основе угля марки Т и

древесины в период времени полного термического разложения основных компонент и смесевых топлив на их основе.

Результаты определения концентрации оксидов серы в продуктах пиролиза угля марки Т, древесины и смесевых топлив на их основе, приведенные на рисунке 3, позволяют сделать вывод о устойчивом снижении доли образующихся при пиролизе оксидов серы с увеличением доли древесной компоненты до 50 % в топливной смеси. В топливах на основе угля марки Т снижение пиковой концентрации оксидов серы составило 90,2 % по отношению к концентрации этих газов при пиролизе однородного Тощего угля. Масштабы снижения максимальной концентрации оксидов серы сопоставимы с полученными при пиролизе смесевых топлив на основе Длиннопламенного угля и древесины. Полученные результаты позволяют утверждать, что древесная биомасса интенсифицирует процессы снижения концентрации оксидов серы в смесевых топливах на основе этих двух разных, но в тоже время, достаточно типичных энергетических углей в результате формирования в золе таких топлив солей кальция и алюминия [2].

Результаты выполненных экспериментов позволяют сделать вывод о том, что добавление древесины в угли разных марок (например, Д, Т) не приводит к идентичному процессу образования оксидов серы, азота и углерода. У угля марки Д увеличение концентрации сосновых опилок в смесевом топливе до 50 %, приводит к значительному росту выхода оксидов углерода. Концентрация же  $\text{CO}_2$  в продуктах пиролиза смеси угля марки Т с древесиной существенно снижается по сравнению с однородным углем марки Т. Менее масштабное несоответствие концентраций оксидов азота установлено после экспериментов со смесями древесины с углем Д и углем Т. Стабильное и существенное снижение концентраций установлено только для оксидов серы в продуктах пиролиза смесей углей марок Д и Т с древесиной.

Результаты выполненных экспериментальных исследований позволяют обосновать возможность использования отходов переработки древесины

(опилок) как экологически чистой энергетической добавки, способствующей снижению выбросов антропогенных газов (оксидов серы от 10 % до 95,8) при её совместном сжигании с широко распространёнными и применяемыми по всему миру углями: одного бурого угля марки 2Б, четырех бурых углей марки 3Б, одного каменного угля марки Т, и двух углей марки Д (угли пяти месторождений РФ, двух месторождений Казахстана и одного Монгольского месторождения) в топках котлоагрегатов различной мощности.

По результатам экспериментов была сформулирована гипотеза [46] о том, что при совместном сжигании смесей измельченной древесины с диспергированными углями продукты их термического разложения вступают во взаимодействие, результатом которого является образование сульфатов кальция и алюминия в золе исследовавшихся топливных смесей. Введение древесины (в виде сосновых опилок) в смеси с углем марки Т приводит [48] к увеличению концентрации серы, кальция и алюминия в зольном остатке смеси по сравнению с золой однородного угля. Однако анализ полного элементного состава показывает, что для различных углей интенсивность формирования таких солей может отличаться достаточно существенно (в зависимости от минерального состава топлива).

**5. Разработка экспериментального стенда по пиролизу топливных смесей навеской по массе до 20 грамм с целью последующего определения элементного состава продуктов термического разложения топлив.**

Для проведения анализа элементного состава зольного остатка была разработана экспериментальная установка. На рис. 13 приведена принципиальная схема экспериментальной установки, использовавшейся при проведении исследования процессов термического разложения смесей древесных и угольных топлив в инертной среде (Аргон).

Навеска топливной смеси после смешения в определенной пропорции компонент (уголь/древесина 100 % / 0 %, 90 % / 10 %, 75 % / 25 %, 50 % / 50 %) помещалась в тигель, расположенный в продуваемой инертным газом специализированной камере.

Камера с навеской продувалась непрерывно инертным газом (Аргон) при атмосферном давлении. Нагрев каждой навески топлива осуществлялся в диапазоне следующих температур от 20 °С до 400 °С. После достижения требуемой температуры выдержка по времени составляла 60 мин, после окончания выдержки при заданной температуре нагрев останавливался. Продувка инертным газом выполнялась до полного охлаждения (20 °С) исследуемой топливной навески. Во время проведения эксперимента проводился анализ компонентного состава образующихся в процессе пиролиза газов с целью контроля отсутствия кислорода. Температура в терморегулируемой камере регистрировалась двумя термопарами (термоэлектрические преобразователи платинородий-платина, рабочий диапазон температур 0-1350°С) непрерывно в течение всего эксперимента.

Исследовались процессы термического разложения навесок массой 15 грамм. Смеси измельченного угля марки Д и мелкодисперсных сосновых отходов лесопиления исследовались при температурах 400 °С, 600 °С, 800 °С.

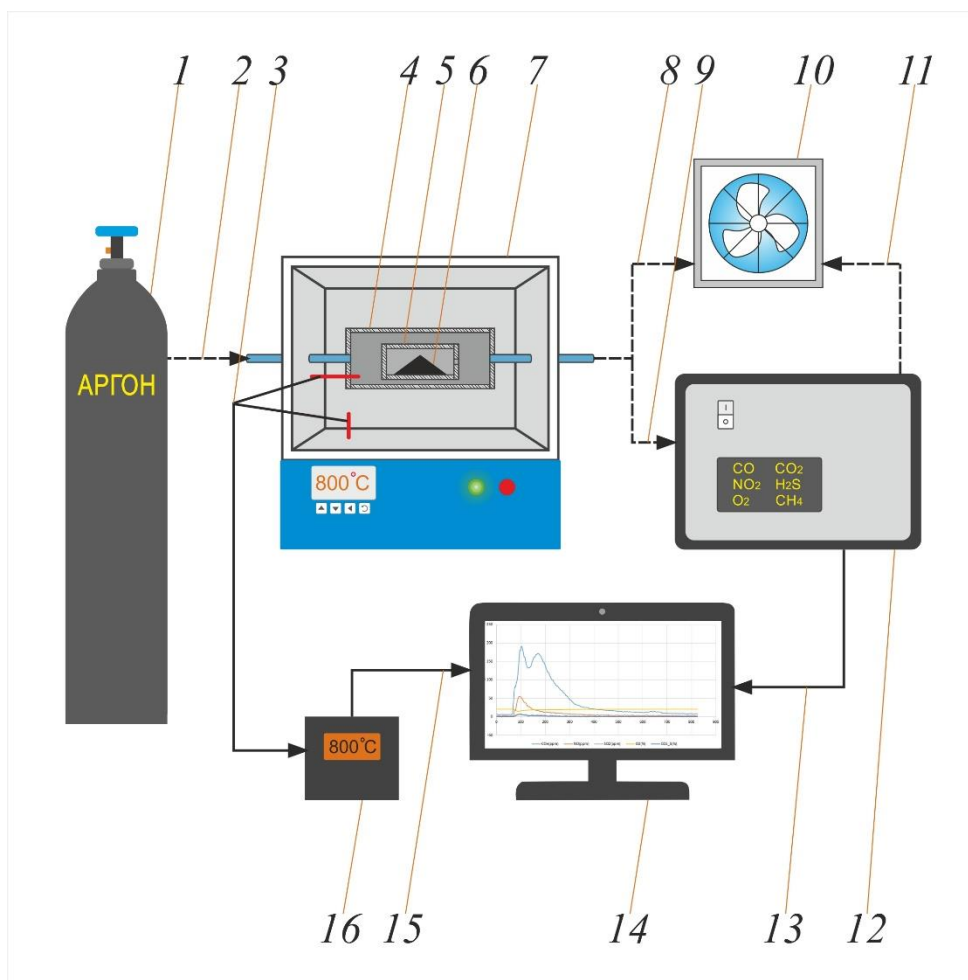


Рисунок 13 – Принципиальная схема экспериментальной установки.

1 – баллон с инертным газом (Аргон), 2 – магистраль подачи инертного газа, 3 – термопары, 4 – камера с нагреваемой инертной средой, 5 – камера с топливной навеской, 6 – топливная навеска, 7 – камера с регулируемой температурой, 8 – линия транспорта избытка летучих газов в вентиляцию, 9 – канал подачи газообразных продуктов пиролиза в газоанализатор, 10 – система вентиляции, 11 – линия транспорта газов после газоанализатора в вентиляцию, 12 – газоанализатор, 13 – линия связи газоанализатора с моноблоком; 14 – моноблок; 15 – модуль связи компьютера с преобразователем; 16 – преобразователь сигналов термопар.

После завершения процесса пиролиза смесевых топлив на основе каменного угля марки Д определялся состав твердых продуктов термического разложения и концентраций, представляющих интерес компонент. Эксперименты в среде инертного газа проводились для того, чтобы избежать возможности зажигания смеси летучих продуктов пиролиза и воздуха. В реальных условиях при движении большой совокупности частиц угля и древесины в потоке подогретого воздуха (или смеси воздуха с высокотемпературными продуктами сгорания) образующиеся в процессе термического разложения топлив летучие фильтруются к поверхности нагрева. Эти газы препятствуют проникновению воздуха в пористую структуру частицы топлива, которая формируется в результате пиролиза. При этом необходимо учитывать, что в реальных условиях топочной среды частицы твердого топлива движутся, как правило, со скоростями, незначительно отличающимися от скорости движения несущей среды (воздуха или его смеси с продуктами сгорания). Поэтому по существу частицы топлива находятся в практически неподвижной относительно их, среды, и проникновение воздуха в поры, например, древесной частицы почти невозможно.

На приборе элементного анализа X-Supreme 8000 (анализатор химического состава), определялись элементные составы зольных остатков всех исследовавшихся смесевых топлив на основе угля марки Д и сосновых опилок. На современном оборудовании практически невозможно определять элементный состав топлива в процессе его термического разложения, поэтому



регистрация изменения элементных составов топливных смесей проводилась после завершения пиролиза. Анализатор X-Supreme 8000 обеспечивает возможность определения содержания химических элементов от натрия Na (11) до урана U (92) в твердых пробах, жидкостях, порошках, гранулах и т.д. в диапазоне концентраций от 1 ppm до 100%).

## **6. Результаты термогравиметрического анализа угля, древесины и смесевых топлив на их основе.**

С применением ТГ ДТГ и ДСК анализатора проведен термогравиметрический анализ с установлением диапазона изменения температур, соответствующих завершению процессов пиролиза древесно-угольных смесей (рис.9).

Термограммы, приведенные на рис.14, позволяют оценить влияние древесины на характер термического разложения смесевых топлив, сформированных на основе угля марки Д. Анализ зависимостей скоростей убыли массы от температуры показывает, что на первой стадии нагрева происходит выделение связанной влаги.

Непосредственно термическое разложение древесины начинается на второй стадии пиролиза. В диапазоне температур от 150 °С до 400 °С завершается разложение гемицеллюлозы. С ростом температур от 400 °С до 570 °С происходит разложение целлюлозы и лигнина, третий диапазон температур от 570 °С до 800 °С соответствует интенсивному разложению угля. Видно (рис. 9), что увеличение концентрации древесины в смесевом топливе до 50 % приводит к снижению максимальной температуры термического разложения до 31,3 % по отношению к углю марки Д. Процесс полного разложения смесевых топлив при увеличении концентрации древесной компоненты происходит в области более низких температур. Последнее обусловлено увеличением массы летучих веществ (по сравнению с углем) при нагреве в смесевых топливах и более низкими температурами начала термического разложения древесины.

В таблице 2 приведены типичные результаты основных характеристик процесса термического разложения исследовавшихся смесевых топлив, приготовленных на основе угля марки Д и сосновых опилок (отходов лесопиления), полученные в результате термогравиметрического анализа.

Таблица 2 – Результаты термогравиметрического анализа смесевых топлив на основе угля марки Д и древесины

Топливо (Уголь/древесина, %)	$T_e, ^\circ\text{C}$	$T_p, ^\circ\text{C}$	$T_f, ^\circ\text{C}$	$V_{\max}, ^\circ\text{C}/\text{мин}$
100/0	220,1	481,52	753,26	2,58
90/10	229,34	579,89	689,13	3,39
75/25	184	585,3	691,3	3,07
50/50	174,45	330,43	690,76	4,49

Где:  $T_e$  – температура начала термического разложения топлив;  $T_p$  – температура максимальной скорости термического разложения топлив;  $T_f$  – температура завершения процессов термического разложения топлив;  $V_{\max}$  – максимальная скорость термического разложения топлив.

Анализ результатов, приведенных в табл. 2 позволяет сделать вывод, что увеличение доли древесины до 50 % приводит к снижению температуры начала термического разложения таких топлив на 20,7 %, а максимальная скорость пиролиза возрастает в 1,7 раза. Сдвиг кривых ДТГ в диапазон более низких температур происходит за счет процессов, инициированных термическим разложением древесины. Также установлено, что процесс пиролиза всех исследовавшихся смесей завершается до температур 800 °С. Поэтому все эксперименты, результаты которых приведены ниже, выполнены при температурах от 400 °С до 800 °С (рис.5).

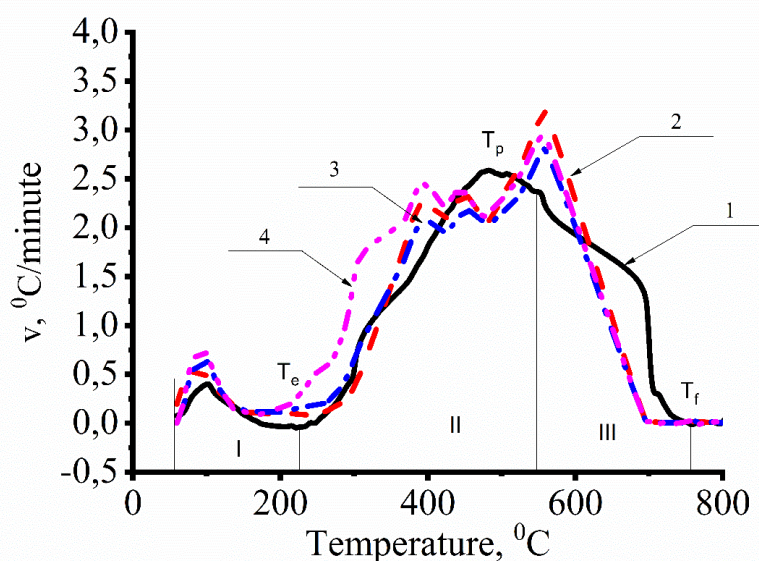


Рисунок 14 – Зависимость скорости термического разложения смесевых топлив от температуры. Процентное соотношение угля марки Д и древесины: 1) 100; 2) 90 / 10; 3) 75 / 25; 4) 50 / 50.

Результаты определения содержания основных представляющих интерес элементов (кальция, алюминия и серы) в золе угля марки Д, древесины, а также в золе смесей на их основе представлены на рисунках 10 – 12.

Целью проведенных экспериментов было обоснование сформулированной ранее [46] гипотезы о механизме секвестирования оксидов серы при совместном термическом разложении угля и древесины. Поэтому основными задачами анализа твердых продуктов пиролиза (после его завершения) было определение концентраций основных представляющих интерес компонент (в рамках обоснования базовой гипотезы) кальция, алюминия и серы. При взаимодействии по описанной выше схеме газообразных и твердых продуктов пиролиза угля и древесины между собой в золе смеси должны были расти концентрации серы, кальция и алюминия по сравнению с продуктами пиролиза однородных угля и древесины. Важным при этом является анализ исследуемых процессов в диапазоне изменения температур, соответствующих диапазону интенсивного пиролиза угольной и древесной компонент. Этот диапазон составляет  $400\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 800\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис.5). При меньших температурах скорости пиролиза очень малы, а при температурах больше  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  процесс термического разложения заканчивается, как показали результаты термического анализа (рис.14).

#### **7. Результаты элементного анализа золы угля, древесины и зольного остатка смесевых топлив на их основе.**

На рисунке 15 приведены результаты определения концентрации кальция в золе угля марки Д и в золе смеси угля и древесины в диапазоне температур от  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  в среде Аргона.

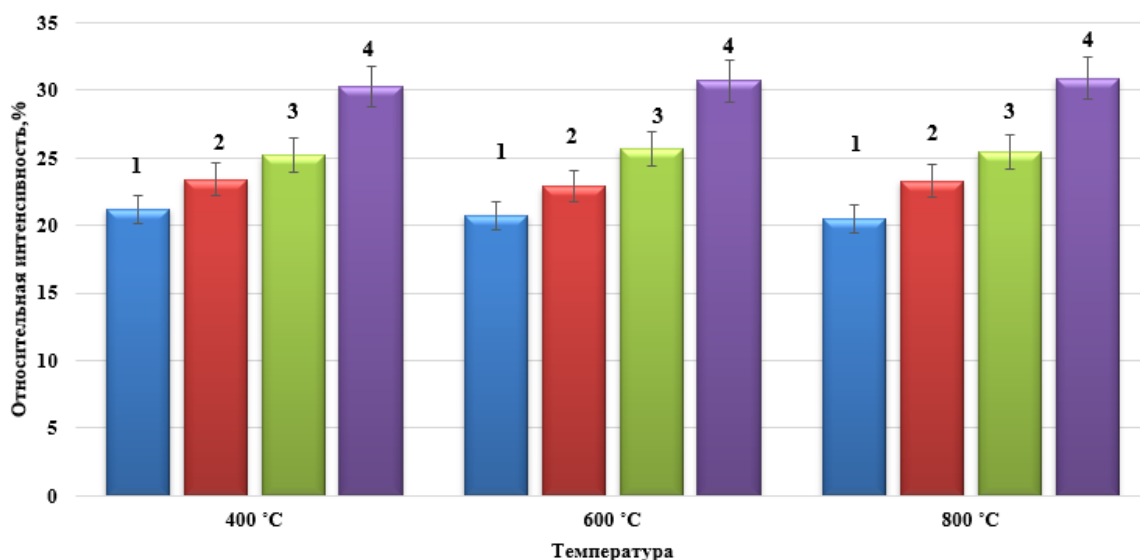


Рисунок 15 – Концентрация кальция в золе угля марки Д и в золе смесевых топлив на основе угля и древесины при температурах 400, 600, 800 °С в среде Аргон:  
 1. Уголь - 100 %; 2. Уголь - 90 % - Древесина - 10 %; 3. Уголь - 75 % - Древесина - 25 %; 4. Уголь - 50 % - Древесина - 50 %

Анализ изменений доли Са в золе показывает (рис. 15), что увеличение концентрации древесной компоненты от 10 % до 50 % приводит к росту концентрации Са в золе смесевых топлив до 30 % при температуре до 400 °С, и до 34 % при температуре 800 °С по отношению к содержанию кальция в единице массы золы однородного угля марки Д. Содержание кальция в твердых продуктах термического разложения древесины значительно больше чем у угля, поэтому и при термическом разложении смесевых топлив с увеличением древесной компоненты соответственно увеличивается и доля кальция в золе.

Проведен также анализ содержания алюминия в золе смесей древесины и угля марки Д (рис.16). Видно, что в результате термического разложения топливных смесей происходит рост концентрации алюминия в золе этих смесей, но этот рост незначителен по сравнению с изменением доли кальция, т.к. Al в угле марки Д много меньше, чем кальция.

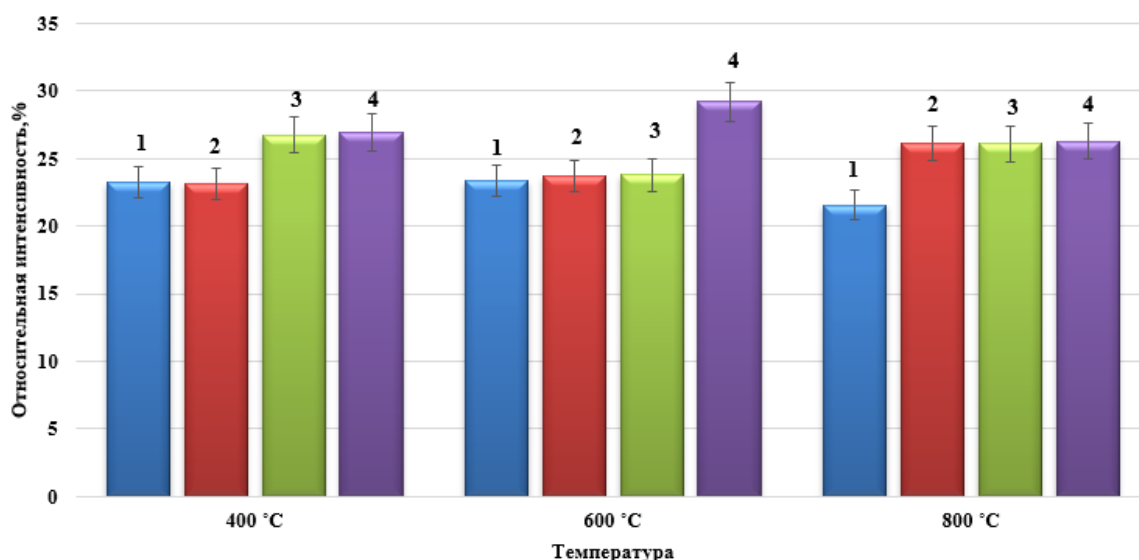


Рисунок 16 – Концентрация алюминия в золе угля марки Д и в золе смешанных топлив на основе угля и древесины при температурах 400, 600, 800 °С в среде Аргон:  
 1. Уголь - 100 %; 2. Уголь - 90 % - Древесина - 10 %; 3. Уголь - 75 % - Древесина - 25 %; 4. Уголь - 50 % - Древесина - 50 %

Из анализа рисунка 16 также видно, что максимальный рост доли алюминия в зольном остатке смешанных топлив на основе угля марки Д соответствует температуре 600 °С. При температурах 400 °С и 800 °С увеличение доли древесной компоненты в смеси до 50 % не приводит к существенным изменениям содержания алюминия в зольном остатке при термическом разложении таких топлив. Эти результаты дают основание для вывода о том, что с ростом температуры изменяются химические реакции, протекающие между продуктами пиролиза древесины и угля, в которых участвуют оксиды алюминия.

Проведен анализ содержания серы в золе угля марки Д и смесей угля Д и древесины при температурах 400 °С, 600 °С, 800 °С.

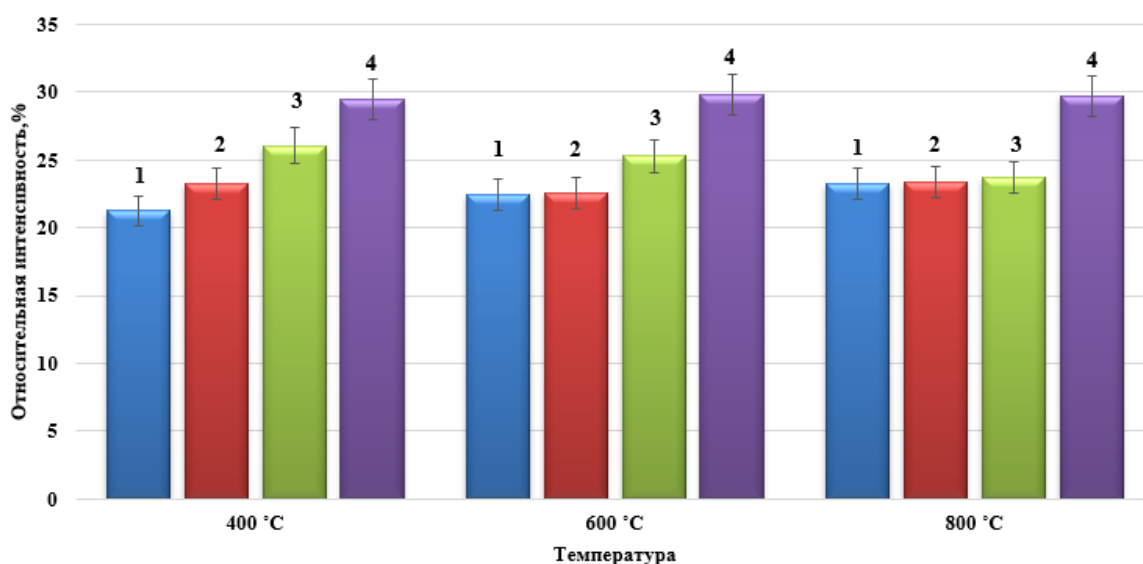


Рисунок 17 – Концентрация серы в золе угля марки Д и в золе смесевых топлив на основе угля и древесины при температурах 400, 600, 800 °C в среде Аргон:  
 1. Уголь - 100 %; 2. Уголь - 90 % - Древесина - 10 %; 3. Уголь - 75 % - Древесина - 25 %; 4. Уголь - 50 % - Древесина - 50 %

Наиболее интересные результаты приведены на рис. 8 – увеличение концентрации древесной компоненты до 50 % в смеси приводит к росту содержания серы в золе при температуре 400 °C на 27 %, при 800 °C на 22 %.

Следы кислотных дождей на поверхности снега или растений обнаруживаются не каждый день и даже не каждый месяц [48]. Поэтому можно сделать обоснованный вывод, что так как паров воды в атмосфере почти всегда достаточно для образования паров серной кислоты, причиной выпадения кислотных дождей являются, скорее всего, процессы, происходящие при сжигании углей в топках ТЭС. Наиболее вероятно, что содержание серы в составе углей даже одной марки меняется при переходе от одного месторождения к другому. Соответственно, при смене месторождения может измениться и концентрация оксидов серы в дымовых газах ТЭС. Более того, даже уголь одного месторождения, как известно, может несколько отличаться по составу органической и минеральной частей.

Следует отметить, что аналогичные анализы серы провели авторы [48]. На электростанции в Финляндии [48] (мощность котлоагрегатов 363 МВт) проведены промышленные эксперименты по совместному сжиганию древесных

и биоугольных пеллет в смеси с углем, используемым на этой станции как основное топливо. Размер частиц, распыляемых в топку котлагрегата [48], составлял менее 90 мкм. Результаты полного анализа (ultimate analysis) исходных топливных компонент показали присутствие серы в древесных пеллетах, биоугле и непосредственно в угле (180, 580 и 3100-4600 мг/кг на сухую массу). Авторы [48] также провели полный анализ (ultimate analysis) золы, полученной при сжигании таких смесевых топлив. В результате установлено, что с увеличением биомассы до 13 % происходит увеличение Са (на 3%) и Al (на 12 %) в зольном остатке.

Полученные экспериментальные результаты позволяют сделать вывод о том, что сера выпадает в твердый (зольный) остаток после завершения процесса термического разложения смесевых топлив на основе угля марки Д.

На приборе рентгеновский дифрактометр XRD-7000S с вертикальным высокоточным гониометром определялись концентрации сульфатов кальция и алюминия. Такой анализ проведен с целью оценки изменения содержания сульфатов кальция и алюминия в золе смесей угля Д и древесины с ростом доли второй компоненты в смеси. Результаты экспериментальных исследований приведены на рисунках 9,10.

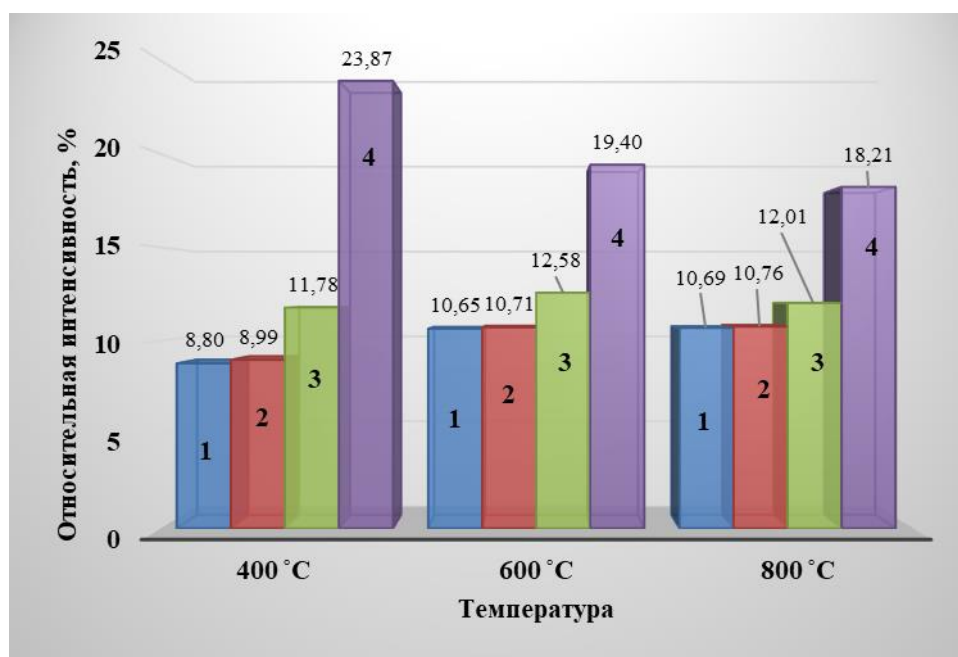


Рисунок 18 – Концентрация сульфата кальция в золе угля марки Д и в золе смесевых топлив на основе угля и древесины в среде Аргон: 1. Уголь - 100 %; 2.



Уголь - 90 % - Древесина - 10 %; 3. Уголь - 75 % - Древесина - 25 %; 4. Уголь - 50 %  
- Древесина - 50 %

Из рисунка 18 видно, что увеличение концентрации древесной компоненты до 50 % в смесевых топливах на основе угля марки Д приводит к существенному (до 47 %) увеличению сульфата кальция в золе. Так как в древесине сосны серы практически нет, то можно сделать обоснованный вывод, что при образовании в золе смеси после пиролиза сульфата кальция происходит связывание серы, присутствующей в исходном угле. Рис.18 показывает, что масштабы этого эффекта значительны.

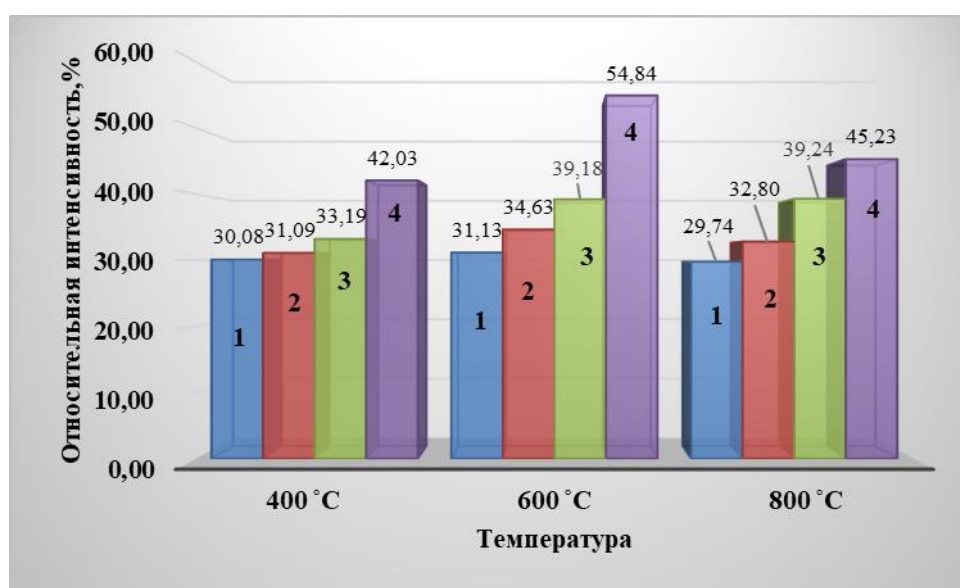


Рисунок 19 – Концентрация сульфата алюминия в золе угля марки Д и в золе смесевых топлив на основе угля и древесины в среде Аргон: 1. Уголь - 100 %; 2. Уголь - 90 % - Древесина - 10 %; 3. Уголь - 75 % - Древесина - 25 %; 4. Уголь - 50 % - Древесина - 50 %

Также установлено, что концентрация сульфата алюминия в золе смесевых топлив на основе угля марки Д и древесных отходов, как видно на рис. 19, значительно выше по сравнению с золой однородного угля Д. Прирост концентрации сульфата алюминия составил около 45 % при T=600 °C.

На основании результатов выполненных экспериментальных исследований на примере смеси типичного энергетического угля и древесины можно сделать вывод обоснованности, выдвинутой ранее [47] гипотезы по механизму секвестирования оксидов серы при совместном термическом

разложении измельченных углей и древесины. При нагреве последней происходит интенсивное испарение поглощенной ею атмосферной влаги (в естественном состоянии древесина, как правило, является достаточно влажной). При достижении температур, соответствующих интервалу термического разложения древесины, дополнительно происходит выход гигроскопической связанной влаги. Параллельно происходит процесс термического разложения органической части угля с образованием летучих, углерода кокса и выходом минеральной части (оксидов кальция и алюминия). С ростом температуры летучих образуются оксиды серы, которые вступают в химическое взаимодействие с нагретыми до высоких температур парами воды – образуются пары серной кислоты. Полученные кислотные пары взаимодействуют с оксидами металлов с образованием солей этих металлов – сульфатов кальция и алюминия. Кальций является основным элементом, инициирующим образование сульфата, т.к. его концентрация в твердых продуктах термического разложения углей велика. Он же является основной составляющей и древесной золы.

Остальные металлы, скорее всего, также тормозят процесс выхода оксидов серы, но их влияние мало в связи с достаточно низкими (относительно кальция) концентрациями оксидов железа, магния, титана и других в неорганической части углей.

Основываясь на результаты выполненных экспериментальных исследований, можно сформировать следующий важный вывод.

Около трети вырабатываемой в мире электроэнергии на теплоэлектростанциях вырабатывается при сжигании твердого топлива [47]. В связи с этим борьба с выбросами в окружающую среду, которые влекут за собой образование кислотных дождей [48] является одной из основных задач этих предприятий. Применение же многокомпонентных топлив (включающих биомассу), сжигаемых в топках паровых котлов, приведет к существенному снижению выхода паров серной кислоты в продуктах сгорания и, соответственно, к снижению интенсивности антропогенного воздействия работающих на угле электростанций на окружающую среду.

В этой связи повышенная влажность древесины в ее естественном состоянии, является фактором, способствующим к росту концентрации паров воды при нагреве и высокотемпературном разложении древесной компоненты. Последние же способствует интенсификации образованию паров серной кислоты в широком диапазоне изменения температур с поглощением оксидов серы и последующему интенсивному взаимодействию этих паров с оксидами металлов, присутствующими в золе древесно-угольной смеси.

Можно сделать вывод, что, сушка мелкодисперсной древесины, как отдельный процесс топливоприготовления, перед ее сжиганием в смеси с углем во многих случаях не целесообразна.

По результатам выполненных экспериментов также можно сделать вывод, что древесина лиственных пород, влажность которой в естественном состоянии, как правило, больше влажности хвойной древесины, является даже более перспективной при сжигании в смеси с углями. Но если после переработки деловой хвойной древесины остаются большие объемы отходов лесопиления в виде опилок и щепы, которые перспективны как добавка к углям (их сжигание позволит снизить антропогенную нагрузку предприятий лесопромышленного комплекса на окружающую среду), то для использования в теплоэнергетике лиственных пород древесины необходимо их специальное пиление и дробление. Поэтому в качестве древесной компоненты целесообразно использовать отходы пиления деловой древесины хвойных пород.

Также проведена растровая микроскопия золы смесевых топлив. Анализ фотографий выполненный растровой микроскопии позволил установить, что присутствие древесины существенно изменяет состав золы смеси после завершения пиролиза последней – появляются крупные частицы золы, которых нет в золе однородного угля и однородной древесины. Особенно отчетливо эта тенденция проявляется при относительно низких температурах пиролиза (400°C, 600°C). При этом хорошо видно, что температура среды, в которой происходит пиролиз топлив и их смесей, не оказывает существенного влияния на внешний вид золы однородной древесины. Рост температуры приводит только к

некоторому уменьшению характерных размеров частиц золы древесины сосны. Зола становится более однородной по фракционному составу.

На рисунке 20 приведены типичные изображения частиц золы смесевых топлив на примере угля марки Д и древесины, выполненные на приборе JEOL JSM-6000PLUS с приставкой SEM, позволяющей определять элементный состав золы.

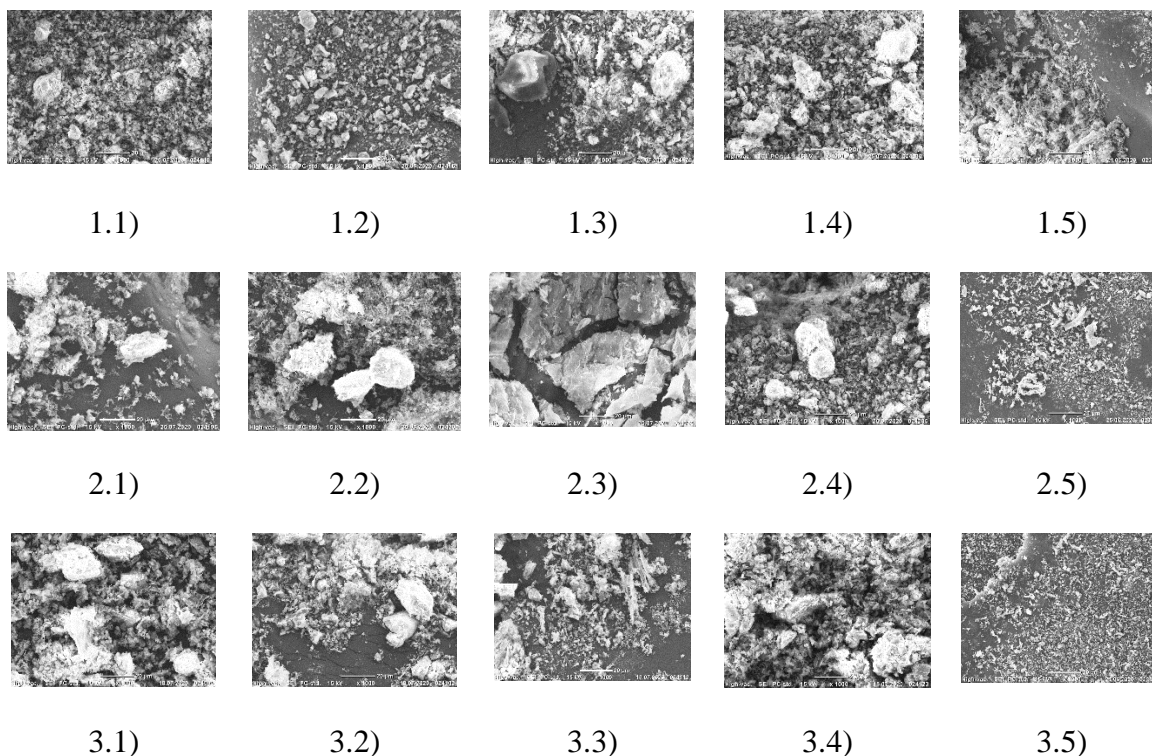


Рисунок 20 – Типичные изображения (растровая микроскопия) золы после пиролиза частиц угля марки Д, древесины и совокупности частиц золы смесей на их основе при различных соотношениях компонент:

- 1 – Зола после пиролиза при температуре 400 °С: 1.1 Уголь – 100 %; 1.2. Уголь – 90 % – Древесина – 10 %; 1.3. Уголь – 75 % - Древесина – 25 %; 1.4. Уголь – 50 % – Древесина – 50 %, 1.5. Древесина – 100 %;
- 2 – Зола после пиролиза при температуре 600 °С: 2.1 Уголь – 100 %; 2.2. Уголь – 90 % – Древесина – 10 %; 2.3. Уголь – 75 % - Древесина – 25 %; 2.4. Уголь – 50 % – Древесина – 50 %, 2.5. Древесина – 100 %;
- 3 – Зола после пиролиза при температуре 800 °С: 3.1 Уголь – 100 %; 3.2. Уголь – 90 % – Древесина – 10 %; 3.3. Уголь – 75 % - Древесина – 25 %; 3.4. Уголь – 50 % – Древесина – 50 %, 3.5. Древесина – 100 %

Анализ фотографии рис.20 дает основания для вывода, что присутствие древесины существенно изменяет состав золы смеси после завершения пиролиза последней – появляются крупные частицы золы (рис. 1.3; 1.4), которых нет в золе

однородного угля и однородной древесины. Особенно отчетливо эта тенденция проявляется при относительно низких температурах пиролиза (400 °С, 600 °С).

При этом хорошо видно, что температура среды, в которой происходит пиролиз топлив и их смесей не оказывает существенного влияния на внешний вид золы однородной древесины. Рост температуры (рис.20: 1.5, 2.5, 3.5) приводит только к некоторому уменьшению характерных размеров частиц золы древесины сосны. Зола становится более однородной по фракционному составу.

Рост температуры среды при пиролизе однородного угля приводит к появлению крупных частиц (возможно, своеобразных агломератов). Скорее всего, это следствие процессов взаимодействия продуктов пиролиза угля между собой.

Еще более сложен состав золы смесей угля с древесиной. Хорошо видны крупные частицы золы, представляющие собой, скорее всего, соли металлов, входящих в состав минеральной части углей.

На рисунке 21 приведены типичные изображения частиц золы смесевых топлив на основе угля марки Т и древесины.

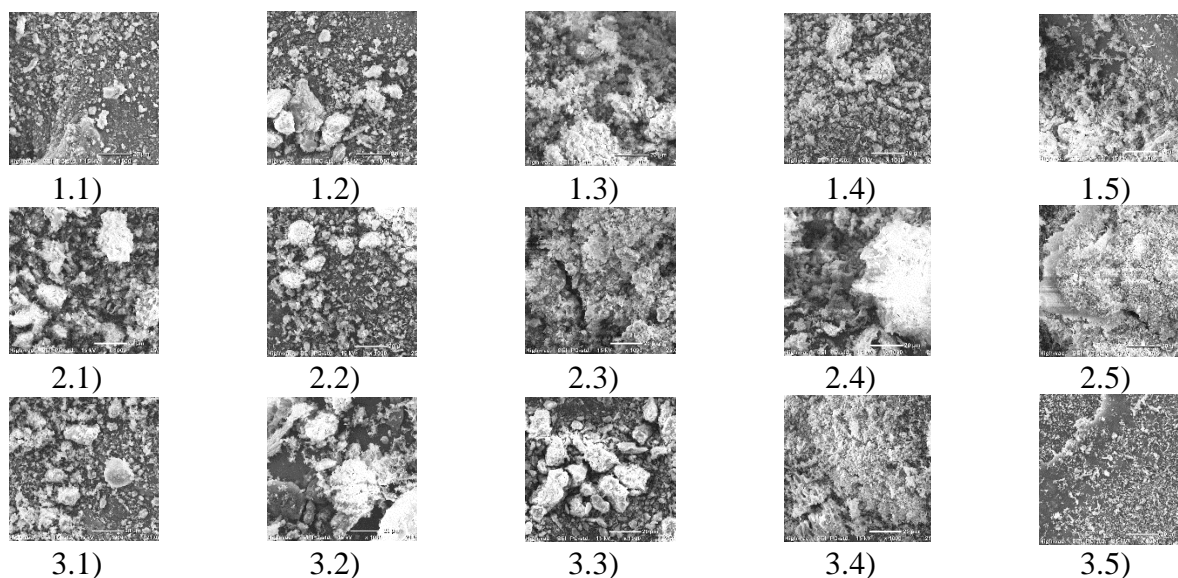


Рисунок 21 – Типичные изображения (растровой микроскопии) золы после пиролиза частиц угля марки Т, древесины и совокупности частиц золы смесей на их основе в различных соотношениях компонент:

1 – Зола после пиролиза при температуре 400 °С: 1.1 Уголь – 100 %; 1.2. Уголь – 90 % – Древесина – 10 %; 1.3. Уголь – 75 % - Древесина – 25 %; 1.4. Уголь – 50 % – Древесина – 50 %, 1.5. Древесина – 100 %;

2 – Зола после пиролиза при температуре 600 °С: 2.1 Уголь – 100 %; 2.2. Уголь – 90 % – Древесина – 10 %; 2.3. Уголь – 75 % - Древесина – 25 %; 2.4. Уголь – 50 % – Древесина – 50 %, 2.5. Древесина – 100 %;

3 – Зола после пиролиза при температуре 800 °С: 3.1 Уголь – 100 %; 3.2. Уголь – 90 % – Древесина – 10 %; 3.3. Уголь – 75 % - Древесина – 25 %; 3.4. Уголь – 50 % – Древесина – 50 %, 3.5. Древесина – 100 %

Анализ изображения растровой микроскопии золы смеси частиц каменного угля марки Т с древесиной, и золы совокупности частиц смесей на их основе, позволяет установить, что зола при пиролизе каменных углей состоит из агломератов более агрегированных по форме по сравнению с агломератами золы на основе угля марки Д и смесей с частицей биомассы. Увеличение доли последней до 50 % в смеси частиц древесины и угля марки Т приводит к формированию агломератов мелкозернистых по форме также четко сформированных и менее пористых по сравнению с золой частиц смесей угля марки Д и биомассы в идентичных условиях пиролиза.

Типичные изображения поверхности зольных остатков совокупности частиц углей и древесины (рис. 21) достаточно хорошо соответствуют результатам исследований полного элементного анализа, по которым установлена интенсификация процессов образования сульфатов кальция и алюминия в смесевых топливах на основе каменного угля марки Т (по сравнению с образованием этих же сульфатов в золе смесевых топлив на основе каменного угля марки Д).

Эти результаты также подтверждаются полным элементным анализом золы исследовавшихся смесевых топлив (типичные результаты приведены ранее по тексту).

Выполненные экспериментальные исследования показали, что совместный пиролиз смесей счетной совокупности частиц восьми углей марок Т и Д и древесины сосны приводит к увеличению концентрации сульфатов кальция и

алюминия в золе смесей с увеличением доли древесной компоненты по отношению к однородным углям на единицу массы последних. Установлено, что полученные данные по образованию сульфатов кальция в условиях пиролиза смесевых топлив при расположении небольшой группы частиц угля и древесины на некотором расстоянии друг от друга соответствуют результатам, полученным при исследовании на первом этапе выполнения проекта множества частиц (до 1000 шт) смеси угля и биомассы. Например, при температуре термического разложения таких топлив 800 °С рост содержания CaSO<sub>4</sub> для счетного количества частиц, составил 66,89 %, а для смеси массой до 15 г. 52,5 %. При более высоких температурах увеличение доли сульфатов кальция в золе исследовавшихся топлив составило от 33,3 % до 50,3 % как при счетном количестве частиц, так и в навесках топливных смесей массой до 15г. Результаты экспериментальных исследований позволяют сделать вывод, что расстояния от микрометров до 1 мм между частицами угля и древесины в смесевых топливах несущественно влияют на интенсивность формирования сульфатов кальция и алюминия в золе смесевых топлив на основе типичных энергетических углей восьми различных месторождений.

Аналогичные эксперименты выполнены для групп частиц смесевых топлив на основе каменного угля марки Т и отходов лесопиления.

На рисунке 22 приведены результаты определения содержания сульфата кальция в золе угля марки Т, древесины и совокупности частиц смесей угля марки Т и древесины с увеличением доли последней до 50 %.

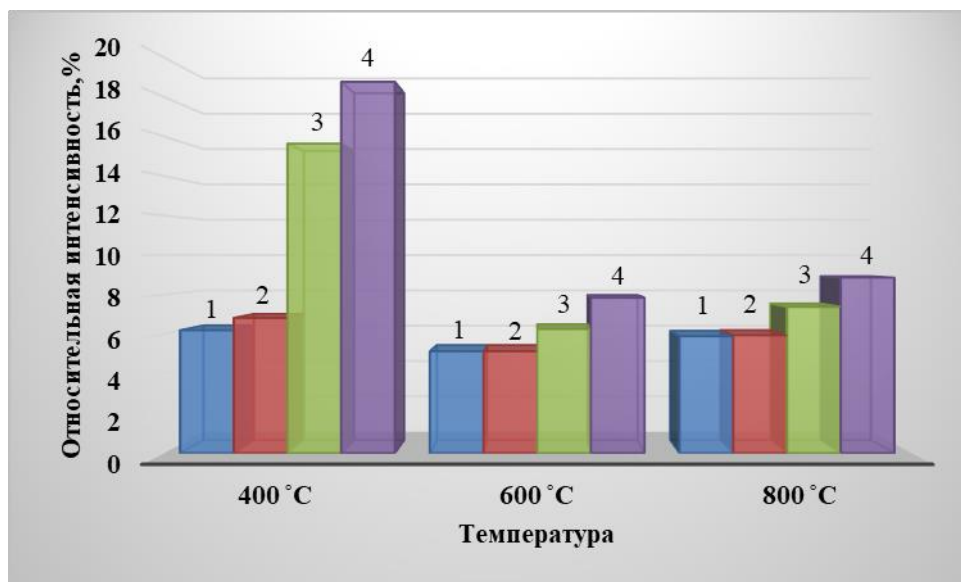


Рисунок 22 – Содержание сульфата кальция в золе смесей совокупности (5+1) частиц угля марки Т и древесины при их пиролизе: 1. Уголь – 100 %; 2. Уголь – 90 % – Древесина – 10 %; 3. Уголь – 75 % - Древесина – 25 %; 4. Уголь – 50 % – Древесина – 50 %.

Рисунок 22 иллюстрирует значительный (на 66,89 % при температуре 400 °С) прирост сульфата кальция в золе смесевого топлива при увеличении доли древесной биомассы до 50 % по сравнению с содержанием этой же соли в однородном угле. При температурах 600 °С и 800 °С прирост составил 34,42 % и 33,33 %, соответственно.

Проведено сравнение с результатами аналогичных исследований, выполненных для таких же топливных смесей, но не со счетной совокупностью частиц, а с навесками смесей массой до 15 г. [48]

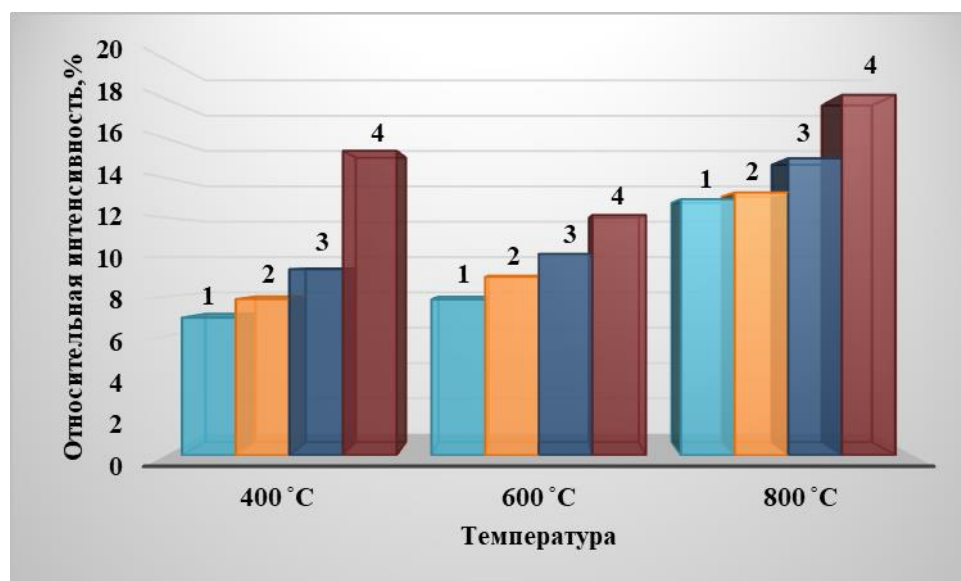




Рисунок 23 – Содержание сульфата кальция в золе угля марки Т, древесины и смесей из угля марки Т и древесины (с увеличением доли последней в смеси) при пиролизе в инертной среде топливных навесок массой до 15 г. в диапазоне температур от 400 °С до 800 °С: 1. Уголь – 100 %; 2. Уголь – 90 % – Древесина – 10 %; 3. Уголь – 75 % - Древесина – 25 %; 4. Уголь – 50 % – Древесина – 50 % [48]

Сравнение рисунков 22 и 23 позволяет сделать вывод, что наибольший рост содержания сульфата кальция происходит в золе смесевых топлив из угля марки Т и древесины в соотношении компонент 50 % / 50 %. При температуре термического разложения таких топлив, соответствующей 400 °С, рост содержания  $\text{CaSO}_4$  для счетного количества частиц составил 66,89 %, а для смеси массой до 15 г. 54,8 % по отношению содержания этих же сульфатов в однородном угле марки Т. При более высоких температура увеличение доли содержания сульфатов кальция в золе исследовавшихся топлив составило от 28,9 % до 35,1 % как при счетном количестве частиц (5+1), так и навесках топливных смесей массой до 15г. Экспериментально полученные результаты позволяют обоснованно утверждать о высоком соответствии установленного увеличения сульфатов кальция в смесевых топливах как при счетном количестве частиц (5+1), так и при топливных навесках массой до 15 г.

На рисунке 24 приведены результаты определения содержания сульфата алюминия в золе угля марки Т, древесины и совокупности частиц (5+1) смесей угля марки Т и древесины с увеличением доли последней до 50 % в топливной навеске.

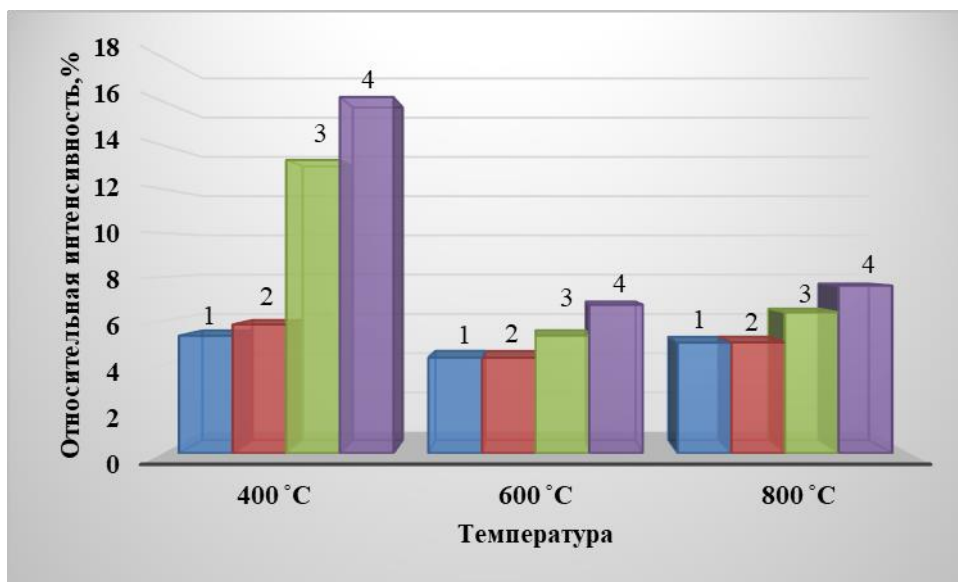


Рисунок 24 – Содержание сульфата алюминия в золе угля марки Т, древесины и смесей на их основе (с увеличением доли древесины в смеси) при пиролизе счетного количества частиц (5+1): 1. Уголь – 100 %; 2. Уголь – 90 % – Древесина – 10 %; 3. Уголь – 75 % - Древесина – 25 %; 4. Уголь – 50 % – Древесина – 50 %.

Анализ рисунка 24 позволяет сделать вывод о приросте доле сульфата алюминия в золе смесей угля марки Т и древесной биомассы во всем диапазоне температур с увеличением доли древесины до 50 % в смесевом топливе. Результаты экспериментов показали, что увеличение доли древесной компоненты до 50 % интенсифицирует рост сульфатов алюминия при температуре 400 °С на 67,00 % по отношению к содержанию сульфатов алюминия в однородном угле, для температур 600 °С и 800 °С на 35,53 % и 34,06 %, соответственно.

Проведен сравнительный анализ с результатами, полученными при пиролизе навесок (25 рис.) топливных смесей массой до 15 г. [48].

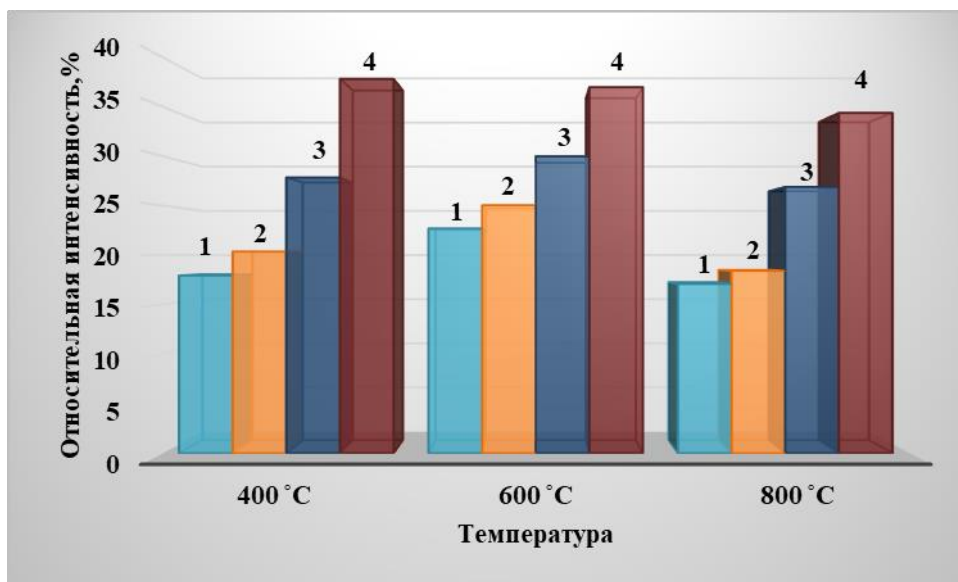


Рисунок 25 – Содержание сульфата алюминия в золе угля марки Т, древесины и смесей угля марки Т и древесины при пиролизе топливных навесок массой до 15 г. в инертной среде в диапазоне температур от 400 °С до 800 °С: 1. Уголь – 100 %; 2. Уголь – 90 % – Древесина – 10 %; 3. Уголь – 75 % - Древесина – 25 %; 4. Уголь – 50 % – Древесина – 50 % [48]

Из рис. 25 видно, что концентрация сульфата алюминия в золе смесевых топлив также увеличивается с ростом концентрации древесной компоненты. С увеличением температуры от 400 °С до 800 °С прирост  $Al_2(SO_4)_3$  составил 52,5 % и 50,3 %, соответственно, при максимальной концентрации древесины в исходном смесевом топливе [48].

Анализ результатов выполненных экспериментальных исследований позволяет сделать вывод о существенном влиянии древесины на формирование в золе смесевых топлив (на основе типичных энергетических углей двух марок Д и Т) сульфатов кальция и алюминия. Сравнение результатов экспериментальных исследований смесевых топлив, сформированных из группы пяти частиц угля и одной частицы древесины в различном соотношении по массе (от 0 % до 50 %) двух компонент в смеси с результатами, полученными ранее [48], показало их хорошее соответствие. Экспериментальные исследования со счетной совокупностью частиц подтверждают обоснованность эффективного сжигания смесевых топлив на основе смесей энергетических углей с отходами переработки древесины в топках котельных установок ТЭС с целью

минимизации экологического воздействия угольных ТЭС на окружающую среду.

### **Заключение по разделам**

По результатам проектных экспериментальных исследований отходов переработки древесины можно сделать вывод о существенном влиянии древесины на формирование в золе смесевых топлив на основе типичных энергетических углей (восьми месторождений как Российских, так и зарубежных) сульфатов кальция и алюминия. Сравнение результатов экспериментальных исследований смесевых топлив, сформированных из группы пяти частиц угля и одной частицы древесины в различном соотношении по массе (от 0 % до 50 %) двух компонент в смеси с результатами, полученными при анализе смесевых топлив навесками массой до 15 г. с учетом размера частиц в навесках (менее 80 мкм и остатка на сите 200 – 1000 мкм) показало их хорошее соответствие. Результаты экспериментальных исследований подтверждают обоснованность эффективного сжигания смесевых топлив на основе смесей энергетических углей с отходами переработки древесины в топках котельных установок ТЭС с целью минимизации экологического воздействия угольных ТЭС на окружающую среду и энергоресурсоэффективной экологически безопасной переработки техногенных отходов переработки древесины.

## **Участие в научных мероприятиях по тематике проекта за период обучения**

2020г.

1. V Всероссийская научная конференция "Теплофизика и физическая гидродинамика" 13-20 сентября 2020 (стендовый)
2. Всероссийская конференция «XXXVI Сибирский теплофизический семинар» 5-7 октября 2020 (секционный)
3. III Международная конференция "Современные проблемы теплофизики и энергетики" 19-23 октября 2020 Г. (секционный)

2021г.

1. V Всероссийская научная конференция "Теплофизика и физическая гидродинамика" 22-29 августа 2021 (секционный)
2. Международная научно-техническая конференция «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2021» (ICMTMTE 2021) 6-10 сентября (секционный)
3. «ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ» 26-28 октября (секционный)
4. XI Всероссийской конференции с международным участием «ГОРЕНИЕ ТОПЛИВА: ТЕОРИЯ, ЭКСПЕРИМЕНТ, ПРИЛОЖЕНИЯ») 9-12 ноября (секционный)
5. I Всероссийская с международным участием молодежная конференция «БУТАКОВСКИЕ ЧТЕНИЯ» 15-16 декабря (секционный)
6. V Конгресс «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований» Техноген – 2021 23-26 ноября (секционный).

**Библиографический список всех публикаций по проекту, опубликованных за весь период реализации проекта**

Kuznetsov G V, Tolokolnikov A A, Cherednik I V, Yankovsky S A. Influence of wood additives on pyrolysis products composition of mixed fuels based on 3B grade lignite. Journal of Physics: Conference Series (см. в книгах), 2020, 1683 - 4, 042054

Yankovsky S.A., Kuznetsov G.V., Tolokolnikov A.A., Cherednik I.V., Ivanov A.A.. Experimental study of the processes of reducing the formation of sulfur oxides during the co-combustion of particles of Уголь марки Tand wood processing waste. Fuel, 2021, 291, 120233, IPF 6.609

Misyukova A. D., Galaktionova A. A., Fedorko K. D., Yankovsky S. A.. Thermal conversion of BSG to produce high-calorie bio-carbon. AIP Conference Proceedings, 2021, 2422, 030004

Jankovsky S. A., Kuznetsov G. V., Fedorko K.D., Ivanov A.A.. Impact of Sawmill Waste on SO<sub>2</sub> Emissions from Co-firing with Lignite. Combustion Science and Technology, 2021, 1-17, IPF 1.946

Kuznetsov G V, Cherednik I V, Galaktionova A A, Yankovsky S A. The influence of wood processing waste on the technical and energy characteristics of the Maikuben coal-based mixed fuels. Journal of Physics: Conference Series (см. в книгах), 2021, 2057 - 1, 012128

Yankovsky Stanislav, Tolokol'nikov Anton, Gorshkov Alexander, Misyukova Albina, Kuznetsov Geniy. Justification of the Reduction Possibility of Sulfur Oxides and Fly Ash Emissions during Co-Combustion of Coal and Waste from Woodworking Enterprises. Applied sciences, 2021, 11 - 24, 11719, IPF 2.679

Yankovsky Stanislav, Tolokol'nikov Anton, Misyukova Albina, Kuznetsov Geniy. On the Effect of the Distances between Coal and Wood Particles during Their Joint Pyrolysis on Sulfur Oxides Formation. Energies, 2021, 14 - 24, 8321, IPF 3.004

Янковский С. А., Кузнецов Г. В., Мисюкова А. Д.. ОБОСНОВАНИЕ СНИЖЕНИЯ ВЫХОДА ОКСИДОВ СЕРЫ ПРИ ПИРОЛИЗЕ УГЛЕЙ С

ДОБАВКОЙ ОТХОДОВ ЛЕСОПИЛЕНИЯ. Химия твердого топлива, 2022, 1, 57-65, IPF 0.841

Yankovsky S. A., Cherednik I. V., Kupoderova E. D.. Comparison of the ignition characteristics of fuel based on bituminous coal and biomass during combustion in moving bed and entrained flow. AIP Conference Proceedings, 2019, 2135, 020061

Yankovsky S A, Cherednik I V, Kuznetsov G V. Ignition of granulated mixed fuel based on lignite and wood waste. Journal of Physics: Conference Series (см. в книгах), 2019, 1359 - 1, 012134

Kuznetsov G.V., Yankovsky S.A., Tolokolnikov A.A., Zenkov A.V., Cherednik I.V.. Conditions and characteristics of mixed fuel granules ignition based on coal and finely dispersed wood. Energy, 2020, 194, 116896, IPF 6.082

Kuznetsov G. V., Yankovskii S. A., Tolokol'nikov A. A., Cherednik I. V.. Mechanism of the Suppression of Sulfur Oxides in the Oxidative Thermolysis Products of Coals upon Their Combustion in a Mixture with Dispersed Wood. Solid Fuel Chemistry, 2020, 54 - 5, 311-317, IPF 0.541

Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Kostoreva A.A., Kostoreva Zh.A., Nigay N.A.. Effect of concentration and relative position of wood and coal particles on the characteristics of the mixture ignition process. Fuel, 2020, 274, 117843, IPF 5.578

Kuznetsov G V, Tolokolnikov A A, Cherednik I V, Yankovsky S A. Influence of wood biomass on physical and chemical transformations during its joint high-temperature pyrolysis with coals. Journal of Physics: Conference Series (см. в книгах), 2020, 1675 - 1, 012123

Kuznetsov G.V., Zenkov A.V., Tolokolnikov A.A., Cherednik I.V., Yankovsky S.A.. Ignition of particles of finely dispersed fuel mixtures based on coal and fine wood. Energy, 2021, 220, 119697, IPF 6.082

Кузнецов Гений Владимирович, Янковский Станислав Александрович, Сыродой Семен Владимирович. О перспективах использования отходов деревопереработки в качестве компоненты твердого топлива для паровых и водогрейных котлов. 2019, 3, 271



Кузнецов Гений Владимирович, Янковский Станислав Александрович, Сыродой Семен Владимирович. Математическое моделирование процессов секвестирования антропогенных продуктов сгорания углей на тепловых электростанциях. 2019, 1, 338-342

Кузнецов Гений Владимирович, Сыродой Семен Владимирович. Сравнительный анализ интенсивности конвективного и диффузионного переноса в системе частиц твердого топлива при зажигании. 2019, 491-493

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5БМ01	Янковскому Станиславу Александровичу

<b>Школа</b>	ИШЭ	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	НОЦ И.Н.Бутакова
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	13.04.01 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>	Стоимость материальных ресурсов в соответствии с рыночными ценами г. Томска. Тарифные ставки исполнителей в соответствии со штатным расписанием НИ ТПУ.
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	- районный коэффициент- 1,3; - коэффициент дополнительной заработной платы -1,15; - накладные расходы – 20%; - норма амортизации 20%.
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды 30 %

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	Проведение конкурентного анализа. Определение и сегментирование целевого рынка. SWOT-анализ проекта.
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	Формирование плана и графика проекта: - определение структур работ; - определение трудоемкости работ; - разработка диаграммы Ганта.
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	Составление календарного плана проекта. Определение структуры работ. Подсчет бюджета исследования. Смета затрат на проект.
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Разработка инвестиционного плана и оценка рисков.

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

1. <i>Оценка конкурентоспособности технических решений</i>
--

2. Матрица SWOT
3. График проведения и бюджет НИИ
4. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИИ
5. Потенциальные риски

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Якимова Т.Б.	канд. экон. наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ01	Янковский Станислав Александрович		

## **8. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

### **1.1. Предпроектный анализ**

#### **1.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования**

Для решения задачи анализа потенциальных потребителей необходимо провести исследование целевого рынка и его сегментирование.

В рамках данной работы под целевым рынком понимаются сегменты рынка, на котором в будущем возможна продажа разрабатываемого топлива. Сегментом рынка является выделенная часть рынка, группы потребителей, обладающих общими признаками.

Целевым рынком для данной работы является рынок производственных предприятий, тепло и электростанций, работающих на пылеугольном топливе.

#### **1.1.2 Анализ конкурентных решений**

Анализ конкурентоспособности композитного топлива на основе угля и древесины позволяет определить наиболее вероятную позицию на рынке. Анализ конкурентных технических решений необходимо проводить с целью внесения коррективов в научное исследование. Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны конкурентов.

Конкурентными разработками в данном случае будут являться композиционные топлива на основе угля и рисовой шелухи (У/Р) и топлива на основе угля и твердых бытовых отходов (У/ТБО).

В таблице 1 приведена экспертная оценка основных технических характеристик данных смесей.

Таблица 1 – Оценочная карта сравнения конкурентных технических решений.

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентно-способность		
		У/М	У/П	У/Д	У/М	У/П	У/Д
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
Энергоэкономичность	0,08	5	4	5	0,4	0,32	0,4
Энергоэффективность	0,06	0	3	2	0	0,18	0,12
Экономические критерии оценки эффективности							
Конкурентоспособность продукта	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
Уровень проникновения на рынок	0,05	5	4	3	0,25	0,2	0,15
Цена	0,16	5	2	3	0,8	0,32	0,48
Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	5	5	4	0,5	0,5	0,4
Финансирование научной разработки	0,2	2	2	4	0,4	0,4	0,8
Срок выхода на рынок	0,1	3	3	2	0,3	0,3	0,2
Экологические критерии эффективности							
Влияние на окружающую среду	0,05	5	5	4	0,25	0,25	0,2
Утилизация биомассы и ТБО как перерабатываемых отходов	0,1	3	2	4	0,3	0,2	0,4
Итого	1	38	34	35	3,7	3,07	3,55

В таблице 1 представлены основные конкуренты и критерии оценки конкурентоспособности. Каждый показатель конкурентов оценивается по пятибалльной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 5 – наиболее сильная. Вес показателя определяется в соответствии с его значимостью для окружающей среды и экономической эффективности использования того или иного вида топлива, сумма всех показателей составляет 1.

Применение отходов лесопромышленного комплекса в качестве топлива способно существенно расширить сырьевую базу тепловых электрических станций, использующих в качестве основного топлива угольную пыль. В пиковых режимах работы возможно повышение маневренности котельных агрегатов в пиковом режиме работы.

### **1.1.2. SWOT-анализ**

Одним из основных методов оценки конкурентоспособности организации является SWOT-анализ. SWOT анализ может проводиться по фирме в целом, по отдельным бизнес - направлениям, по отдельным рынкам, на которых фирма функционирует, а также по отдельным товарно-рыночным комбинациям.

При проведении SWOT-анализа на первом этапе определяются сильные и слабые стороны, возможности и угрозы проекта.

В таблице 2 приведён подробный SWOT-анализ компании, а также количественная оценка каждого критерия.

Таблица 2 – SWOT-анализ

	<p><b>Сильные стороны проекта:</b>  С1. Экономичность и энергоэффективность проекта;  С2. Кратное сокращение выбросов отходов лесопиления и деревообрабатывающей промышленности;  С3. Снижение выбросов антропогенных газов электростанцией.</p>	<p><b>Слабые стороны проекта:</b>  Сл1. Большое количество конкурентов  Сл2. Сложность измельчения материала до однородности  Сл3. Сложность в транспортировке и хранении биомассы.</p>
<p><b>Возможности:</b>  В1. Экономия природного топлива и частичный переход на возобновляемый источник энергии;  В2. Снижение затрат на уголь;  В3. Снижение стоимости за единицу производимой энергии за счет снижения расходов на топливо.</p>	<p>Введение предложенной технологии позволяет повысить экономичность и энергоэффективность тепловых электрических станций,.  Технология позволяет сократить выбросы антропогенных газов в атмосферу и, за счет снижения затрат на уголь, снизить стоимость за единицу производимой электроэнергии.</p>	<p>Сложность в транспортировке и хранении топлива является весомой и нерешенной проблемой, которую необходимо будет решать в ходе эксплуатации нововведения.</p>
<p><b>Угрозы:</b>  У1. Отсутствие спроса на данный вид смесового топлива.  У2. Введения дополнительных государственных требований к сертификации продукции.  У3. Развитая конкуренция</p>	<p>Могут быть предъявлены повышенные требования к надежности работы энергетического котлоагрегата, использующего данный вид топлива. Следует уделить внимание технике безопасности при работе на оборудовании для подготовки предлагаемого топлива. Низкая себестоимость данного вида топлива позволяет конкурировать на рынке.</p>	<p>Отсутствие необходимого оборудования и длительный срок поставок комплектующих материалов может повлечь за собой отсутствие спроса на данную технологию.</p>

После составления матрицы SWOT можно сделать несколько важных выводов:

1. Необходимо совершенствовать технологию транспортировки и хранения предлагаемого топлива.
2. Необходимо искать решения по снижению стоимости данного вида топлива для возможности конкурировать на рынке.
3. Для осуществления предлагаемой технологии необходимо готовить кадры, внося несущественные изменения в технику безопасности и правила эксплуатации котельного агрегата, использующего данный вид топлива.

## **1.2. Инициация проекта**

В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта.

### **1.2.1. Цели и результаты проекта**

Для того, чтобы четко определить цели данного проекта необходимо провести анализ и выявить заинтересованные стороны проекта. В таблице 3 представлена информация по заинтересованным сторонам проекта.

Таблица 3 – Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованные стороны проекта	Ожидание заинтересованных сторон
Государство	Сокращение отходов лесопромышленного комплекса, и сокращение расхода потребления угля как невозобновляемого энергетического ресурса.
Электростанция	Уменьшение выбросов антропогенных газов, снижение затрат на уголь.
Томский политехнический университет	Увеличение научных разработок, повышающих статус ВУЗа.

Цели и результат проекта представлены в таблице 4.



Таблица 4 – Цели и результаты проекта

Цели проекта	Экспериментальное исследование по определению влияния добавления в топливных состав древесных отходов на энергетические, экологические и экономические характеристики.
Ожидаемые результаты проекта	Рассчитать и выяснить оптимальную концентрацию смеси древесно-угольного топлива для максимальной эффективности сгорания такого топлива.
Критерии приемки результата проекта	Предоставление методики выполнения исследования, полнота, актуальность и объективность данных, структурированное изложение результатов проекта.
Требования к результату проекта	Эффективность использования данного топлива на предприятиях.

### 1.2.2. Организационная структура проекта

На этапе организационной структуры работы проекта решались следующие вопросы: определить, кто будет входить в рабочую группу данного проекта, определить роль каждого участника в данном проекте, а также прописать функции, выполняемые каждым из участников и их трудозатраты в проекте. Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники, инженеры, руководитель проекта, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей.

Рабочая группа проекта состоит из научного сотрудника, координирующего деятельность проекта и исполнителя, выполняющего работы по проекту.

#### Планирование работ по проектированию

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;

- построение графика проведения научных исследований.

В данном разделе составлен перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования, проведено распределение исполнителей по видам работ. Примерный порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 5.

Таблица 5 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей научного исследования

	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Научный сотрудник
Выбор направления исследований	2	Подбор и изучение материалов по теме	Исполнитель
	3	Выбор направления исследований	Исполнитель
	4	Календарное планирование работ по теме	Научный сотрудник
Теоретические исследования	5	Проведение предварительных расчетов и обоснований	Исполнитель
	6	Очистка и сушка биомассы	Исполнитель
	7	Определение энергетических характеристик смесового топлива	Исполнитель
	8	Определение количества газов, выбрасываемых в атмосферу при использовании топлива	Исполнитель
	9	Оценка и обсуждение результатов	Научный сотрудник
	10	Оценка эффективности полученных результатов	Научный сотрудник
Оформление отчета по НИР	11	Составление пояснительной записки (эксплуатационно- технической документации)	Исполнитель

Таблица 6 – Календарный план-график проведения НИОКР

№	Вид работ	Исполнитель	T <sub>ki</sub> калдн	Продолжительность выполнения работ													
				фев		март			апрель			май			июнь		
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	
1	Составление и утверждение технического задания	Научный сотрудник	3	■													
2	Подбор и изучение материалов по теме	Исполнитель	6		▨												
3	Выбор направления исследований	Исполнитель	6		▨												
4	Календарное планирование работ по теме	Научный сотрудник	3			■											
5	Проведение предварительных расчетов и обоснований	Исполнитель	8				▨	▨									
6	Очистка и сушка биомассы	Исполнитель	6					▨									
7	Определение энергетических характеристик смесового топлива	Исполнитель	3					▨									
8	Определение количества газов, выбрасываемых в атмосферу при использовании топлива	Исполнитель	3							▨							
9	Выбор форсунки для распыления топлива	Исполнитель	3							▨							
10	Оценка и обсуждение результатов	Научный сотрудник	6								▨						
13	Оценка эффективности полученных результатов	Научный сотрудник	6										▨	▨			
14	Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	Исполнитель	6											▨			

Итого длительность работ в календарных днях научного сотрудника равняется 18 дней, а исполнителя 41 день.

### **Бюджет затрат на проектирование**

В ходе выполнения данного раздела был произведен расчет материальных затрат на проектирование, затрат на заработную плату исполнителей научного исследования, отчисления во внебюджетные фонды и накладные расходы.

В процессе формирования бюджета, планируемые затраты группируются по статьям, представленным в таблице 7.

Таблица 7 – Материальные затраты на сырье, материалы, покупные изделия и полуфабрикаты.

Материальные затраты	Ед. изм.	Объем потребления	Тариф, руб/ед.	Итого, руб.
Электроэнергия	Кол. часов работы x потреб. мощн.	300 ч x 100 Вт = 30 кВт·ч	5,8 кВт·ч	174
Настольные весы Аксион ВКЕ-21	шт	800 гр	570	570
Белая бумага формата А4	Упаковка, шт	–	500	500
<b>ИТОГО:</b>				1244

### **Стоимость экспериментальной установки**

Задачи проекта решаются на базе оборудования, находящегося в лаборатории газификации твердых топлив НИ ТПУ. Главным объектом развития и оптимизации технологии является экспериментальная установка, состоящая из нескольких основных элементов:

1. Высокотемпературная печь ПМ-1400;
2. Дополнительные детали;
3. Координатное устройство;
4. Высокоскоростная камера Photron;
5. Вытяжная вентиляция;

6. Компьютер.

Таблица 8 – Специальное оборудование для экспериментальных исследований

№ п/п	Наименование	Стоимость, руб.	Количество, шт.
2	Дополнительные детали	10000	-
3	Координатное устройство	19000	1
5	Вытяжная вентиляция	36000	1
6	Компьютер	25000	1
Итого		90000	

На такое оборудование, как муфельная печь и высокоскоростная камера необходимо провести расчет амортизации, так как оборудование приобреталось не только для данного проекта и стоимость оборудование выше 100 тыс.руб.

Камера и печь всегда работали одновременно, следовательно, амортизация рассчитывается по формуле:

$$K_{ам} = \frac{T_{исп.кт}}{T_{кал}} \cdot C_{кт} \cdot \frac{1}{T_{сл}}, \text{ руб. год,}$$

Где  $T_{исп.кт}$  – время использования высокотемпературной печи;

$T_{кал}$  - календарное время;

$C_{кт}$  – цена оборудования;

$T_{сл}$  – срок службы установки.

$$K_{ам} = \frac{94}{365} \cdot 350000 \cdot \frac{1}{5} = 18027,4 \text{ руб. год}$$

$$K_{ам} = \frac{94}{365} \cdot 1000000 \cdot \frac{1}{5} = 51506,8 \text{ руб. год}$$

Таблица 9 – Амортизационные отчисления

№ п/п	Наименование	Стоимость, руб	Количество
1	Высокотемпературная печь ПМ-1400	18027,4	1
2	Высокоскоростная камера Photron	51506,8	1
Итого		69534,2	

### **Затраты на заработную плату исполнителей темы**

В данной НИР включается основная заработная плата научного руководителя и студента магистранта. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы оплаты труда. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы (размер определяется «Положением об оплате труда»). Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением проекта, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату.

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}$$

Где  $Z_{осн}$  - основная заработная плата;

$Z_{доп}$  - дополнительная заработная плата (12-20% от  $Z_{осн}$ ).

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}$$

Где  $Z_m$  – оклад работника за месяц;

$M$  – количество рабочих месяцев без отпуска в течение года:

При отпуске в 24 рабочих дня –  $M = 11,2$  месяца, 5-дневная неделя;

При отпуске в 48 рабочих дней  $M=10,4$  месяца, 6-дневная неделя.

$F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени персонала, раб.дн.

Таблица 10 – Показатели рабочего времени

Показатель	Дни
Календарное число дней	365
Нерабочие дни (праздники/выходные)	66
Потери рабочего времени (отпуск/невыходы по болезням)	56
Действительный годовой фонд рабочего времени	243

Определим основную заработную плату:

$$Z_{\text{зп}}(\text{исп}) = 13000 \cdot 1,3 = 16900 \text{ руб};$$

где 1,3- районный коэффициент.

Определим зарплату за 1 день:

$$Z_{\text{день}}(\text{исп}) = 16900 \cdot \frac{11,2}{243} = 779 \text{ руб};$$

Определим основную заработную плату за отработанное количество дней:

$$Z_{\text{осн}}(\text{исп}) = 779 \cdot 41 = 31939 \text{ руб};$$

Определим основную заработную плату руководителя проекта:

$$Z_{\text{осн}}(\text{нс}) = 35000 \cdot 1,3 = 45500 \text{ руб},$$

где 1,3 - районный коэффициент.

Определим зарплату за 1 день:

$$Z_{\text{день}}(\text{нс}) = 45500 \cdot \frac{11,2}{243} = 2097 \text{ руб};$$

Определим основную заработную плату за отработанное количество дней:

$$Z_{\text{осн}}(\text{нс}) = 2097 \cdot 18 = 37746 \text{ руб};$$

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} + Z_{\text{осн}}$$

где  $k_{\text{доп}}$  - коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

$$Z_{\text{доп}}(\text{исп}) = k_{\text{доп}} + Z_{\text{осн}}(\text{исп}) = 0,15 \cdot 31939 = 4790,85 \text{ руб};$$

$$Z_{\text{доп}}(\text{нс}) = k_{\text{доп}} + Z_{\text{осн}}(\text{нс}) = 0,15 \cdot 37746 = 5661,9 \text{ руб}.$$

Определим полную заработную плату за весь период научного исследования:

$$Z_{\text{зп}}(\text{исп}) = Z_{\text{осн}}(\text{исп}) + \text{доп}(\text{исп}) = 31939 + 4790,85 = 36729,85 \text{ руб}$$

$$Z_{\text{зп}}(\text{нс}) = Z_{\text{осн}}(\text{нс}) + Z_{\text{доп}}(\text{нс}) = 37746 + 5661,9 = 43407,9 \text{ руб}$$

Их сумма равна  $36729,85 + 43407,9 = 80137,75$  руб.

### **Отчисления во внебюджетные фонды**

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}),$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и др.).

На 2022 г. отчисления во внебюджетные фонды 30%.

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{зп}}(\text{исп}) + Z_{\text{зп}}(\text{нс})) = 0,30 \cdot 80137,75 = 24041,3 \text{ руб.}$$

### **Накладные расходы**

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д.

Накладные расходы принимаются в размере 20% от затрат на заработную плату.

$$Z_{\text{накл}} = 80137,75 \cdot 1,2 = 96165,3 \text{ руб.}$$

### **Формирование бюджета затрат на проектирование**

Рассчитанная величина затрат проектирования работы является основой для формирования бюджета затрат проекта.

Определение бюджета затрат на проектирование приведено в таблице 11.



Таблица 11 – Бюджет затрат на проектирование

Наименование статьи	руб.	в %
Материальные затраты НТИ	1244	0,34
Затраты на заработную плату исполнителей темы	80137,75	22,2
Отчисления во внебюджетные фонды	24041,3	6,66
Накладные расходы	96165,3	24,9
Оборудование	90000	19,3
Амортизация	69534,2	26,6
Итого	361123	100

### Реестр рисков проекта

Идентифицированные риски проекта включают в себя возможные неопределенные события, которые могут возникнуть в проекте и вызвать последствия, которые повлекут за собой нежелательные эффекты. Информацию по данному разделу необходимо свести в таблицу (табл. 12).

Таблица 12 – Реестр риска проекта

№	Риск	Потенциальное воздействие	Вероятность наступления (1-5)	Влияние риска (1-5)	Уровень риска*	Способы смягчения риска	Условия наступления
1	Экономический кризис	Отсутствие бюджетного финансирования	2	2	Низкий	Прогнозирование экономической ситуации	Непредвиденная экономическая обстановка
2	Невостребованность исследований	Невостребованность исследований	2	5	Средний	Популяризация данного исследования	Незаинтересованность потребителей

### Определение экономической эффективности проекта

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности. Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в

ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}$$

Где  $I_{\Phi}^p$  - интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{max}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. налоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в разгах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разгах (значение меньше единицы, но больше нуля). Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_m^a = \sum_{i=1}^n a_i b_i^a ; I_m^p = \sum_{i=1}^n a_i b_i^p .$$

Где  $I_m$  – интегральный показатель ресурсоэффективности для  $i$ -го варианта исполнения;

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения;

$b_i^a, b_i^p$  – балльная оценка  $i$ -го варианта исполнения, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

$n$  – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности представлен в форме таблицы 13.

Таблица 13 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

ПО Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Аналог
Способствует росту производительности труда пользователя	0,2	4	3
Влияние на окружающую среду	0,25	4	2
Энергосбережение	0,3	5	3
Надежность	0,25	4	4
Итого	1	26	19

$$I_{\Phi}^p = 4 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,25 + 5 \cdot 0,3 + 4 \cdot 0,25 = 4,3;$$

$$I_{T1}^{\Phi} = 3 \cdot 0,2 + 2 \cdot 0,25 + 3 \cdot 0,3 + 4 \cdot 0,25 = 3.$$

$$I_{\Phi}^p = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}} = \frac{80000}{423989} = 0,19.$$

$$I_{\Phi}^a = \frac{\Phi_{ai}}{\Phi_{max}} = \frac{40000}{423989} = 0,095.$$

Интегральный показатель эффективности разработки и аналога определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{финр}^p = \frac{I_T^p}{I_{\Phi}^p} = \frac{4,3}{0,19} = 22,6;$$

$$I_{финр}^a = \frac{I_T^a}{I_{\Phi}^a} = \frac{3}{0,095} = 31,58.$$

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{финр}^p}{I_{финр}^a} = \frac{22,6}{31,58} = 0,72.$$

Таблица 14 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Аналог	Разработка
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,095	0,19
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	3	4,3
3	Интегральный показатель эффективности	31,58	22,6
4	Сравнительная эффективность исполнения	0,73	

### Вывод по разделу

В данном разделе был проведен расчет проекта по анализу эффективности использования смесового топлива на основе угля и отходов лесопиления. Для этого были решены следующие задачи:

- 1) составлен перечень работ и произведена оценка времени их выполнения;
- 2) составлена смета затрат на проект;
- 3) Рассчитан бюджет научного исследования и реализации проекта;
- 4) Определена экономическая эффективность проекта.

Несмотря на достаточно высокие затраты для реализации данного проекта, такие как разработка проекта, материальные затраты, затраты за заработную плату сотрудникам, срок окупаемости достаточно мал.

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b> 5БМ01		<b>ФИО</b> Янковскому Станиславу Александровичу	
<b>Школа</b>	ИШЭ	<b>Отделение (НОЦ)</b>	НОЦ И.Н.Бутакова
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Тема ВКР:

Исследование горения смесевых топлив на основе углей и отходов лесопромышленного комплекса	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
<p><b>Введение</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика) и области его применения.</li> <li>– Описание рабочей зоны (рабочего места) при разработке проектного решения/при эксплуатации</li> </ul>	<p><i>Объект исследования:</i> смесевое топливо на основе угля и древесной биомассы  <i>Область применения:</i> Энергетика  <i>Рабочая зона:</i> научно-исследовательская лаборатория  <i>Размеры помещения:</i> 10 * 10 м  <i>Количество и наименование оборудования рабочей зоны:</i> высокотемпературная печь  <i>Рабочие процессы, связанные с объектом исследования, осуществляющиеся в рабочей зоне:</i> Термическая конверсия смесевое топлива</p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<p><b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при эксплуатации:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<p>ПНД Ф 12.13.1-03. Техника безопасности при работе в лабораториях;          ТК РФ Статья 351.6. Особенности регулирования труда работников в сфере электроэнергетики, сфере теплоснабжения, в области промышленной безопасности, области безопасности гидротехнических сооружений;          Федеральный закон от 28 декабря 2013 г. N 426-ФЗ «О специальной оценке условий труда».</p>
<p><b>2. Производственная безопасность при разработке при эксплуатации:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Анализ выявленных вредных и опасных производственных факторов</li> </ul>	<p><b>Опасные факторы:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Производственные факторы, связанные с чрезмерно высокой температурой материальных объектов производственной среды, способных вызвать ожоги тканей организма человека;</li> <li>2. Неподвижные режущие, колющие, обдирающие, разрывающие части твердых объектов.</li> <li>3. Угольная пыль;</li> <li>4. Угарный газ и продукты сгорания, способные вызвать отравление или удушье.</li> <li>5. Производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов, под действие которого попадает работающий;</li> </ol> <p><b>Вредные факторы:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Повышенный уровень локальной вибрации;</li> </ol>

	<p>2. Повышенный уровень шума;</p> <p>3. Отсутствие или недостаток необходимого искусственного освещения;</p> <p>4. Производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего;</p> <p>5. Монотонность труда, вызывающая монотонию;</p> <p>6. Длительное сосредоточенное наблюдение.</p> <p>Требуемые средства коллективной и индивидуальной защиты от выявленных факторов: тепловая изоляция, использование защитных костюмов, перчатки, беруши, наушники.</p> <p><b>Расчет:</b> расчет системы искусственного освещения.</p>
<p><b>3. Экологическая безопасность при разработке <u>при эксплуатации</u>:</b></p>	<p><b>Воздействие на селитебную зону:</b> отсутствует;</p> <p><b>Воздействие на литосферу:</b> отсутствует.</p> <p><b>Воздействие на гидросферу:</b> сброс воды после промывок поверхностей нагрева печи.</p> <p><b>Воздействие на атмосферу:</b> выбросы из дымовых труб дымовых газов, в частности двуокись серы, окислы азота и зола.</p>
<p><b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях при разработке проектного <u>при эксплуатации</u>:</b></p>	<p><b>Возможные ЧС:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- неконтролируемый выброс вредных веществ;</li> <li>- быстро распространяющийся пожар;</li> <li>- наводнение;</li> <li>- взрыв.</li> </ul> <p><b>Наиболее типичная ЧС:</b> пожар.</p>
<p>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</p>	

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ООД	Сечин А.И.	Доктор технических наук		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ01	Янковский Станислав Александрович		

## **9. Социальная ответственность**

### **Введение**

В выпускной квалификационной работе представлены исследования по горению смесевых топлив на основе углей и отходов лемопромышленного комплекса

Областью применения данной разработки является любая электрическая станция или районная котельная, имеющая в оборудовании котлы, работающие на пылевидном топливе.

Охрана труда – совокупность нормативных, технических и правовых актов, мероприятий и правил, целью которых является сохранение здоровья и жизни работника в процессе трудовой деятельности. Данные мероприятия могут быть организационно-технического, санитарно-гигиенического, социально-экономического, лечебно-профилактического, реабилитационного характера. Условия труда оказывают прямое воздействие на здоровье человека и его состояние в процессе работы, что обуславливает их отвечать всем требованиям безопасности и санитарно-гигиеническим требованиям. Все факторы, воздействующие на работника в процессе осуществления трудовой деятельности, принято разделять на два типа: вредные и опасные производственные факторы.

Рабочим местом является лаборатория газификации твердых топлив НИ ТПУ. Размер лаборатории 10x10 метров. Оборудование, на котором совершаются основные рабочие процессы – высокотемпературная печь ПМ-1400, с температурой при работе 800-1000°С.

### **Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности Специальные трудовые нормы правового законодательства**

Правовая основа по обеспечению охраны труда и безопасности трудящихся на рабочем месте основывается на Конституцию РФ и состоит из ряда федеральных законов и нормативно правовых актов. Управление охраной труда осуществляет блок федеральных органов исполнительной власти, 87

руководимый Министерством здравоохранения и социального развития РФ (Минздравсоцразвития). Правовую основу организации работ в ЧС и ликвидации их последствий составляет закон РФ —О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера (1994). Ведомственные службы охраны труда совместно с комитетами профсоюзов разрабатывают инструкции по безопасности труда для различных профессий с учетом специфики работы, а также проводят инструктажи и обучение всех работающих правилам безопасной работы. Различают следующие виды инструктажа: вводный, первичный на рабочем месте, повторный внеплановый и текущий.

В Кодексе нашли существенное отражение вопросы охраны труда. В нем констатируется, что каждый работник имеет право на условия труда, отвечающие требованиям безопасности и гигиены, на обязательное социальное страхование, на возмещение ущерба, причиненного работнику в связи с выполнением трудовых обязанностей, и ряд других. Вопросам охраны труда посвящен специальный раздел «Охрана труда».

Работа исследователя связана с использованием в практических условиях ручного и электрифицированного инструментария при работе на исследовательском оборудовании, исследователю приходится, эксплуатируя установки, генерирующие температуру до 1400°C.

К работе в лаборатории допускаются лица старше 18 лет. Важно, чтобы сотрудники получили положительное заключение медкомиссии, прошли специальное обучение, прослушали инструктаж.

### **Производственная безопасность**



Таблица 1 – Возможные опасные и вредные производственные факторы на рабочем месте исследователя

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Нормативные документы
Отклонение параметров микроклимата	СанПиН 1.2.3685-21[8]. Гигиенические к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий СП 52.13330.2016[9]. Напряжения стандартные Санитарные нормы СН 2.2.4/2.1.8.566-96[10]. «Производственная вибрация, вибрация помещениях жилых и общественных зданий.» (утв. постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 30 октября 1996 г. N 40). ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные факторы производства.
Повышенный уровень шума	
Опасность поражения электрическим током	
Недостаточная освещённость рабочей зоны	

### Анализ выявленных вредных и опасных факторов

Перечень возможных опасных и вредных производственных факторов, возникающих в научно-исследовательской лаборатории, приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Вредные и опасные производственные факторы.

Основные средства факторы	Источники и причины возникновения опасных и вредных факторов	Решение
1	2	3
Отклонение параметров микроклимата	За счет повышенной температуры наружных поверхностей тепловых энергоустановок в лаборатории нарушаются параметры микроклимата	Использование Приточно-вытяжной вентиляции
Недостаточная освещенность рабочей зоны	Тусклый свет от искусственных источников, маленькие оконные проемы, расположенные у потолка.	Увеличение количества искусственных источников света.
Механическое оборудование с движущимися и	Вращающиеся валы, маховики, муфты сцепления	Ограждения, дистанционное управление, знаки безопасности, звуковые сигналы.

Основные средства факторы	Источники и причины возникновения опасных и вредных факторов	Решение
1	2	3
вращающимися частями.		
Повышенный уровень шума	Громкий звук работающих установок, вытяжной вентиляции.	Звукоизоляция ограждающих конструкций, кабин наблюдения и дистанционного управления, звукопоглощающие конструкции и экраны, глушители шума.
Повышенный уровень вибрации	Компрессора, насосы.	Виброизоляция, виброгашение.
Опасность поражения электрическим током	Корпуса электрооборудования, токоведущие части, находящиеся под напряжением.	Защитные ограждения, устройства автоматического контроля и сигнализации, устройство защитного заземления, устройств автоматического отключения, дистанционное управление

### **Отклонение параметров микроклимата**

Основным источником возникновения отклонения параметров микроклимата является высокотемпературная муфельная печь с температурой, достигающей 1400°C.

Допустимые микроклиматические условия не вызывают нарушений или ухудшения состояния здоровья во время проведения исследований, но могут привести к ухудшению самочувствия и снижению работоспособности. Если невозможно устранить неблагоприятные воздействия микроклимата из-за технологических требований к производственному процессу или экономической нецелесообразности, считается вредным или опасным. Для уменьшения неблагоприятного воздействия микроклимата используются следующие системы: локальные системы кондиционирования, рабочие перерывы, защитная одежда, средства индивидуальной защиты. Согласно ГОСТ Р 30331.4-95, мерами предосторожности являются [21]:

- не контактируйте с нагретыми частями оборудования во время его работы (или после завершения работы при остывании печи);
- соблюдайте технику безопасности при работе с исследуемыми нагретыми образцами;
- выполняйте все работы по обслуживанию и чистке оборудования только при полностью отключенном от сети питанием оборудования и после остывания нагретых частей;
- используйте перчатки из негорючего материала (краги, верхонки) для защиты рук от ожогов.

### **Недостаточная освещенность рабочей зоны**

Для возможности выполнения работы без напряжения зрения необходимо, чтобы требования по освещенности помещения удовлетворяли установленным нормам. На производственных предприятиях освещение выполняет несколько задач: обеспечивает безопасность трудовых процессов, снижает утомляемость персонала и повышает его производительность. В котельном цехе должны быть обеспечены 3 вида освещения: естественное, искусственное и аварийное.

Естественное освещение в помещениях должно соответствовать санитарным нормам и правилам. Применение естественного освещения влияет положительно на зрение, а также на психологическое состояние. Для оценки производственного освещения применяются СНиП 52.13330.2016.

Искусственное освещение делится на 2 вида: рабочее и дежурное. Искусственное используется в производстве не только ночью, но и днем, когда естественное освещение не способно обеспечить необходимую работу в полном объеме. Если естественного освещения недостаточно, то к нему добавляют искусственное освещение.

### **Повышенный уровень шума**

Шум ухудшает условия труда, оказывая воздействие на организм человека. Процесс сжигания смесового топлива является шумным, так как

необходимо при помощи специализированного оборудования доставлять топливную смесь в камеру сгорания. Одним из методов уменьшения воздействия шума в лаборатории является снижение или ослабление шума в его источниках – генераторы, нагреватели, трансформаторы, вентиляторы, специализированные механизмы и устройства. Своевременное устранение этих причин позволяет снизить уровень шума. В качестве СИЗ от шума могут использоваться специальные наушники, беруши, противозумные каски, защитное действие которых основано на изоляции и поглощения шума [22].

У человека, находящегося под ежедневным воздействием интенсивного шума снижается острота слуха, повышается кровяное давление, ослабляется внимание и ускоряется процесс утомления.

Таблица 4 – Допустимые уровни шума (ГОСТ 12.01.003-2014)

Помещения	Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц								Уровни звука, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
ОРУ	99	92	86	83	80	78	76	74	85

### **Электробезопасность**

Соблюдение электробезопасности в котельной – залог комфортных условий труда персонала и безопасной эксплуатации оборудования.

В помещении с большим количеством аппаратуры, использующей однофазный электрический ток, промышленной частоты напряжением 220В, есть вероятность поражения током. Во время нормального режима работы оборудования опасность поражения током практически минимальна, однако, возможны аварийные режимы работы, когда происходит случайное электрическое закорачивание 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 ПК;

- при однофазном (однополюсном) прикосновении незащищенного от земли человека к незащищенным токоведущим частям электроустановок, находящихся под напряжением;

- при прикосновении к незащищенным частям, находящимся под напряжением (нарушение изоляции);

- при соприкосновении с полом и стенами, оказавшимися под напряжением.

Основными мероприятиями по обеспечению электробезопасности являются [23]:

- изолирование токоведущих частей, исключающее возможность случайного контактирования;

- установки защитного заземления;

- наличие общего выключателя (рубильника);

- своевременное ТО технического оборудования, осмотр целостности изоляции.

Таблица 6 – Основные и дополнительные средства защиты [10].

Напряжение установки	Защитные средства	
	Основные	Дополнительные
До 1 кВ	<ul style="list-style-type: none"><li>• Диэлектрические перчатки;</li><li>• Инструмент с изолированными рукоятками;</li><li>• указатели напряжения.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Диэлектрические галоши;</li><li>• резиновые коврики;</li><li>• изолирующие подставки.</li></ul>
Выше 1 кВ	<ul style="list-style-type: none"><li>• оперативные и измерительные штанги;</li><li>• изолирующие и токоизмерительные клещи;</li><li>• указатели напряжения;</li><li>• устройства и приспособления изолирующие.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Диэлектрические перчатки;</li><li>• диэлектрические боты;</li><li>• резиновые коврики;</li><li>• изолирующие подставки.</li></ul>

## **Механическое оборудование с движущимися и вращающимися частями**

Большое количество оборудования, которое вредно для человеческого организма, было установлено для обеспечения бесперебойной работы установки. Такое оборудование включает в себя насосы двигателя, компрессоры, системы топливоприготовления, очистки топлива и дробления. Это может нанести серьезный ущерб здоровью исследователя во время движения: переломы костей, повреждение мышц и т.д.

Также существует опасность получения травмы подвижными элементами модуля координатного механизма. Перед включением модуля следует убедиться в отсутствии каких-либо препятствий на пути подвижной части.

Согласно ГОСТ 12.2.003, мерами предосторожности являются [24]:

- 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, смазывать подвижные части. Обтирочные материалы, которыми очищается модуль, не должны оставлять следов и повреждений на протираемых поверхностях.

Согласно правилам техники безопасности, движущиеся части производственного оборудования, к которым возможен доступ работников, должны иметь механические защитные ограждения.

### **Экологическая безопасность**

#### *Атмосфера.*

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.

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 соде ржания 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.

*Гидросфера.* Для очистки сточных вод от промышленных отходов используют механическую очистку, физико-химическую очистку, химическую очистку, биохимическую очистку.

*Литосфера.* Твердые частицы, содержащиеся в дымовых газах, осаждаются на поверхности земли и загрязняют почву. Для очистки дымовых газов прибегают к установке насосов и вакуумным системам.

### **Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

Чрезвычайные ситуации — это явления техногенного, экологического происхождения, заключающиеся в резком отклонении происходящих процессов или явлений и оказывающих от нормы существенное негативное влияние на жизнедеятельность человека, функционирование экономики, социальную среду и природную среду.

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

- укрытие в защитных сооружениях;
- проведение эвакуационных мероприятий;
- использование средств индивидуальной защиты.

При работе котельной могут возникнуть некоторые чрезвычайные ситуации. Например, воспламенение котельной и прилегающей к ней территории. Опасность представляет сам котлоагрегат.

### **Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований**

В лаборатории и на производстве наибольшую опасность представляет возникновение возгорания. Поскольку топливо необходимо хранить, для дальнейшего сжигания, то существует вероятность воспламенения.

При эксплуатации необходимо контролировать состояние емкостей с горючим путем внешнего осмотра и измерения температуры в них.

Признаками самовозгорания являются повышение температуры, появление характерного запаха. Самой распространенной причиной возникновения пожара является нарушение противопожарных правил. Поэтому персонал должен эти правила хорошо знать и выполнять.

Особое внимание стоит уделить пожаробезопасности и электробезопасности. При функционировании муфельной печи существуют риски возникновения опасных ситуаций, как и при работе любого высокомоощного электрического прибора. Так как установка работает при высоких температурах, одним из таких рисков является перегрев оборудования выше температуры, рассчитанной для его стабильной работы, что может привести к воспламенению экспериментального стенда, а вследствие и лаборатории. Для предотвращения появления такой ситуации необходимо тщательно следить за изменением температуры в муфельной печи и следить за правильностью подключения оборудования к электрической сети.



Также, причиной возникновения чрезвычайных ситуаций, связанных с возгоранием помещения, может послужить короткое замыкание в проводке экспериментального стенда. Поэтому, для предотвращения возгорания помещение должно быть оборудовано средствами пожаротушения (огнетушителями, ящиком с песком, стендом с противопожарным инвентарем), средствами связи.

В случае возникновения данной ЧС, требуется разработать профилактические мероприятия и осуществит контроль за их проведение.

Пожары – неконтролируемый процесс горения, который чреват большими материальными издержками, а часто и человеческими жертвами. Обеспечение пожаробезопасности начинается с определения класса взрывоопасной зоны или класса пожароопасной зоны данного участка. Согласно [25] классификации производств по пожарной опасности, здания, помещения и сооружения научных лабораторий относятся к классу Б.

В топочных устройствах при сжигании любого вида топлива может произойти взрыв вследствие образования в топке или в последующих газоходах взрывоопасных концентраций пыли из-за недостаточной вентиляции котла при пуске, неустойчивости процесса горения, обрыва факела, сепарации пыли на пол котла, а также при переходе на сжигание с одного вида топлива на другой.

Организационно-технические мероприятия: наглядная агитация и инструктаж работающих по пожарной безопасности, разработка схемы действий администрации и работающих в случае пожара и организация эвакуации людей, организация внештатной пожарной дружины. При эксплуатации производственного оборудования в атмосфере пожаро- и взрывоопасной пыли и пылевоздушных смесей основным условием безопасности является предотвращение пожаро- и взрывоопасных ситуаций, что обеспечивается:

- последовательностью работающего в пуск едином и остановки технологического оборудования, комплексе, с автоматической блокировкой при ее нарушении;

- светозвуковой сигнализацией срабатывания любой блокировки;
- устройством аварийного отключения приводов;
- датчиками уровня заполнения бункеров, заблокированными с транспортным и другим технологическим оборудованием и др.

### **Вывод по разделу**

В заключение всего вышперечисленного хочется отметить основную задачу, поставленную данным разделом, формирование у индивида социальной ответственности перед другими людьми и окружающей его средой обитания, а также необходимости выполнения всех возможных мероприятий, ведущих к улучшению условий окружающего мира.

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

- в работе рассмотрена социальная ответственность предприятия (корпоративная социальная ответственность), указаны пагубные воздействия на окружающую среду;

- 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.

## Заключение

При выполнении проекта впервые проведены экспериментальные исследования с целью определения состава золы бурых и каменных углей различных месторождений России после их пиролиза в смеси с древесной биомассой. Впервые установлено, что концентрация сульфатов кальция и алюминия в золе, остающейся после пиролиза смеси различных марок углей в 1,3 раза и более выше, чем в золе исследуемых однородных углей после их пиролиза. Впервые проведены масштабные эксперименты с навесками древесно-угольных смесей массой около 15 г. (с размерами частиц менее 80 мкм, и 200 – 1000 мкм соответственно), счетным количеством (5+1) частиц (пять частиц угля и одной частицы древесины), диапазон концентрации древесной компоненты в смеси которых составлял от 10 % до 50 %. Условия экспериментальных исследований были приближены к реальной практике сжигания углей или их смесей с измельчённой биомассой. Частицы этих двух топлив находились на некотором расстоянии друг от друга в топочном пространстве. Поэтому условия взаимодействия продуктов пиролиза угля и древесины были максимально приближены к процессам, протекающим в топочном пространстве котлоагрегатов ТЭС.

Научная новизна экспериментальных исследований, результаты которых приведены в диссертации, заключается в установлении механизмов секвестирования основных антропогенных оксидов и определении содержания сульфатов кальция и алюминия в золе смесей углей различных марок (широко используемых в мировой энергетике как топлива ТЭС) и древесной биомассы (отходов лесопиления) после их пиролиза в условиях некоторой (до миллиметра) удаленности частиц угля и древесины одна от другой и сопоставлении с результатами, полученными на первом этапе выполнения проекта для насыпок такой смеси в плотной «упаковке». Результаты исследований с размерами частиц смесевых топлив менее 80 мкм и размерами частиц смеси в диапазоне размеров 200 – 1000 мкм. Сопоставимы между собой. Выполненные экспериментальные исследования позволили впервые сформировать базу данных, достаточную для описания механизмов устойчивого снижения концентрации оксидов серы в газообразных продуктах пиролиза смеси углей с древесиной. Результаты выполненных

экспериментальных исследований позволяют сделать вывод фундаментального значения – состав углей оказывает существенное влияние на выход антропогенных оксидов после пиролиза смесей углей с отходами переработки древесины. Впервые экспериментально доказано, что древесная биомасса в соотношении компонент 50 % / 50 % (уголь / древесина) является эффективной добавкой к углю, способствующей существенному снижению антропогенных выбросов энергетических котлов ТЭС.

Сформулирована по результатам анализа и обобщения результатов выполненных в рамках проекта экспериментов, а также опубликованных ранее результатов исследования процессов термического разложения, газификации и горения углей система нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных с соответствующими начальными и граничными условиями. Ранее процессы пиролиза и горения твердых топлив с использованием таких сложных математических моделей не исследовались. При постановке задач впервые учтены процессы испарения влаги, содержащейся в пористой структуре угольных и древесных частиц, фильтрация водяных паров через поры к нагреваемой поверхности и их вдув в слои воздуха, прилегающие к поверхности частиц. В отличие от известных моделей горения взвесей угольной пыли, в которых предполагалось однородность полей температур и других характеристик процесса в частице топлива, при постановке задач проекта совокупность физических и химических процессов в одиночной частице топлива рассматривалась в рамках модели, учитывающей изменение основных характеристик процесса не только во времени, но и в пространстве (по частице).

Впервые проведено обоснование физики и химии процессов, протекающих при термическом разложении смесей частиц угля и биомассы с образованием газообразных и твердых продуктов пиролиза. Существенно расширены возможности проведения опытно-конструкторских работ по созданию технологий сжигания углей в смеси с отходами лесопиления с существенным снижением выхода антропогенных оксидов и летучей золы в продуктах сгорания смесей.

### Список литературы:

- [1] IEA. Coal - Fuels & Technologies - IEA 2020.
- [2] Key World Energy Statistics 2020 – Analysis - IEA 2020.
- [3] British Petroleum. Energy Outlook 2020 edition explores the forces shaping the global energy transition out to 2050 and the surrounding that. BP Energy Outlook 2030, Stat Rev London Br Pet 2020:81.
- [4] EUROPA - Implementing the SET Plan 2020 report | SETIS - European Commission n.d.
- [5] Mitchell SR, Harmon ME, O’Connell KEB. Carbon debt and carbon sequestration parity in forest bioenergy production. *GCB Bioenergy* 2012;4:818–27. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2012.01173.x>.
- [6] 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 n.d.
- [7] Ayli UE, Özgirgin E, Tareq M. Solar Chimney Power Plant Performance for Different Seasons under Varying Solar Irradiance and Temperature Distribution. *J Energy Resour Technol Trans ASME* 2021;143. <https://doi.org/10.1115/1.4048533>.
- [8] Gebreslassie MG. Development and Manufacturing of Solar and Wind Energy Technologies in Ethiopia: Challenges and Policy Implications. *Renew Energy* 2020;168:107–18. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.042>.
- [9] Zhao Y, Yang X, Luo Z, Duan C, Song S. Progress in developments of dry coal beneficiation. *Int J Coal Sci Technol* 2014;1:103–12. <https://doi.org/10.1007/s40789-014-0014-5>.
- [10] Laimon M, Mai T, Goh S, Yusaf T. Energy sector development: System dynamics analysis. *Appl Sci* 2020;10:134. <https://doi.org/10.3390/app10010134>.
- [11] Baxter L. Biomass-coal co-combustion: Opportunity for affordable renewable energy. *Fuel*, vol. 84, Elsevier; 2005, p. 1295–302. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.09.023>.
- [12] Roy P, Dias G. Prospects for pyrolysis technologies in the bioenergy sector: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;77:59–69. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.136>.
- [13] Daian G, Ozarska B. Wood waste management practices and strategies to increase sustainability standards in the Australian wooden furniture manufacturing sector. *J Clean Prod* 2009;17:1594–602. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.07.008>.
- [14] Kan T, Strezov V, Evans TJ. Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;57:1126–

40. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.185>.
- [15] Ho SH, Zhang C, Tao F, Zhang C, Chen WH. Microalgal Torrefaction for Solid Biofuel Production. *Trends Biotechnol* 2020;38:1023–33. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2020.02.009>.
- [16] Lim JS, Abdul Manan Z, Wan Alwi SR, Hashim H. A review on utilisation of biomass from rice industry as a source of renewable energy. *Renew Sustain Energy Rev* 2012;16:3084–94. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.051>.
- [17] Kim S, Dale BE. Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues. *Biomass and Bioenergy* 2004;26:361–75. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.08.002>.
- [18] Intasit R, Cheirsilp B, Louhasakul Y, Boonsawang P, Chaiprapat S, Yeesang J. Valorization of palm biomass wastes for biodiesel feedstock and clean solid biofuel through non-sterile repeated solid-state fermentation. *Bioresour Technol* 2020;298:122551. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122551>.
- [19] Schönnenbeck C, Trouvé G, Valente M, Garra P, Brillhac JF. Combustion tests of grape marc in a multi-fuel domestic boiler. *Fuel* 2016;180:324–31. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.04.034>.
- [20] Mediavilla I, Barro R, Borjabad E, Peña D, Fernández MJ. Quality of olive stone as a fuel: Influence of oil content on combustion process. *Renew Energy* 2020;160:374–84. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.001>.
- [21] Skone TJ, Littlefield J, Eckard R, Cooney G, Wallace R, Marriott J. Role of Alternative Energy Sources: Pulverized Coal and Biomass Co-firing Technology Assessment. 2012. <https://doi.org/10.2172/1515248>.
- [22] Liu P, Zhu M, Leong YK, Zhang Y, Zhang Z, Zhang D. An Experimental Study of the Rheological Properties and Stability Characteristics of Biochar-Algae-Water Slurry Fuels. *Energy Procedia*, vol. 105, Elsevier Ltd; 2017, p. 125–30. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.290>.
- [23] Gao W, Zhang M, Wu H. Fuel properties and ageing of bioslurry prepared from glycerol/methanol/bio-oil blend and biochar. *Fuel* 2016;176:72–7. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.02.056>.
- [24] Guo F, Zhong Z. Co-combustion of anthracite coal and wood pellets: Thermodynamic analysis, combustion efficiency, pollutant emissions and ash slagging. *Environ Pollut* 2018;239:21–9. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.004>.

- [25] Kuznetsov G V., Yankovsky SA, Tolokolnikov AA, Zenkov A V., Cherednik I V. Conditions and characteristics of mixed fuel granules ignition based on coal and finely dispersed wood. *Energy* 2020;194:116896. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.116896>.
- [26] Zhao R, Qin J, Chen T, Wang L, Wu J. Experimental study on co-combustion of low rank coal semicoke and oil sludge by TG-FTIR. *Waste Manag* 2020;116:91–9. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.007>.
- [27] Kim JH, Lee YJ, Yu J, Jeon CH. Improvement in Reactivity and Pollutant Emission by Cofiring of Coal and Pretreated Biomass. *Energy and Fuels* 2019;33:4331–9. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b00396>.
- [28] Lauri P, Havlík P, Kindermann G, Forsell N, Böttcher H, Obersteiner M. Woody biomass energy potential in 2050. *Energy Policy* 2014;66:19–31. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.11.033>.
- [29] Czekala W, Bartnikowska S, Dach J, Janczak D, Smurzyńska A, Kozłowski K, et al. The energy value and economic efficiency of solid biofuels produced from digestate and sawdust. *Energy* 2018;159:1118–22. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.090>.
- [30] Tillman DA. Biomass cofiring: The technology, the experience, the combustion consequences. *Biomass and Bioenergy* 2000;19:365–84. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00049-0](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00049-0).
- [31] Al-Mansour F, Zuwała J. An evaluation of biomass co-firing in Europe. *Biomass and Bioenergy* 2010;34:620–9. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.01.004>.
- [32] Agbor E, Zhang X, Kumar A. A review of biomass co-firing in North America. *Renew Sustain Energy Rev* 2014;40:930–43. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.195>.
- [33] Mylläri F, Karjalainen P, Taipale R, Aalto P, Häyrynen A, Rautiainen J, et al. Physical and chemical characteristics of flue-gas particles in a large pulverized fuel-fired power plant boiler during co-combustion of coal and wood pellets. *Combust Flame* 2017;176:554–66. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2016.10.027>.
- [34] Roni MS, Chowdhury S, Mamun S, Marufuzzaman M, Lein W, Johnson S. Biomass co-firing technology with policies, challenges, and opportunities: A global review. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;78:1089–101. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.023>.
- [35] Zuwała J, Lasek J. Co-combustion of low-rank coals with biomass. *Low-rank Coals Power Gener. Fuel Chem. Prod.*, Elsevier Inc.; 2017, p. 125–58. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100895-9.00006-1>.
- [36] Ma L, Yu S, Chen X, Fang Q, Yin C, Zhang C, et al. Combustion interactions in oxy-fuel

- firing of coal blends: An experimental and numerical study. *J Energy Inst* 2021;94:11–21. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2020.10.007>.
- [37] Haykiri-Acma H, Yaman S, Kucukbayrak S. Co-combustion of low rank coal/waste biomass blends using dry air or oxygen. *Appl. Therm. Eng.*, vol. 50, 2013, p. 251–9. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.06.028>.
- [38] Krzywański J, Czakiert T, Muskała W, Nowak W. Modelling of CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions from the oxy-fuel combustion in a circulating fluidized bed. *Fuel Process Technol* 2011;92:590–6. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.11.015>.
- [39] Zuwała J, Lasek J. Co-combustion of low-rank coals with biomass. *Low-rank Coals Power Gener. Fuel Chem. Prod.*, Elsevier Inc.; 2017, p. 125–58. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100895-9.00006-1>.
- [40] Yi Q, Zhao Y, Huang Y, Wei G, Hao Y, Feng J, et al. Life cycle energy-economic-CO<sub>2</sub> emissions evaluation of biomass/coal, with and without CO<sub>2</sub> capture and storage, in a pulverized fuel combustion power plant in the United Kingdom. *Appl Energy* 2018;225:258–72. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.013>.
- [41] Wang Y, Zhou Y. Effect of the Coal Blending Ratio on NO<sub>x</sub> Formation under Multiple Deep Air-Staged Combustion. *Energy and Fuels* 2020;34:853–62. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b02965>.
- [42] Skeen SA, Kumfer BM, Axelbaum RL. Nitric oxide emissions during coal and coal/biomass combustion under air-fired and oxy-fuel conditions. *Energy and Fuels* 2010;24:4144–52. <https://doi.org/10.1021/ef100299n>.
- [43] Coppola A, Esposito A, Montagnaro F, Iuliano M, Scala F, Salatino P. The combined effect of H<sub>2</sub>O and SO<sub>2</sub> on CO<sub>2</sub> uptake and sorbent attrition during fluidised bed calcium looping. *Proc Combust Inst* 2019;37:4379–87. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.08.013>.
- [44] Yao Y, Liu D, Huang W. Influences of igneous intrusions on coal rank, coal quality and adsorption capacity in Hongyang, Handan and Huaibei coalfields, North China. *Int J Coal Geol* 2011;88:135–46. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.09.004>.
- [45] Flores RM. *Coal Composition and Reservoir Characterization*. Coal Coalbed Gas, Elsevier; 2014, p. 235–99. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-396972-9.00005-7>.
- [46] Kuznetsov G V., Yankovskii SA. Conditions and Characteristics in Ignition of Composite Fuels Based on Coal with the Addition of Wood. *Therm Eng* 2019;66:133–7. <https://doi.org/10.1134/S0040601519020010>.



- [47] Kuznetsov GV, Zenkov AV, Tolokolnikov AA, Cherednik IV, Yankovsky SA. Ignition of particles of finely dispersed fuel mixtures based on coal and fine wood. *Energy* 2020;220:119697. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119697>.
- [48] Kuznetsov GV, Yankovskii SA, Tolokol'nikov AA, Cherednik IV. Mechanism of the Suppression of Sulfur Oxides in the Oxidative Thermolysis Products of Coals upon Their Combustion in a Mixture with Dispersed Wood. *Solid Fuel Chem* 2020;54. <https://doi.org/10.3103/S0361521920030076>.
- [49] Kuznetsov G V., Jankovsky SA, Tolokolnikov AA, Zenkov A V. Mechanism of Sulfur and Nitrogen Oxides Suppression in Combustion Products of Mixed Fuels Based on Coal and Wood. *Combust Sci Technol* 2019;191:2071–81. <https://doi.org/10.1080/00102202.2018.1543285>.

Приложение А  
(справочное)

**Foreign sources**

“Ignition of particles of finely dispersed fuel mixtures based on coal and fine wood”

Студент:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
5БМ01	Янковский Станислав Александрович		

Руководитель ВКР

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ	Ларионов К.Б.	к.т.н.		

Консультант – лингвист отделения иностранных языков ШБИП

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Егорова Юлия Ивановна	Кандидат технических наук		

## Introduction

One of the main problems being solved by the international community in recent years is the pollution of the Earth's atmosphere with anthropogenic gases. The main suppliers of such gases are thermal power plants that burn coal. The energy industry cannot refuse this fuel, since coal-fired thermal power plants generate more than 35% of electricity (in China – more than 60%) [1]. Recently, numerous attempts have been made [2–8] to use various types of mixed (two, three or more component) coal fuels in thermal power engineering. The purpose of the second, third and more components in the fuel mixture is to reduce emissions of sulfur and nitrogen oxides, as well as fly ash. The greatest attention is paid to the research of coal-water fuels [3], organic coal-water fuels (for example [4, 5]), and mixtures of coal with biomass [6-8]. Each of these fuels, providing a significant reduction of anthropogenic emissions in combustion products, has smaller (for obvious reasons) calorific value ( $Q$ ) compared to homogeneous coal. Comparison of all the above mixed fuel options [2-8] with each other shows noticeable advantage in the value of  $Q$  of a mixture of coal with wood biomass.

Therefore, one of the most promising options for reducing anthropogenic emissions during coal combustion in steam and hot water boilers furnaces is application of coal and biomass based fuels (mainly waste from lumbering and wood processing). Until 2018, attempts were made to burn such fuels at more than 250 power plants [9 - 14]. However, it was possible to develop and implement empirically effective technologies for burning mixtures of coal and biomass only at 17 stations located in the countries that were technologically and scientifically developed (USA, Germany, Finland, China, Sweden) [9 - 14].

Analysis of the current state of the problem according to the data in [15 - 26] allows distinguishing three main methods of composite fuels combustion based on coal and biomass, for which industrial tests were conducted: direct, indirect, parallel co-combustion [15 - 26].

1. Direct combustion of mixed fuels. This method of combustion is the most expensive, since the combustion process is carried out with parallel burners, and each component can be supplied separately or by spraying a pre-prepared mixture of coal and biomass. According to [27-28], addition of 3% biomass allows operating an existing power plant without major capital investments in equipment reconstruction. Operating experience in this way was obtained in Austria (St. Andrea) at a 124 MW power plant [27].

2. Indirect combustion of composite fuels based on coal and biomass [28] is conducted with additional fuel preparation: a gasifier is installed, in which the thermal decomposition of composite fuel produces synthesis gas (subsequently burned in a gas-fired boiler). This method allows to

achieve a high degree of thermal decomposition of the fuel and to conduct maximum flue gas cleaning [28]. Tests were performed at a power unit in Finland. The installed capacity of the first unit is 137 MW (3% of wood), the second - 167 MW (15% of wood) [28].

3. Parallel fuel combustion [29]. Supply of mixed fuel components to the furnace is carried out in parallel: coal and biomass are fed separately. Combustion process is performed in fluidized bed in a single complex. An example of such combustion method of coal together with wood chips and straw is in Denmark [29] at the thermal power plant in Ensted (660 MW power unit).

But so far there are few such examples. The reason for the small amounts of application of sawmill and woodworking waste in the energy sector is, obviously, that theoretical and physical foundations of the processes of floating particles co-ignition of fine coal and dispersed wood have not been developed (experimental data on the patterns of ignition of a mixture of these two substances; chemical reactions between products of joint thermal decomposition of a mixture of coal and wood; theoretical consequences, providing the possibility for developing technologies of effective combustion of such mixed fuels). One of the most important tasks for implementation of co-combustion technologies of coal with biomass is determination of conditions and characteristics of particles ignition of such mixtures. To date, ignition delay times for single particles of coal [30] and wood [30] under conditions of their placement on fixed holders were experimentally determined. Mathematical models of heat and mass transfer processes and physicochemical transformations during ignition of single particles of coal [30] and wood [30] under conditions of intense convective radiation heating were developed. However, a single particle of wood is almost always surrounded by a large set of coal particles in a real furnace environment of steam and hot water boilers after fine solid fuels atomization (including wood-coal). This coal particles, to a greater or lesser extent (depending on their position), reduce the intensities of both convective and radiation heating of any single particle, which, we can say, is floating in the furnace space at some low speed. Therefore, results of experimental determination of conditions and characteristics of ignition of coal or wood particles located on fixed holders (for example, [30]) are not sufficient for a reasonable assumption of the ignition delay times of particles floating in the furnace space. The aim of the work is to experimentally establish ignition characteristics of floating particles of mixture of two typical energy coals and wood (pine) under conditions of intense radiation heating, corresponding to the combustion chambers of steam and hot water boilers. The objective of the study is to substantiate the effectiveness of application of sawmill and woodworking waste (in Russia, for example, they produce more than 30 million cubic meters per year) in large and small power engineering, with the aim of suppressing nitrogen and sulfur oxides during interaction of intermediate reaction products

of coal and wood pyrolysis [31,32]. It is also important to evaluate the possibility of using ignition delay times established for a single fuel particle for determination of such characteristics for a large number of particles.

### **Methods of materials preparation and experimental research**

The studies were carried out in a temperature-controlled cylindrical combustion chamber with a volume of  $5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$  (characteristic dimensions: diameter 0.032 m, height 0.06 m), which provides heating of the medium (air) to a temperature of  $1200^\circ\text{C}$ .

T grade (lean) coal of Alardinskoye deposit and D grade (long flame) coal of Listvyazhnoye deposit (particles less than 80 microns in size) and sawmill waste (pine sawdust, initial particle size of not more than  $200 \mu\text{m}$ ) were used as initial components for experimental studies. It should be noted that at large thermal power plants, industrial experiments on combustion of mixture of coal and biomass were carried out with a variety of biomass (corn cobs [33], tangerine peel [34], rice husk [35], waste from olive processing [36], cacti [37] and many others), but the most promising for most regions of the planet is wood biomass due to the fact that sawmill and wood processing wastes in their annual growth amounts [38] are many times larger than any other type of biomass that is promising for heat power engineering. Therefore, sawdust of pine (commercial wood) was studied in the experiments, calorific value of which is quite high compared to other types of wood and amounts of stored sawmill waste are huge in many states [38]. An important advantage of pine sawdust over all other possible energy sources based on wood biomass is that there is no need for special crushing, sawing or splitting of such wood in contrast to hardwood. Due to the fact that, for example, poplar is not commercial wood, a special preparation process for combustion is necessary for its application as the second component of wood-coal fuel, the main part of which is dispersion as a result of successive rather energy-intensive technological operations.

The pine sawdust used in the experiments was waste from sawing wood at LLC Dzerzhinsky LPK, Tomsk.

All sawdust was from the same sawmill shift (identical in age and location of timber harvesting). Chips and other large sawmilling elements were dried during the day in a room with normal room temperature after preliminary cleaning from bark ( $20^\circ\text{C} - 22^\circ\text{C}$ ) to remove excess moisture. The latter can be adsorbed by wood when storing sawmill waste outdoors at any time of the year. After drying, the sawdust was sieved, and pine wood particles with a characteristic size of no more than  $250 \mu\text{m}$  were used in the experiments.

Before the experiments, the wood was stored in a room with a temperature of 20-22 °C, standard humidity (no more than 75%) and at a pressure of 101.4 kPa. No special processing of wood (for example, mechanical activation) was carried out.

Elemental compositions and calorific value of the researched coal and wood were determined using Euro EA 3000 analyzer of elemental composition (for combustible mass). The results are presented in table 1.

Determination of technical characteristics of the researched mixed fuels (calorific value, ash content, humidity and volatile yield) was conducted in accordance with the procedures described in ISO 1928-2009 and ISO 589-81 after preliminary preparation of both components. The experiments were performed at different concentrations of wood and coal in the mixture. The compositions are presented in table 1. The samples weighing 100 g each were placed in a galvanized drum of Pulverisette 6 planetary mill with spherical (metal – steel) grinding bodies with a diameter of 5 mm in 1:1 mass ratio before elemental analysis. The mixing process was conducted at a drum rotation speed of 500 rpm for seven minutes [26]. This time was sufficient to ensure high uniformity of the mixture.

Table 1. Results of the analysis of elemental composition and other characteristics of the initial fuel components (calorific value, humidity, ash content and yield of volatile substances of the studied fuel mixtures)

Fuel (wood/coal_grade), %	Calorific value, Q, MJ/kg	Technical analysis, %			Elemental analysis, % on <i>daf</i>			
		W <sup>a</sup>	A <sup>d</sup>	V <sup>daf</sup>	C	H	N	O+S <sub>org</sub>
100 / 0	21.73	5.35	0.29	80.25	53.3	6.9	-	39.8
0 / 100 D	17.94	5.83	15.76	37.41	65.7	4.4	1.8	28.1
10 / 90 D	24.92	5.42	14.00	14.55	63.2	4.5	1.8	30.5
25 / 75 D	24.31	5.23	11.91	38.89	60.6	4.7	1.5	33.2
50 / 50 D	23.84	5.35	10.44	40.96	56.2	5.2	1	37.6
0 / 100 T	25.72	5.52	18.37	24.93	84.3	6.4	2.9	6.4
10 / 90 T	25.60	5.42	14.24	26.46	53.5	4.1	1.4	40.9
25 / 75 T	25.22	5.34	13.65	28.33	52.2	4.4	1.2	42.2
50 / 50 T	24.79	5.41	11.08	39.95	51.0	4.9	0.8	43.3

It can be seen from table 1 that with increase in the concentration of wood in the mixture to 50%, calorific value of wood-coal fuel decreases by less than 9% with respect to homogeneous coal of D grade and less than 3.6% with respect to T grade coal.

The research results presented in table 1 illustrate decrease in the ash content of the studied fuels with increase in the concentration of wood. Increase in the proportion of wood in the mixture to 50% leads to a decrease in ash content to 10.44% (ash content is 15.76% for D grade coal) and to 11.08% (ash content is 18.37% for T grade coal). The ash values of the fuel mixtures (table 1)

show that these characteristics are not additive with respect to the ash content of the respective coal and wood. If the processes of thermal decomposition of crushed coal and wood occurred independently of one another, the ash yield would be significantly less (8.03% for composite fuel based on D grade coal and 9.34% for fuel based on T grade coal). It should also be noted that comparison of theoretical and experimentally established ash values of mixtures and coals shows that their differences are significantly larger than the errors of both the recording means used to determine the ash content (systematic errors) and random errors caused by an objective reason - initial proportion of organic and mineral components may vary in small weight samples.

It can be concluded by the experimental results that the value of formed ash is more than theoretical value during thermal decomposition and subsequent combustion of composite fuels, if we consider combustion of coal and wood independent. Based on the obtained results, it is possible to formulate a hypothesis that combustion processes of a mixture of crushed coal and wood interact with each other to form solid compounds (most likely, salts or metal oxides). It can be noted that the established effect on fuel mixtures based on T grade coal is more pronounced than on fuels based on D grade coal. It is important that influence of secondary (after pyrolysis of the basic material) chemical reactions between gaseous and solid products of thermal decomposition of the initial coking material during heating to high temperatures on the temperature field of the latter was considered in [27]. It was established in [27] that high-temperature heating is necessary for these reactions and their rate depends exponentially on temperature. Sufficiently high temperatures are achieved during fuels combustion in the furnace of TPPs boiler units, therefore probability of secondary reactions (after pyrolysis) between the products of the latter is very high. The difference between the process of thermal decomposition of mixed fuels based on coal and wood and pyrolysis of coking materials [27] is that gaseous and solid products of thermal decomposition of two different substances can react with each other, and new solid materials (metal salts) are formed as a result of this thermal interaction. The latter will fall into the slag and be removed together with it under conditions of furnace processes. It is likely that intensity of such products formation will be different for different coal due to specific composition of each coal (component composition of mineral part).

Analysis of the elemental composition of the ash of the studied wood and coal was performed to substantiate the hypothesis of non-additivity of the obtained ash residue of fuel mixtures after their thermal decomposition at a medium temperature of 800 °C. The analysis was performed on iCAP Duo device, Thermo Scientific. This optical emission spectrometer with inductively coupled plasma allows for qualitative, semi-quantitative and quantitative elemental analysis. The results of the study are presented in Table 2.

Table 2. Elemental composition of the ash of the studied wood and coal.

S No.	Element	Wood, %	T coal, %	D coal, %
1	Al	3.85	21.97	27.11
2	Ba	6.33	0.8	0.48
3	Ca	48.78	18.46	7.51
4	Co	-	0.02	0.02
5	Cr	3.14	0.03	0.03
6	Cu	0.03	0.16	0.08
7	Fe	3.43	9.82	5.35
8	K	18.93	515	2.89
9	La	0.02	0.01	0.02
10	Li	-	0.18	0.01
11	Mg	9.2	0.97	1.78
12	Mn	2.27	0.13	0.04
13	Na	0.42	1.05	2.46
14	Nb	-	0.01	-
15	Ni	0.57	0.14	0.04
16	P	0.7	0.27	-
17	Pb	-	0.04	0.74
18	Sc	-	-	0.01
19	Si	1.55	38.02	31.48
20	Sr	0.58	0.52	0.22
21	Ti	0.05	1.88	1.5
22	V	-	0.04	0.04
23	Y	-	0.01	0.02
24	Zn	0.15	0.15	18.07
25	Zr	-	0.17	0.1

Table 2 illustrates the content of metals which oxides react with sulfuric acid formed as a result of the interaction of sulfur oxides with water vapor during high-temperature decomposition of coals. Calcium and aluminum sulfates are formed in the ash of such mixed fuels as a result of the reaction of this acid with metal oxides.

To confirm the hypothesis of sulfur oxides sequestering as a result of the formation of calcium and aluminum sulfates in the ash of fuel mixtures based on D, T coal and wood biomass (pine sawdust) under high-temperature thermal decomposition, an x-ray phase analysis of the ash of the main components and the ash of mixed fuels based on these coals was performed. XRD-7000S x-ray diffractometer with a vertical high-precision goniometer was used to determine concentrations of calcium and aluminum sulfates. Experiments were conducted for each studied mixture at least five times. Results of experimental studies are shown in Figures 1, 2, 3 and 4.



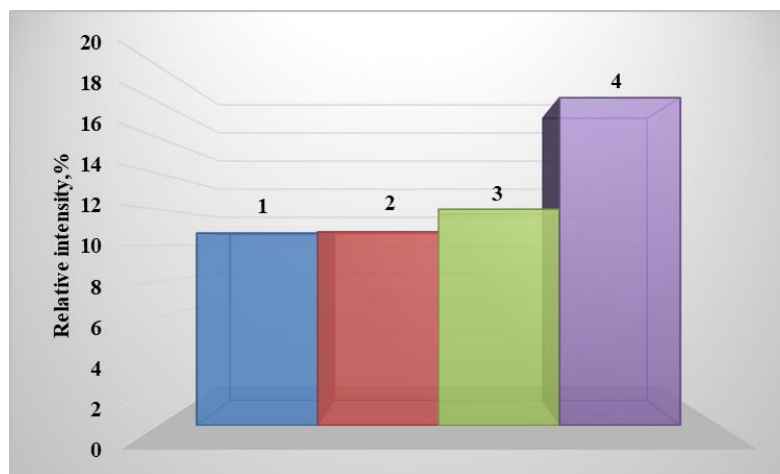


Figure 1. Content of calcium sulfate (with different proportions of wood in the mixture) in the ash of D grade coal and wood mixtures during pyrolysis in an inert environment: 1. Coal - 100 %; 2. Coal - 90 % - Wood - 10 %; 3. Coal - 75 % - Wood - 25 %; 4. Coal - 50 % - Wood - 50 %, at T=800 °C.

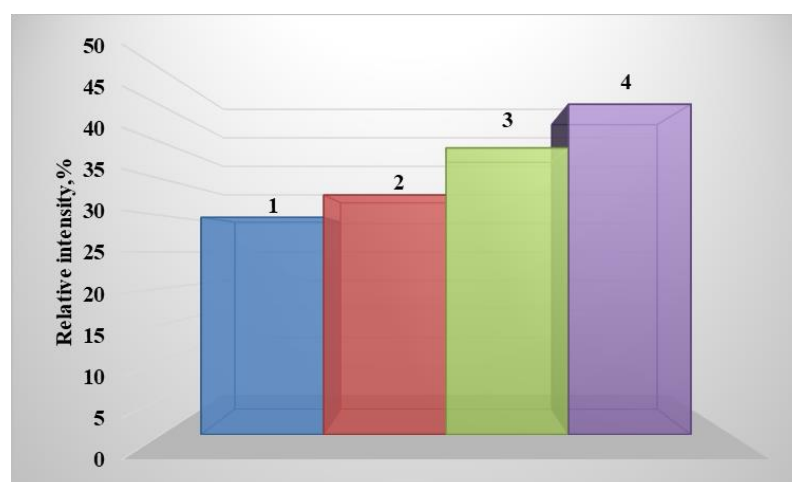


Figure 2. Content of aluminium sulfate (with different proportions of wood in the mixture) in the ash of D grade coal and wood mixtures during pyrolysis in an inert environment: 1. Coal - 100 %; 2. Coal - 90 % - Wood - 10 %; 3. Coal - 75 % - Wood - 25 %; 4. Coal - 50 % - Wood - 50 %, at T=800 °C.

Analysis of calcium and aluminium sulphates in the mixtures ash leads to the conclusion that increase in the proportion of wood components in the mixture with D grade coal to 50 % leads to an increase in calcium (by 41.3%) and aluminium (by 34.2 %) sulphates in the mixture ash. The research results confirm the hypothesis of a non-additive dependence of the ash content of mixed fuels based on coal and dispersed wood on the concentration of components.

Similar experiments were performed with mixtures of T grade coal and wood (Fig. 3, 4).

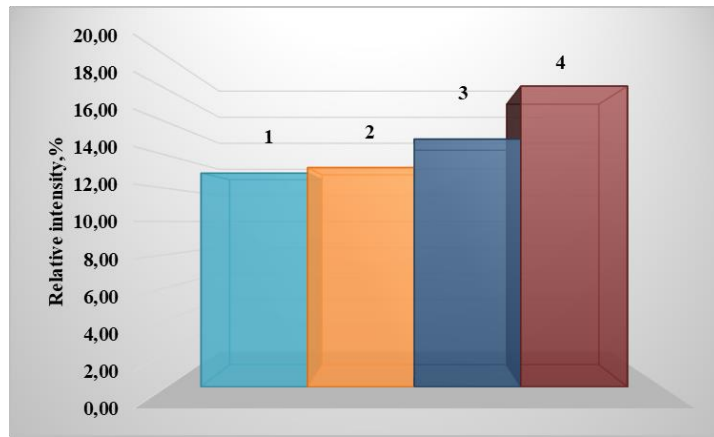


Figure 3. Content of calcium sulfate (with different proportions of wood in the mixture) in the ash of T grade coal and wood mixtures during pyrolysis in an inert environment: 1. Coal - 100 %; 2. Coal - 90 % - Wood - 10 %; 3. Coal - 75 % - Wood - 25 %; 4. Coal - 50 % - Wood - 50 %, at T=800 °C.

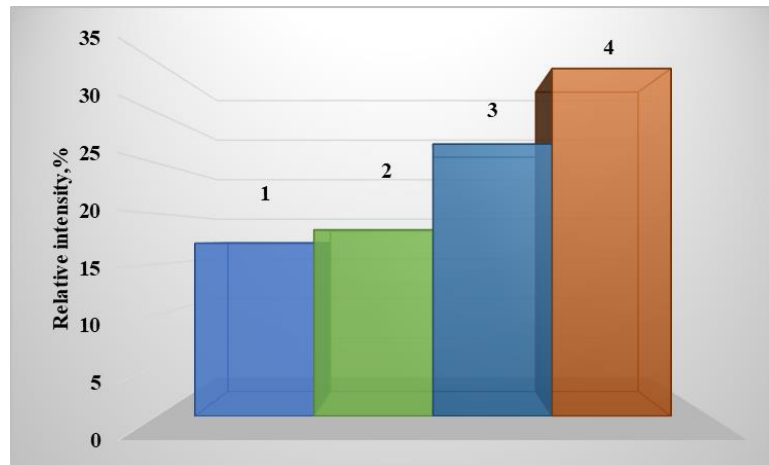


Figure 4. Content of aluminium sulfate (with different proportions of wood in the mixture) in the ash of T grade coal and wood mixtures during pyrolysis in an inert environment: 1. Coal - 100 %; 2. Coal - 90 % - Wood - 10 %; 3. Coal - 75 % - Wood - 25 %; 4. Coal - 50 % - Wood - 50 %, at T=800 °C.

Analysis of Fig. 3, 4 also allows to establish a significant increase in the concentrations of calcium and aluminum sulfates in the ash of mixed fuels based on T grade coal and sawmill waste. Proportion of calcium sulfate in the ash increased by 28.9 %, and aluminum sulfate by 50.3 % with increase in the concentration of wood components in a mixture with T grade coal to 50%.

The obtained results allow to substantiate the hypothesis formulated above about the sequestration of sulfur oxides during the joint thermal decomposition of T and T grade coals with sawmill waste. This is the reason for the non-additive content of the main components of the ash residue.

The most important characteristic, as noted above, illustrating efficiency of any mixed fuel combustion in furnaces of steam and hot water boilers, is ignition delay time [39–48].

Therefore, the main objective of the research was to determine ignition delay times of the studied fuel mixtures on a special experimental bench, providing heat transfer conditions of high-temperature medium with fuel particles corresponding to the conditions of the combustion chamber of steam and hot water boilers. The main elements of the stand are: combustion chamber (cylindrical shape, with maximum operation temperature of 1280°C) with digital thermostat (measurement error  $\pm 1^\circ\text{C}$ ); high-speed video camera with image format of 1024×1024 pixels, frame rate - up to 10<sup>5</sup> per second. Manual fuel supply system with a special dispenser was used.

Experimental installation and its schematic diagram are presented in Figures 5, 6.



Figure 5. Experimental setup for determining ignition delay times of floating particles of mixed fuels

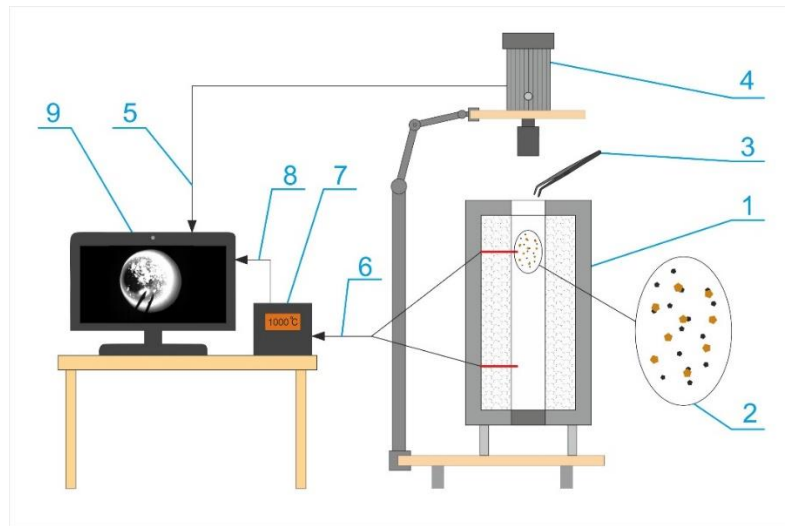


Figure 6. Schematic diagram of the installation for determining ignition delay times of floating particles of mixed fuels

1 – temperature-controlled combustion chamber; 2 - floating particles located in the combustion chamber; 3 – dispenser of fuel particles; 4 - high-speed video camera; 5 – connection line between monoblock and high-speed video camera; 6 - connection line between thermocouples and signal converter; 7 - thermocouples signal converter; 8 - connection line between thermocouples signal converter and monoblock; 9 – monoblock.

Methodology for studying the processes of composite fuels ignition based on fine coals of D, T grades and grounded sawmill waste (pine sawdust) involved several stages. Required air temperature was set (from 600°C to 1200°C) in a vertically arranged cylindrical chamber. The temperature field in the thermoregulated chamber was continuously controlled by two thermocouples (platinorodium-platinum thermoelectric converters, operating temperature range 0-1350°C) throughout the experiment with a methodological error of no more than  $\pm 1\%$ . All experimental studies were performed in an oxidation environment (air). The combustion chamber was not blown because velocity of coal and wood particles slightly differs from the flow rate at the points corresponding to the position of fuel particles in a real furnace environment. The smaller the characteristic particle size (and, consequently, their mass), the smaller the difference between the velocities of the fuel particles and the gas flow (a mixture of air and combustion products). Small particles do not deviate from the current line of their carrier medium. Therefore, the heating of fuel particles is carried out mainly as a result of radiation exposure. Convective heat fluxes to the surface of fuel particles in the furnace medium are negligible compared to radiant ones. Therefore, in experiments, stationary air, but heated to high temperatures, was used as a heating source of fuel particles. The fuel sample was placed above the combustion chamber at a distance of 1-2 centimeters

on a special flat holder. The calculated amount of fuel particles was about 100 pcs. The fuel sample was weighed on ViBRA HT 224rce analytical balance (measurement discreteness of  $10^{-4}$  g) before each experiment. Its mass was  $5 \pm 0.001$  mg. The resulting mixture of fuel particles was discharged into the furnace at a certain point in time. This moment was the starting point of the ignition time. Video recording began simultaneously with the introduction of the fuel sample into the combustion chamber. Ignition delay time was considered as the time from the moment of first particles to enter the furnace until the glow appeared (of first particle or group of particles), corresponding to the beginning of the combustion process. Experiments for each fuel mixture were carried out at least five times, the results of the experiments showed good repeatability, systematic errors were less than 2 %, random errors were less than 3.5 %. Typical video frames of fuel mixture particles based on the two studied coals at the moment of ignition are shown in figures 7, 8. Glowing fuel particles on the video frames are recorded at the moment of ignition.

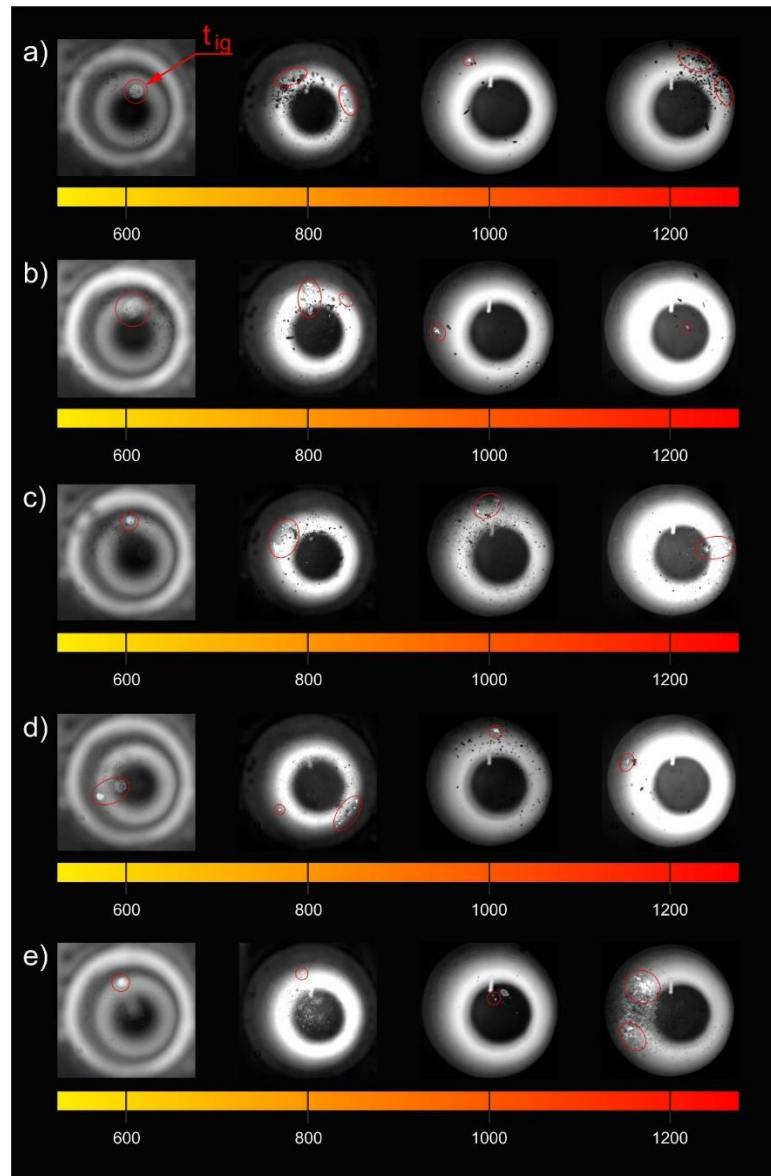


Figure 7. Video frames of particles of fuel mixtures at the time of ignition ( $t_{ig}$ ) at ambient temperatures of 600°C, 800°C, 1000°C, 1200°C.

a) homogeneous D grade coal, b) fuel mixture with a wood content of 10%, c) fuel mixture with a wood content of 25%, d) fuel mixture with a wood content of 50%, e) homogeneous wood

In the frames, particles of the group (from 100 to 150 pcs.) are seen differently because the focus of the lens at various temperatures was adjusted to the distance at which ignition of most of the particles discharged into the furnace occurred in the given temperature mode.

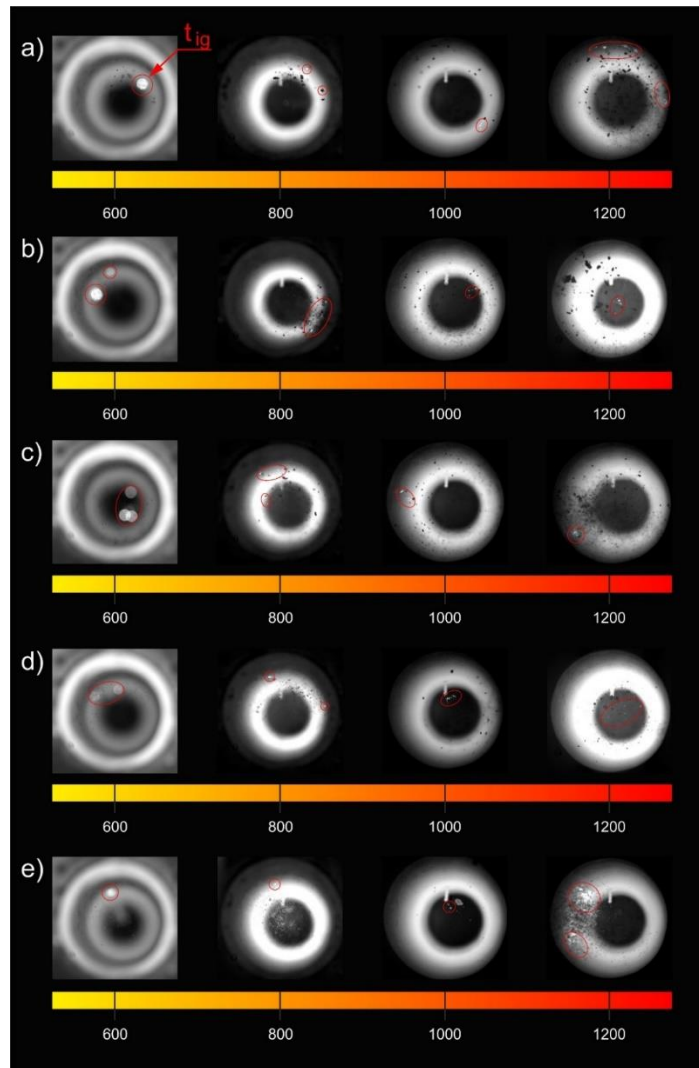


Figure 8. Video frames of particles of fuel mixtures at the time of ignition ( $t_{ig}$ ) at ambient temperatures of 600°C, 800°C, 1000°C, 1200°C.

a) homogeneous T grade coal, b) fuel mixture with a wood content of 10%, c) fuel mixture with a wood content of 25%, d) fuel mixture with a wood content of 50%, e) homogeneous wood

### Results and discussion

Experimental studies were conducted in the temperature range (of external to the fuel mixture) environment from 600°C to 1200°C. Figures 5, 6 show the dependences of ignition delay times of the fuel mixture particles based on the two studied coals (D and T grades) on the concentration of biomass (wood).

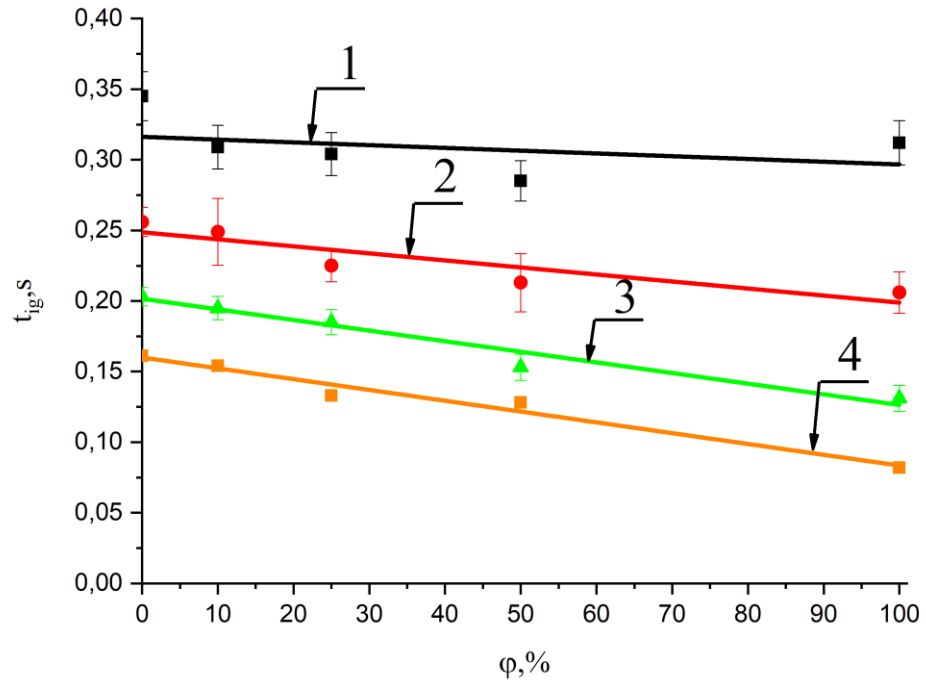


Figure 9. Dependence of the ignition delay time of the floating particles of mixed fuels based on D grade coal on the concentration of wood component at furnace temperatures: 1 - 600°C; 2 - 800°C; 3 - 1000°C; 4 - 1200°C

Analysis of the dependencies of Figure 5 shows a slight effect of the proportion of the wood component on ignition delay times of the floating particles of mixed fuels based on D grade coal and biomass.

Dependencies shown in Fig. 9 can be approximated with small errors by the expressions:

Expression 1

$$t_{ig} = -0,0002\varphi + 0,3191;$$

Expression 2

$$t_{ig} = -0,0005\varphi + 0,2481;$$

Expression 3

$$t_{ig} = -0,0007\varphi + 0,201;$$

Expression 4

$$t_{ig} = -0,0008\varphi + 0,1599.$$

It should be noted that ignition of mixed fuel particles occurs unstable (it can either happen during the movement along the cylindrical channel of 0.6 m high or not) when the air temperature in the combustion chamber is lower than 600°C. Decrease in the ignition delay time for mixed fuel



particles based on D grade coal with an increase in the proportion of wood component to 50% was 17.1% (from 0.35 s to 0.29 s) at  $T = 800^{\circ}\text{C}$ ; and at  $T = 1200^{\circ}\text{C}$  it was 18.8% (from 0.16 s to 0.13 s). The results obtained make it possible to conclude that wood waste of sawmill has a negligible effect on the ignition delay time of the fuel mixture based on dispersed coal and wood biomass as an additive to coal. In general, deviations of the  $t_{ig}$  values are small. At  $t_{ig} < 0.35$  s, the effect of wood on the process of the mixture ignition can be considered insignificant, since absolute values of  $t_{ig}$  are in the range of  $0.1\text{ s} \leq t_{ig} \leq 0.35$  s for all values of  $(\varphi)$  and temperature.

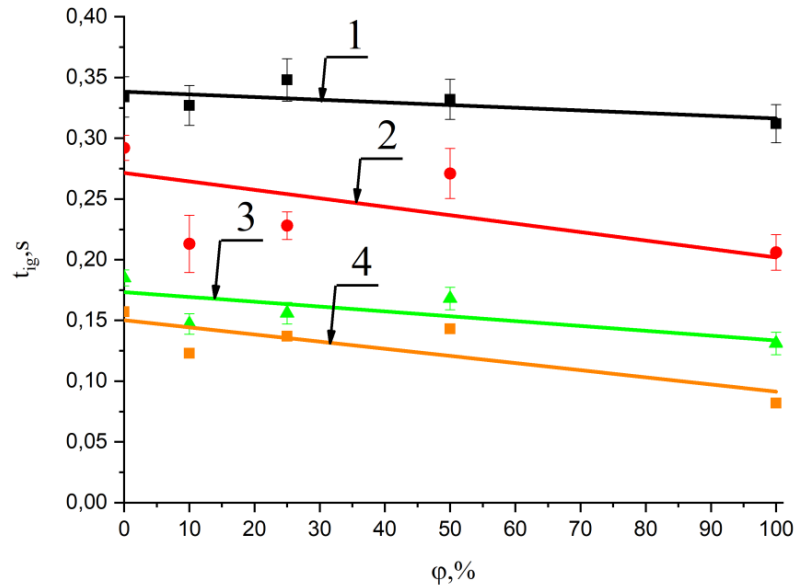


Figure 10. The change of ignition delay time of mixed fuels particles based on T grade coal with an increase of wood component concentration at furnace temperatures: 1 -  $600^{\circ}\text{C}$ ; 2 -  $800^{\circ}\text{C}$ ; 3 -  $1000^{\circ}\text{C}$ ; 4 -  $1200^{\circ}\text{C}$

It is worth noting that dependences of  $t_{ig}$  on  $(\varphi)$  for floating particles of fuel mixtures based on two different fossil fuels in the entire range of variation of  $\varphi$  are almost identical (within the confidence intervals of  $t_{ig}$ ).

Dependences shown in Fig. 10 can be approximated with small errors by the expressions:

Expression 1

$$t_{ig} = -0,0002\varphi + 0,3387;$$

Expression 2

$$t_{ig} = -0,0004\varphi + 0,2582;$$

Expression 3

$$t_{ig} = -0,0004\varphi + 0,1704;$$

Expression 4

$$t_{ig} = -0,0006\varphi + 0,1501.$$

It can be concluded that conditions and characteristics of ignition of such fuel mixtures based on two different fossil fuels at any concentrations of the wood component (sawmill waste) are determined mainly by the properties of the fuels. Such regularities are most likely due to the fact that particles of fine coal (characteristic size of not more than 80 microns) are heated to temperatures corresponding to the beginning of the process of thermal decomposition of the organic part much faster than wood particles. The latter were used in experiments in their natural state after storage at room temperature of 20°C for several days. Heating times of wood particles are almost five times longer than the characteristic heating times of coal particles with the characteristic sizes of individual sawdust particles not exceeding 200 microns. Therefore, ignition delay time of coal particles is less even with the smallest particle size ratio of these two fuels. This size ratio is achieved if the coal is grinded to the dispersed composition for coal-fired TPPs and the sawdust remaining after sawing is not further milled. In this case, energy consumption for preparing a unit mass of the wood-coal mixture will be even lower than for homogeneous coal. The cost of wood-coal mixture preparation for combustion will be 10% lower at 1:9 wood/coal mass ratio compared to homogeneous coal. It can also be concluded that ignition delay times of all investigated mixtures of coal and wood particles do not exceed 0.35 s. It should be emphasized that such  $t_{ig}$  values with a fairly typical fractional composition of the wood-coal mixture are acceptable for any fuel combustion technologies and furnace designs of steam and hot water boilers.

Figures 11, 12 and 13 show the experimental results in the form of dependence of  $t_{ig}$  (T) on the ambient temperature (temperature in the combustion chamber) for bituminous coals of T and D grade, wood in the form of dust, and mixed fuels based on them. Left boundary by temperature (T = 600°C) corresponds to the limiting conditions for stable ignition of suspended particles of mixed fuels.

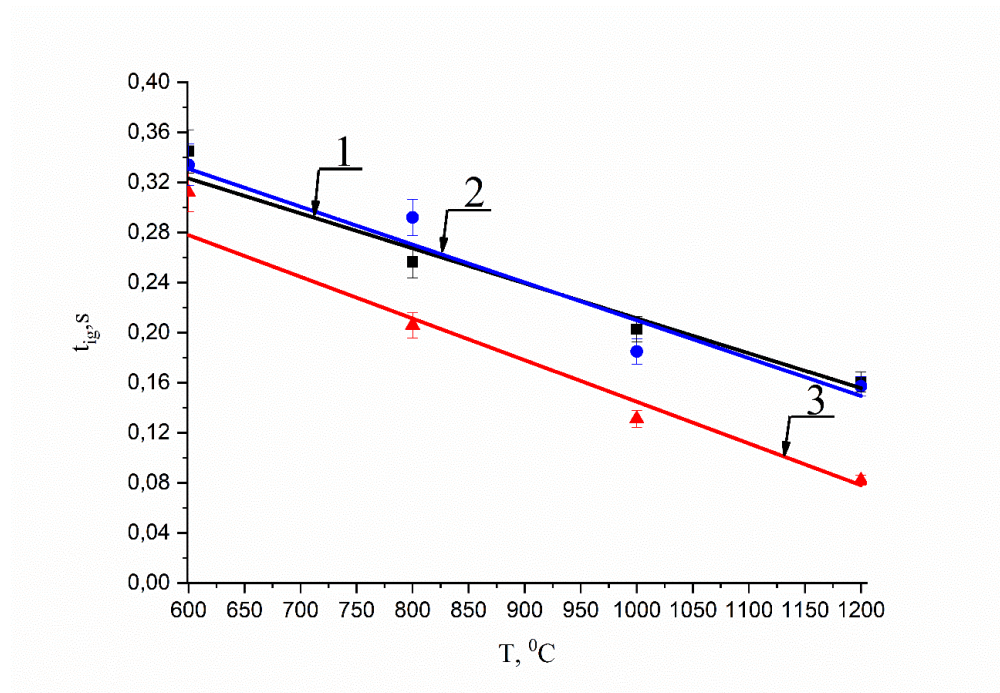


Figure 11. Dependences of the ignition delay time of the main fuel components on temperature: 1 – D grade coal; 2 – T grade coal; 3 - wood

Analysis of Figure 11 allows to conclude that, although ignition of homogeneous coals of D and T grades in hot air is carried out with longer ignition delay times compared to wood even at high temperatures in the combustion chamber, these differences are small in absolute values (do not exceed 0.1 s). Therefore, difference in ignition delay time of coal and wood particles at the investigated (important for practical application) mixture composition can be ignored for development of technologies for wood-coal mixtures combustion in the furnaces of steam and hot water boilers for the range of ambient temperature that is possible in real practice.

Dependences shown in Fig. 11 can be approximated with small errors by the expressions:

Expression 1

$$t_{ig} = -0,0003\varphi + 0,5291;$$

Expression 2

$$t_{ig} = -0,0003\varphi + 0,5138;$$

Expression 3

$$t_{ig} = -0,0004\varphi + 0,527.$$

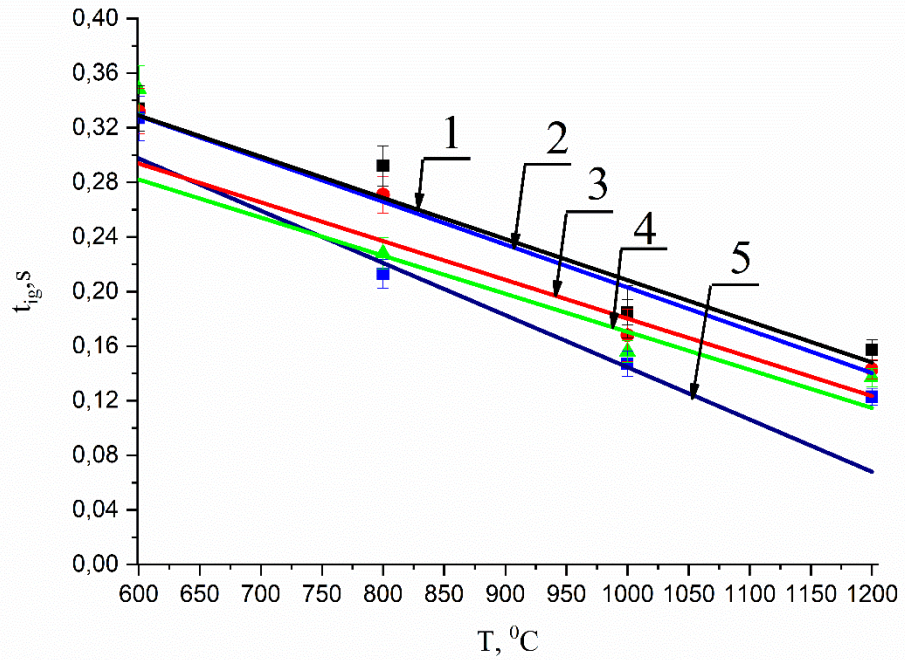


Figure 12. Dependences of the ignition delay times of floating particles of coal, wood and fuel mixtures based on D grade coal on temperature at various concentrations of the wood component: 1 - homogeneous coal; 2 - mixture with a coal content of 90%; 3 - mixture with a coal content of 75%; 4 - mixture with a coal content of 50%; 5 - homogeneous wood

As can be seen in Figure 12, at a temperature of 1200°C, the  $t_z$  values of floating particles of all fuel mixtures slightly differ from the ignition delay times of homogeneous wood and are 1 - 0.161 s, 2 - 0.154 s, 3 - 0.133 s, 4 - 0.128 s, 5 - 0.082 s.

Dependences shown in Fig. 12 can be approximated with small errors by the expressions:

Expression 1

$$t_{ig} = -0,0003\varphi + 0,5138;$$

Expression 2

$$t_{ig} = -0,0003\varphi + 0,4603;$$

Expression 3

$$t_{ig} = -0,0003\varphi + 0,4606;$$

Expression 4

$$t_{ig} = -0,0003\varphi + 0,4337;$$

Expression 5

$$t_{ig} = -0,0004\varphi + 0,527.$$

The deviations established in the experiments on the  $t_{ig}$  values of coal, wood, and mixtures do not exceed 0.1 s, which slightly exceeds the error for determination of this characteristic of the ignition process.

Similar results were obtained for floating particles of the fuel mixture based on T grade coal (Fig. 13).

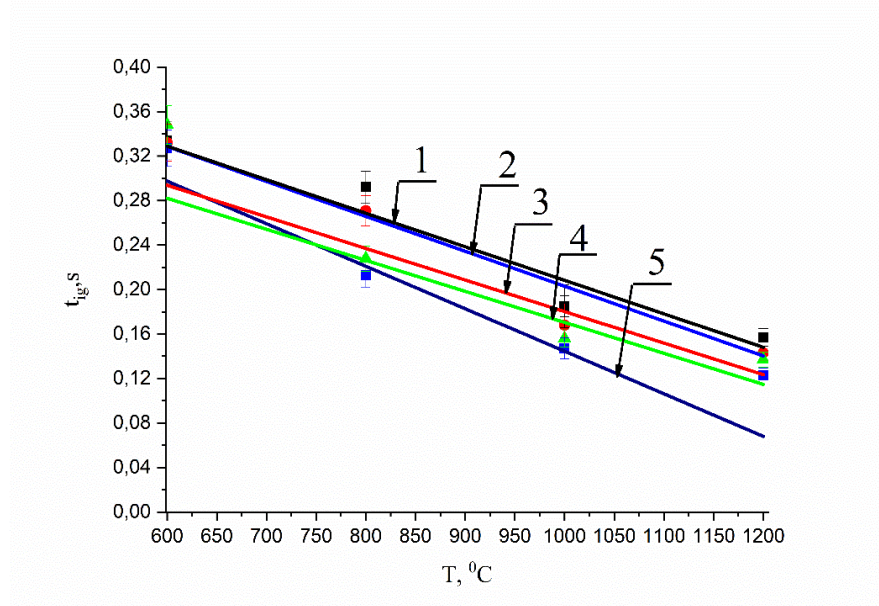


Figure 13. Dependences of the ignition delay times of floating particles of coal, wood and fuel mixtures based on T grade coal on temperature at various concentrations of the wood component: 1 - homogeneous coal; 2 - mixture with a coal content of 90%; 3 - mixture with a coal content of 75%; 4 - mixture with a coal content of 50%; 5 - homogeneous wood

Analysis of Figure 13 allows estimating the effect of temperature on the ignition delay times of floating particles of mixed fuels in a pulverized state based on T grade coal and sawmill waste.

Dependences shown in Fig. 12 can be approximated with small errors by the expressions:

Expression 1

$$t_{ig} = -0,0003\varphi + 0,5291;$$

Expression 2

$$t_{ig} = -0,0003\varphi + 0,5300;$$

Expression 3

$$t_{ig} = -0,0004\varphi + 0,5345;$$

Expression 4

$$t_{ig} = -0,0003\varphi + 0,5076;$$

Expression 5

$$t_{ig} = -0,0004\varphi + 0,527.$$

Increase of the temperature in the combustion chamber to 1200°C leads to a decrease of the ignition delay time to 0.157 s for homogeneous coal and to 0.123 s for mixed fuel with a component ratio of 50 % / 50 %.

The main result of the conducted experimental studies is substantiation of the possibility of wood-coal mixtures combustion in the furnaces of steam and hot water boilers without significant changes in the technology of fuel preparation, its supply to the furnace, and combustion. Introduction of pine sawdust into coal dust changes the ignition delay times of the mixture by no more than 0.1 s compared to homogeneous coal. Such deviations of the ignition delay times do not have any significant effect on the fuel combustion process. It should be noted that introduction of wood additives [49] reduces not only concentration of sulfur and nitrogen oxides in flue gases, but also the cost of a unit of energy produced by a thermal power plant (sawmill waste is not a product in an overwhelming majority of cases, and many woodworking enterprises are ready to supply them without payment).

The obtained results reflect the possibility of application of mixed fuels based on crushed coal and wood for joint in-line combustion in coal-fired power plants boilers, as well as hot water boilers, not only without significant changes in fuel preparation technologies, but also without additional energy costs. Application of wood component in the mixed fuel significantly reduces the cost of furnace space pre-heating with a slight decrease in the energy characteristics of the mixed fuels in relation to homogeneous coals.

The results of the performed experimental studies also provide grounds for explaining the reasons why it was not possible to implement the technology of co-combustion of crushed coals and biomass at many thermal power plants even with a fraction of the latter in the mixture of less than 15%.

Most likely, the negative results of attempts at co-firing coal and biomass are due to insufficient grinding of the latter. In this case, large fragments, for example, of straw or waste from sunflower processing, could simply not be specially crushed before entering the furnace. As a result, such fragments, for example, of the same straw, which, moreover, for reasons of fire safety could not pass the drying stage, did not start to burn for a long time (seconds, perhaps even tens of seconds at high initial humidity). The presence of such non-combustible biomass particles in the combustion products of coal for a certain period of time, comparable to the characteristic combustion time of coal as a whole, inevitably leads not only to a decrease in the gas temperature, but also to a change

in the flow of flue gases. The latter, even at relatively low (10 - 20%) biomass concentrations, could lead to a radical change in the circulation mode of flue gases and the termination of combustion.

In this regard, there are grounds for the conclusion that the safest and most efficient option for the widespread application of biomass in thermal power engineering is combustion of sawmill waste (sawdust), the characteristic dimensions of which ensure their unconditional ignition in the furnace environment of steam and hot water boilers and complete combustion during the characteristic combustion time of coals. Application of wet agricultural waste is most likely associated with the solution of a large complex of fuel preparation problems (grinding, drying and mixing). Accordingly, it can be concluded that combustion of sawdust in the furnaces of steam and hot water boilers is possible without any major changes in the technology of crushed coals combustion. Cardinal changes in the technology of fuel preparation at coal-fired power plants are required for combustion of agricultural waste.

### **Conclusion**

The results of experimental studies substantiate the possibility of utilizing sawmill waste at power plants by combustion of wood-coal fuel mixtures in the furnaces of steam and hot water boilers without changing technologies for fuel preparation, its atomization and combustion. Introduction of sawmill waste (pulverized wood) into coal dust does not significantly change ignition delay times in comparison with homogeneous coals. The limiting (in terms of the temperature of combustion medium) conditions of stable ignition of fuel particles and their subsequent combustion have been established.

## References

1. Coal Information: Overview (2017 edition) / Energy Efficiency Indicators Highlights – 2017.
2. Antonio Coppola, Alessandro Esposito, Fabio Montagnaro, Mauro Iuliano, Piero Salatino. The combined effect of H<sub>2</sub>O and SO<sub>2</sub> on CO<sub>2</sub> uptake and sorbent attrition during fluidised bed calcium looping, *Proceedings of the Combustion Institute*, 37 (4) 2019, pp. 4379-4387.
3. Saito, M., Sadakata, M., Sakai, T. Single droplet combustion of coal-oil/methanol/water mixtures, *Fuel*, 62 (12) (1983), pp. 1481-1486. doi: 10.1016/0016-2361(83)90118-7.
4. Burdukov, A.P., Popov, V.I., Tomilov, V.G., Fedosenko, V.D. The hemodynamics and combustion of coal-water mixtures, *Fuel*, 81 (7) (2002), pp. 927-933.
5. Gao, W., Zhang, M., Wu, H. Fuel properties and ageing of bioslurry prepared from glycerol/methanol/bio-oil blend and biochar, *Fuel*, 176 (2016), pp. 72-77.
6. Riaza, J., et al., Oxy-fuel combustion of coal and biomass blends, *Energy*, 2012. 41(1): p. 429-435.
7. Riaza, J., et al., Combustion of single biomass particles in air and in oxy-fuel conditions. *Biomass and Bioenergy*, 2014. 64: p. 162-174.
8. Haykiri-Acma, H., S. Yaman, and S. Kucukbayrak, Co-combustion of low rank coal/waste biomass blends using dry air or oxygen. *Applied Thermal Engineering*, 2013. 50(1): p. 251-259.
9. M. Muthuraman, T. Namioka, K. Yoshikawa, A comparative study on cocombustion performance of municipal solid waste and Indonesian coal with high ash Indian coal: a thermogravimetric analysis, *Fuel Processing Technology*. – 2010. V. 91. – P. 550.
10. Fanni Mylläri, Panu Karjalainen, Raili Taipale, Pami Aaltoc, Anna Häyrinend, Jani Rautiainend, Liisa Pirjola, Risto Hillamof, Jorma Keskinena, Topi Rönkköa Physical and chemical characteristics of flue-gas particles in a large pulverized fuel-fired power plant boiler during co-combustion of coal and wood pellets, *Combustion and Flame*. – 2017. V. 176. – P. 554 – 566.
11. Growing Power - Advanced solutions for bioenergy technology from Finland, Tekes & VTT Processes & Teonsana Oy. Lahti 2002. 34 p.
12. TUBITAK. Coal-Biomass Mixed Combustion Technology Call for proposal 2016:3. <http://www.tubitak.gov.tr>.



13. Wannapeera J, Fungtammasan B, Worasuwannarak N. Effects of temperature and holding time during torrefaction on the pyrolysis behaviors of woody biomass. *J Anal Appl Pyrol.* 2011; 92:99 – 105.
14. Jan Ilavsky, Milan Oravec Utilization of biomass in Slovakia, *Ecological Engineering*, 16 (2000), pp. 83 – 89.
15. European Commission-Dg TREN. EUROPEAN UNION – Energy & transport in figures, Statistical pocketbook, 2007/2008.
16. Communication from the Commission: Energy for the future: renewable sources of energy, White Paper for a Community Strategy and Action Plan COM (97) 599 final (26/11/1997).
17. Directive 2001/77/EC of 27 September 2001 on the promotion of electricity produced from renewable energy sources in the internal electricity market. *Official Journal of the European Communities*, L 283/33, 27.10.2001.
18. Communication from the Commission to the European Parliament and the Council. Renewable energy roadmap: renewable energies in the 21st century; building a sustainable future – COM (2006) 848.
19. Communication from the Commission to the European council and the European parliament: an energy policy for Europe, {SEC(2007) 12}, COM(2007) 1 final, Brussels, 10.1.2007. <http://eurlex.europa.eu>
20. Commission of the European Communities: Biomass action plan, {SEC(2005) 1573}, COM (2005) 628 final, Brussels, 7.12. 2005. <http://ec.europa.eu>
21. The European Bioenergy Networks (EUBIONET): Biomass co-firing – an efficient way to reduce greenhouse gas emissions. <http://ec.europa.eu>.
22. Communication from the Commission: Energy for the future: renewable sources of energy, White Paper for a Community Strategy and Action Plan COM (97) 599 final (26/11/1997).
23. Directive 2001/77/EC of 27 September 2001 on the promotion of electricity produced from renewable energy sources in the internal electricity market. *Official Journal of the European Communities*, L 283/33, 27.10.2001.
24. European Commission-Dg TREN. EUROPEAN UNION – Energy & transport in figures, Statistical pocketbook, 2007/2008.
25. Sonobe T. Synergies in co-pyrolysis of Thai lignite and corncob / Sonobe T, Worasuwannarak N, Pipatmanomai S., *Fuel Process Technology*. – 2008. V. 89. – P. 1371 – 1378.
26. Geniy V. Kuznetsov, Stanislav A. Jankovsky, Anton A. Tolokolnikov & Andrey V. Zenkov. Mechanism of Sulfur and Nitrogen Oxides Suppression in Combustion Products of Mixed

Fuels Based on Coal and Wood, *Combustion Science and Technology*, 2018, pp 1 - 12. DOI: 10.1080/00102202.2018.1543285.

27. Strakhov V.L., Garashchenko A.N., Kuznetsov G.V., Rudzinskii V.P., *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2001. V. 37. P. 178.

28. Gold BA, Tillman DA. Wood cofiring evaluation at TVA power plants. *Biomass Bioenergy* 1996;10(2-3):71-8.

29. Skeen, S.A., B.M. Kumfer, and R.L. Axelbaum, Nitric Oxide Emissions during Coal and Coal/Biomass Combustion under Air-Fired and Oxy-fuel Conditions. *Energy & Fuels*, 2010. 24: p. 4144-4152.

30. G.V.Kuznetsov, S.V.Syrodoy, A.A.Kostoreva, Zh.A.Kostoreva, N.A.Nigay Effect of concentration and relative position of wood and coal particles on the characteristics of the mixture ignition process *Fuel*, Volume 274, 15 August 2020, 117843

31. Hughes EE, Tillman DA. Biomass cofiring: status and prospects 1996. *Fuel Process Technol* 1998;54:127-42.

32. Easterly JL, Burnham M. Overview of biomass and waste fuel resources for power production. *Biomass Bioenergy* 1996;10(2-3):79-92.

33. Sonobe T., Worasuwanarak N., Pipatmanomai S., *Fuel Process Technology*. 2008. V. 80. P. 1371.

34. Kuznetsov, G.V., Yankovskii, S.A., *Thermal Engineering*. 2019. V. 66(2), P. 133 - 137.

35. Chao C.Y., Kwong P.C., Wang J.H., Cheung C.W., Kendall G., *Bioresource Technology*. 2008. V.99. P. 83.

36. Cliffe K.R., Patumsawad S., *Waste Management*. 2001. V.21. P. 49.

37. Perez-Jeldres R, Flores M., Cornejo P., Gordon A., García Mauricio Flores X., Cornejo P., *Energy* 2018. V.145. P. 1.

38. Jiaxin He, Ying Liu, Boqiang Lin Should China support the development of biomass power generation , *Energy*, 163 (2018), pp. 416-425

39. Pedersen, L.S., et al., Effects on SOx and NOx emissions by co-firing straw and pulverized coal, *Energy and Fuels*, 1997. 11(2): p. 439-446.

40. Chao, C.Y.H., et al., Co-firing coal with rice husk and bamboo and the impact on particulate matters and associated polycyclic aromatic hydrocarbon emissions, *Bioresource Technology*, 2008. 99(1): p. 83-93.

41. Cliffe, K.R. and S. Patumsawad, Co-combustion of waste from olive oil production with coal in a fluidised bed, *Waste Management*, 2001. 21(1): p. 49-53.
42. Wieck-Hansen, K., P. Overgaard, and O.H. Larsen, Cofiring coal and straw in a 150 MWe power boiler experiences, *Biomass and Bioenergy*, 2000. 19(6): p. 395-409.
43. Andersen, K.H., et al., Deposit formation in a 150 MWe utility PF-Boiler during co-combustion of coal and straw, *Energy and Fuels*, 2000. 14(4): p. 765-780.