

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Янковский Станислав Александрович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ПЫЛЕВИДНОГО СЖИГАНИЯ УГЛЯ НА ТЭС ЗА СЧЕТ
ДОБАВЛЕНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНОЙ ДРЕВЕСИНЫ**

**05.14.14 – Тепловые электрические станции, их энергетические системы и
агрегаты**

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор физико – математических наук,
профессор Кузнецов Г.В.

Томск – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ	2
ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МИРОВОГО ОПЫТА СЖИГАНИЯ СМЕСЕВЫХ ТОПЛИВ В ТОПКАХ КОТЛОАГРЕГАТОВ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ	14
1.1. Виды смесевых топлив на основе углей и биомассы.	14
1.2. Примеры объектов энергетики, работающих на смесевых топливах	20
1.3. Проблемы и перспективы использования смесевых топлив на основе углей и древесины	31
Выводы по первой главе	35
ГЛАВА 2. МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СМЕСЕВЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ УГЛЕЙ И ДРЕВЕСИНЫ	37
2.1. Методика приготовления смесевых топлив на основе углей и древесины	39
2.2 Методика определения технических характеристик смесевых топлив на основе углей и мелкодисперсной древесины.....	41
2.3. Методика определения скорости термического разложения смесевых топлив на основе углей и древесины	45
2.4. Методика определения компонентного состава выделяющихся газов при термическом разложении смесевых топлив	47
Основные результаты и выводы по второй главе	48
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СМЕСЕВЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ УГЛЕЙ И ДРЕВЕСИНЫ.....	49
3.1. Анализ влияния концентрации древесины в смесевых топливах на основе углей марок Д, Т, ЗБ, 2Б на их теплотехнические, энергетические и экологические характеристики	49

3.2.	Анализ зависимости скорости термического разложения смесевых топлив от концентрации древесины.....	56
3.3.	Оценка экологических показателей смесевых топлив на основе углей и древесины.....	72
3.4.	Оценка возможности использования смесевых топлив на основе углей и древесины при работе котла БКЗ-220-100-4, установленном на Томской ГРЭС-278	
3.5.	Теоретическая оценка эффективности использования смесевых топлив на основе углей и мелкодисперсной древесины на тепловых электрических станциях по трем основным критериям.	85
3.6.	Рекомендации по использованию результатов диссертационной работы.....	95
3.7.	Акты об использовании результатов диссертационных исследований на энергоустановках ТЭС.....	96
	Выводы по третьей главе.....	99
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	100
	СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	102
	ЛИТЕРАТУРА	104

ВВЕДЕНИЕ

По прогнозам [1] среднегодовой рост потребления электроэнергии в мире, вызванный увеличением численности населения и развитием производственных мощностей, до 2030 года составит 2,4 %. В настоящее время около 36 % электроэнергии в мире вырабатывается на угольных тепловых электрических станциях (ТЭС). Это связано, прежде всего, с тем, что уголь является широко распространенным и доступным ископаемым энергетическим ресурсом, цены на который достаточно стабильны. Добычей и реализацией такого энергоносителя занимаются многие Российские и международные компании [2, 3]

На сегодняшний день запасы угля в РФ составляют 19 % от мировых показателей, а доля ТЭС, использующих это топливо, – 26 % [2]. Для большинства тепловых электростанций уголь является привозным, что приводит к увеличению стоимости энергоресурсов для потребителей в 1,5 – 2 раза (в зависимости от региона) [2]. Но при сжигании этого вида топлива с применением устаревших технологий производства тепла и электроэнергии происходит интенсивное выделение загрязняющих веществ (CO_2 , SO_x , NO_x , летучая зола и другие антропогенные продукты сгорания) [2 – 6].

Основные современные методы снижения вредных выбросов, образующихся при эксплуатации угольных тепловых электростанций, разработаны достаточно давно [6]. Большинство из них являются дорогостоящими [6], что приводит к существенному увеличению издержек производства тепла и электроэнергии. Но при этом в ряде случаев (даже при очень больших затратах на очистку дымовых газов) объем загрязняющих атмосферу выбросов остается значительным по сравнению, например, с европейскими ТЭС [6]. Одним из решений экологической проблемы угольной энергетики может стать создание смесевых топлив на основе угля и древесины [6].

Известно [7], что положительный эффект от добавления мелкодисперсной древесины в уголь при формировании смесевого топлива для производства тепла и электроэнергии достигается за счет того, что биомасса является углерод –

нейтральной. При этом древесина и ее отходы – наиболее распространенный биоресурс [7]. Широкое использование смесевых топлив на основе угля и древесины может позволить существенно снизить объемы потребления привозного угля на многих тепловых электростанциях за счет использования местных энергоресурсов [4 – 8].

В энергетической стратегии России на период до 2030 с последующей пролонгацией до 2035 года (Распоряжение Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. № 17715-р) обоснована необходимость снижения доли привозных ресурсов в региональных топливно-энергетических балансах [2]. В требованиях данной стратегии предписывают увеличение объемов выработки тепла и электроэнергии на ТЭС с использованием возобновляемых источников энергии (в том числе отходов лесопиления) на 4,5 % [2].

По оценкам [4 – 9] установлено, что объем запасов древесины в России превышает 80 млрд. куб. м. Отходы ее переработки составляют более 30 млн. куб. м в год [5]. В тоже время в районы, обладающие большим потенциалом производства древесной биомассы, поставляются твердые и жидкие топлива для местных тепловых электрических станций. Интерес к энергетическому применению биомассы вызван, кроме всего прочего, ужесточением экологических требований и стандартов [6], а также ростом цен на первичные энергоносители [7].

Россия и многие другие государства ведут исследования по использованию в энергетике различных видов смесевых топлив: водоугольных [10,11], органоводоугольных [12,13], на основе отходов лесо- и агропромышленного производства [14,15] и др. Определенных успехов в применении технологий совместного сжигания угля и биомассы добились в таких странах как Финляндия, Швеция, Китай, Индия, США, Канада [10 – 13].

Однако применение смесевых топлив на тепловых электрических станциях существенно ограничивается отсутствием общей теории формирования их компонентного состава. Кроме того, недостаточно изучены технические,

энергетические, экологические характеристики, степень реактивности получаемого смесового топлива с добавлением углерод-нейтральной компоненты – биомассы.

На основании анализа литературы по сформулированной проблеме [1 – 15], можно сделать обоснованный вывод о том, что исследования в данном направлении актуальны, а анализ возможности создания смесовых топлив на основе углей и отходов лесопромышленного производства РФ с энергетическими характеристиками, близкими к однородным углям, и скорее всего, лучшими экологическими параметрами, представляет достаточно высокий интерес.

Цель работы заключается в обосновании по результатам экспериментальных исследований энергетических и экологических характеристик, а также оценки экономической эффективности смесовых топлив на основе типичных для РФ углей и широко распространенных отходов лесопромышленного производства, возможности их эффективного сжигания в котлоагрегатах тепловых электрических станций.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

1. Установление основных факторов, оказывающих значимое влияние на характеристики получаемых смесовых топлив.
2. Разработка методик проведения экспериментальных исследований по определению теплотехнических, энергетических и экологических характеристик различных смесовых топлив на основе углей и древесины.
3. Экспериментальное определение основных, значимых теплотехнических, энергетических и экологических характеристик смесовых топлив на основе типичных углей и древесины.
4. Экспериментальное определение состава газов, выделяющихся при термическом разложении смесовых топлив на основе типичных углей и древесины.

5. Оценка влияния массовой доли древесины на энергетическую эффективность смесевых топлив.
6. Поверочный расчет типичного котлоагрегата при его переводе на смесевые топлива на основе угля и древесины.
7. Разработка методики оценки эффективности использования на тепловых электростанциях смесевых топлив на основе энергетического, экологического и экономического критериев.
8. Обоснование по итогам анализа и обобщения результатов экспериментальных исследований группы типичных смесевых топлив на основе угля и древесины диапазона изменения концентраций последней, при которых возможно сжигание таких топлив в топках энергетических котлов с достижением положительного эффекта по нескольким показателям качества работы котельных установок тепловых электростанций.
9. Разработка рекомендаций по практическому применению смесевых топлив на основе типичных углей разных марок и отходов лесопромышленного производства (древесины).

Методы исследования. Диссертационная работа выполнена с использованием аналитических и экспериментальных методов исследования.

Научная новизна работы. Впервые проведены экспериментальные исследования процессов термического разложения группы смесевых топлив из типичных разных по своим характеристикам углей и отходов лесопромышленных производств (древесины). Выявлены соотношения компонентов от 10 % / 90 % до 50 % / 50 %, при которых энергетические характеристики смесевых топлив незначительно уступают (от 1,6 до 9 %) исходным углям, но выход вредных выбросов при этом близок к углерод-нейтральному топливу. Разработана новая методика выбора состава смесевых топлив на основе углей и древесины. Обоснована возможность сжигания новых смесевых топлив (на основе углей марок Д (месторождение «Листвяжное»), Т (месторождение «Алардинское»), ЗБ («Балахтинское месторождение»), 2Б («Бородинское месторождение»)) и углерод-

нейтральной добавки из отходов лесопромышленного производства (древесины) на энергетическом оборудовании современных ТЭС. Разработана методика оценки эффективности смесевых топлив на основе угля и отходов древесины по трем критериям: экономичности, энергетической эффективности, экологичности, позволяющая оценить перспективность их использования в качестве топлива тепловых электрических станций.

Практическая значимость работы. Сформирована база данных технических характеристик смесевых топлив на основе типичных углей марок Д, Т, 3Б, 2Б с добавлением древесины (отходов лесопромышленного производства) при соотношении концентраций основных компонент 10 % / 90 %, 25 % / 75 %, 50 % / 50 %. Полученные результаты являются базой для оценки снижения затрат на привозное дорогостоящее сырье за счет применения местного углерод-нейтрального сырья с добавлением его в уголь. Рекомендованные смесевые топлива пригодны для сжигания в топочных камерах ТЭС без выполнения масштабного комплекса мероприятий по реконструкции котлоагрегатов с использованием технологий циркулирующего кипящего слоя.

Полученные экспериментальные результаты и сформулированные рекомендации являются основой для разработки новых технических решений по формированию топливно-энергетических балансов тепловых электрических станций в районах с большими запасами древесины, где уголь является топливом привозным и дорогостоящим. Установленный по результатам экспериментов синергетический эффект замены углей на смесевые топлива может способствовать развитию энергетических комплексов многих регионов с лесопокрытыми территориями, в том числе за счет снижения затрат на приобретение угля для тепловых электрических станций и его доставка к месту использования. Полученные при выполнении диссертационного исследования результаты являются основой для проведения опытно-конструкторских работ по

разработке технологий сжигания смесевых топлив на основе углей и древесины в топках паровых котлов тепловых электростанций.

Основные положения, результаты и выводы, выносимые на защиту:

1. Новый подход к оценке возможности применения смесевых топлив из угля и мелкодисперсной древесины для сжигания в топках котельных установок тепловых электрических станций.
2. Увеличение концентрации древесины в смесевых топливах до 50 % приводит к снижению температуры начала термического разложения до 31 % в зависимости от марки углей и увеличению их реакционности до 27 %.
3. Установлены концентрации смесевых топлив от 10 % / 90 % до 50 % / 50 %, энергетические характеристики которых снижаются от 1,6 % до 9 %, но при этом зольность снижается до 48 %, а выбросы загрязняющих веществ в окружающую среду – до 26 % по сравнению с аналогичными характеристиками однородных углей.
4. При доле древесины в смесевом топливе 50 % КПД типовых котлоагрегатов снижается не более чем на 1,2 % по сравнению с режимом использования проектного топлива (угля) при существенном (на 47,6 %) снижении затрат на приобретение топлива, значительном сокращении (NO на 30,2 %, CO_2 на 22,1 %, SO_2 на 37,2 % вредных газообразных выбросов), а также твердых продуктов (летучей золы до 40 %) горения.
5. Установлен синергетический эффект сжигания смесевых топлив на основе двух углей и древесины проявляющихся в существенном изменении диапазона температур, в котором происходит термическое разложение угля.
6. Концентрации древесины в рассматриваемых смесевых топливах при которых возможно их эффективное сжигание, могут быть существенно более 10 % (до 50 %).
7. Методика оценки эффективности составов смесевых топлив на основе трех критериев: экономичности, энергетической эффективности, экологичности,

позволяющая оценить возможность их использования в качестве основного топлива котлоагрегатов тепловых электрических станций.

Степень достоверности результатов проведенных исследований.

Результаты экспериментальных исследований получены с использованием современного высокоточного аналитического и экспериментального оборудования. Выполнены оценки систематических и случайных погрешностей. Результаты экспериментов подтверждаются удовлетворительной повторяемостью при использовании идентичных навесок всех исследовавшихся смесевых топлив.

Личный вклад автора состоит в разработке методик проведения экспериментов, постановке, планировании экспериментальных исследований и их проведении, обработке, анализе и обобщении полученных результатов, в формировании рекомендаций по практическому использованию полученных результатов, формулировке защищаемых положений и выводов, подготовке статей к опубликованию в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ и индексируемых базами данных Scopus и Web of Science.

Апробация работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

1. VI Всероссийская научная конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий», г. Томск, 13-15 октября 2015 г.
2. 11th International Forum on Strategic Technology 2016 (IFOST 2016) г.Новосибирск, June 1 - June 3, 2016
3. XV Международная конференция по термическому анализу и калориметрии в России (RTAC-2016) 16 – 23 September, 2016 Saint-Petersburg, Russia.

4. VII Всероссийская научная конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий», г. Томск, 26-28 октября 2016 г.
5. Международная научная конференция «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» г. Томск, 26 – 28 апреля 2017г.
6. II Всероссийская научная конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» с элементами школы молодых ученых Ялта, Республика Крым, 11-17 сентября 2017г.

Публикации. Основные положения и результаты диссертационных исследований опубликованы в 11 печатных работах, в том числе 3 – в журналах из списка, рекомендованного ВАК РФ для публикации основных научных результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата наук: «Промышленная энергетика», «Научно – технические ведомости СПбГПУ», «Fuel».

Восемь статей опубликованы в периодических изданиях, индексируемых базами Scopus и Web of Science (MATEC Web of Conferences, Proceedings, AIP Conference Proceedings).

Получены два акта о внедрении результатов исследований.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 122 страницах машинописного текста, содержит 19 рисунков и 19 таблиц. Библиография включает 190 наименований.

Краткое содержание работы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, отражена практическая значимость и научная новизна полученных результатов.

Первая глава отражает мировой опыт применения смесевых топлив из углей и древесины на энергетических установках тепловых электрических станций.

Представлены основные результаты исследований влияния компонентного состава смесевых топлив на их энергетические характеристики. Показано, что на сегодняшний день результатов экспериментальных исследований характеристик смесевых топлив на основе углей и древесной биомассы недостаточно для их использования на ТЭС, отсутствуют обоснования и методики выбора концентраций компонент (по базовым критериям).

Во второй главе приведено описание разработанного автором нового подхода к оценке возможности использования смесевых топлив из углей и древесины на тепловых электрических станциях. Приведен комплекс методик по приготовлению смесевых топлив на основе углей и древесины; определению технических характеристик типичных исследовавшихся топлив; определению степени реактивности смесевых топлив на основе углей различных марок и древесины; определению компонентного состава выделяемых газов при термическом разложении исследуемых топлив. Описаны методы оценки погрешностей результатов экспериментальных исследований.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований по определению теплотехнических, энергетических и экологических характеристик смесевых топлив на основе углей марок Д, Т, 3Б, 2Б и древесины. Описаны основные факторы, оказывающие значимое влияние на параметры получаемых смесевых топлив. Приведен хроматографический анализ состава газов, выделяющихся при термическом разложении смесевых топлив на основе углей марок Д, Т, 3Б, 2Б и древесины. Приведены результаты поверочных расчетов котлоагрегата БКЗ-220-100-4, эксплуатируемого на ГРЭС-2 г. Томска, при его переводе на смесевые топлива на основе угля марки Д и древесины.

Описана методика оценки смесевых топлив по мультипликативному критерию, в состав которого входят три критерия эффективности (энергетической, экологической, экономической).

Обоснована возможность использования древесной биомассы в качестве второй компоненты смесевых топлив на основе угля при концентрациях

древесины существенно более 10 % (до 50 %). Показан диапазон изменения концентраций второй компоненты, в котором смесевое топливо по двум из трех основных критериев существенно предпочтительнее угля, а по энергетике уступает не более чем на 9 % (при максимальной концентрации древесной биомассы 50 %).

Разработаны рекомендации по практическому применению смесевых топлив на основе углей разных марок и отходов лесопромышленного производства.

В заключении подведены основные итоги выполненных диссертационных исследований и сформулированы соответствующие выводы.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МИРОВОГО ОПЫТА СЖИГАНИЯ СМЕСЕВЫХ ТОПЛИВ В ТОПКАХ КОТЛОАГРЕГАТОВ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

1.1. Виды смесевых топлив на основе углей и биомассы.

В последние десятилетия ведутся активные исследования новых более экологичных топлив по сравнению традиционными [1 – 3]. Такие энергоносители в основном – смесевые топлива на основе углей и биомассы. Одним из перспективных топлив такого рода и является смесь углей и мелкодисперсной древесины [4 – 6].

Мелкодисперсная древесина представляет собой разновидность биотоплива, сформированного из высокомолекулярных соединений, основными компонентами которой является целлюлоза, лигнин, гемицеллюлоза. В процессе работы деревоперерабатывающих комбинатов образуется много отходов в виде мелкодисперсной древесины [6].

В России [6 – 14] и многих других государствах ведутся исследования смесевых топлив (водоугольных [6,7], органоводоугольных [8,9], на основе отходов лесопромышленного производства [10,11] и др.), определенных успехов в последние годы добились в таких странах как Финляндия, Швеция, Китай, Индия, США, Канада.

Группа научных сотрудников из университета г. Ноттингем Нингбо, Китай провели [14] исследования взаимодействия между низкосортным углем и биомассой (солома овса, рисовая шелуха) в различных концентрационных соотношениях. Исследовались каталитические эффекты золообразования при термическом разложении таких смесевых топлив. Авторами [14] установлено, что состав смесевых топлив из угля и овсяной соломы дает более высокий синергетический эффект, чем смесь угля и рисовой шелухи. Положительный эффект получен при соотношении массовых концентраций биомассы и угля 30 % / 70 %. Также установлен коэффициент эффективного соотношения смесевых

топлива на основе угля и соломы овса – 0,16, смеси угля и рисовой шелухи – 0,09. Коэффициент соотношения угля и биомассы в работе [14] определен с целью подбора оптимального их соотношения для совместного сжигания на угольных электростанциях. Экспериментальные исследования [14] позволили определить условия повышения эффективности использования низкокачественных углей за счет синергетического эффекта при их совместной переработке с биомассой. Этот коэффициент [14] получил наименование «синергетический фактор», показал хорошую корреляцию с характеристиками, представленными в других работах и позволяет оценить значимость каталитического эффекта при сжигании смесевых топлив [14].

В [15 – 19] выполнены исследования влияния добавок сточного ила и сахарного тростника на процессы шлакования при сжигании топлив на основе угля. Установлено, что эти компоненты увеличивают скорость отложения золы. Добавление в топливо древесины, проса, соломы снижает скорость отложений, что подтверждает положительный синергетический эффект. Однако полученные результаты [15 – 19] сегодня не могут быть использованы для анализа закономерностей процессов термического разложения и горения смесевых топлив при разных соотношениях компонент древесины и угля, что обусловлено недостаточно широким описанием характерных зависимостей влияния многих факторов на физико-химические процессы при сжигании таких топлив.

Процессы слоевого сжигания смесевых топлив на основе угля и биомассы (проса, щепы и др.) в разных концентрационных соотношениях исследованы авторами в [20 – 25]. С применением термогравиметрического анализа определены кинетические характеристики, интенсивность процессов тепловыделения, а также выполнен анализ возможности применения таких смесевых топлив в энергетических установках, сжигающих топливо в слое [20 – 25].

Термогравиметрический анализ (ТГА) является одним из наиболее распространенных методов исследования смесевых топлив в настоящее время [26

– 36]. Он позволяет быстро определять кинетические характеристики процесса термического разложения твердых топлив [37 – 38]. Методом ТГА в работах [39 - 42] определены характеристики углей и смесевых топлив на их основе с добавлением илистых отходов производства бумаги [43], рисовой шелухи [44 - 48], шелухи фундука [49 - 50], опилок [51 – 52]. Кинетические характеристики процессов термического разложения смесевых топлив с применением модели Аррениуса определялись в работах [55 – 56].

В [39] предложено в качестве альтернативного топлива для угольных электростанций использовать смесь отходов производства бумаги (ила) с углем. Авторами [39] в ходе проведения экспериментальных исследований зарегистрированы изменения состояния смесевых топлив при пиролизе и горении, на основе которых разработаны кинетические модели, позволившие провести оценку совместимости каждого компонента в смеси. Установлено [39] влияние неорганических компонентов топлив и их смеси на характеристики тепловой конверсии, реакционную способность, шлакообразование и выделение загрязняющих окружающую среду газов (CO_2 , NO_x , SO_2).

Авторами [44] установлена линейная зависимость отношения массовой доли рисовой шелухи к массе угля при соотношении компонент 0 %, 50 %, и 100 %. Определена [44] возможность использования смеси угля и рисовой шелухи в доменных печах. Эффект достигается за счет увеличения выхода летучих веществ получаемого смесевоего топлива [44].

В работе [45] представлены результаты исследований смесевых топлив на основе турецкого угля марки «Сома Денис» с добавлением рисовой шелухи и отходов переработки оливок. Анализ проведен с применением термогравиметрического анализатора в кислородной среде с температурой нагрева от 20 °С до 900 °С. Определены показатели реактивности, степень выгорания, максимальная скорость горения и его температура. Авторы [45] показали, что зависимость степени реактивности смесевых топлив (а также

степень их выгорания в кислородной среде) не линейна, и не всегда может быть определена заранее.

Результаты исследований [47-48] позволяют оценить влияние рисовой шелухи, запасы которой довольно велики в странах азиатско-тихоокеанского региона, на характеристики смесевых топлив на основе угля. Установлено, температуры начала термического разложения и энергии активации таких смесевых топлив снижаются по сравнению с однородным углем. Кроме того, в этих работах выявлено снижение выхода загрязняющих окружающую среду газов (CO_2 , NO_x , SO_2) в диапазоне от 10 % до 30 %. Приведенные результаты свидетельствуют о том, что увеличение доли влаги в топливе не приводит к росту концентрации загрязняющих веществ [47 – 48], а размер частиц биомассы не влияет на эту концентрацию в продуктах их термического разложения при идентичных по температуре условиях эксперимента.

Экспериментальные данные, полученные в результате исследования смесевых топлив из угля шахты Эльбистан и скорлупы турецкого фундука, представлены в [49 – 50]. Авторами [49 – 50] проведен термогравиметрический анализа таких смесевых топлив при температурах нагрева до 900 °С и скоростях ее роста 20 °С/мин и 40 °С/мин. Размер образцов составил менее 0,250 мм, соотношение масс скорлупа / уголь 2 – 20 %. Проведено [49 – 50] сопоставление максимальных скоростей термического разложения смесевых топлив. Установлено, что увеличение массовой доли скорлупы фундука до 8 % обеспечивает увеличение степени выгорания по сравнению с результатами теоретических исследований. Увеличение же концентрации этой биомассы до 10 % приводит к снижению индекса термического разложения. Авторы [49 – 50] показали, что энергия активации процесса пиролиза растет с увеличением концентрации скорлупы фундука до 20 массовых процентов в смесевых топливах.

Проведены [51] исследования по определению синергетического эффекта при сжигании смесевых топлив на основе двух разных углей с добавлением сосновых опилок. Термогравиметрический анализ выполнен при скоростях

нагрева 10, 30, 50 °С / мин. и максимальной температуре нагрева 1200 °С. Авторы [51] установили, что фактическое увеличение выхода летучих веществ превышает расчетное при температуре нагрева более 400 °С.

В работе [52] приведены результаты исследований процессов пиролиза, оценены энергетические характеристики угля, биомассы (сосны) и смесевых топлив на основе данных компонентов. Согласно [52] отклонения от ожидаемых авторами статьи характеристик сжигания смесевых топлив в ходе проведения исследований не зафиксированы. Установлено [52], что горение биомассы осуществляется в два этапа: первый этап (пиролиз) в диапазоне температур от 200 °С до 360 °С (соответствует выходу летучих веществ), второй этап от 360 °С до 490 °С (соответствует горению древесины). Уголь сжигается в одну стадию в диапазоне температур от 315 °С до 615 °С. Смеси угля и древесины сжигаются в три стадии, которые соответствуют (в определенной степени) сумме отдельных этапов сжигания биомассы и угля. Механизмы горения приняты в рамках модели Coats–Redfern [52]. Кинетические параметры процесса определены с учетом отдельных реакций для каждой стадии термического разложения. Авторами [52] установлено, что химическая реакция первого порядка является наиболее эффективной моделью первой стадии окисления биомассы и сжигания угля. При этом механизмы диффузии характерны для второй стадии сжигания биомассы.

Авторы [53] провели исследования процессов совместного сжигания частичек угля и древесины с использованием высокоскоростной фоторегистрации. Которая выполнена со скоростью 7000 кадров в секунду. Одна частичка топлива переносилась в потоке горячего газа с температурой 1067 °С. Скорость быстрого нагрева составляла 104 – 105 °С / секунду. Для оценки влияния размеров частиц топлив на процессы, протекающие при их сжигании, авторами исследуемые образцы разделены на три группы с характерными размерами 215–255 мкм, 255–300 мкм, 300 – 350 мкм. Соотношение топливных компонент уголь / древесина составляло 20 % / 80 % и 50 % / 50 %. Процессы горения смесевых топлив исследовались на лабораторной установке поперечного

впрыска. В [53] описаны процессы сжигания частиц относительно времени смещения в потоке. Показано [53], что при быстром нагревании мелкие угольные частицы зажигаются раньше, чем частички древесины. При совместном сжигании частичек угля и древесины снижается радиационный теплообмен по отношению к чистой древесине. При соотношении размеров частиц 50 % / 50 % тепловыделение составило до 21 %, а при соотношении частиц 20 % / 80 % соответственно до 32 %. Зарегистрировано быстрое гомогенное зажигание и равномерный процесс горения топлив. Результаты полученные авторами [53] подтверждают возможность работы котлоагрегатов на исследовавшихся в [53] смесевых топливах.

Результаты изучения процессов совместного сжигания угля (антрацита) с древесными опилками представлено в [54]. Авторы [54] провели исследования с применением термогравиметрического анализа смесевых топлив в следующих соотношениях древесина / уголь: 30 % / 70 %, 50 % / 50 %, 80 % / 20 %. Установлено [54], что температура зажигания таких топлив ниже, чем у антрацита, а температура максимума горения выше. Также показано [54], что термическое разложение смесевых топлив на основе антрацита осуществляется в две стадии.

Анализ основных результатов мировых исследований с целью обоснования возможности использования смесевых топлив на основе углей и биомассы в качестве энергетического сырья [30 – 56] показал, что существуют большие проблемы применения таких топлив для сжигания в котлоагрегатах угольных тепловых электрических станций. Это связано, прежде всего, с отсутствием методологии формирования качественного и количественного состава смесевых топлив. Не в полном объеме определены температуры начала зажигания смесевых топлив из углей и древесины, процессы их горения и степень выгорания. Результаты проведенного анализа подтверждают актуальность исследования смесевых топлив из российских углей с добавлением отходов производства лесопромышленных комплексов в различных концентрационных соотношениях с

целью определения возможности их использования в качестве топлив на тепловых электростанциях.

1.2. Примеры объектов энергетики, работающих на смесевых топливах

Различные продукты деревопереработки могут быть использованы для совместного сжигания с углем. К ним относятся, например, опилки, стружка, щепа, древесная кора, пеллеты [57]. Котлоагрегаты, сжигающие топливо в псевдосжиженном слое, способны работать на разных типах твердых топлив и не требуют масштабной реконструкции как самих агрегатов, так и систем топливоподачи [57]. Однако, такой подход не применим к пылеугольным котлоагрегатам, так как они оснащены более сложными системами топливоподачи и топливоприготовления [57]. Кроме того, перевод таких котельных установок на сжигание смесевых топлив зачастую невозможен без выполнения работ по реконструкции горелочных устройств. Недостаточно изучена возможность применения смесевых топлив на тепловых электрических станциях с котлоагрегатами, работающими на пылевидном топливе, без проведения масштабной реконструкции подтверждает актуальность выбранного направления работы. Авторы [57 – 59] полагают, что применение смесевых топлив на основе углей и биомассы в слоевых котлоагрегатах может повысить эффективность электростанций до 15 % от общей производимой энергии [57]. Преимущества смесевых топлив заключаются в том, что на станции появляется возможность сократить затраты на выработку электроэнергии, снизить выбросы CO_2 (основная причина глобального потепления), SO_x , NO_x и твердых частиц летучей золы.

Согласно опубликованным данным [57 – 59] по проблеме использования смесевых топлив, исследования в основном выполнялись в 90-е годы двадцатого столетия. Более того, их основная часть была направлена на анализ возможности совместного сжигания таких топлив и оценку экономической эффективности

перевода энергетического оборудования на альтернативные топлива из традиционных углей с добавлением биомассы [57 – 59].

В Дании на энергоблоке электростанции Амагер 3 мощностью 250 МВт, работающей на угле, в 1994 году проводились экспериментальные исследования по сжиганию смесевых топлив из угля и соломы [58]. Целью работы являлось достижение стабильности горения такого топлива. В ходе эксперимента солома смешивалась с углем в соотношении 10 % / 90 %, с последующим увеличением ее доли до 20 %. Тепловая мощность электростанции составляла 330 МДж, температура пара – 545 °С при давлении 25 МПа. Котел энергоблока оснащен 16 горелками с односторонним расположением в шахматном порядке. При проведении испытаний выявлены серьезные проблемы поддержания стабильного горения. При этом наблюдалось постепенное снижение выбросов SO_x , NO_x при увеличении концентрации соломы до 20 %. Совместное сжигание соломы и угля на одном энергоблоке, в целом, не оказало существенного влияния на характеристики станции. Авторами [58 – 59] сделан вывод о том, что при правильной подготовке соломы совместное сжигание с углем на электростанции возможно без крупных мероприятий по реконструкции.

Известным мировым поставщиком оборудования для электростанций является компания Ансальдо Калдае (Ansaldo Caldaie) [60]. В 1998 г. эта компания одной из первых провела испытания по совместному сжиганию пылевидного угля и отходов производства оливкового масла, мясной костной муки, древесных пеллет, коры пальмового дерева. Испытания проводились при прямом сжигании пылевидных смесей в реконструированных котлах суммарной мощностью 320 МВт.

На базе исследовательского центра по сжиганию различных видов топлив компанией Ансальдо Калдае разработана горелка, обеспечивающая сжигание биомассы в пылевидном состоянии на энергоблоке мощностью до 35 МВт [60]. Испытания такого масштаба сегодня являются единственными в Европе. Система удаления золы на стенде [60] – с сухим шлакоудалением. Габаритные размеры

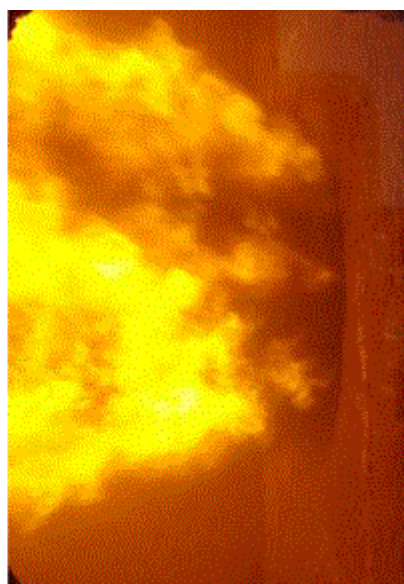
экспериментальной печи: длина 12 м, ширина 4,5 м, высота 6 м (исключая бункер высотой 2,5 м). На рисунке 1.2.1 показан внешний вид энергоблока и камеры сгорания [60].



а)



б)



в)

Рисунок 1.2.1. Исследовательский центр Ансальдо Калдае: а) внешний вид энергоблока; б) камера сгорания; в) сжигание угля и смесового топлива в потоке [60]

Конструкция камеры сгорания [60] позволяет полностью контролировать процессы сжигания топлив, проводить визуальные наблюдения и инструментальные измерения. Установка [60] не связана с производством и применяется только для проведения испытаний различных видов топлива в разнообразных газовых средах с контролируемым объемом. Подача топлива на

стенде выполнена двухпоточной (уголь и биомасса подаются по отдельным каналам), а контроль расхода топлива осуществляется по температуре и скорости подачи. Испытания показали высокую стабильность горения факела, снижение объемов вредных выбросов, позволили определить широкий диапазон режимов работы горелочного устройства [60].

Известно почти 230 электростанций, которые провели испытания по совместному сжиганию смесевых топлив из угля и биомассы [61 – 64]. Только на 15 из них сжигали пылевидное топливо при проведении испытаний [62]. При сжигании смесевых топлив в псевдосжиженном слое коэффициент добавляемой биомассы в большинстве котлов составил 10 – 15 %. На ТЭС мощностью от 15 кВт до 150 МВт использование смесевых топлив показало положительную динамику снижения негативного воздействия на окружающую среду и повышение надежной работы энергоустановок [62-64].

Хорошим примером сжигания биомассы и углей в псевдосжиженном слое является ТЭЦ Альхолменс Крафт в Питерсариин, обеспечивающая теплом и электроэнергией более 20 000 жителей западного побережья Финляндии. Эта станция расположена рядом с целлюлозно-бумажным комбинатом и работает на отходах производства древесной коры. Годовое потребление топлива электростанцией составляет минимум 200 000 м³. Суммарная мощность энергоустановок составляет 550 МВт, паропроизводительность 698,4 т/ч, температура пара 545 °С [63].

В Испании (1920 г.) проведены испытания энергоисточников с пеллетами марки Альперуджо [64]. Такое топливо изготавливается из бурого угля (или антрацита) и отходов производства оливкового масла. Испытания проводились при сжигании в псевдосжиженном слое. Установлено, что использование топлива, в состав которого входили отходы производства оливкового масла при концентрации в смеси от 10 % до 25 %, позволило достичь снижение отложений на трубах экранов котлоагрегата, а также снижение зольности. При увеличении

концентрации биомассы от 25 до 50 % выявлено отсутствие равномерных процессов горения топлива [64 – 65].

В Финляндии успешно эксплуатируются три газификатора на псевдосжиженном слое: один – в городе Лахти, второй – в городе Варкаус и третий – в городе Руене (Бельгия). В эксплуатируемых устройствах 15 % угля заменено соломой, что позволило снизить выбросы CO_2 , NO_x , SO_2 до 6 %. На рисунке 1.2.2 показан газификатор, работающий на смешанном топливе из угля и соломы [66].



Рисунок 1.2.2. Газификатор с псевдосжиженным слоем в городе Лахти (станция мощностью 350 МВт) [66].

Процесс газификации и сжигания смешанных топлив на основе угля и биомассы активно исследуется в Турции. Это направление является приоритетным до 2023 г. в работе научных учреждений Турции. В период с 2007 г. по 2012 г. проведены одни из первых исследований, в ходе которых выполнялось отдельное и совместное сжигание угля и биомассы в псевдосжиженном циркуляционном слое [67]. В консорциум проекта были включены Ближневосточный технический университет (Мету), Гама Электрические системы инжиниринг, исследовательский центр Тубитак и Энергетический институт в Марме [67]. Установка мощностью в 700 кВт находится в исследовательском центре Тубитак. Консорциум проводит исследования по следующим направлениям [68 – 70]: совместная газификация

угля и биомассы в псевдосжиженном слое с дутьем; сжигание угля и биомассы в псевдосжиженном слое; сжигание смесевых топлив в котлоагрегате на ТЭЦ. В 2015 году управление программами финансирования Тубитак (TEYDEV) объявило направление по сжиганию смесевых топлив на основе углей и биомассы на тепловых электрических станциях приоритетным (номер программы 1511-ENE-KOMR-2015-2) [69]. В начале 2016 года объявлена новая программа финансирования проектов под номером 1003-ENE-KOMR-2016-1, направленная на поддержание исследований технологий совместного сжигания смесевых топлив из угля и биомассы в псевдосжиженном слое или в псевдосжиженном слое с дутьем [70].

Сжигание смесевых топлив на основе угля и биомассы на традиционных угольных электростанциях с минимальным вложением инвестиций становится все более актуальным направлением развития «эко-дружелюбной» энергетики, так как с увеличением доли биомассы в угле, снижаются выбросы загрязняющих веществ в атмосферу [71]. По оценкам [71 – 80] объем необходимых инвестиций в реконструкцию угольных блоков для сжигания смесевых топлив составляют от 50 до 300 долларов за кВт. По мнению авторов [71 – 80] эти затраты значительно ниже финансовых вложений, требуемых для полного перевода энергоустановок на непроектное топливо. Опыт сжигания смесевых топлив в Дании и Нидерландах показал снижение потребления угля на 3,5 млн. тонн угля в год. Результаты многолетней работы большой группы исследователей подтверждают актуальность частичной замены угля биомассой [71 – 80].

В таблицах 1.2.1 – 1.2.5 приведены характеристики более успешных ТЭС и энергоблоков на которых проведены исследования по совместному сжиганию угля и биомассы [71].

Таблица 1.2.1. Характеристики энергетических установок по совместному сжиганию смесевых топлив в пылевидном состоянии [71]

Страна	Место расположение	Название энергоисточника	Мощность, МВт	Биомасса, %	Исходное топливо	Компонента для смешения
Австрия	Санкт-Андреа	Санкт-Андреа	124	3	Угольная пыль	Щепа
Дания	Орхусская	Студstrupваркет 1	150	20	Угольная пыль	Солома
Дания	Орхусская	Студstrupваркет 4	350	20	Угольная пыль	Солома
Германия	Любенау	-	100	7	Угольная пыль	Древесина, солома
Нидерланды	Амстердам	Хемвегцентрал 8	600	4	Угольная пыль	Ил, сточных вод
Нидерланды	Борсель	Борсель 12	403	-	Угольная пыль	Шелуха, бумага, волокна
Нидерланды	Гитрюденбург	Амерцентрал 8	600	8	Угольная пыль	Отходы производства бумаги
Нидерланды	Маасвлакте, Роттердам	Маасвлактцентрал, 1+2	2*518	-	Угольная пыль	Пеллеты из биомассы
Нидерланды	Нижмеген	Гелдерланд	602	-	Угольная пыль	Древесная пыль
Польша	Скавина	Скавина	590	10	Угольная пыль	Древесные опилки, кофеная шелуха
Польша	Рыбник	Рыбник	1800	10	Угольная пыль	Щепа
Польша	Полянца	Полянца	1800	10	Угольная пыль	Щепа

Таблица 1.2.2. Характеристики энергетических установок по совместному сжиганию смесевых топлив в циркуляционном псевдосжиженном слое [71]

Страна	Место расположение	Название энергоисточника	Электрическая мощность, МВт	Тепловая мощность, МВт	Биомасса, %	Исходное топливо	Топливо для совместного сжигания
Австрия	Эбенси	-	-	38	-	Уголь	Бурый уголь, газ, нефть, древесина
Финляндия	Коко-кола	-	-	98	-	Уголь	Торф, древесина
Финляндия	Кухмо	-	-	18	-	Уголь	Торф, древесные отходы
Финляндия	Лиеска	-	8	22	-	Уголь	Торф, кора, опилки
Финляндия	Миккели	-	-	84	-	Уголь	Бурый уголь, газ, нефть, древесные отходы
Финляндия	Раухалаhti	-	-	-	100	Уголь	Торф, древесные отходы
Финляндия	Раума	-	-	160	-	Уголь	Торф, ил, кора
Норвегия	Санде	-	-	26	-	Уголь	Древесина
Испания	Ла Переда	Электростанция Хуноса	-	50	-	Уголь	Угольные отходы, древесные отходы
Швеция	Форс	Стора энсо Форс Мил	9,6	55	90	Уголь	Древесина, кора
Швеция	Норркопинг	-	-	125	-	Уголь	Древесина
Швеция	Нукопоинг	-	-	80	-	Уголь	Древесина, торф
Швеция	Остерсунд	-	-	25	-	Уголь	Древесина, торф, кора, опилки, нефть

Таблица 1.2.3. Характеристики энергетических установок по совместному сжиганию смесевых топлив в кипящем слое [71]

Страна	Место расположение	Название энергоисточника	Электрическая мощность, МВт	Тепловая мощность, МВт	Биомасса, %	Исходное топливо	Топливо для совместного сжигания
Финляндия	Лохья	Лохья, бумажная фабрика	-	36	-	Уголь	Древесные отходы, Отходы производства бумаги
Финляндия	Аутокумпу	Аутокумпу Ой	-	17,5;24	-	Уголь	Торф, древесные отходы
Финляндия	Пьексамаки	Пьексамаки	-	20	-	Уголь	Торф, древесные отходы, мазут
Финляндия	Раума	Раума бумажная фабрика	-	60	-	Уголь	Кора, стоки, древесная стружка
Финляндия	Сейняйоки	Сейняйоки Энергия	-	20	-	Уголь	Торф, древесные отходы, мазут

Таблица 1.2.4. Характеристики энергетических установок по совместному сжиганию смесевых топлив в котлах с колосниковой решеткой [71]

Страна	Место расположение	Название энергоисточника	Электрическая мощность, МВт	Тепловая мощность, МВт	Биомасса, %	Исходное топливо	Топливо для совместного сжигания
Германия	Швандорф	-	-	280	-	Бурый уголь	Древесина, соломенные пеллеты
Швеция	Линкопинг	ЛТД 1	-	-	-	Уголь	Отходы производства резины
Швеция	Линкопинг	ЛТД 2	-	-	-	Уголь	-

Таблица 1.2.5. Характеристики энергетических установок по не прямому совместному сжиганию смесевых топлив [71]

Страна	Место расположения	Название энергоисточника	Электрическая мощность, МВт	Тепловая мощность, МВт	Биомасса, %	Исходное топливо	Топливо для совместного сжигания
Австралия	Зельтвег	Биококомб	137	-	3	Мелко-дисперсный уголь Польский каменный уголь	Кора, опилки, щепа
Бельгия	Руен	Руен	540	-	-	Мелко-дисперсный уголь	Щепа переработанной свежей древесины, кора, твердые и влажные осадочные стоки
Нидерланды	Гиртруденберг	Амерцентрал 9	600	-	-	Мелко-дисперсный уголь	Отходы древесины

Таблица 1.2.6. Характеристики энергетических установок по не прямому (параллельному) совместному сжиганию смесевых топлив [71]

Страна	Место расположения	Название энергоисточника	Электрическая мощность, МВт	Тепловая мощность, МВт	Биомасса, %	Исходное топливо	Топливо для совместного сжигания
Дания	Санкт-Андреа	Мабджерг	68	-	-	Мелко-дисперсный уголь	Солома, древесная щепа
Польша	Трзевиния	Сиерса	813	-	8	Мелко-дисперсный уголь	Солома
Польша	Конин	Конин	233	-	10	Мелко-дисперсный уголь	Щепа, брикеты
Польша	Остролека	Остролека	93,5	-	10	Мелко-дисперсный уголь	Щепа, кора

Анализ современного состояния проблемы по данным [71 – 80] позволяет выделить три основных способа сжигания смесевых топлив из угля и биомассы, для которых проводились промышленные испытания: прямое, косвенное, параллельное совместное сжигание [71].

1. Прямое сжигание смесевых топлив является наиболее дорогостоящим способом. Так как процесс сжигания осуществляется при параллельно работающих горелках, а топливоподача может быть осуществлена отдельно для каждой компоненты или с подачей заранее подготовленного смесевого топлива. По данным [71] добавление 3 % биомассы позволяет эксплуатировать действующую электростанцию без крупных капитальных вложений в реконструкцию оборудования. Опыт эксплуатации таким способом получен в Австрии (г. Санкт-Андреа) на электростанции мощностью 124 МВт [71].

2. Косвенное сжигание смесевых топлив из углей и биомассы [71] осуществляется при дополнительной подготовке топлива: устанавливается газификатор, в котором при термическом разложении смесевого топлива образуется синтез-газ (впоследствии сжигается в угольном котле). Такой способ позволяет достичь высокой степени термического разложения топлива и проводить максимальную очистку дымовых газов [71]. Испытания выполнены на энергоблоке в Финляндии (установленная мощности первого блока 137 МВт с применением 3 % древесины, второго – 167 МВт и 17 % древесины) [71].

3. Параллельное сжигание топлив [71]. Этот способ сжигания смесевых топлив осуществляется параллельно: отдельно подается уголь и биомасса. Процесс сжигания осуществлен в псевдосжиженном слое в едином комплексе. Пример такого метода сжигания щепы и соломы есть в Дании на тепловой электрической станции в Энстэд (энергоблок мощностью 660 МВт).

Анализ вышеизложенного позволяет сделать вывод о том, что наиболее развиты технологии по совместному сжиганию смесевых топлив из угля и древесины в Дании, Нидерландах, Швеции, Бельгии, Австрии, Норвегии, Польше, Испании и Германии [71 – 80]. Выполненный анализ существующих

энергоустановок, сжигающих смесевые топлива на основе угля и биомассы, подтверждает актуальность исследования и недостаточную изученность таких технологий, так же отсутствует теория формирования компонентного состава смесевых топлив и их сжигания. Не достаточно экспериментально определены экологические, энергетические, технические характеристики получаемых смесевых топлив. Результаты, представленные в [71 – 80], не могут быть основой анализа закономерностей процессов термического разложения смесевых топлив в условиях изменения соотношения в широком диапазоне концентрации древесины и угля при сжигании в топках тепловых электрических станций.

1.3. Проблемы и перспективы использования смесевых топлив на основе углей и древесины

Проблема снижения антропогенных выбросов угольных электростанций РФ сегодня остается нерешенной и заслуживает особого внимания, так как разработка современных высококачественных систем золоулавливания требует крупных капитальных затрат, что негативно сказывается на эффективности ведения энергетического бизнеса [71 - 80]. Поэтому поиск альтернативных решений с относительно малыми капитальными вложениями на реконструкцию действующего оборудования тепловых электрических станций остается актуальным на текущий момент и в будущем [71 - 80]. Одним из решений данной задачи может стать совместное сжигание смесевых топлив на основе угля и древесины. При сжигании такого топлива снижается образование SO_2 (приводят к образованию кислотных дождей) и других вредных веществ по сравнению с сжиганием угля. Степень снижения вредных выбросов ТЭЦ будет зависеть от концентрации основного топлива – угля и используемой древесины [71 - 80].

В работах [71 – 75] показано, что при производстве тепловой энергии на тепловых электрических станциях добавление до 10 % биомассы приводит к снижению энергетических характеристик энергоустановок не более чем на 5 %.

Также предполагается [71 - 75], что выбросы CO₂ к 2035 г. могут быть сокращены до 450 миллионов тонн в год. В зависимости от качества биомассы и ее доли в угле чистый КПД тепловых электростанций может варьироваться от 36 % до 44 %. Однако авторы [71 – 75] утверждают, что увеличение доли биомассы более чем на 10 % снижает стабильность процессов горения. Предполагают, что данный факт связан с техническими проблемами формирования и подачи смесевых топлив для совместного сжигания на тепловых электрических станциях.

Согласно проведенным расчетам [71] замена 10 % угля на смесевые топлива в энергетике по всему миру приведет к увеличению объемов выработки тепловой энергии с использованием биомассы до 150 ГВт [71]. Так, мощность современных тепловых электростанций, сжигающих смесевые топлива из углей и биомассы, оценивается в 1 – 10 ГВт [71] (неопределенность связана с отсутствием фактических данных о концентрации биомассы в смесевых топливах на основе углей, сжигаемых в современных энергоустановках тепловых электрических станций), а общий объем биомассы, переведенный в тепловую энергию составляет около 62 ГВт [71 – 75]. Таким образом существует большой потенциал совместного сжигания смесевых топлив на основе углей и древесины в том числе.

Оценки ресурсов биомассы [71 – 75] сильно различаются. Реалистичные оценки должны учитывать только устойчивую биомассу, то есть ресурсы, которые не конкурируют с производством продовольствия и не вносят изменений в землепользование с негативным воздействием на окружающую среду и климат.

Исследователи университета Восточной Англии оценивают глобальный устойчивый потенциал энергии биомассы более 100 МДж в год (в основном, на основе отходов производства сельского хозяйства, лесного хозяйства и лигноцеллюлозного сырья). Энергетическое использование биомассы, по предварительной оценке [71 – 75], возможно, приведет к повышению ценности лесного и сельскохозяйственного секторов. Применение биомассы является привлекательным при малом плече доставки. С увеличением транспортной составляющей преимущества ее использования значительно снижаются [71 – 75].

Развивающиеся страны, такие как Маврикий, Гватемала, Гваделупа, Индия, Доминиканская Республика [75 – 80], выращивают в крупных масштабах сахарный тростник. В этих государствах исследуют возможность совместного сжигания отходов его производства с углем. Такие государства как Малайзия и Таиланд проводят исследования по совместному сжиганию рисовой шелухи с углем [80 – 82].

Авторы [71 – 82] установили, что при низкой доле биомассы, смесевое топливо целесообразно размалывать на угольных мельницах с последующим совместным сжиганием через угольные горелки. Это самый простой и наиболее экономически выгодный способ применения смесевых топлив из углей и древесины. Соотношение же массовых долей основных компонент (древесины и углей) до сих пор выбирается расчетным способом в большинстве исследований, что не позволяет достаточно оценить возможность увеличения концентрации древесины более чем 10 % в смесевом топливе. В тоже время известно, что использование смесевых топлив на действующем оборудовании, в ряде случаев приводило к выходу из строя систем подачи топлива [71 – 82].

Способ отдельного сжигания требует для каждого вида топлива установки системы топливоприготовления, дополнительных горелочных устройств. Данный вариант использования смесевых топлив требует крупных капитальных затрат для организации дополнительной системы подачи топлива (древесины) и реконструкцию топki котла под горелочные устройства сжигающих биомассу [80 – 84].

Проведенные ранее исследования [71 – 84] позволяют предположить, что смесь биомассы и угля ограничена малыми концентрациями в угле, однако постоянно разрабатываются новые решения по увеличению эффективности ее использования.

По сравнению с сжиганием смесевых топлив в псевдоожиженном слое эффективность котлов при прямом совместном сжигании ниже. Процессы, как правило, ограничиваются низкими коэффициентами совместного сжигания.

Основные технические проблемы, связанные с технологией совместного использования биомассы, сформулированы следующим образом [71 – 84]:

а) необходимость проведения системных экспериментальных исследований по определению энергетических и технических характеристик топлив.

б) в связи с тем, что древесина, как правило, влажная и гидрофильная, а также нерастворима, требуется качественная подготовка, хранение и организация доставки топлива;

в) в зависимости от качества сырья сжигание смесевых топлив из угля и древесины может привести в большей или меньшей степени к снижению тепловыделения таких топлив.

Синергетический эффект при сжигании смесевых топлив из углей и древесины заключается в том, что их пиролиз начинается значительно раньше однородного угля. За счет увеличения доли древесины, наблюдается рост выхода летучих веществ и скорость термического разложения таких топлив, также снижается содержание серы и золы. Характеристики топлива и золы играют важную роль в проектировании котлов, поскольку эрозия и коррозия энергетического оборудования должны быть сведены к минимуму.

Анализ вышеизложенного позволяет сделать вывод о том, что совместное сжигание смесевых топлив на основе углей разных марок и древесины недостаточно исследовано. Диапазон возможного изменения концентрации древесины для одновременного сжигания не определен, не установлена концентрация древесины в топливе, обеспечивающая максимальное снижение негативного воздействия тепловых электрических станций на окружающую среду.

Выводы по первой главе

1. Установлено, что большой интерес к исследованиям возможности перевода ТЭС на сжигание смесевых топлив из углей и биомассы связан с попыткой решения мировым сообществом глобальной проблемы снижения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, а также уменьшения объемов привозных закупаемых энергетических ресурсов, частичной или полной их замены местными биоресурсами. Известны более 200 вариантов малого или крупнотоннажного сжигания различных смесевых топлив на основе углей и биомассы (рисовая шелуха, овсяная солома, сахарный тростник, отходы переработки оливок и др.) как в рамках экспериментов так и в условиях длительной (годы) работы котельных агрегатов ТЭС.
2. Анализ мирового опыта применения смесевых топлив на основе углей и биомассы в качестве энергетического сырья показывает, что отсутствует общая теория применения таких топлив для сжигания на тепловых электрических станциях.
3. Установлено, что отсутствуют методы теоретически или экспериментально обоснованного выбора концентрации биомассы в смесевом топливе. К настоящему времени экспериментально установлено, что при доле биомассы в смесевом топливе до 10 % сжигание последнего осуществляется в подавляющем большинстве вариантов стабильно. Не определен диапазон температур зажигания, горения и степени выгорания типичных смесевых топлив на основе даже широко распространенных углей и древесины.
4. Результаты проведенного анализа подтверждают актуальность проведения экспериментальных исследований основных свойств смесевых топлив из российских углей с добавлением отходов лесопромышленных комплексов (древесины) при ее различных концентрациях с целью определения возможности использования таких топлив на тепловых электрических станциях.

5. Известны три способа сжигания смесевых топлив из углей и биомассы на ТЭС. Наиболее эффективным и менее затратным по реконструкции котлоагрегата способом является сжигание в псевдосжиженном слое. Второй способ сжигания таких видов топлив предполагает подачу топлива по отдельным горелкам и смешение в факеле топочного устройства. Третий, наименее исследованный, предполагает сжигание смесевых топлив из углей и биомассы в существующих горелочных устройствах котлоагрегатов ТЭС.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СМЕСЕВЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ УГЛЕЙ И ДРЕВЕСИНЫ

Анализ литературы по теме диссертационной работы показал, что до последнего времени основные усилия исследователей, проектировщиков и конструкторов направлены [71 – 84] на оценку возможности использования смесевых топлив (например, на основе угля и соломы [71]) в качестве основного топлива для тепловых электростанций. Однако все полученные ранее результаты (как экспериментальные, так и теоретические) имеют частный характер и не могут, как правило, использоваться для обоснования возможности применения других смесевых топлив (на основе типичных для РФ углей с биомассой при разных соотношениях массовых долей первой и второй компонент). При этом, ранее анализировалась возможность беспроблемного сжигания угля с некоторой добавкой биомассы без серьезной реконструкции котельного оборудования.

Автором диссертации разработан новый подход к оценке возможности использования смесевых топлив на основе угля и биомассы при сжигании в топках паровых котлов ТЭС. Сущность этого подхода заключается в оценке преимуществ и недостатков смесевое топлива по сравнению с однородным угольным по группе из трех критериев, каждый из которых характеризует один из важнейших аспектов работы тепловых электростанций (энергетика, экономика, экология).

Для обоснованного выбора таких критериев и расчета их численных значений необходимы характеристики смесевых топлив, достаточные для сравнения последних с углем. Поэтому одной из целей экспериментов, результаты которых приведены ниже, было установление основных теплотехнических, экологических, энергетических характеристик группы смесевых топлив на базе нескольких типичных углей разных месторождений РФ.

Исследования проводились для четырех углей, существенно отличающихся по своим характеристикам один от другого. Такой набор топлив был выбран для

обоснованного вывода о возможности использования результатов проведенных экспериментов при оценке перспектив применения смесевых топлив на основе угля и отходов древесины в теплоэнергетике. Выбор второй компоненты проводился с учетом того, что подавляющее большинство отходов лесопиления и деревообработки представляют собой опилки или стружку (в ряде случаев щепу древесины хвойных (в большей степени)) и лиственных пород. Поэтому основные эксперименты проводились с древесиной, полученной в результате пиления сосны.

Для минимизации проблем, связанных со спецификой теплопереноса в слоях частиц древесины разной концентрации и дисперсности (опилки, стружка, щепа) основные эксперименты выполнялись с топливами, второй компонентой которых были сосновые опилки.

Необходимо отметить, что по результатам анализа литературы по изучаемой проблеме (глава 1) установлена наиболее приемлемая для сжигания в топках котлов тепловых электростанций концентрация биомассы в смесевых топливах на основе углей – 10 %. При таком содержании, например, соломы [71] достигается, как правило, положительный эффект без значимых негативных последствий. Но отсутствуют сведения о возможности повышения доли биомассы более 10 % в таких смесевых топливах, хотя установлено, что при их сжигании в псевдосжиженном слое никаких технологических проблем при использовании разных видов биомассы не возникало. Поэтому целесообразны исследования изменения характеристик смесевых топлив на основе угля с ростом концентрации древесной компоненты в реально возможном диапазоне изменения.

При всем многообразии видов древесной биомассы и разных затратах на ее доставку к месту сжигания на многих лесопокрытых территориях РФ древесина будет стоить много меньше любых энергетических углей, доставляемых даже из соседних регионов. В этой связи также целесообразно повышение доли древесной биомассы в смесевом топливе до максимально возможной из-за технологических

ограничений величины. Исследования проведены в широком диапазоне изменения отношений массовых долей первой и второй компоненты.

2.1. Методика приготовления смесевых топлив на основе углей и древесины

Проведение экспериментальных исследований начиналось с подготовки топлива. Эксперименты проводились в лабораторных условиях при температуре окружающей среды 20 °С, давлении 101,4 кПа и влажности 75 %.

Для приготовления смесевых топлив в качестве основных компонентов использованы угли месторождений: «Листвяжное» марки Д, «Алардинское» марки Т, «Балахтинское» марки ЗБ, «Бородинское» марки 2Б (частицы размером менее 80 мкм). В качестве второй компоненты использовались отходы производства пиломатериалов ООО Дзержинский ЛПК г. Томск (размер частиц менее 200 мкм). Отходы лесопиления предварительно очищались от разнородных примесей (кора, сучки, ветки), образующихся при пилении. Подготовка смесевых топлив проходила с использованием древесины одного происхождения (отходы одной смены лесопиления).

При подготовке экспериментов навески углей (все исследовавшиеся угли широко применяются как в большой, так и в малой энергетике) размалывались в шаровой барабанной мельнице до мелкодисперсного состояния. В состав мельницы входили 5-литровый керамический барабан, мелющие шары того же материала и специализированные валки. После измельчения при помощи сит (ГОСТ Р 51568-99) выполнялся рассев и приготовление навесок со средним размером частиц менее 80 мкм.

Отбор древесины проведен в пригороде г.Томска на предприятии ООО Дзержинский ЛПК г. Томска. Работа предприятия направлена на производство древесной продукции для строительства деревянных домов и бань. Строительство такого рода, в основном, осуществляется из сосновых пород древесины, которые широко распространены и используются на предприятиях ЛПК г.Томска, Томской области и в городах РФ повсеместно. Поэтому для проведения

исследований в диссертационной работе выбраны именно такого рода отходы лесопромышленного производства.

Подготовка навесок смесового топлива проводилась с помощью отбора опила пиломатериалов с последующим просеиванием через сито размером 200 мкм.

Навески из частиц, прошедших через сита, формировались в смесевые топлива при разных объемных концентрациях древесины в смеси с углями марок Д, Т, ЗБ, 2Б в компонентном соотношении: 10 % / 90 %; 25 % / 75 %; 50 % / 50 %. Готовая смесь помещалась в оцинкованный барабан планетарной мельницы Pulverisette 6 с шарообразными мелющими телами диаметром 5 мм в массовом соотношении 1:1. Процесс смешения осуществлялся при скорости вращения 500 об/мин в течение семи минут [72].

Следует отметить, что все экспериментальные исследования, результаты которых приведены ниже, проводились не только для смесевых топлив, но и для каждой компоненты в отдельности.

Задачи с методиками исследований сформулированы и выбраны, соответственно, на основании анализа современной литературы по изученной проблеме (глава 1). Так для широкого внедрения смесевых топлив на основе угля и древесины, в первую очередь, необходимы оценки тепловых эффектов их сгорания. Достаточно очевидно, что энергетический потенциал любых композиций с добавлением древесины будет несколько ниже угля, являющегося основной компонентой. Но при таком анализе важно оценить масштабы этого снижения, потому, что очевидны, даже на первый взгляд, преимущества древесины перед углями (для лесопокрытых территорий) по концентрациям вредных примесей в продуктах сгорания, а также по стоимости топлива в целом. Цена угля любого месторождения составляет от 900 до 4000 рублей за тонну, отходы же лесопиления практически не стоят ничего. Крупные предприятия могут даже вывозить их бесплатно потребителю (опилки, как минимум). Поэтому для обоснованных выводов о возможности практического использования

смесевых топлив необходимы в свою очередь установленные в экспериментах численные значения основных теплотехнических, энергетических и экологических характеристик таких топлив. При этом необходимо еще раз подчеркнуть, что по данным [73 – 86] сжигание смесевых топлив на основе угля и биомассы возможно без каких-либо серьезных проблем при использовании технологии циркулирующего кипящего слоя. Такие технологии в настоящее время используются на ряде тепловых электростанций России и проектируется создание ряда новых энергоблоков такого типа на нескольких ТЭС. Кроме того, можно отметить, что и другие технологии сжигания (рассмотренные в первом разделе) смесевых топлив на основе угля с добавлением различных видов биомассы используются на ряде электростанций стран Западной Европы в последние годы.

2.2 Методика определения технических характеристик смесевых топлив на основе углей и мелкодисперсной древесины

Определение структуры и фракционного состава смесевых топлив

Проведены эксперименты по определению элементного состава, формы и структуры смесевых топлив. Результаты таких исследований являются частью исходных данных, необходимых для проведения поверочных расчетов с целью оценки возможности использования смесевых топлив для сжигания в котлоагрегатах ТЭС. Анализ проводился методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX) с использованием сканирующего электронного микроскопа (РЭМ) JSM 6000С (JEOL, Япония) [87]. Прибор позволяет исследовать структуру поверхности смесевых топлив с увеличением от 10 до 60 000 крат.

Микроскоп JSM 6000С обеспечивает возможность сканирования поверхности образца максимально сфокусированным электронным пучком с одновременной регистрацией возбужденного этим пучком излучения [87]. В

качестве такого излучения используют низкоэнергетические (до 50 эВ) вторичные электроны, которые генерируются материалом образца при релаксации и возбуждении внешних электронных оболочек, вызванные облучением. Это позволяет отображать рельеф поверхности исследуемого образца. Для повышения качества изображения частиц они покрываются тонким слоем золота (0,02 мкм), а ускоряющее напряжение устанавливается в диапазоне излучений от 10 до 15 кВ.

Технические характеристики топлив (калорийность, зольность, влажность и выход летучих) используются традиционно для обоснования возможности их эффективного применения при сжигании в топках энергетического оборудования. Для численной оценки этих характеристик исследовавшихся топлив проведены экспериментальные исследования в соответствии с методиками, описанными в ГОСТ 147-2013 (ISO 1928-2009), ГОСТ 11022-95, ГОСТ 27314-91 (ISO 589-81), ГОСТ 6382-2001 [88 – 91].

Определение теплоты сгорания смесевых топлив. Определение высшей теплоты сгорания и вычисление низшей теплоты сгорания смесевых топлив из углей различных марок и древесины, а также продуктов их обогащения и термической обработки, осуществляется по результатам полного сжигания навески исследуемого состава в калориметрической бомбе. Анализ проводился в изотермическом режиме при постоянном объеме в среде сжатого кислорода под давлением 30 кгс/см². Выполнялись измерения подъема температуры воды в калориметрическом сосуде. При этом рассчитывались поправки на теплоту, выделяемую при сжигании запальной проволоки, теплоту образования и растворения в воде серной и азотной кислот [88]. Определение удельной теплоты сгорания смесевых топлив проведено на калориметре сжигания АБК-1 с бомбой [88] по ГОСТ 147-2013.

Принцип работы калориметра заключается в измерении температуры калориметрической системы с заранее известной эффективной теплоемкостью при сжигании строго определенной массы исследуемого топлива [88]. Подготовка

к проведению калориметрического опыта заключается в приготовлении навески, бомбы и помещения.

Измерения проводились в отдельной комнате, защищенной от прямого воздействия солнечных лучей, с малыми колебаниями температуры и влажности воздуха. В ходе эксперимента исключалось присутствие в помещении разогретых нагревательных приборов, оборудования, работающего с выделением тепла, а также включенных вентиляторов и кондиционеров, создающих сильные потоки воздуха. Амплитуда колебаний температуры окружающего воздуха за время работы не превышала 1 °С за 30 мин, и ее значения фиксировались при регистрации результатов единого эксперимента. Во время определения теплоты сгорания двери и окна были плотно закрыты.

Каждая навеска аналитической пробы смесевых топлив из углей и древесины взвешивалась на аналитических весах ViBRA НТ 224RCE (дискретность измерений 10^{-4} г) и составляла по массе 0,8 – 1,0 г.

Измерения и расчет проводились в соответствии с методикой ГОСТ 147-2013 [88].

Определение зольности смесевых топлив. Для определения зольности подготовленные навески топлив тщательно перемешивались, взвешивались на весах ViBRA НТ 224RCE (дискретность измерений 10^{-4} г) массой $1 \pm 0,1$ г и распределялись равномерным слоем без насыпания топлива на края лодочки. Лодочки с навесками топлив вновь взвешивались, после чего их помещали в холодную терморегулируемую печь TSMP Ltd R14-U с цифровым терморегулятором (погрешность измерений ± 1 °С) и нагревали в течение 30 минут до температуры 250 °С. В течение следующих 30 минут повышали температуру до 500 °С, затем в течение 60 минут – до 815 ± 15 °С и выдерживали при этой температуре 60 минут. После прокаливания лодочки извлекались из печи, охлаждались с зольным остатком до комнатной температуры и взвешивались, после чего вновь помещались в печь для контрольного

прокаливания на 15 минут. Прокаливание повторялось до тех пор, пока разность масс при двух последних взвешиваниях не превышала допустимую величину.

Расчеты зольности выполнены в соответствии с методикой по ГОСТ 11022-95 [89].

Определение влажности смесевых топлив. Содержание влаги в смесевых топливах из углей различных марок и древесины определялось по ГОСТ 27314-91. Эксперименты с каждой навеской смесевых топлив дублировалась с целью оценки погрешности результатов измерений. Терморегулируемая печь TSMP Ltd R14-U с цифровым терморегулятором (погрешность измерений ± 1 °С) прогревалась до температуры 105 – 110 °С. Бюксы вместе с крышками взвешивались на весах ViBRA HT 224RCE (дискретность измерений 10^{-4} г), после чего в них помещали навески смесевых топлив массой $10 \pm 1,0$ г и снова взвешивали. Затем приоткрытые бюксы с топливом помещали в терморегулируемую печь. Смесевые топлива из бурых углей и древесины выдерживали в печи в течение 90 минут, а смесевые топлива из каменных углей и древесины – в течение 60 минут. Отсчет времени начинался с момента достижения температуры 105 – 110 °С в терморегулируемой печи TSMP Ltd R14-U с цифровым терморегулятором (погрешность измерений ± 1 °С). После выдержки необходимого по эксперименту промежутка времени бюксы вынимались из терморегулируемой печи, накрывались крышками и охлаждались до комнатной температуры. Далее бюксы с смесевыми топливами взвешивались на весах ViBRA HT 224RCE (дискретность измерений 10^{-4} г). После записи показаний крышки бюкс приоткрывались повторно и снова помещались в терморегулируемую печь для контрольного просушивания на 30 минут. Контрольные сушки проводились до тех пор, пока массы навесок двух последних взвешиваниями не отличались на заданную величину. Численная оценка влаги в топливах выполнена в соответствии с методикой [90].

Определение выхода летучих продуктов пиролиза смесевых топлив. Выход летучих веществ в топливе оказывает непосредственное влияние на

организацию топочного процесса, выбор объема топочной камеры и полноту сжигания топлива. Для определения выхода летучих веществ в первую очередь нагревалась терморегулируемая печь TSMP Ltd R14-U с цифровым терморегулятором (погрешность измерений ± 1 °C) до температуры 900 ± 5 °C. Далее взвешивались пустые тигли с крышками. Подготовленные навески смесевых топлив из углей и древесины массой $1 \pm 0,1$ г помещались в тигли. Взвешивание осуществлялось вместе с крышкой тигля на весах ViBRA HT 224RCE (дискретность измерений 10^{-4} г). Подготовленные тигли с топливами устанавливались на подставку и быстро помещались в печь, где выдерживались в течении 7 минут. Затем печь снова открывалась, подставка вынималась и охлаждалась на воздухе до комнатной температуры при закрытых крышках тиглей. После этого тигли взвешивались на весах ViBRA HT 224RCE (дискретность измерений 10^{-4} г). Расчеты по определению выхода летучих веществ осуществлялись в соответствии с методикой [91].

2.3. Методика определения скорости термического разложения смесевых топлив на основе углей и древесины

Знание численных значений скорости термического разложения смесевых топлив, температур начала термического разложения и полного термического разложения обеспечивало возможность оценки степени влияния древесины в смесевых топливах на основе углей разных марок Д, Т, 3Б, 2Б на характеристики горения. Экспериментальные исследования проведены на установке Netzsch STA 449 F3 Jupiter (Netzsch, Germany) [92]. Это оборудование позволяет выполнять исследования в интервалах температур 25 – 1300 °C. Процесс роста температур варьируется в диапазоне скоростей нагревания от 0,1 до 100 °C/мин или от 0,1 до 10 °C/мин [93]. Анализатор работает при продувке через реакционную камеру инертного или реакционного газа. Термический анализ каждой навески массой 20 мг выполнялся при скорости роста температуры 10 °C/мин. (максимальная достигнутая температура 1100 °C) [93].

Для определения скорости термического разложения смесевых топлив использована методика [93]. Температура начала термического разложения определялась методом [94 – 95]. Индекс зажигания (D_i) рассчитывался по формуле [92]:

$$D_i = \frac{(d_w / d_t)_{\max}}{t_p \cdot t_e}, \quad (1)$$

Здесь $(d_w / d_t)_{\max}$ – максимальная скорость термического разложения,

t_p – время достижения максимальной скорости термического разложения;

t_e – время начала термического разложения.

Индекс (D_f) использовался для оценки степени полного термического разложения, который описывается формулой [95 – 96]:

$$D_f = \frac{(d_w / d_t)_{\max}}{\Delta t_{1/2} \cdot t_p \cdot t_f}, \quad (2)$$

где $\Delta t_{1/2}$ – полупериод в момент достижения максимальной скорости термического разложения;

t_f – время полного термического разложения топлива.

Анализ степени реактивности топлив позволяет определить изменения характеристик исследуемых смесевых топлив из углей разных марок и древесины при варьировании доли первой базовой компоненты.

2.4. Методика определения компонентного состава выделяющихся газов при термическом разложении смесевых топлив

Для оценки влияния древесины в топливах с углями разных марок на выход летучих веществ выполнен анализ продуктов термического разложения смесевых топлив квадрупольным масс-спектрометром QMS 403 C Aeolos [97 – 98].

Масс-спектрометр предназначен для комплексного анализа многокомпонентных газов и позволяет осуществлять динамический контроль состава различных смесей. При проведении анализа дополнительное оборудование было непосредственно связано с термоанализатором Netzsch STA 449 F3 Jupiter (Netzsch, Germany), и регистрация масспектров осуществлялась совместно с термоанализом [97 – 98].

Во время проведения одновременной хромато-масс-спектрометрии формировался дополнительный сигнал, характеризующий время, за которое вещество проходило через хроматографическую колонку [98]. Это время определялось при одних и тех же условиях эксперимента и являлось важной характеристикой вещества, позволяющей разделить даже сложные составы и определять масс-спектры каждого соединения в смеси. Площадь получаемого пика масс-спектра пропорциональна содержанию вещества в анализируемом образце, что позволяло при соблюдении определенных условий проводить анализ состава образцов.

Полученные масс-спектры выделяющихся газов при термическом разложении исследуемых смесевых топлив сравнивались с выделяемым количеством газов при разложении каждой навески однородных углей. По результатам сравнений проводился анализ массы выделяемых антропогенных газов при термическом разложении смесевых топлив на основе углей и древесины.

Вследствие определенной неоднородности всех исследовавшихся углей в конкретных численных по объему навесках вследствие возможных небольших

отклонений содержаний органической и минеральной частей топлива проводилась оценка случайных погрешностей определения характеристик исследовавшихся смесевых топлив. Для этого все эксперименты при фиксированных значениях основных значимых факторов проводились несколько раз (3-4), результаты усреднялись и рассматривались среднеквадратические отклонения, относительные значения которых не превышали (4-5 %). На этом этапе обработки результатов экспериментов проводилась оценка систематических ошибок измерений основных определяемых характеристик. Значения погрешностей, (вследствие высокого уровня систем регистрации параметров, использовавшегося аналитического и измерительного оборудования) не превышали 1,5 %.

Основные результаты и выводы по второй главе

1. Разработан новый комплексный подход (на основе методик проведения экспериментальных исследований) к оценке возможности использования смесевых топлив из углей разных марок и древесины в котлоагрегатах ТЭС.
2. Сформирован комплекс методик, позволяющих проводить экспериментальные исследования состава и свойств смесевых топлив на основе углей и древесины, необходимых для оценки возможности их использования в качестве топлив ТЭС.
3. Циклы экспериментов на основе разработанных методик обеспечивают возможность определения основных технических и энергетических характеристик смесевых топлив на основе углей и древесины, а также степень их реактивности и содержание оксидов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СМЕСЕВЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ УГЛЕЙ И ДРЕВЕСИНЫ

3.1. Анализ влияния концентрации древесины в смесевых топливах на основе углей марок Д, Т, ЗБ, 2Б на их теплотехнические, энергетические и экологические характеристики

Приготовление смесевых топлив является важным процессом при определении возможности их сжигания в котлоагрегатах ТЭС. С использованием методик, описанных в 2.2, проведен комплекс экспериментальных исследований по определению основных характеристик (теплоты сгорания, влажности, зольности и выхода летучих веществ) исследуемых смесевых топлив на основе углей марок Д, Т, ЗБ, 2Б и мелкодисперсной древесины.

В таблице 3.1.1. приведена нумерация в соответствии с которой сформированы компонентные составы смесевых топлив.

Таблица 3.1.1. Компонентный состав смесевых топлив

№ п/п	Древесина, %	Уголь, %
1	100	0
2	0	100
3	10	90
4	25	75
5	50	50

Диапазон изменения концентраций древесной компоненты выбран на основании анализа опыта работы тепловых электростанций на смесевых топливах [99 – 103]. Установлено [99 – 103], что при концентрациях биомассы любого происхождения до 10 % достигается безусловный положительный эффект ее использования при любых трех возможных технологий сжигания. Поэтому основной интерес представлял анализ возможности увеличения доли древесной

компоненты в смесевых топливах до значений, обеспечивающих более высокую (по группе основных критериев) эффективность процессов сжигания таких топлив в топках котельных установок ТЭС.

Ниже приведен перечень основных компонент, используемых при формировании смесевых топлив:

а – Древесина (отходы производства пиломатериалов ООО Дзержинский ЛПК г. Томск).

б – Уголь марки Д (месторождение «Листвяжное» Кемеровская область).

в – Уголь марки Т (месторождение «Алардинское» Кемеровская область).

г – Уголь марки ЗБ (месторождение «Балахтинское» Красноярский край).

д – Уголь марки 2Б (месторождение «Бородинское» Красноярский край).

Результаты экспериментальных исследований по определению теплоты сгорания, влажности, зольности и выхода летучих веществ исследуемых топлив, приведены в таблице 3.1.2. Номер в первом столбце таблицы соответствует процентному соотношению компонент, буквенное обозначение соответствует сырью, используемому в смесевом топливе.

Таблица 3.1.2. Результаты экспериментальных исследований по определению теплоты сгорания, влажности, зольности и выхода летучих веществ

Топливо	Теплота сгорания, Q, МДж/кг	Влага, W, %	Зольность, A, %	Выход летучих, V ^{daf} , %
1а	21,73	5,35	10,44	38,89
2б	26,20	5,83	15,76	12,36
3аб	24,92	5,42	14,00	14,55
4аб	24,31	5,23	11,91	38,89
5аб	23,84	5,35	10,44	40,96
2в	25,72	5,52	18,37	25,56
3ав	25,6	5,42	14,24	26,46
4ав	25,22	5,34	13,65	28,33
5ав	24,79	5,41	11,08	39,95
2г	25,79	9,75	3,45	40,09
3аг	23,91	8,82	3,2	44,89
4аг	23,83	14,21	3,11	47,41

Топливо	Теплота сгорания, Q, МДж/кг	Влага, W, %	Зольность, A, %	Выход летучих, V ^{daf} , %
5аг	23,75	12,87	2,75	54,75
2д	23,72	8,25	7,42	43,39
3ад	23,68	12,29	4,68	47,93
4ад	23,44	10,45	4,53	51,7
5ад	23,35	10,29	3,82	66,17

Представленные в таблице 3.1.2 результаты позволяют сделать вывод о том, что увеличение доли мелкодисперсной древесины в угле до 50 % приводит к снижению теплотворной способности смесевых топлив менее чем на 9 % по сравнению с однородными исследовавшимися типичными и широко используемыми углями.

Анализ полученных результатов показывает, что составы соответствующие смесевым топливам с соотношением компонент 50 % / 50 % (5аб, 5ав, 5аг, 5ад), незначительно отличаются по энергетическим характеристикам от однородного угля. Однако при таком соотношении компонент снижение зольности составляет до 50 %, выход летучих веществ растет до 52 %. Важным является и то, что установленный эффект способствует существенному снижению температуры воспламенения исследуемых топлив.

На рисунках 3.1.1 – 3.1.4 представлены фотографии поверхности навески смесевых топлив, полученные с использованием микроскопа (РЭМ) JSM 6000С (JEOL, [97]). Анализ структуры смесевых топлив выполнен при соотношении компонент 50 % / 50 % (увеличение изображения в 500 крат). Выбор такого соотношения компонент обусловлен целесообразностью анализа физических и химических процессов, протекающих в смесевых топливах на основе угля и древесины, приводящих, как установлено в проведенных экспериментах, к синергетическому эффекту их сжигания. При максимально возможной на практике концентрации древесной компоненты (50 %) такой анализ с

использованием информации о структуре поверхности смесевых топлив наиболее целесообразен.

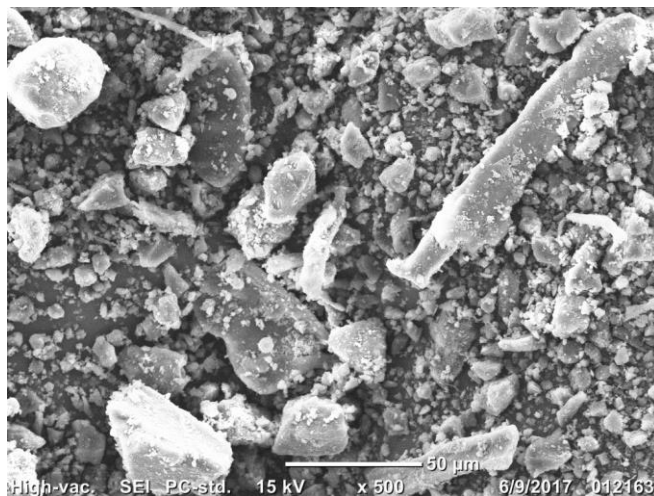


Рисунок 3.1.1. Фотография поверхности навески смесевого топлива из угля марки Д и древесины при отношении компонент 50 % / 50 %

Анализ фотографии микрочастиц смесевого топлива из угля марки Д и древесины показал, что частицы угля имеют обломочную форму (характерный размер менее 80 мкм). На частицах древесины продолговатой формы и существенно более крупных (характерный размер до 200 мкм) расположены микрочастицы угольной пыли.

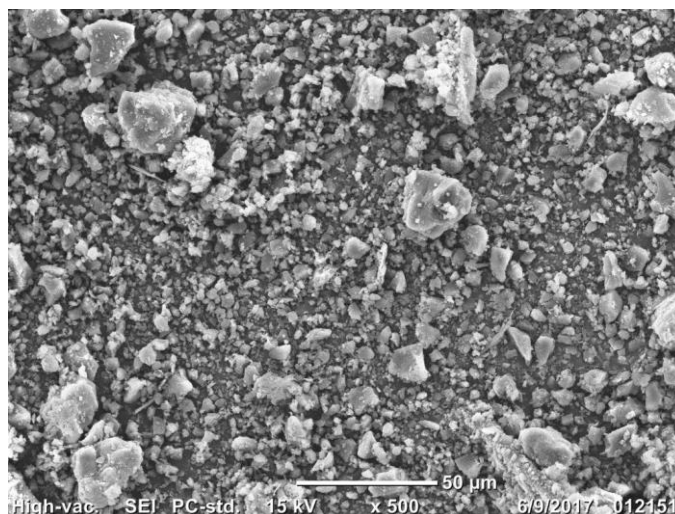


Рисунок 3.1.2. Фотография поверхности навески смесевого топлива из угля марки Т и древесины при отношении компонент 50 % /50 %

Анализ фотографии навески топлива (рисунок 3.1.2) дает основание для вывода, что частицы угля марки Т более хрупкие, так как фракции размером менее 50 мкм преобладают над более крупными. На фотографии поверхности навески смесового топлива также видно, что частицы древесины имеют малые размеры, сопоставимые с размером частиц угля. Из рисунков 3.1.1. и 3.1.2 видно, что смесевые топлива из угля марки Т и древесины более однородные и их элементарные фрагменты имеют более округлую форму по сравнению с частицами топлив из угля марки Д и древесины. Можно сделать вывод, что воспламенение топлива на основе тощего угля будет происходить быстрее по сравнению с длиннопламенным, что важно при разработке технологий сжигания смесевых топлив. Кроме того, можно сделать вывод, что горение второго топлива (на основе угля марки Т) будет проходить более стабильно, т.к. характерные размеры и первой и второй его компоненты значительно (в 1,5 – 2 раза) меньше размеров частиц топлива на основе длиннопламенного угля.

Аналогичный анализ структуры поверхности навесок проведен и для топлив на основе бурых углей (рис.3.1.3, 3.1.4).

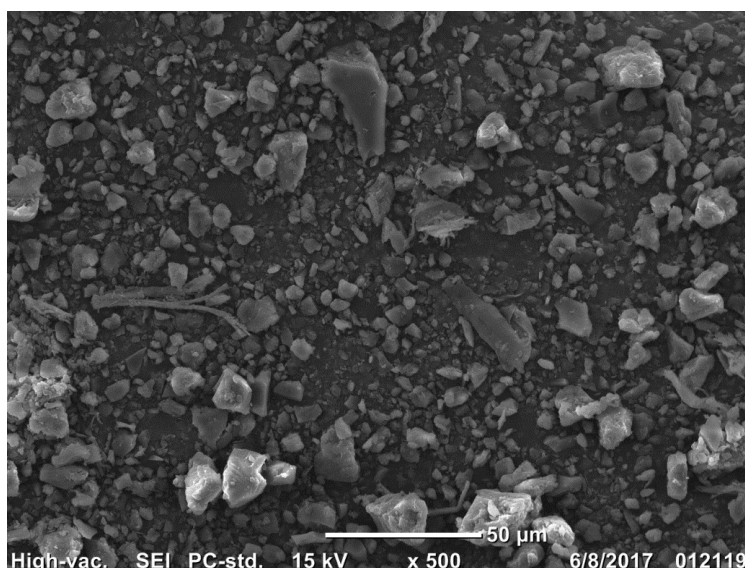


Рисунок 3.1.3. Фотография поверхности навески смесового топлива из угля марки ЗБ и древесины при отношении компонент 50 % /50 %

Из фотографии, представленной на рисунке 3.1.3 видно, что частицы угля имеют специфическую форму неправильных многогранников, а частицы

древесины продолговатую волокнистую. В отличие от навесок смесевых топлив на основе длиннопламенного и каменного углей, фотографии поверхностей которых изображены на рисунках 3.1.1 и 3.1.2, мелкие частицы угольной пыли имеют структуру с явно выраженными плоскими гранями.

Сопоставление рисунков 3.1.1 – 3.1.3 показывает существенные отличия структуры трех смесевых топлив (на основе длиннопламенного, тощего и бурого углей), полученных в аналогичных условиях. Можно сделать вывод об определенных преимуществах составов топливных композиций на основе углей Т и ЗБ вследствие малых характерных размеров частиц угольной и древесной компонент, что благоприятно влияет на характеристики процессов зажигания и горения. Известно [104 – 108], что в идентичных условиях нагрева малые по размерам фракции измельченного твердого топлива зажигаются существенно быстрее, по сравнению с крупными. Это обусловлено тем, что теплопроводность любого конденсированного вещества выше теплопроводности воздуха. Поэтому при локальном нагреве большой по размерам частицы топлива температура ее поверхности растет не так быстро, как мелкой вследствие перетока теплоты в глубинные слои частицы. Маленькая же по размерам частица топлива прогревается до высоких температур много быстрее.

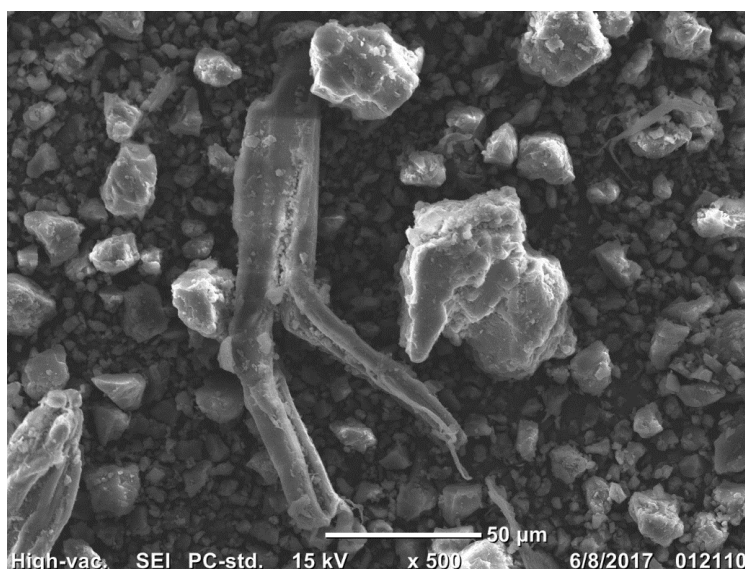


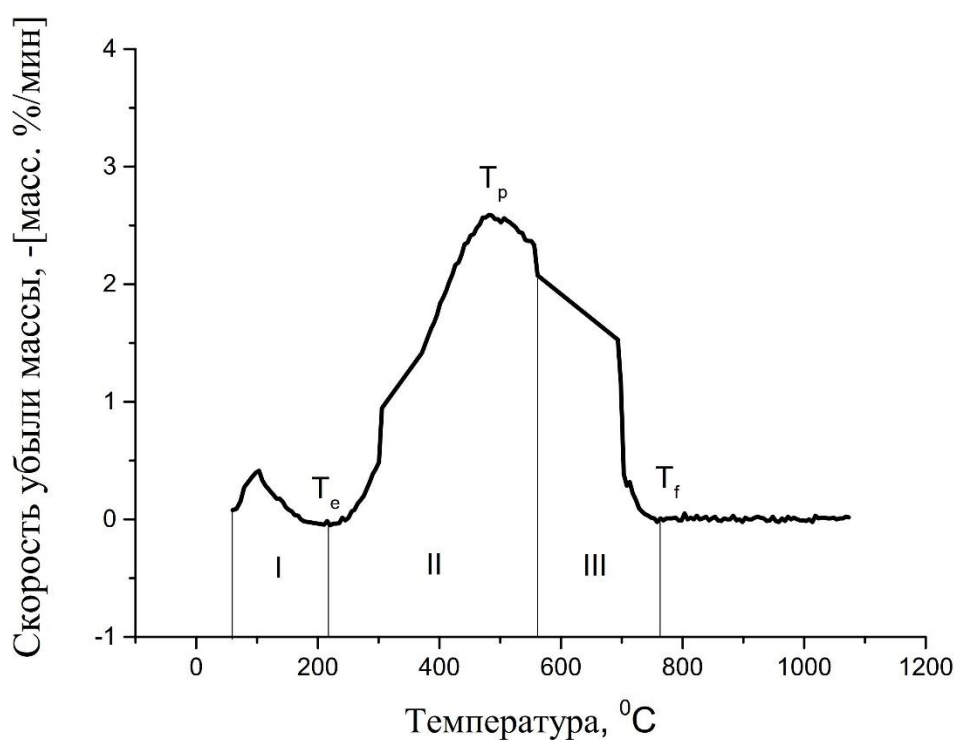
Рисунок 3.1.4. Фотография поверхности навески смесевого топлива из угля марки 2Б и древесины при отношении компонент 50 % /50 %

Анализ фотографии микрочастиц топлива из угля марки 2Б и древесины показал, что частицы угля имеют явно выраженные плоские грани. Частицы древесины более крупных размеров (по отношению к углю) и имеют волокнистую структуру. Проведенный анализ микрофотографий смесевых топлив позволил установить, что частицы древесины при смешении с углем подвергаются деформации с расщеплением волокон, что способствует формированию более однородных смесевых топлив. Характерный размер частиц углей при смешении топлив, как видно на рисунках 3.1.1 – 3.1.4 составляет менее 50 мкм. Древесина же при смешении с углями марок Д и 2Б менее деформирована, размер частиц более 50 мкм. Такие топлива менее однородны по сравнению с смесевыми топливами из углей марок Т и 3Б. Последнее позволяет сделать вывод о том, что навески двух бурых углей отличаются по своей структуре, что может оказать существенное влияние на характеристики их зажигания и горения. Возможно, это связано с составом и свойствами минеральной части бурых углей, которая в процессе их подготовки к сжиганию оказывает определенное влияние на процесс измельчения органической части. Кроме того, округлые фракции минеральной составляющей оказывают существенное влияние на процессы прогрева приповерхностного слоя топлива, поглощают тепло и снижают скорость термического разложения, выхода летучих веществ и соответственно температуры начала зажигания.

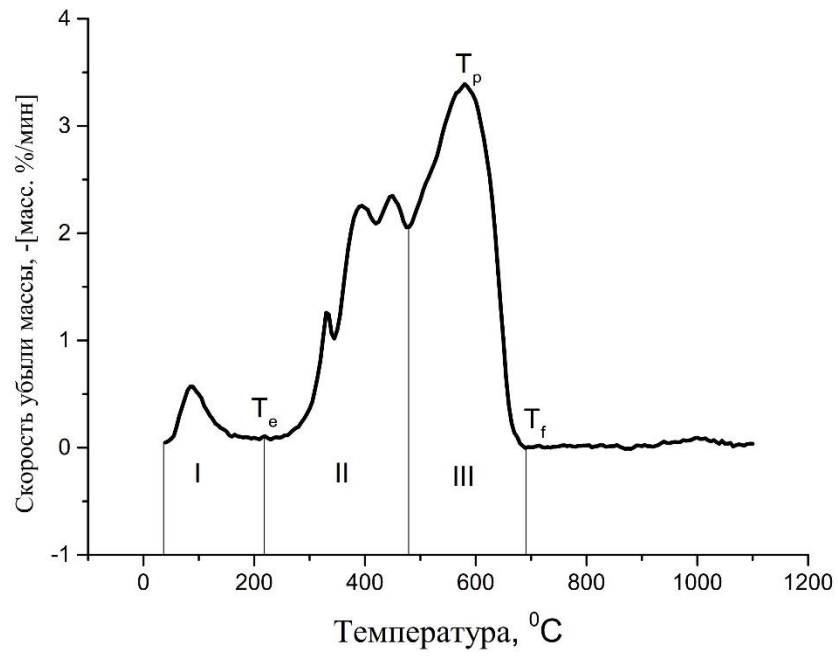
На основании известных результатов по зажиганию частиц топлив [104 – 109] также можно сделать вывод, что существенно более эффективным по сравнению с другими видами отходов деревообработки, скорее всего, являются опилки. При их использовании в качестве второй компоненты смесевых топлив инициирование горения будет происходить на много быстрее, чем при использовании, например, щепы.

3.2. Анализ зависимости скорости термического разложения смесевых топлив от концентрации древесины

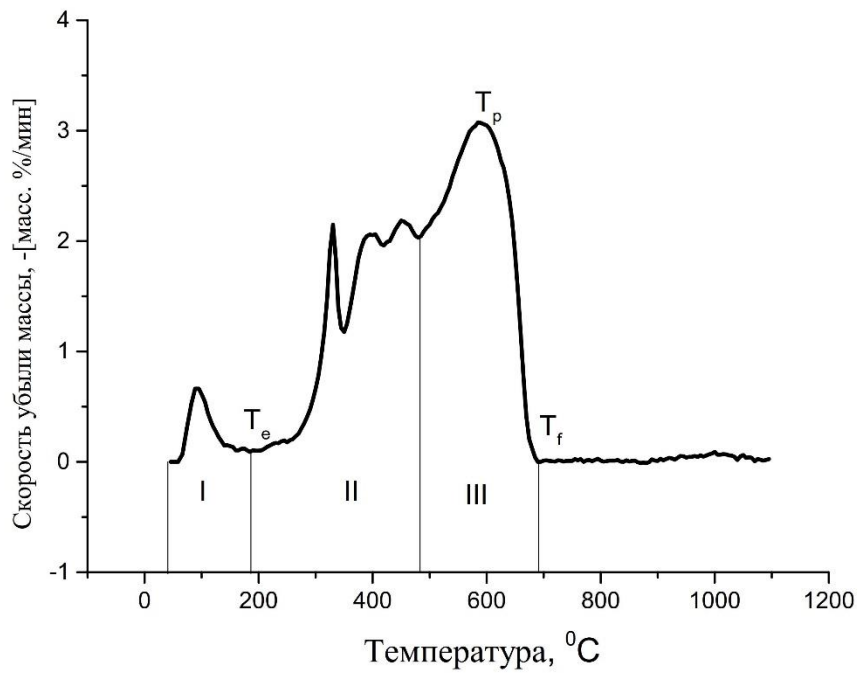
Определение скоростей термического разложения смесевых топлив на основе углей и древесины проведено с целью изучения синергетических эффектов при изменении концентрации древесины в угле. Анализ исследуемых топлив проведен по методике, описанной в разделе 2.3. Результаты совместной термогравиметрии и дифференциально-сканирующей калориметрии смесевых топлив из углей марок Д, Т, ЗБ, 2Б и мелкодисперсной древесины показали, что при увеличении концентрации биомассы в угле происходит снижение температуры начала термического разложения. При этом увеличивается реакционная способность топлива. Кривые дифференциально-термической гравиметрии для всех составов, явно отражающие стадии термического разложения топлив, представлены на рисунках 3.2.1 – 3.2.4.



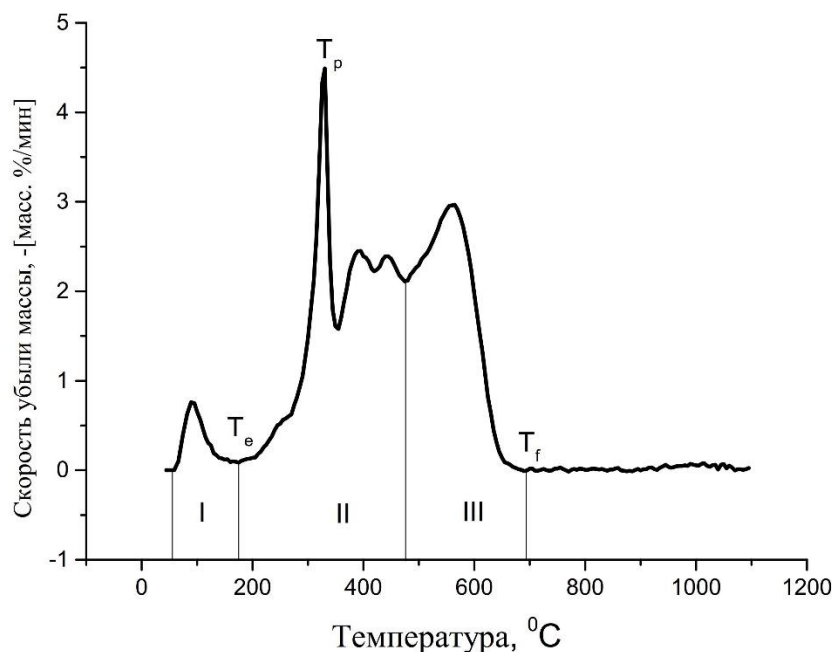
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.2.1. Зависимость скорости термического разложения смесевых топлив от температуры. Процентное соотношение древесины и угля марки Д: а) 0; б) 10 / 90; в) 25 / 75; г) 50 / 50. T_e – температура начала термического разложения топлив, T_p – температура максимальной скорости термического разложения топлив, T_f – температура завершения термического разложения топлив

Приведенные на рисунке 3.2.1 термограммы позволяют оценить влияние древесины на характер термического разложения смесевых топлив. Анализ зависимостей скоростей убыли массы от температуры показывает, что на первой стадии нагрева происходит выделение влаги. Непосредственно термическое разложение древесины начинается на второй стадии конверсии (рис. 3.2.1). 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. 3.2.1), что увеличение концентрации древесины в смесевом топливе до 50 % приводит к снижению максимальной температуры термического разложения до 31,3 % по отношению к

углю. Процесс полного разложения топлива 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 пиролиза и воспламенения древесины.

В таблице 3.2.1 представлены характеристики термического разложения исследовавшихся смесевых топлив из угля марки Д и древесины, полученные в результате термогравиметрического анализа.

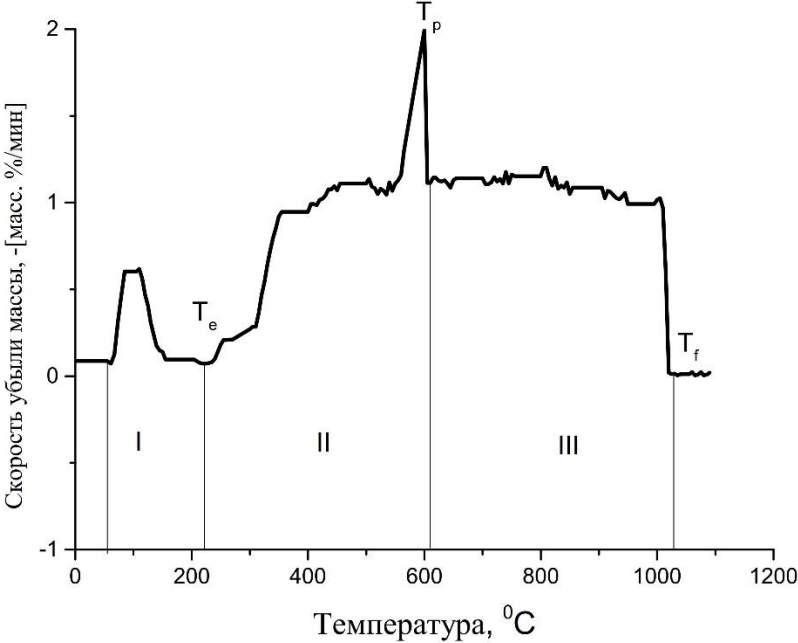
Таблица 3.2.1. Результаты термогравиметрического анализа смесевых топлив из угля марки Д и древесины

Топливо	$V_{\max},$ °C/мин	$T_p, °C$	$T_e, °C$	$T_f, °C$	$\Delta T_{1/2}, °C$	$D_i, \text{масс.}\%$ /Г ²	$D_{f, \text{масс}\%} / T^3$
2б	2,58	481,52	220,1	753,26	343,48	$2,43 \cdot 10^{-5}$	$2,07 \cdot 10^{-8}$
3аб	3,39	579,89	229,34	689,13	273,91	$2,54 \cdot 10^{-5}$	$3,09 \cdot 10^{-8}$
4аб	3,07	585,3	184	691,3	334,2	$2,85 \cdot 10^{-5}$	$2,27 \cdot 10^{-8}$
5аб	4,49	330,43	174,45	690,76	283,7	$7,79 \cdot 10^{-5}$	$6,93 \cdot 10^{-8}$

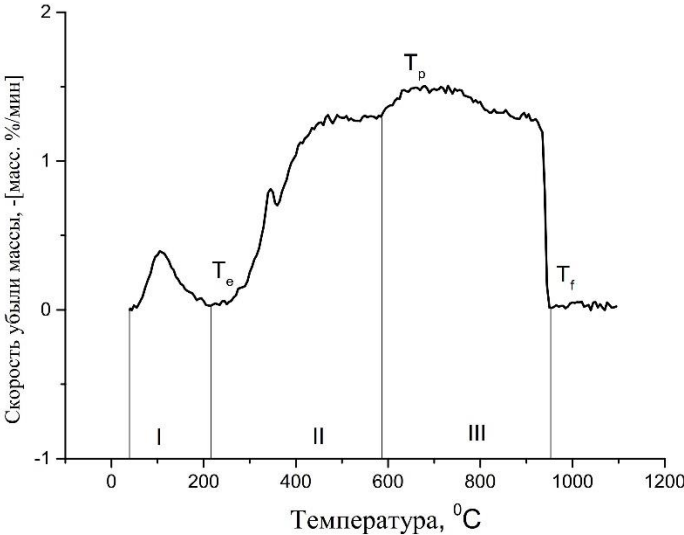
Анализ приведенных в таблице 3.2.1 результатов позволяет сделать вывод, что увеличение доли древесины до 50 % приводит к снижению температуры начала термического разложения смесевого топлива на 20,7 %, а максимальная скорость пиролиза возрастает в 1,7 раза. Сдвиг кривых ДТГ в диапазон более низких температур происходит за счет процессов, инициированных термическим разложением древесины.

На основании результатов проведенного анализа можно сделать вывод о том, что при увеличении доли древесины в смесевых топливах снижается температура начала термического разложения топлив, увеличивается скорость этого процесса (растет выход летучих веществ). Снижение температуры полного термического разложения является положительным эффектом, способствующим обоснованию дальнейшего использования смесевых топлив в котлоагрегатах ТЭС [109 – 110].

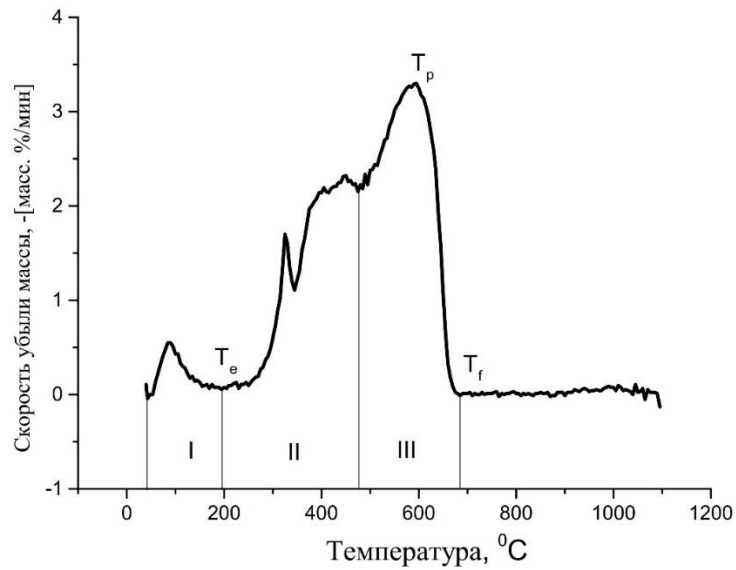
На рисунке 3.2.2. представлены результаты термогравиметрического анализа смесевых топлив из угля марки Т и древесины.



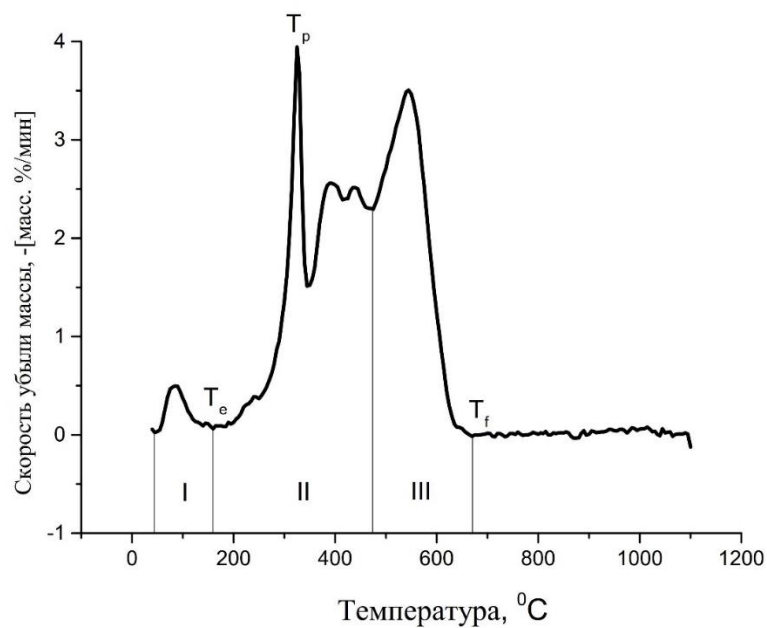
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.2.2. Зависимость скорости термического разложения смесевых топлив от температуры. Процентное соотношение древесины и угля марки Т: а) 0; б) 10 / 90; в) 25 / 75; г) 50 / 50. T_e – температура начала термического разложения топлив, T_p – температура максимальной скорости термического разложения топлив, T_f – температура завершения термического разложения топлив

По аналогии с длиннопламенным углем процесс термической конверсии смесевых топлив из угля марки Т можно условно разделить на три стадии (рисунок 3.2.2). На первой стадии происходит удаление влаги, на второй – разложение гемицеллюлозы, целлюлозы, лигнина и частично угля, а на третьей стадии заканчивается разложение лигнина и остальных газообразных продуктов пиролиза угля. При увеличении доли древесины до 50 % стадии ее разложения выражены более отчетливо.

На рисунках 3.2.1 и 3.2.2 хорошо видны отличия термогравиметрических кривых топлив на основе длиннопламенного и тощего углей. Характерным для последнего является существенное уменьшение интервала температур, в котором происходит пиролиз угля, с ростом доли древесины. При малой концентрации последней процесс термического разложения угля Т заканчивается при температуре $T \approx 1020$ °С (однородный уголь) и $T \approx 950$ °С (доля древесины 10 %). С увеличением доли древесины до 25 % процесс термического разложения угля завершается при температуре менее 700 °С. В этом случае биомасса выступает в роли своеобразного инициатора пиролиза тощего угля. Установленные закономерности дают основания для вывода о высокой перспективности топливных композиций на основе угля и древесины в энергетике. Важным при этом является то, что у длиннопламенного угля такой эффект незначителен. То есть древесина является иницирующей добавкой селективно (избирательно). Соответственно, термический анализ, аналогичный описанному выше, необходимо проводить при оценке возможности использования любого угля как базовой компоненты в смесевых топливах такого рода.

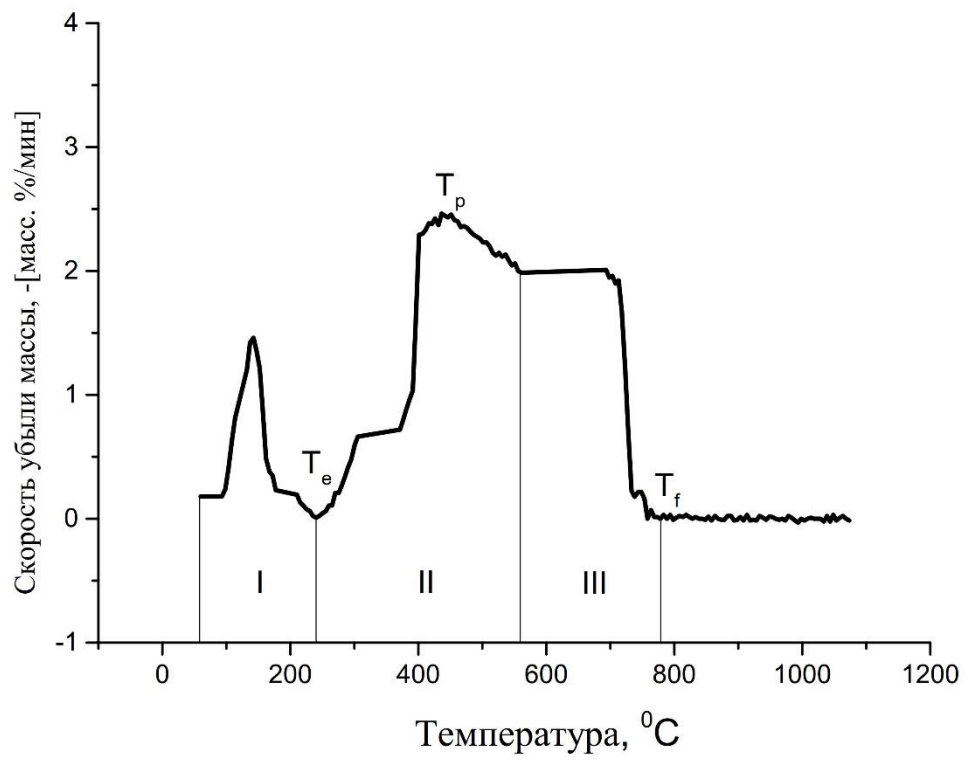
В таблице 3.2.2 представлены результаты термогравиметрического анализа смесевых топлив из угля марки Т и древесины.

Таблица 3.2.2. Результаты термогравиметрического анализа смесевых топлив из угля марки Т и древесины

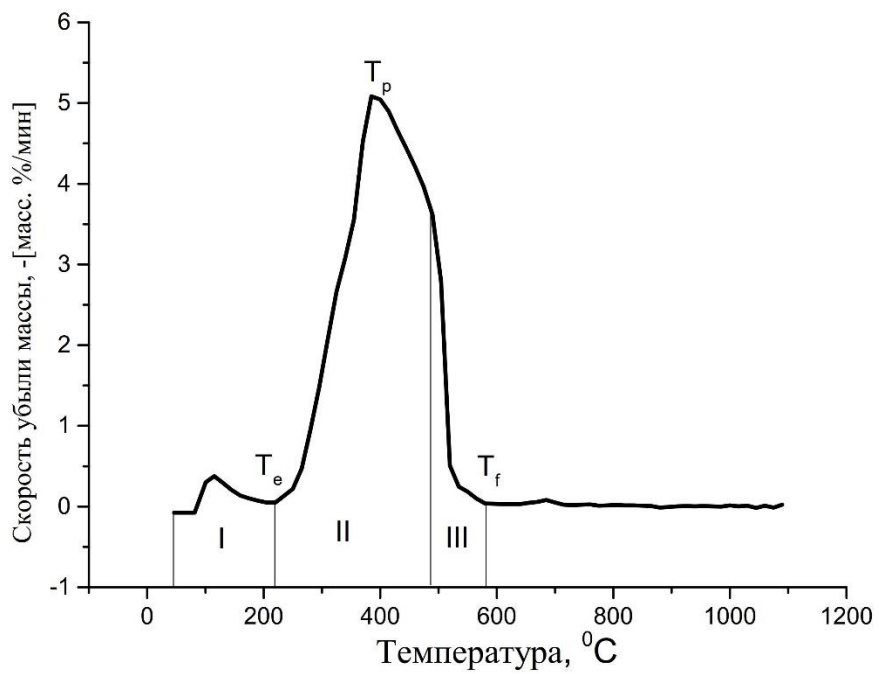
Топливо	$V_{\max},$ °C/МИН	$T_p, °C$	$T_e, °C$	$T_f, °C$	$\Delta T_{1/2}, °C$	$D_i, \text{масс.}\%$ / T^2	$D_{f, \text{масс}} \% / T^3$
2в	1,98	601	236,79	1019	657,19	$1,39 \cdot 10^{-5}$	$0,49 \cdot 10^{-8}$
3ав	1,5	729,89	212,5	950,05	602,18	$0,97 \cdot 10^{-5}$	$0,36 \cdot 10^{-8}$
4ав	3,3	594,57	194,02	685,32	323,91	$2,86 \cdot 10^{-5}$	$2,50 \cdot 10^{-8}$
5ав	3,94	325	159,78	669,57	276,08	$7,50 \cdot 10^{-5}$	$6,55 \cdot 10^{-8}$

Из таблицы 3.2.2 видно, что увеличение доли древесины до 50 % приводит к росту максимальной скорости термического разложения топлив в 1,9 раз, при этом температура, соответствующего пика этой скорости, снижается на 45,9 % относительно однородного угля. С увеличением доли древесины в смесевых топливах начало их термического разложения «сдвигается» в область низких температур на 32,5 %. Температура полного термического разложения снижается на 34,2 %. Индекс зажигания связан с температурой начала термического разложения смесевых топлив (чем выше значение D_i , тем ниже температура начала термического разложения топлив [111]).

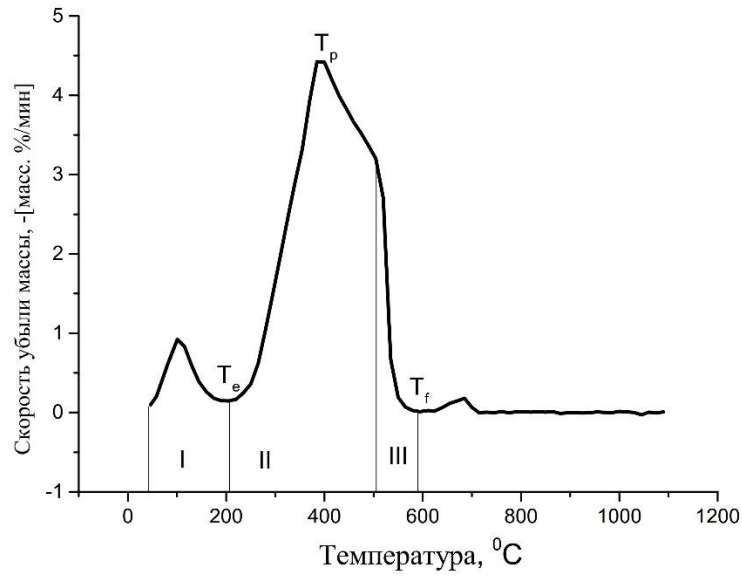
На рисунке 3.2.3. представлены результаты термогравиметрического анализа смесевых топлив из угля марки 3Б и древесины при разных соотношениях масс компонент.



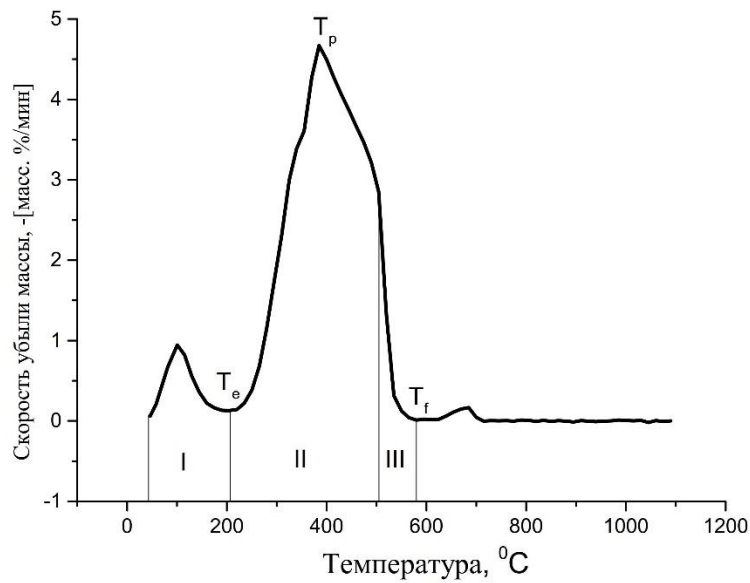
a)



б)



в)



г)

Рисунок 3.2.3. Зависимость скорости термического разложения смесевых топлив от температуры. Процентное соотношение древесины и угля марки ЗБ: а) 0; б) 10 / 90; в) 25 / 75; г) 50 / 50. T_e – температура начала термического разложения топлив, T_p – температура максимальной скорости термического разложения топлив, T_f – температура завершения термического разложения топлив

На рисунке 3.2.3 представлены результаты термогравиметрического анализа угля марки ЗБ и смесевых топлив с добавлением древесины [112]. Уголь ЗБ по сравнению с углями Д и Т более влажный, выход основных летучих веществ происходит в интервале температур от 240 °С до 560 °С. После этого начинается пиролиз более тяжелых веществ, входящих в состав угля. Термическое разложение смесевых топлив завершается в интервале температур от 580 °С до 760 °С. С увеличением доли древесины до 50 % отмечен незначительный рост максимальной скорости термического разложения. При этом стадия термического разложения древесины соответствует выходу летучих веществ угольной компоненты. С ростом доли древесины в смеси происходит ускорение его термического разложения за счет увеличения содержания гемицеллюлозы (пик скорости термического разложения максимален). Стадии разложения целлюлозы, лигнина и угля имеют более выраженные границы.

Анализ рисунков 3.2.1 – 3.2.3 показывает, что в случае с этим бурым углем добавка древесины приводит к существенному снижению температуры конца пиролиза смесевых топлив из этого угля и древесины. При этом увеличение доли биомассы в смеси почти не влияет на численное значение $T_{кп}$. На основании анализа термогравиметрических кривых на рисунке 3.2.3 можно сделать вывод о «каталитическом» влиянии древесины на интенсивность процесса термического разложения и бурого и тощего углей. Присутствие древесной биомассы в качестве компоненты смеси топлива на основе угля, в целом, адекватно увеличению температуры внешней среды при термическом разложении типичных углей. Т.е. интенсивность выхода летучих газов увеличивается не с ростом температуры, а при введении мелкодисперсной древесины.

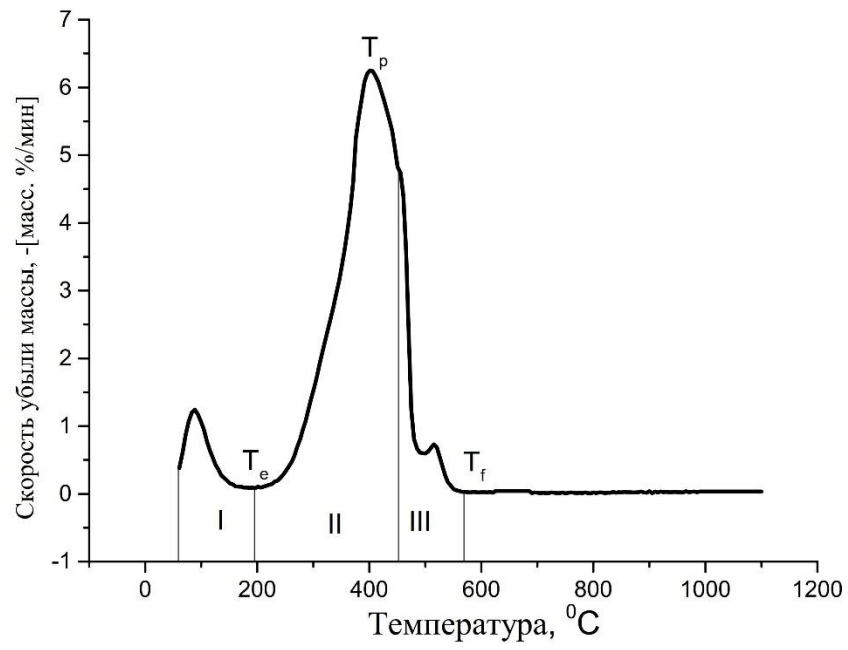
В таблице 3.2.3 представлены результаты термогравиметрического анализа смесевых топлив из угля марки ЗБ и древесины.

Таблица 3.2.3. Результаты термогравиметрического анализа смесевых топлив из угля марки ЗБ и древесины

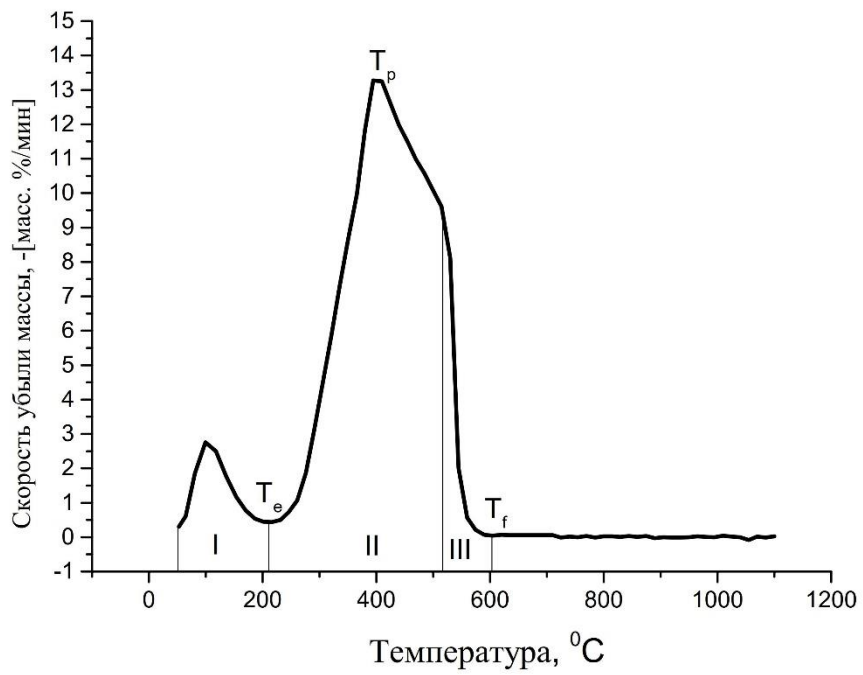
Топливо	$V_{\max},$ °C/МИН	$T_p, °C$	$T_e, °C$	$T_f, °C$	$\Delta T_{1/2}, °C$	$D_i, \text{масс.}\%$ / T^2	$D_{f, \text{масс}} \% / T^3$
2Г	2,47	436,41	240,2	758,15	329,89	$2,35 \cdot 10^{-5}$	$2,26 \cdot 10^{-8}$
3аг	5,08	384,78	219,57	586,87	183,15	$6,00 \cdot 10^{-5}$	$12,28 \cdot 10^{-8}$
4аг	4,43	385,87	204,89	594,57	212,5	$5,60 \cdot 10^{-5}$	$9,09 \cdot 10^{-8}$
5аг	4,67	384,78	205,97	580,43	200,43	$5,90 \cdot 10^{-5}$	$10,43 \cdot 10^{-8}$

Результаты экспериментальных исследований показали снижение температуры начала термического разложения смесевых топлив на основе угля указанной марки и сокращение времени их термического разложения. Из таблицы 3.2.3 видно, что увеличение доли древесины в смесевом топливе до 50 % снижает температуру максимальной скорости термического разложения смесевых топлив на 22,2 %, температуру начала термического разложения на 20,1 %, что дает возможность обоснованного сокращения дополнительных затрат на подогрев топлива в котлоагрегатах ТЭС. Из таблицы 3.2.3 видно, что индексы зажигания и горения исследованных композиций достаточно хорошо характеризуют синергетический эффект от древесной компоненты в смесевых топливах.

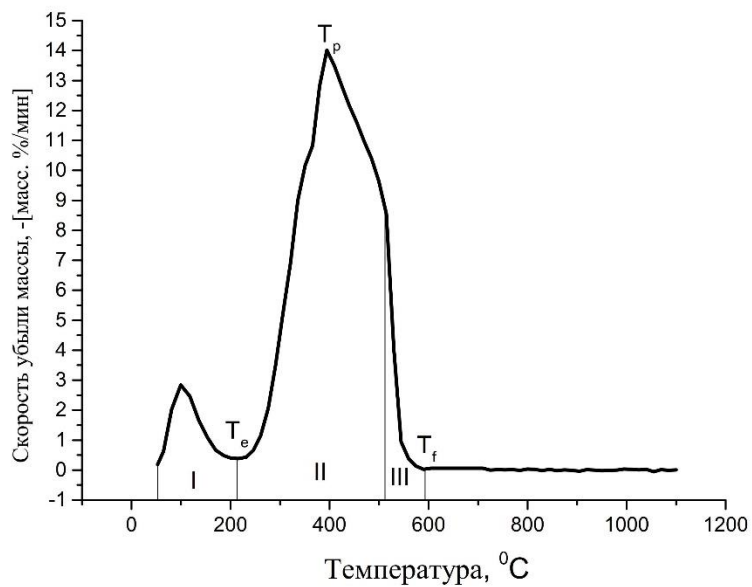
На рисунке 3.2.4. представлены результаты термогравиметрического анализа смесевых топлив из угля марки 2Б и древесины.



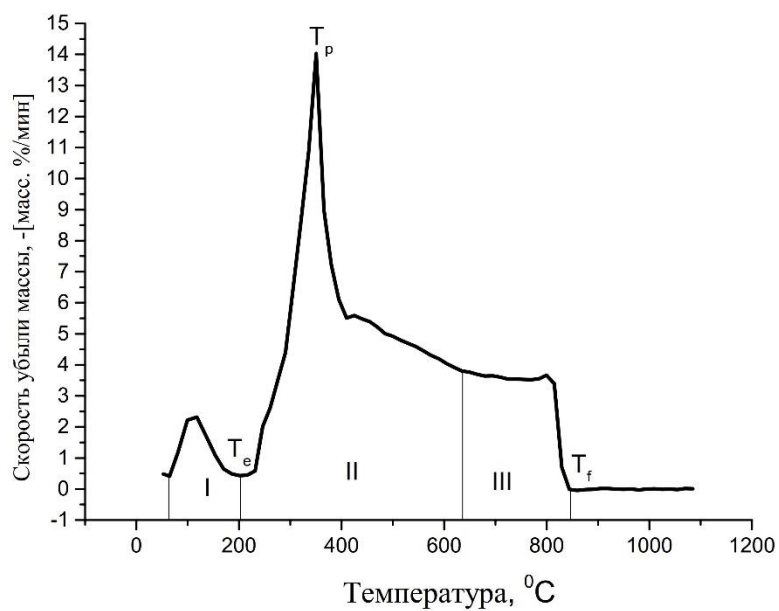
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.2.4. Зависимость скорости термического разложения смесевых топлив от температуры. Процентное соотношение древесины и угля марки 2Б: а) 0; б) 10 / 90; в) 25 / 75; г) 50 / 50. T_e – температура начала термического разложения топлив, T_p – температура максимальной скорости термического разложения топлив, T_f – температура завершения термического разложения топлив

Характеристики (рис. 3.2.4, б, в), полученные при термическом разложении смесевых топлив, схожи с результатами, полученными при термическом разложении однородного угля, а увеличение доли древесины до 50 % в топливе приводит к росту периода времени его полного термического разложения [113]. Стадия разложения гемицеллюлозы характеризуется пиком при массовой доле древесины более 50 % в диапазоне температур от 200 °С до 400 °С, а целлюлозы, лигнина и угля – при температуре от 400 °С до 860 °С.

В таблице 3.2.4. представлены результаты термогравиметрического анализа смесевых топлив из угля марки 2Б и древесины.

Можно отметить, что отличия закономерностей термического разложения смесевых топлив на основе двух исследованных бурых углей достаточно существенны. Введение древесины в смесевые топлива на основе угля 2Б практически не влияет на характеристики термического разложения этого твердого топлива. Можно сделать вывод, что при выборе компонент смесевых топлив такого типа необходимо проводить анализ характеристик их пиролиза в связи с возможностью проявления (или не проявления) каталитического эффекта присутствия древесины.

Таблица 3.2.4. Результаты термогравиметрического анализа смесевых топлив из угля марки 2Б и древесины

Топливо	$V_{\max},$ °С/мин	$T_p, °C$	$T_e, °C$	$T_f, °C$	$\Delta T_{1/2}, °C$	$D_i, \text{масс.}\%$ / T^2	$D_{f, \text{масс}} \% / T^3$
2д	6,248	401,63	196,2	564,67	406,52	$7,93 \cdot 10^{-5}$	$6,7 \cdot 10^{-8}$
3ад	13,27	395,57	217,39	603,26	204,9	$15,4 \cdot 10^{-5}$	$27 \cdot 10^{-8}$
4ад	14,02	394,57	217,39	603,26	197,83	$16,3 \cdot 10^{-5}$	$30 \cdot 10^{-8}$
5ад	14,025	350,5	201	844,6	72,82	$19,9 \cdot 10^{-5}$	$65 \cdot 10^{-8}$

В отличие от ранее рассмотренных смесевых топлив из углей марок Д, Т, 3Б для угля марки 2Б наблюдается увеличение периода полного термического

разложения на 42,7 %, при этом температура в момент максимальной скорости тепловыделения снизилась на 12,7 %.

Сопоставление данных термогравиметрического анализа смесевых топлив из углей марок Д, Т, 3Б, 2Б показало, что у топлив на основе углей Д и Т с увеличением массовой доли в биомассе можно выделить явные стадии разложения гемицеллюлозы, целлюлозы, лигнина и угля на термограммах. Смеси на основе углей марок 3Б и 2Б имеют схожую структуру частиц, поэтому при увеличении доли древесины до 25 % на термограммах можно выделить основной пик, соответствующий выходу летучих веществ, и незначительный рост скорости разложения этих углей в адекватных температурных интервалах. Можно отметить, что как показали эксперименты, снижение температуры полного термического разложения смесевых топлив относительно однородных углей способствует уменьшению длительности процесса сжигания углей в топке котла, при этом уменьшаются тепловые потери с химическим недожогом топлив [110 – 116].

Результаты приведенных экспериментов позволяют сделать вывод, что увеличение массовой доли древесины в смесевых топливах из углей исследовавшихся марок также способствует снижению начальных температур термического разложения, увеличению максимальной скорости этого процесса, «смещению» «температурного» пика, соответствующего максимуму скорости пиролиз углей, в область более низких температур.

3.3. Оценка экологических показателей смесевых топлив на основе углей и древесины

Снижение вредных выбросов угольных тепловых электрических станций в настоящее время является одной из главных задач мировой энергетики [117 – 129]. Выбросы загрязняющих веществ (особенно оксидов SO_x , NO_x) способствуют образованию кислотных дождей и разрушению озонового слоя. Методы, используемые при очистке дымовых газов ТЭС, являются, как правило, дорогостоящими и приводят к существенным увеличениям издержек производства тепла и электроэнергии. В последние годы выдвинута гипотеза, что менее дорогостоящим и более эффективным методом снижения выбросов является совместное сжигание углей и биомассы [129 – 137]. Авторы [129 – 137] показали снижение выхода вредных выбросов при сжигании смесевых топлив из углей и биомассы. Соответственно воздействие на окружающую среду снижается, и могут быть повышены экономические показатели производств тепловой и электрической энергии. Исследования [137 – 146] иллюстрируют снижение выбросов SO_x , NO_x в большей или меньшей степени в зависимости от используемой биомассы. Несмотря на то, что биомасса считается углерод – нейтральным топливом, установлено снижение выбросов и CO_2 .

Полученные к настоящему времени результаты [137 – 146] не обеспечивают возможность анализа закономерностей процессов снижения негативного воздействия ТЭС на окружающую среду при увеличении доли древесины в однородном угле. Исследования в данном направлении представляют интерес и в связи с необходимостью обоснования возможности использования смесевых топлив на основе углей разных марок и древесины на тепловых электрических станциях.

На рисунках 3.3.1 – 3.3.4 представлены результаты анализа выхода оксидов SO_2 , NO , CO_2 при термическом разложении смесевых топлив из углей и древесины.

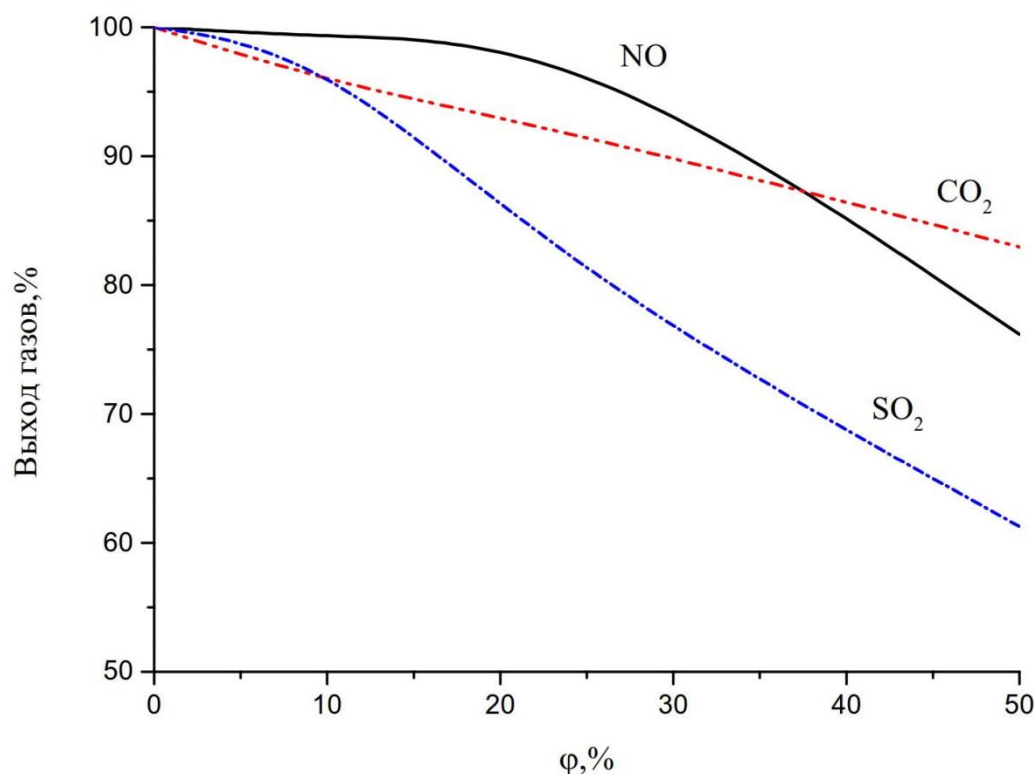


Рисунок 3.3.1. Концентрации основных антропогенных газов в продуктах термического разложения смесевых топлив, по отношению к каменному углю марки Д (φ – доля древесины, $V_{\text{газ}}$ – выход газов)

Из рисунка 3.3.1 видно, что увеличение доли древесины до 50 % в смесевом топливе на основе угля Д приводит к снижению выделения основных антропогенных оксидов (NO на 23,8 %, CO₂ на 17,1 %, SO₂ на 38,7 %). Полученные результаты показывают возможность существенного (до 40 %) снижения негативного воздействия тепловых электрических станций на окружающую среду при использовании смесевых топлив на основе углей и древесины. Аналогичные исследования проведены для других вариантов смесевых топлив на основе тощих и бурых углей. На рис. 3.2.2 показаны зависимости концентраций NO, CO₂, SO₂ в продуктах пиролиза смесевых топлив от доли древесины.

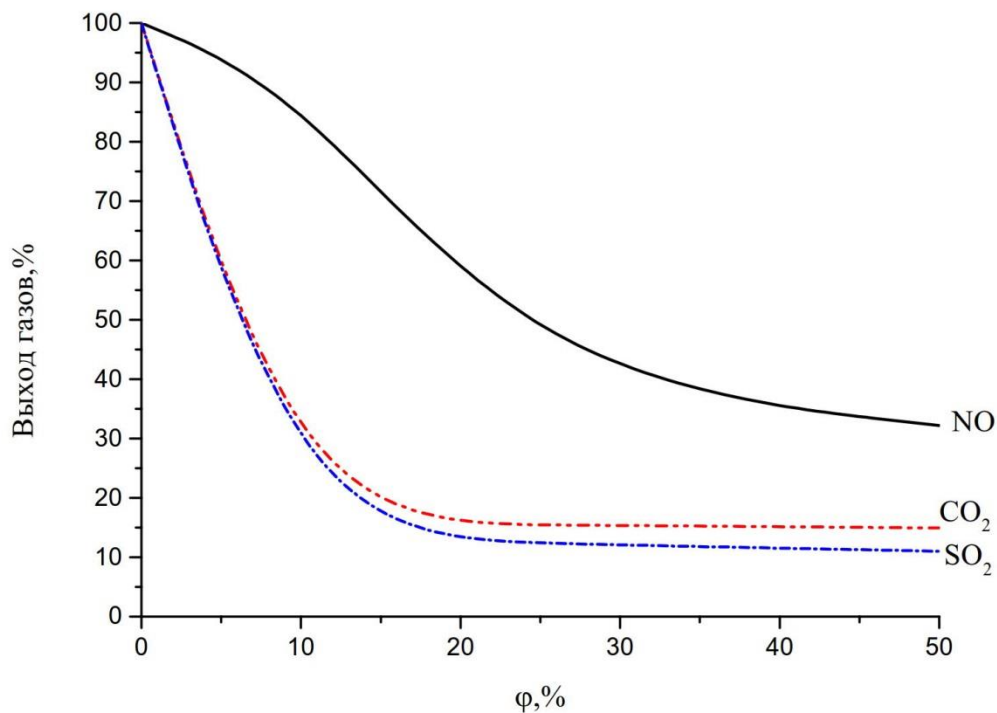


Рисунок 3.3.2. Концентрации основных антропогенных газов в продуктах термического разложения смесевых топлив, по отношению к каменному углю марки Т (φ – доля древесины, $V_{\text{газ}}$ – выход газов)

Из рисунка 3.3.2 видно, что снижение негативного воздействия вредных выбросов ТЭС с использованием смесевых топлив на основе угля Т с добавлением массовой доли древесины значительно. Например, при увеличении доли древесины до 50 % в смесевых топливах выход NO снижается на 60,2 %, CO₂ на 85,1 %, SO₂ на 89,0 %. Соотношение компонент выбрано из условия, в соответствии с которым, калорийность такого топлива должна быть сопоставима с калорийностью угля, а зольность – значительно ниже. Полученные результаты при сравнении с экспериментальными данными топлив на основе угля марки Д и древесины иллюстрируют кратное изменение выхода вредных выбросов при их пиролизе на основе тощего угля по сравнению с длиннопламенным. Если учесть, что стоимости первого и второго отличаются незначительно, то можно сделать вывод о том, что для регионов, удаленных от месторождения угля, уголь марки Т

достаточно перспективен. При этом следует отметить, что снижение выхода антропогенных газов при сжигании топлив на основе угля марки Г существенно выше доли таких газов при вводимой древесины (SO_2 , например, в 5-6 раз). Установленная закономерность еще раз подтверждает каталитический (или другими словами, синергетический) эффект присутствия биомассы в смесевом топливе, что проявляется в кратном снижении выхода антропогенных газов.

Аналогичные исследования проведены для топлив на основе бурых углей.

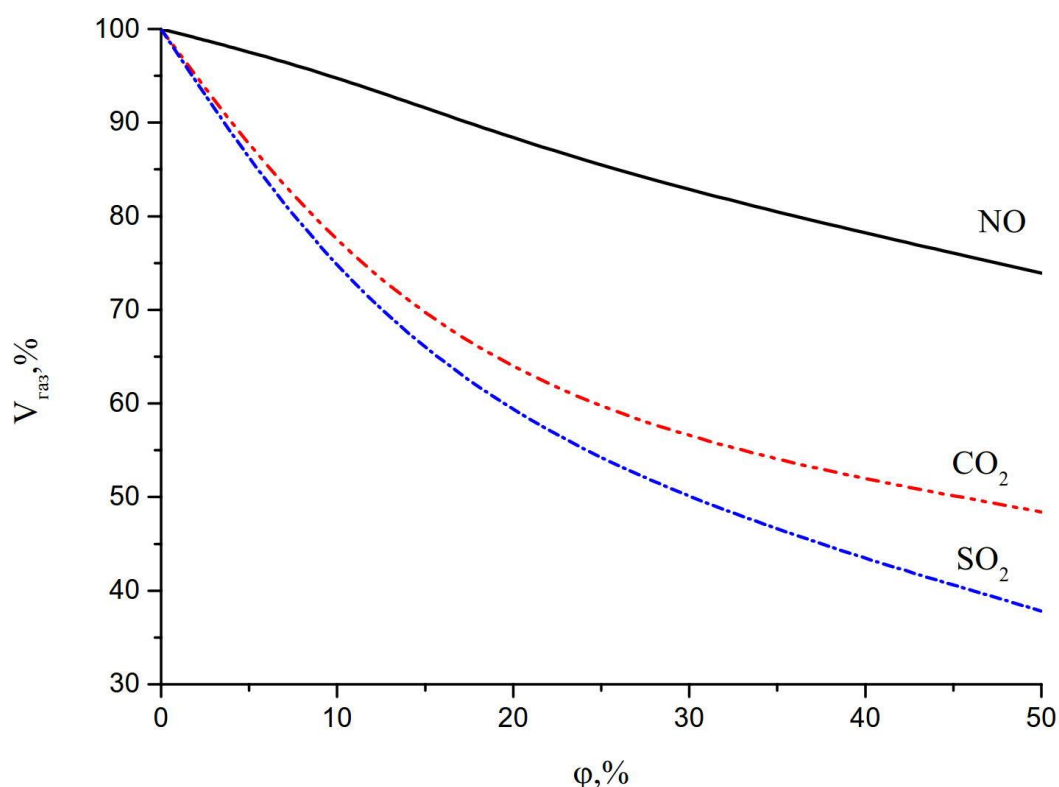


Рисунок 3.3.3. Концентрации основных антропогенных газов в продуктах термического разложения смесевых топлив, по отношению к бурому углю марки ЗБ (φ – доля древесины, $V_{\text{газ}}$ – выход газов)

Из рисунка 3.3.3 видно, что увеличение доли древесины до 50 % в смесевых топливах приводит к снижению NO на 26,1 %, CO_2 на 51,6 %, SO_2 на 62,2 %. Экспериментально полученные результаты подтверждают эффективность

существенного снижения антропогенного воздействия на окружающую среду при сжигании смесевых топлив и на основе угля 3Б.

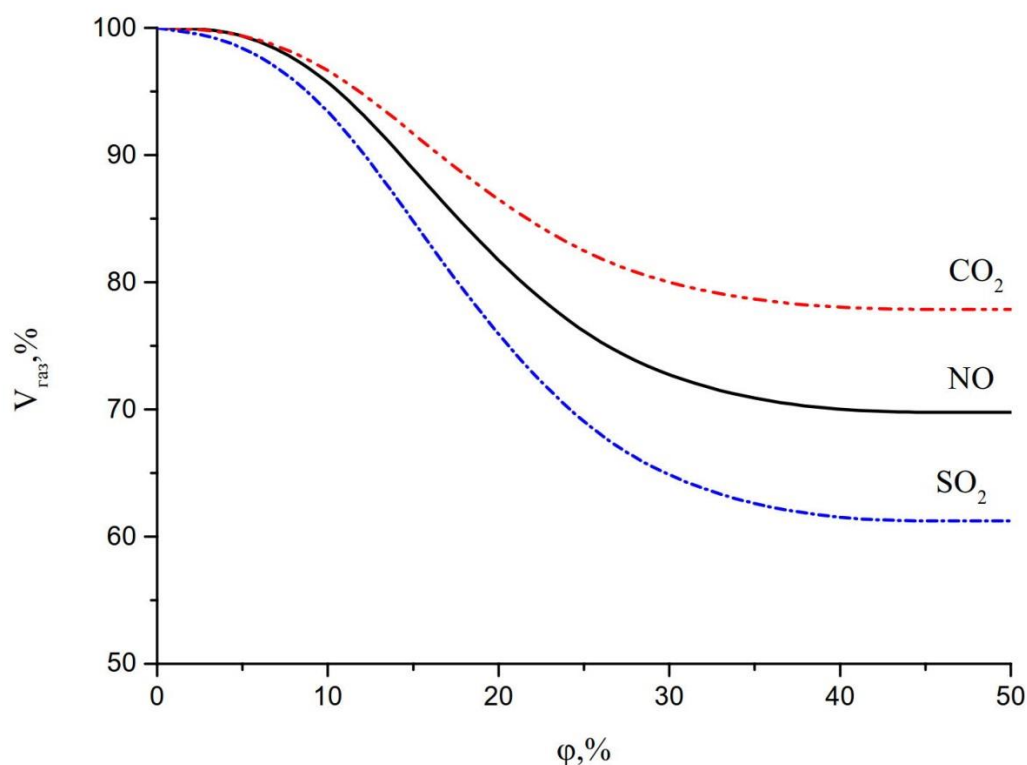


Рисунок 3.3.4. Концентрации основных антропогенных газов в продуктах термического разложения смесевых топлив, по отношению к бурому углю марки 2Б (φ – доля древесины, $V_{\text{газ}}$ – выход газов)

Результаты исследования топлива на основе угля марки 2Б приведены на рисунке 3.3.4. Видно, что увеличение массовой доли древесины и в этом случае приводит к снижению выхода антропогенных газов в окружающую среду при термическом разложении смесевых топлив.

Сравнительный анализ проведен на основании состава смесевых топлив при соотношении компонент 50 % / 50 %. Из рисунка 3.3.4 видно, что при таком соотношении компонент выделение вредных выбросов NO снижается на 30,2 %, CO_2 на 22,1 %, SO_2 на 37,2 %. Анализ полученных результатов позволяет

подтвердить улучшенные характеристики смесевых топлив такого рода по отношению к исходному углю, но масштаб положительного эффекта много меньше, чем у угля марки Т и бурого ЗБ. Установленная закономерность еще раз иллюстрирует необходимость детального исследования на стадии формирования смесевых топлив не только углей, являющихся их основой, но и обязательно самого смесевого топлива. В этом случае может быть достигнут максимальный положительный эффект применения последних.

В заключении следует отметить, что результаты выполненных исследований смесевых топлив на основе энергетических углей марок Д, Т, ЗБ, 2Б и древесины создают предпосылки для обоснования снижения негативного воздействия тепловых электрических станций на окружающую среду без установки дополнительных фильтров по очистке дымовых газов при использовании смесевых топлив.

3.4. Оценка возможности использования смесевых топлив на основе углей и древесины при работе котла БКЗ-220-100-4, установленном на Томской ГРЭС-2

Рассмотрена возможность применения исследуемых смесевых топлив на действующем энергетическом котлоагрегате БКЗ-220-100-4, расположенном на Томской ГРЭС-2. Выбранная для анализа энергоустановка работает на угле марки Д месторождения «Листвяжное». Станция ГРЭС-2 является единственной тепловой электростанцией в г. Томске, работающей на угле и газе. Снижение вредных выбросов и затрат на привозное топливо без привлечения дополнительных крупных капиталовложений в реконструкцию одного из основных источников энергии города Томска является актуальной задачей.

Котлоагрегат марки БКЗ-220-100-4 широко распространен на тепловых электростанциях РФ. Выбор котельной установки обусловлен тем, что ее конструкция и технические процессы (теплообмена, гидродинамики) наиболее приближены к рассмотренным в Нормативном методе [147] котлам.

Исходные данные по котлоагрегату, необходимые для проведения расчетов, получены от технического отдела Томской ГРЭС-2. Расчеты проведены на основании нормативного метода «Тепловой расчет котлов» [147].

Краткая характеристика котла: паровой котел паропроизводительностью 220 т/ч, давление перегретого пара составляет 9,8 МПа, температура перегретого пара 510 °С, температура питательной воды 210 °С, давление в барабане 10,8 кг/см², Температура уходящих газов, требуемая на выходе из ширмового пароперегревателя (ШПП), составляет 1136 °С, между конвективными пароперегревателями (КПП) 162 °С, объем топочного пространства составляет 1087 м³. Котел с твердым шлакоудалением.

На рисунке 3.4.1 представлен общий вид котла марки БКЗ-220-100-4, расположенного на Томской ГРЭС-2.

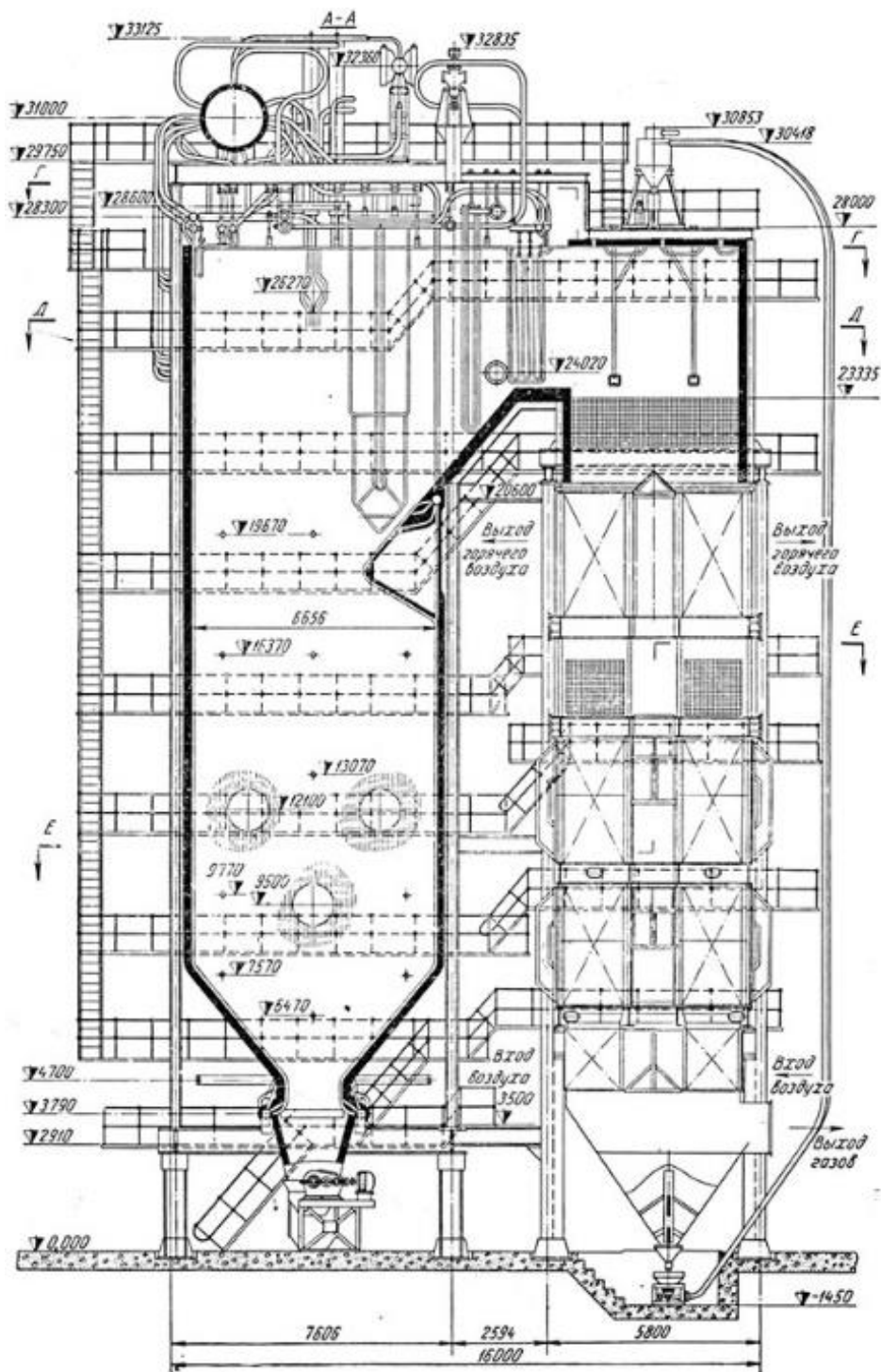


Рисунок 3.4.1. Общий вид котла БКЗ-220-100-4

Анализ возможности перевода котла на смесевые топлива из древесины и угля марки Д в соотношении компонент: 0 % / 100 %, 10 % / 90 %, 25 % / 75 %, 50 % / 50 % проведен на основании полученных экспериментально характеристик таких топлив.

Поверочный расчет котла марки БКЗ-220-100-4 выполнен в среде MathCAD. Исходные данные в части характеристик топлива установлены по результатам проведенных экспериментов (приведены в таблице 3.4.1). Параметры поверхностей нагрева котлоагрегата, необходимые для выполнения поверочных расчетов представлены ранее. Основная задача поверочного расчета заключается в определении расчетным способом расхода смесевых топлив, температуры в топочном пространстве при их сжигании, а также характеристик теплообмена поверхностей нагрева.

Основные результаты поверочного расчета парового котла при сжигании смесевых топлив из угля марки Д и древесины представлены в таблице 3.4.1.

3.4.1. Результаты поверочных расчетов котла БКЗ-220-100-4 Томской ГРЭС – 2 на не проектных топливах

Вещество	Низшая теплота сгорания	Состав топлива %							Параметры газа и воздуха на выходе из тракта		Потери тепла, %				КПД котла	Расход топлива, расчетный	Объем топки	Коеф. изб. воздуха в конце топки	Полезное тепловыделение	Темп. Газов на выходе из топки
		ккал/кг	Влага	Зола	Сера	Углерод	Водород	Азот	Кислород	Газовый, °С	Воздушный, °С	Q _{ух}	Q _{мп}	Q _{окр}						
Каменный уголь марки Д	6300	8,25	15,76	0,11	50,2	3,6	1,6	20,48	139	328	4,459	1,5	0,017	-	93,514	22,008	1087	1,2	6868,7	1045
10 % – Дровесина, 90 % – Д	5960	8,25	14	0,05	50,2	3,67	1,32	22,51	143	338	4,818	1,5	0,51	-	93,156	23,66	1087	1,2	6539,1	1073
25 % – Дровесина, 75 % – Д	5820	8,25	11,91	0,03	51,47	3,78	1,1	23,46	145	347	5,169	1,5	0,51	0,014	92,808	24,321	1087	1,2	6429,2	1095
50 % – Дровесина, 50 % – Д	5700	8,25	10,44	0	53,16	3,84	0,7	23,61	148	357	5,57	1,5	0,51	0,012	92,407	24,94	1087	1,2	6347,5	1115

Из таблицы 3.4.1 видно, что КПД котла при переходе на древесно-угольное топливо снижается незначительно. При концентрации компонентов смешанного топлива 50 % /50 % снижение КПД котлоагрегата составило менее 1,2 %. При этом увеличение расхода смешанного топлива по сравнению с углем не превышает 13 % вследствие незначительного ухудшения энергетических характеристик топлива. Снижение полезного тепловыделения составляет менее 7,6 %. Рост же температуры дымовых газов на выходе из топки котла составил 70 °С или 6,7 %, что обусловлено увеличением выхода летучих веществ при сжигании смешанных топлив.

В таблице 3.4.2. представлены параметры теплоносителя на входе и выходе поверхностей нагрева котла, определенные по результатам поверочных расчетов.

Таблица 3.4.2. Параметры теплоносителя на входе и выходе поверхностей нагрева котла

Топливо	КПП I ст.	ПОТ ПК	ЭК-2	ТВП 2	ЭК-1	ТВП 1	КПП I ст.	ПОТ ПК	ЭК-2	ТВП 2	ЭК-1	ТВП 1
	Обогреваемый теплоноситель на входе, ккал/кг						Обогреваемый теплоноситель на выходе, ккал/кг					
Каменный уголь марки Д	679,5	677,6	226,5	321,1	207,6	66,1	716,7	679,5	275,4	509,9	221,5	321,1
10 % – Древесина, 90 % – Д	678,9	676,8	229,1	324,1	207,6	65,6	720,6	678,9	283,1	519,5	223,6	324,1
25 % – Древесина, 75 % – Д	679	676,8	237,3	337,5	207,6	67,3	725	679	295	546,9	225,6	337,5
50 % – Древесина, 50 % – Д	679,2	676,9	246,3	355,2	207,6	69,8	729,8	679,2	308	581,4	227,9	355,2
75 % – Древесина, 25 % – Д	679,5	676,9	267	397,6	207,6	75,5	742,1	679,5	338,6	661,9	233,6	397,6
90 % – Древесина, 10 % – Д	680,1	677,3	285,5	431,2	207,6	79,5	754,3	680,1	367,1	726	239,4	431,2

Из таблицы 3.4.2 видно, что приращение энергетических характеристик теплоносителя в поверхностях нагрева значительно. Например, КПП I ст., ПОТ ПК, ЭК-2 до 50 ккал/кг, а на ТВП-2 до 200 ккал/кг, на ТВП-1 до 300 ккал/кг.

На рисунке 3.4.2 представлены зависимости приращения энтальпий рабочего тела на поверхностях нагрева котла БКЗ-220-100-4 на номинальной нагрузке.

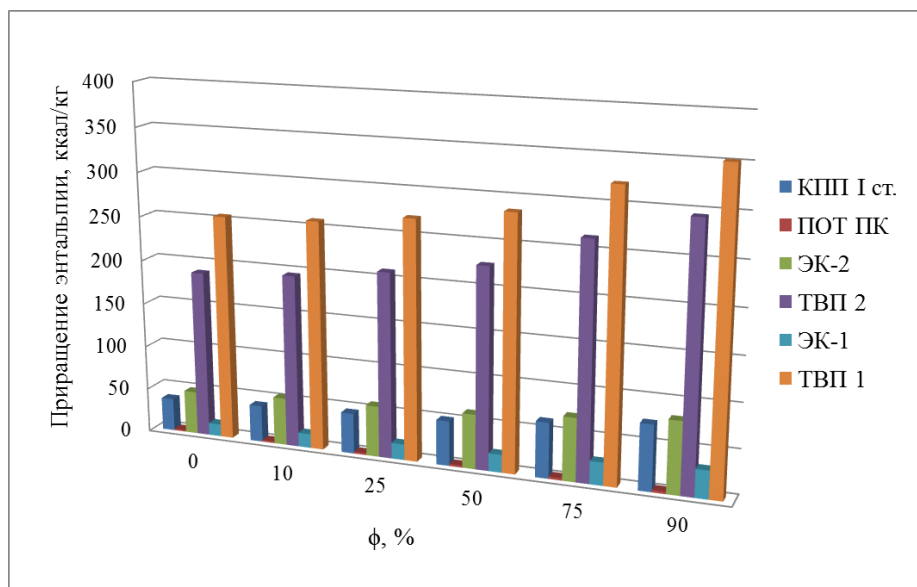


Рисунок 3.4.2. Приращение энтальпий обогреваемого теплоносителя с увеличением древесины в топливе, ккал/кг

Увеличение доли древесины в смесевом топливе до 50 % приводит к росту энтальпии теплоносителя в КПП I ст. до 26,5 %, увеличение энтальпий в ПОТ ПК до 17,4 %, в ЭК – 2 до 20,7 %, в ТВП 2 до 16,5 %, ЭК – 1 до 31,5 % и в ТВП 1 до 10 %.

Результаты поверочных расчетов при анализе нескольких смесевых топлив позволяют обосновать возможность увеличения доли древесины до 50 % с минимальным снижением КПД котла, но с увеличением температур на поверхностях нагрева и приращением энтальпий на них. Данный эффект является положительным, так как улучшение теплообменных характеристик увеличивает характеристики нагреваемого теплоносителя.

3.5. Теоретическая оценка эффективности использования смесевых топлив на основе углей и мелкодисперсной древесины на тепловых электрических станциях по трем основным критериям.

При выборе как стратегии использования древесной биомассы на ТЭС, так и методов решения прикладных задач на конкретных предприятиях необходима теоретическая основа (база) для такого выбора. Ею может быть общая теория горения смесевых топлив на основе угля и древесины в топках паровых котлов или инженерная методика расчета характеристик этого процесса (температур продуктов сгорания, выхода летучих вредных компонент, коэффициентов полезного действия, расходов угля и др.). К настоящему времени нет ни общей теории, ни инженерной методики решения задач такого рода. Причина такого состояния дел, скорее всего – высокая сложность физико-химических процессов, протекающих при зажигании и горении смесевых топлив на основе угля и древесины. Наиболее сложной частью такого рода задач, возможно, являются каталитическая (синергетическая) роль древесины при термическом разложении части углей, установленная в настоящем диссертационном исследовании.

Проблема катализа даже при создании химических технологий решается в подавляющем большинстве случаев эмпирически, несмотря на длительный период работы в этом направлении исследователей химиков. Поэтому научного задела по этой проблеме, при решении задач горения смесевых топлив пока нет. В этой связи целесообразным является введение в рассмотрение на современном этапе работ со смесевыми топливами простых критериев, отражающих преимущества (или недостатки) таких топлив по сравнению с углями. При этом важным является учет основных факторов, определяющих энергетическую, экономическую и экологическую эффективность смесевых топлив, в состав которых входит древесная биомасса.

Возможны разные подходы к решению задачи выбора критериев, исходя из общих положений теории принятия решений [148 – 150]. В настоящей

диссертационной работе предлагается относительно простой подход (сущность которого изложена в этом разделе), доступный для инженерно-технических работников тепловых электростанций.

С целью разработки методики оценки эффективности использования смесевых топлив из углей марок Д, Т, ЗБ, 2Б и мелкодисперсной древесины на тепловых электрических станциях с применением критериев энергетической эффективности, экологичности, экономичности проведен анализ полученных при проведении экспериментальных исследований издержек, а также затрат при сжигании смесевых топлив из углей и древесины по нескольким основным направлениям: инвестиции, эксплуатация и техническое обслуживание, формирование смеси [151 – 170].

Установлено, что по данным [168 – 173] расходы на модернизацию относительно современной угольной электростанции с целью сжигания смесевых топлив из углей и биомассы в пылеугольных котлоагрегатах составляют в среднем 300 – 900 долларов США на один кВт (18222 – 54666 руб./кВт). Тем не менее, такой уровень затрат существенно ниже расходов на строительство новой электростанции, предназначенной для сжигания только биомассы [168 – 175].

По данным [168] стоимость биоресурсов в США и Европе в 2012 году составляло около 668 руб. / МВт, в Бразилии и Индии от 360 до 1340 руб. / МВт [165 – 179]. Доля электроэнергии, вырабатываемой угольными электростанциями, составляет в мире около 42 %. Выбросы CO₂, выделяемые при производстве электрической энергии каждой ТЭС составляет около 8,56 Гт/год. По оценкам [165 – 179] замена только 10 % угля биомассой позволит сократить выбросы углекислого газа на 0,5 Гт в год. Так как сжигание смесевых топлив из углей и биомассы пока предполагается при ориентировочной концентрации древесины от 1 до 10 %, то при анализе максимального реально возможного увеличении этой концентрации можно оценить масштабы снижения негативного воздействия ТЭС на окружающую среду более достоверно.

С целью оценки эффективности использования исследовавшихся смесевых топлив на основе углей марок Д, Т, ЗБ, 2Б и мелкодисперсной древесины на тепловых электрических станциях определены критерии, которые условно можно назвать: «экономичности», «энергетической эффективности», «экологичности».

Основой для вычисления критерия экономичности является сравнительная оценка стоимости основного энергетического сырья для приготовления смесевых топлив на ТЭС. Анализ результатов работы угледобывающих предприятий России по итогам 2015 года показал, что, несмотря на падение мировых цен на уголь, большинство компаний увеличили объем добычи этого топлива [180].

На рисунке 3.5.1 представлена структура добычи углей в России в 2015 – 2016 г.

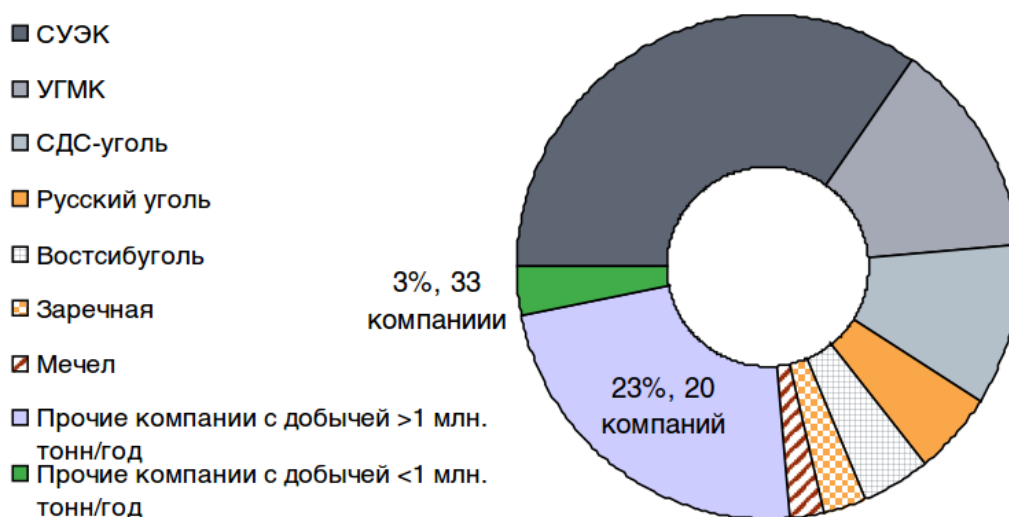


Рисунок 3.5.1. Структура угледобывающих холдингов в России [180].

На рисунке 3.5.2. показана динамика изменения цен и экспортных котировок российского угля на мировом рынке.

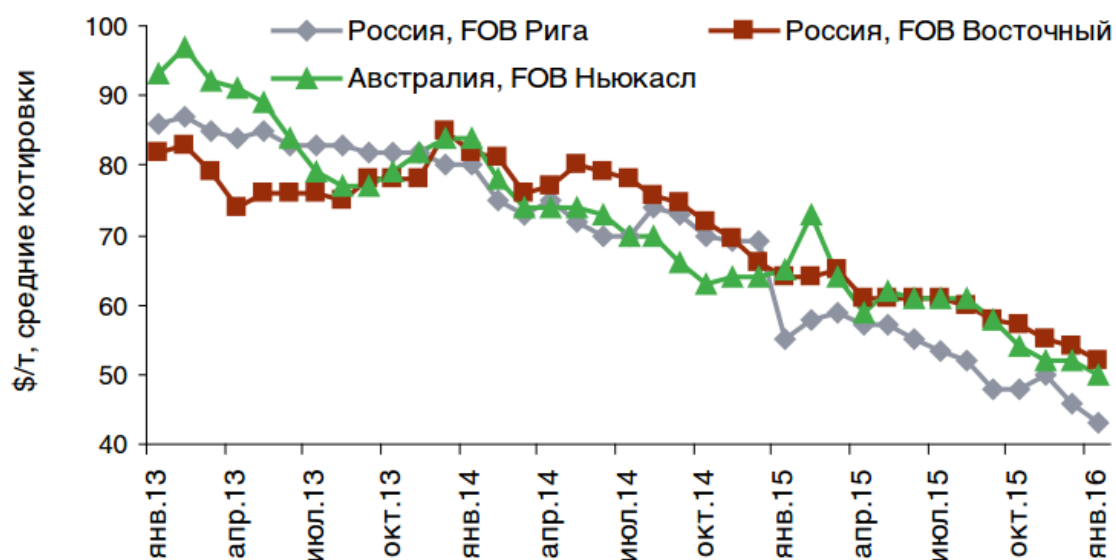


Рисунок 3.5.2. Цены и экспортные котировки российского добываемого угля на мировом рынке [180].

Из рисунка 3.5.2. видно, что за 2015 г. цена на уголь для европейских покупателей снизилась от 60 \$ до 50 \$, а для азиатских и восточных от 68 \$ до 60 \$. В среднем, падение цен на мировом рынке составило до 10 \$ США за 1 тонну угля. В 2016 году падение цен на уголь составило дополнительно 10 \$ США за тонну угля [179].

Цена на внутреннем рынке РФ в зависимости от марки угля и удаленности от угледобывающих предприятий варьируется от 900 до 4000 руб./т. [180]. Фактическая стоимость по состоянию на третий квартал 2017 года определена с учетом цен, представленных компаниями ООО ТК «Георессурс» г. Киров, ООО «Проминвест-уголь» г. Москва, ООО «Углетэк» г. Новокузнецк, ООО «Спецпартнер» г. Красноярск, посчитана фактическая средняя стоимость исследовавшихся углей (табл.3.5.1).

В качестве примера проведены расчеты стоимости группы углей и древесины, используемых на предприятиях г. Томска, г. Новокузнецка, г. Красноярска.

Таблица 3.5.1. Средняя стоимость энергетического сырья, поставляемого в г. Томск из Новокузнецка, Красноярска с учетом стоимости 1 км. транспортной составляющей.

Топливо	Средняя цена, руб/т, с НДС	Стоимость 1 км, с НДС	Доставка	Расстояние до Томска, км
Древесина*	0	38,6925	Томск и Томская обл.	от 5 до 25
Каменный уголь марки Д	1650	219,9	Новокузнецк	534
Каменный уголь марки Т	2880		Новокузнецк	534
Бурый уголь 3 Б	1380		Красноярск	612
Бурый уголь 2 Б	950		Красноярск	612

*Для расчетов стоимости смесевых топлив принято расстояние от предприятия по производству пиломатериалов (ООО Дзержинский ЛПК г. Томск), древесина которого использовалась в данных исследованиях, до Томской ГРЭС- 2. Оно составляет 13 км.

Приведенные в таблице 3.5.1 цены на топливо и доставку определены с учетом географического расположения предприятий лесопиления относительно Томской ГРЭС-2. Транспортная составляющая углей рассчитана как средняя стоимость доставки 10 вагонов по железной дороге следующими маршрутами Новокузнецк – Томск, Красноярск – Томск.

Анализ предприятий по лесопереработке мелкодисперсной древесины проведен с учетом радиуса эффективной доставки на расстояние менее 25 км. (ГРЭС-2 г.Томска). Этому условию удовлетворяют 56 лесоперерабатывающих организаций, которые могут являться поставщиками древесины. На рисунке 3.5.3. показано расположение всех лесоперерабатывающих организаций, расположенных в двадцати пяти километровой зоне от ГРЭС-2 г.Томска.



Рисунок 3.5.3. Расположение лесоперерабатывающих организаций, расположенных в 25 км. зоне от ГРЭС – 2.

С 01.01.2017 года вступили в силу отдельные положения Федерального закона от 29.12.2014 № 458-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» [181]. Новая редакция документа запрещает

прямое захоронение отходов деревопереработки. В случае выявления факта нарушения размер штрафа для граждан составляет от 1 до 2 тысяч рублей, для должностных лиц – от 10 до 30 тысяч рублей, для индивидуальных предпринимателей – от 30 до 50 тысяч рублей, для юридических лиц – от 100 до 250 тысяч рублей [181]. Т.е. лесопереработчикам, скорее всего, будет выгодно поставлять отходы лесопиления по минимальным ценам или даже бесплатно.

В настоящем разделе приведен пример расчета экономической эффективности использования угля марки Д. В таблице 3.5.2 представлены минимальные расходы однородных топлив для формирования смесевых составов, а также общая стоимость таких топлив при разных соотношениях компонент.

Таблица 3.5.2 Стоимость смесевых топлив при разных концентрациях компонент

Уголь	Опилки	Масса угля, т	Масса опилок, т	Всего КТ, т	Стоимость К, руб./т	Кэк
1	0	1	0	1	4264,60	1
0,90	0,10	0,90	0,12	1,02	3858,26	1,11
0,75	0,25	0,75	0,30	1,05	3248,74	1,31
0,50	0,50	0,50	0,60	1,10	2232,88	1,91

Результаты, представленные в таблице 3.5.2, позволяют оценить зависимость стоимости смесевого топлива от концентрации древесины в нем. В соответствии с общими рекомендациями [182 – 190] введем в рассмотрение параметр, характеризующий экономические преимущества смесевых топлив по сравнению с углем – коэффициент экономической эффективности. Этот коэффициент определен как отношение:

$$K_{\text{эк}} = \frac{A_{\text{у}}}{A_{\text{к}}},$$

где $A_{\text{у}}$ – стоимость угля, $A_{\text{к}}$ – стоимость смесевого топлива.

Аналогично может быть проведена оценка влияния концентрации древесины в смесевом топливе на энергетические характеристики, последнего.

Введем в рассмотрение коэффициент энергетической эффективности $K_{эн}$, характеризующий отношение калорийности смесевых топлив к теплоте сгорания угля. Коэффициент энергетичности определен следующим образом:

$$K_{эн} = \frac{Q_K}{Q_Y};$$

где Q_K – калорийность смесевого топлива, Q_Y – калорийность угля.

Результаты расчета коэффициентов энергетической эффективности $K_{эн}$ представлены в таблице 3.5.3.

Таблица 3.5.3 Коэффициент энергетической эффективности топлива

Топливо	Теплота сгорания, Q, МДж/кг	Коэффициент $K_{эн}$
Каменный уголь марки Д	26,20	1
10 % – Древесина, 90 % – Д	24,92	0,95
25 % – Древесина, 75 % – Д	24,31	0,93
50 % – Древесина, 50 % – Д	23,84	0,91

Результаты расчетов, представленные в таблице 3.5.3, показывают влияние концентрации древесины на энергетическую эффективность смесевых топлив.

Для определения степени влияния концентрации древесины в смесевом топливе на характеристики его вредных выбросов введен коэффициент экологичности топлива.

Значение коэффициента $K_{экол}$ определяется следующим образом:

$$K_{экол} = \frac{B_Y}{B_K};$$

Где B_Y – суммарное выделение антропогенных газов при сжигании угля, B_K – суммарное выделение антропогенных газов при сжигании смесевого топлива.

Результаты расчетов $K_{экол}$ приведены в таблице 3.5.4.

Таблица 3.5.4 Основные характеристики коэффициента экологичности
ТОПЛИВА

Топливо	Выделение K_{NO} , %	Выделение K_{CO_2} , %	Выделение SO_2 , %	Суммарное выделение антропогенных газов, В, %	$K_{экол.}$
Каменный уголь марки Д	100	100	100	100	1,00
10 % – Древесина, 90 % – Д	99,23	95,73	97,96	97,64	1,02
25 % – Древесина, 75 % – Д	98,84	91,66	79,91	90,14	1,09
50 % – Древесина, 50 % – Д	76,18	82,95	61,27	73,47	1,36

На основании положений общей теории принятия решений [148 – 150] в рассмотрение введен мультипликативный критерий эффективности, предназначенный для оценки обоснования возможности использования смесевых топлив на энергоустановках ТЭС:

$$K_{эфф} = K_{экон} \times K_{эн} \times K_{экол};$$

В таблице 3.5.5 представлены расчетные значения мультипликативных [148] коэффициентов эффективности использования смесевых топлив на энергетических установках тепловых электрических станций.

Таблица 3.5.5 Суммарный коэффициент эффективности использования смесевых топлив на основе угля и древесины.

Топливо	$K_{экон}$	$K_{эн}$	$K_{экол}$	$K_{эфф}$
Каменный уголь марки Д	1	1	1	1
10 % – Древесина, 90 % – Д	1,11	0,95	1,02	1,08
25 % – Древесина, 75 % – Д	1,31	0,93	1,09	1,33
50 % – Древесина, 50 % – Д	1,91	0,91	1,36	2,36

Результаты расчета коэффициентов $K_{эфф}$, представленные в таблице 3.5.5, позволяют оценить перспективность применения смесевых топлив на основе углей и древесины по трем направлениям (экономический, энергетический, экологический) эффективности.

На примере угля марки Д и мелкодисперсной древесины установлено, что увеличение концентрации древесины на 50 % приводит (таблица 3.5.5) к увеличению эффективности работы ТЭС в 2,36 раза за счет улучшения экологических и экономических показателей энергоустановки в целом. Поэтому потери КПД котлоагрегата – 1,2 % можно считать приемлемым, если оценивать работу ТЭС в целом. Полученные результаты в определенной степени согласуются с результатами, опубликованными авторами [56 - 76]. Разработанный в настоящей работе подход к обоснованию возможности использования смесевых топлив на действующих ТЭС, позволяет выполнять такую оценку и осуществлять выбор предпочтительной концентрации древесной компоненты при приготовлении смесевых топлив на основе углей различных марок и древесины для ТЭС.

3.6. Рекомендации по использованию результатов диссертационной работы

Обобщение результатов выполненных экспериментов (п.3.1 – 3.5) позволяют сформулировать рекомендации по использованию разработанного подхода по оценке возможности использования смесевых топлив на основе углей и мелкодисперсной древесины.

1. Эффективными составами смесевых топлив из углей и древесины, являются концентрации в соотношении компонент от 10 % / 90 % до 50 % / 50 %. Для таких составов возможен во многих случаях синергетический эффект увеличения скорости горения топлива. При этом энергетические характеристики снижаются менее чем на 9 %, снижение же зольности составляет до 40 %.

2. При концентрациях компонент в смесевых топливах, 50 % / 50 % обеспечивается снижение выбросов вредных веществ в окружающую среду (NO на 35,1 %, CO₂ на 43,9 %, SO₂ на 57,1 %) относительно однородных углей.

3. Выполненные поверочные расчеты перевода котлоагрегата на смесевые топлива подтверждают возможность использования смесевых топлив при соотношениях компонент от 10 % / 90 % до 50 % / 50 %. При этом КПД котла снижается максимально менее чем на 1,2 %. Установленный рост приращения энтальпий нагреваемой среды подтверждает синергизм смесевых топлив, предназначенных для сжигания в топках паровых котлов.

4. Разработанная методика определения коэффициентов эффективности использования смесевых топлив позволяет прогнозировать показатели эффективной работы оборудования с учетом требуемого расхода топлива и его компонентного состава.

3.7. Акты об использовании результатов диссертационных исследований на энергоустановках ТЭС

На рис. 3.7.1 – 3.7.2 приведены результаты рассмотрения практической значимости диссертационной работы специалистами ТЭС и других объектов теплоэнергетики (получены 2 акта о внедрении). На указанные ниже предприятия переданы результаты диссертационной работы для дальнейшей практической апробации методик по проведению экспериментального анализа характеристик смесевых топлив. С учетом сформулированного в работе мультипликативного критерия эффективности (по оценке возможности использования смесевых топлив на энергетическом оборудовании) позволит повысить эффективность качественного подбора топлив, приобретаемых для сжигания на ТЭС.



УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер
АО «Кузнецкая ТЭЦ»



2017г.

А.В. Боронин

В Диссертационный совет Д 212.269.13

А К Т

о внедрении результатов диссертационной работы

Янковского Станислава Александровича

«Совершенствование технологии пылевидного сжигания угля на ТЭС за счет добавления мелкодисперсной древесины»,

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Комиссия в составе:

Председатель – заместитель главного инженера по производству – Корнев В.Н.

члены комиссии:

Начальник цеха топливо подачи – Пивцайкин Н.А.

Начальник ПТО – Кривцова Л.В.

Представленные в диссертационной работе Янковского С.А. результаты исследований приняты к рассмотрению в качестве рекомендаций по применению представленных методик по проведению экспериментального анализа характеристик топлив и оценке возможности их сжигания на станции с применением мультипликативного критерия эффективности на АО «Кузнецкая ТЭЦ», при приобретении топлив в планируемый отопительный период. Результаты и заключения, приведенные в диссертации, позволят повысить оценку подбора топлив, приобретаемых для сжигания на станциях.

Сформулированный в диссертации мультипликативный критерий эффективности может быть использован на практике благодаря тому, что при его создании, учтены энергетические, экологические и экономические коэффициенты эффективности, позволяющие комплексно оценить возможность применения топлив на станции.

Настоящий акт также подтверждает, что практические рекомендации и выводы, приведенные в заключении диссертационной работы Янковского С.А., рекомендованы к использованию на АО «Кузнецкая ТЭЦ».

Председатель комиссии
Заместитель главного инженера по производству
члены комиссии:
Начальник цеха топливо подачи
Начальник ПТО

Корнев В.Н.

Пивцайкин Н.А.

Кривцова Л.В.

Рисунок 3.7.1 – акт о рассмотрении результатов диссертационной работы специалистами АО «Кузнецкая ТЭЦ» (лист 1)

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «БИО ТЭК-М»

/Туренко В.А./

“ 15 ” сентября 2017 г.

В Диссертационный совет Д 212.269.13



А К Т

о практическом использовании результатов
диссертационной работы Янковского Станислава Александровича

В результате рассмотрения материалов и результатов диссертационной работы С.А. Янковского «Совершенствование технологии пылевидного сжигания угля на ТЭС за счет добавления мелкодисперсной древесины», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, комиссией, в составе директора Туренко В.А. теплотехника Филиппова А.В. начальника котельной ДКВР 10/13 Табачинского Н.П., был составлен настоящий акт, свидетельствующий о следующем:

- результаты диссертационной работы С.А. Янковского признаны актуальными, полезными с практической точки зрения и способными положительно повлиять на проведение оценки возможности применения таких смесевых топлив на энергетических котлоагрегатах котельной ДКВР 10/13 с использованием мультипликативного критерия эффективности, основанного на трех вспомогательных критериях энергетичности, экологичности, экономичности.

- основные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, рекомендованы подразделениям ООО «БИО ТЭК-М» для дальнейшей практической апробации методик по проведению экспериментального анализа характеристик смесевых топлив на основе угля и древесины.

С учетом предложений приведенных в работе, персоналу ООО «БИО ТЭК-М» рекомендовано осуществлять оценку возможности сжигания таких топлив на энергетических установках предприятия.

Председатель комиссии Туренко В.А.

Члены комиссии:

Филиппов А.В.

Табачинский Н.П.

Рисунок 3.7.2 – акт о рассмотрении результатов диссертационной работы специалистами ООО «БИО ТЭК - М» (лист 2)

Выводы по третьей главе

- Определена степень влияния доли древесины на теплотехнические, энергетические, экологические характеристики исследовавшихся смесевых топлив.

- Установлены зависимости температур начала термического разложения смесевых топлив и максимальной скорости их термического разложения от доли древесины.

- Установлено существенное снижение негативного воздействия на окружающую среду при термическом разложении смесевых топлив с долей древесины в них от 10 % до 50 %.

- Определены составы топлив, перспективные для сжигания на достаточно типичном котле БКЗ-220-100-4 Томской ГРЭС-2.

- Определены коэффициенты эффективности использования смесевых топлив на тепловых электрических станциях по трем показателям (экономический, энергетический, экологический).

Результаты экспериментов и поверочного расчета энергетического котла подтверждают возможность сжигания смесевых топлив на основе углей и древесины при соотношениях компонент от 10 % / 90 % до 50 % / 50 %.

Расчет мультипликативного коэффициента эффективности использования смесевых топлив показал, что их сжигание может приводить к увеличению эффективности работы ТЭС в 2,36 раза за счет улучшения экологических и экономических показателей энергоустановки в целом. Поэтому потери КПД котлоагрегата на 1,2 % приемлемы с учетом полученного экологического и экономического эффекта в целом по ТЭС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Разработан новый подход к оценке возможности применения смесевых топлив из угля и мелкодисперсной древесины для сжигания в топках котельных установок тепловых электрических станций.
2. Разработаны методики проведения экспериментальных исследований по определению теплотехнических, энергетических и экологических характеристик смесевых топлив.
3. Экспериментально определены теплотехнические, энергетические и экологические, характеристики смесевых топлив на основе длиннопламенного, тощего, бурых углей и древесины.
4. Методами комплексного термического анализа выявлены основные факторы, оказывающие значимое влияние на характеристики исследованных перспективных смесевых топлив. Установлено, что при концентрациях древесины в таких топливах от 10 % до 50 % по отношению к углям, обеспечивается синергетический эффект, улучшается степень реактивности, энергетические характеристики снижаются от 1,6 % до 9 %, а зольность на 40 %.
5. По результатам выполненного хроматографического анализа состава выделяемых газов при термическом разложении смесевых топлив на основе углей марок Д, Т, 3Б, 2Б и древесины, установлены концентрации смесей, при которых энергетические характеристики смесевых топлив сопоставимы с однородными углями, а выбросы вредных веществ в окружающую среду существенно снижаются. Например, при соотношении компонент 50 % /50 % содержание NO уменьшается на 35,1 %, CO₂ на 43,9 %, SO₂ на 57,1 %.
6. Установлен синергетический эффект сжигания смесевых топлив на основе двух углей и древесины проявляющихся в существенном изменении диапазона температур, в котором происходит термическое разложение угля.

7. Обоснована возможность эффективного использования смесевых топлив на основе углей разных марок Д, Т, ЗБ, 2Б и древесины на тепловых электрических станциях.
8. По результатам поверочного расчета котлоагрегата типа БКЗ-220-100-4 (Томской ГРЭС-2) при его переводе на смесевые топлива установлено, что при доле древесины 25 % КПД котла снижается на 0,8 %, а при 50 % на 1,2 %. При этом наблюдается рост приращения энтальпий нагреваемой среды, что также подтверждает синергизм исследуемых смесевых топлив.
9. Разработана методика оценки эффективности смесевых топлив по трем критериям: экономичности, энергетической эффективности, экологичности. Расчет коэффициента эффективности использования показал, что увеличение концентрации древесины приводит к увеличению эффективности работы ТЭС за счет улучшения экологических и экономических показателей энергоустановки в целом.
10. Сформулированы рекомендации по практическому применению смесевых топлив на основе углей разных марок и отходов лесопромышленного производства (древесины). Полученные результаты позволяют проводить анализ возможности использования смесевых топлив на действующих ТЭС.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

Q^a – высшая теплота сгорания, Мдж/кг;

W^a – влажность топлива, %;

V^{daf} – выход летучих веществ на беззольную массу топлива, %;

A – зольность в сухом состоянии, %;

D_i – индекс зажигания топлива;

D_f – индекс полного термического разложения топлив;

T_e – температура начала термического разложения топлив;

T_e – температура максимальной скорости термического разложения топлив;

T_f – температура завершения термического разложения топлив;

V_{\max} – максимальная скорость термического разложения;

$V_{\text{газ}}$ – объем выделяемых газов при термическом разложении топлив;

$(d_w / d_t)_{\max}$ – максимальная скорость термического разложения;

t_p – время достижения максимальной скорости термического разложения;

t_e – время начала термического разложения;

$\Delta t_{1/2}$ – полупериод в момент достижения максимальной скорости

термического разложения;

t_f – время полного термического разложения топлива;

φ – доля древесной компоненты в смесевом топливе;

$q_{\text{ух}}$ – потери тепла с уходящими газами;

$q_{\text{ми}}$ – потери тепла от механической неполноты сгорания топлива;

$q_{\text{окр}}$ – потери тепла от наружного охлаждения;

$q_{\text{шл}}$ – потери тепла шлака;

$K_{\text{эк}}$ – коэффициент экономической эффективности топлив;

A_v – стоимость угля;

A_K – стоимость смешанного топлива;

$K_{экол}$ – коэффициент экологической эффективности топлив;

B_Y – суммарное выделение антропогенных газов при сжигании угля;

B_K – суммарное выделение антропогенных газов при сжигании смешанного топлива.

$K_{эн}$ – коэффициент энергетической эффективности топлив;

Q_K – калорийность смешанного топлива;

Q_Y – калорийность угля;

$K_{эфф}$ – мультипликативный критерий эффективности;

ЛИТЕРАТУРА

1. Alessandro Franco, Ana R. Diaz The future challenges for “clean coal technologies”: Joining efficiency increase and pollutant emission control. Dipartimento d’Energetica “L. Poggi”, Università di Pisa, Via Diotisalvi 2, 56126 Pisa, Italy Received 13 January 2008, Available online 17 November 2008, Volume 34, Issue 3, March 2009, Pages 348–354.
2. Долгушин И.А. Исследование и совершенствование схемы ТЭС с котлом ЦКС для повышения эффективности и улучшения экологических показателей: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14. - М., 2014. - 166 с.
3. Termuehlen H, Empsperger W. Clean and efficient coal fired power plants. New York: ASME Press; 2003 <https://www.asme.org>.
4. International Energy Agency. Key world energy statistics 2007. Paris Cedex 15, France: International Energy Agency (IEA); 2007. See also [/http://www.iea.org](http://www.iea.org).
5. BP Statistical Review of World Energy. BP, London, UK, June 2008. <http://www.bp.com>.
6. Федюхин А.В. Разработка комбинированной выработки тепловой и электрической энергии на основе исследования процессов пиролиза и газификации биомассы: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14. - М., 2014. - 157 с.
7. Исламова С.И., Вачагина Е.К. Исследование эффективности преобразования энергии при термической утилизации древесной биомассы // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. - 2015. - № 9-10. - С. 3-11.
8. Heinzl T, Siegle V, Spliethoff H, Hein KRG. Investigation of slagging in pulverized fuel co-combustion of biomass and coal at a pilot-scale test facility // Fuel Process Technology – 1998. V. 54. – P. 109 – 125.
9. M. Muthuraman A comparative study on cocombustion performance of municipal solid waste and Indonesian coal with high ash Indian coal: a thermogravimetric analysis / M. Muthuraman, T. Namioka, K. Yoshikawa // Fuel Processing Technology. – 2010. V. 91. – P. 550.

10. Syrodoy S.V. The influence of heat transfer conditions on the parameters characterizing the ignition of coal-water fuel particles / Syrodoy, S.V., Kuznetsov, G.V., Salomatov, V.V. // *Thermal Engineering*. – 2015. V. 62. – P. 703 – 707.
11. Kuznetsov G.V. Numerical simulation of ignition of particles of a coal – water fuel / Kuznetsov G.V., Salomatov V.V., Syrodoy S.V. // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. – 2015. V. 51. – P. 409 – 415.
12. Vershinina K.Y. Differences in the ignition characteristics of coal–water slurries and composite liquid fuel / Vershinina K.Y., Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. // *Solid Fuel Chem.* – 2016. V. 50. – P. 88.
13. K. Yu. Vershinina Experimental Study of the Ignition of Single Drops of Coal Suspensions and Coal Particles in the Oxidizer Flow [Electronic resource] / K. Yu. Vershinina [et al.] // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics Scientific Journal*. – 2017. V. 90. – P. 198 – 205.
14. European Bioenergy Networks, Biomass Co-firing – An Efficient Way to Reduce Greenhouse Gas Emissions, 2003, <http://www.eubionet.vtt.fi>.
15. Agnieszka Plis. Furniture wood waste as a potential renewable energy source / Agnieszka Plis, Michalina Kotyczka-Morańska, Marcin Kopczyński, Grzegorz Łabojko // *Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2016. V. 125. – P. 1357 – 1371.
16. Van der Stelt MJC Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: a review / Van der Stelt MJC, Gerhauser H, Kiel JHA // *Biomass Bioenergy*. – 2011. V. 35. – P. 3748 – 3762.
17. Nunes LJR. A review on torrefied biomass pellets as a sustainable alternative to coal in power generation / Nunes LJR, Matias JCO, Catalo JPS // *Renew Sustain Energy Rev.* – 2014. V. 40. – P. 153 – 160.
18. Robinson A.L. Pilot-scale investigation of the influence of coal-biomass cofiring on ash deposition / Robinson AL, Junker H, Baxter LL // *Energy Fuels*. – 2002. V. 16. – P. 343 – 355.
19. Annamalai K. Co-firing of coal and cattle feedlot biomass (FB) Fuels, Part III: fouling results from a 500,000 BTU/h pilot plant scale boiler burner / Annamalai

- K, Sweeten J, Freeman M, Mathur M, O'Dowd W, Walbert G, et al. // *Fuel*. – 2003. V. 82. – P. 1195 – 1200.
20. Turn S.Q. Test results from sugar cane bagasse and high fiber cane co-fired with fossil fuels / Turn SQ, Jenkins BM, Jakeway LA, Blevins LG, Williams RB, Rubenstein G, et al. // *Biomass Bioenergy*. – 2006. V. 30. – P. 565 – 574.
 21. Xiao H. Isoconversional kinetic analysis of co-combustion of sewage sludge with straw and coal / Xiao H., Ma X., Lai Z. // *Apply Energy*. – 2009. V. 86. – P. 1741 – 1745.
 22. Aboulkas A. Pyrolysis kinetics of olive residue/plastic mixtures by non-isothermal thermogravimetry / Aboulkas A, El harfi K, El bouadili A, Nadifiyine M, Benchanaa M, Mokhlisse A. // *Fuel Process Technology*. – 2009. V. 90. – P. 722 – 728.
 23. Abreu P. Ash deposition during the co-firing of bituminous coal with pine sawdust and olive stones in a laboratory furnace / Abreu P., Casaca C., Costa M. // *Fuel*. – 2010. V. 89. – P. 4040 – 4048.
 24. Sonobe T. Synergies in co-pyrolysis of Thai lignite and corncob / Sonobe T, Worasuwanarak N, Pipatmanomai S. // *Fuel Process Technology*. – 2008. V. 89. – P. 1371 – 1378.
 25. Kazagic A. Synergy effects of co-firing wooden biomass with Bosnian coal / Kazagic A., Smajevic I. // *Energy*. – 2009. V. 34. – P. 699 – 707.
 26. Jumoke M. A novel index for the study of synergistic effects during the co-processing of coal and biomass / Jumoke M.Oladejo Stephen Adegbite Cheng Heng Pang Hao Liu Ashak M. Parvez Tao Wu // *Elsevier*. – 2017. V. 188. – P. 215 – 225.
 27. Sami M. Co-firing of coal and biomass fuel blends / Sami M, Annamalai K, Wooldridge M. // *Progress in Energy Combustion Science*. – 2001. V. 27. – P. 171 – 214.
 28. Frazzitta S. Performance of a burner with coal and coal: manure blends / Frazzitta S, Annamalai K, Sweeten J. // *Propuls Power*. – 1999. V. 15. – P. 181 – 186.

29. Van Doorn J. Combined combustion of biomass, municipal sewage sludge and coal in an atmospheric fluidised bed installation. In: Biomass for energy and the environment / Van Doorn J, Bruyn P, Vermeij P. // Proceedings of the 9th european bioenergy conference, vol. 2. Copenhagen (Denmark); 24 – 27 June 1996. p. 1007 – 12.
30. Aerts DJ. Co-firing switchgrass in a 50 MW pulverized coal boiler / Aerts DJ, Bryden KM, Hoerning JM, Ragland KW. // Proceedings. – 1997. V. 59. – P. 1180 – 1185.
31. Sampson GR. Co-firing of wood chips with coal in interior Alaska / Sampson GR, Richmond AP., Brewster GA., Gasbarro AF. // For Prod J. – 1991. V. 41. – P. 53 – 56.
32. Fahlstedt I, Lindman E, Lindberg T, Anderson J. Co-firing of biomass and coal in a pressurized fluidised bed combined cycle. Results of pilot plant studies. In: Proceedings of the 14th international conference on fluidized bed combustion, vol. 1. Vancouver (Canada); 1997. P. 295 – 299.
33. Kaer SK, Rosendahl L, Overgaard P. Numerical analysis of co-firing coal and straw. In: Proceedings of the 4th european CFD conference. Athens (Greece); 7 – 11 September. 1998. P. 1194 – 1199.
34. Christensen J, Jespersen P. Straw-firing tests at Amager and Kyndby power stations. Biomass for energy and the environment. In: Proceedings of the 9th european bioenergy conference, vol. 2. Copenhagen (Denmark); 24–27 June. 1996. P. 1013 – 8.
35. Siegel V, Schweitzer B, Spliethoff H, Hein KRG. Preparation and co combustion of cereals with hard coal in a 500 kW pulverized-fuel test unit. Biomass for energy and the environment. In: Proceedings of the 9th european bioenergy conference, vol. 2. Copenhagen (Denmark); 24–27 June. 1996. P. 1027 – 32.
36. Andries J, Verloop M, Hein K. Co-combustion of coal and biomass in a pressurized bubbling fluidized bed. In: Proceedings of the 14th international conference on fluidized bed combustion, vol. 1. Vancouver (Canada); 11–14 May. 1997. P. 313 – 20.

37. Ohlsson O. Results of combustion and emissions testing when co-firing blends of binder-enhanced densified refuse-derived fuel (b-dRDF) pellets and coal in a 440 MWe cyclone fired combustor. Test methodology and results, vol. 1. Subcontract report no. DE94000283. Argonne (IL): Argonne National Laboratory. 1994. P. 60.
38. L. Xiang-guo Thermogravimetric analysis of the co-combustion of the blends with high ash coal and waste tyres / L. Xiang-guo, M. Bao-guo, X. Li, H. Zhen-wu, W. Xin-gang // *Thermochimica Acta.* – 2006. V. 441. – P. 79.
39. Vamvuka D Possibility of using paper sludge in co-firing applications / Vamvuka D, Salpigidou N, Kastanaki E, Sfakiotakis S. // *Fuel.* – 2009. V. 88. – P. 637 – 643.
40. Pis JJ. A study of the selfheating of fresh and oxidized coals by differential thermal analysis / Pis JJ, de la Puente G, Fuente E, Moran A, Rubiera F. // *Thermochim Acta.* – 1996. V. 279. – P. 93 – 101.
41. Rubiera F. Influence of biological desulphurisation on coal combustion performance / Rubiera F, Moran A, Martinez O, Fuente E, Pis JJ. // *Fuel Process Technology.* – 1997. V. 52. – P. 165 – 173.
42. Haykiri – Açma H. Combustion characteristics of different biomass materials / *Energy Conversion and Management.* – 2003. V. 44. – P. 155 – 162.
43. Skodras G. Pyrolysis and combustion behavior of coal – MBM blends / Skodras G, Grammelis P, Basinas P. // *Bioresour Technol.* – 2007. V. 98. – P. 1 – 8.
44. Chen Wei-Hsin. An evaluation on rice husks and pulverized coal blends using a drop tube furnace and a thermogravimetric analyzer for application to a blast furnace / Chen Wei-Hsin, Wu Jheng – Syun // *Energy.* – 2009. V. 34. – P. 1458 – 1466.
45. Harsono S.S. Energy balances, greenhouse gas emissions and economics of biochar production from palm oil empty fruit bunches / Harsono S.S., Grundman P., Lau L.H., Hansen A., Salleh M.A.M., Meyer-Aurich A. // *Resources, Conservation and Recycling.* – 2013. V. 77. – P. 108 – 115.
46. Haykiri-Acma H. Co-combustion of lowrank coal/ waste biomass blends using dry air or oxygen / Haykiri-Acma H, Yaman S, Kucukbayrak S. // *Appl Therm Eng.* – 2013. V. 50. – P. 251 – 259.

47. Zakaria Z. Thermal decomposition study of coals, rice husk, rice husk char and their blends during pyrolysis and combustion via thermogravimetric analysis / Zakaria Z., Mohd Ishak MA., Abdullah MF., Ismail K. // *Int JChem Technol.* – 2010. – P. 1 – 10.
48. Kwong Philip CW Co-combustion performance of coal with rice husks and bamboo / Kwong Philip CW, Chao YH Christopher, Wang JH, Cheung CW, Kendall Gail. // *Atmos Environ.* – 2007. V. 41. – P. 7462 – 7472.
49. Philip CW Co-firing coal with rice husk and bamboo and he impact on particulate matters and associated polycyclic aromatic hydrocarbon emissions / Chao YH Christopher, Kwong Philip CW, Wang JH, Cheung CW, Kendall Gail. // *Bioresource Technology.* – 2008. V. 99. – P. 83 – 93.
50. Haykiri-Acma H. Effect of co-combustion on the burn out of lignite/ biomass blends: a Turkish case study / Haykiri-Acma H, Yaman S. // *Waste Manag.* – 2008. V. 28. – P. 2077 – 2084.
51. H.Yaman. Combinations of synergistic interactions and additive behavior during the co-oxidation of chars from lignite and biomass // *Fuel Process Technology.* – 2008. V. 89. – P. 176 – 182.
52. Ulloa CA. Thermogravimetric study of interactions in the pyrolysis of blends of coal with radiate pine sawdust / Ulloa CA, Gordon AL, Garcia XA. // *Fuel Process Technology.* – 2009. V. 90. – P. 583 – 590.
53. Gil MV. Thermal behavior and kinetics of coal/biomass blends during co-combustion / Gil MV, Casal D, Pevida C, Pis JJ, Rubiera F. // *Bioresour Technology.* – 2010. V. 101. – P. 5601 – 5608.
54. Zhou L, Wang Y, Huang Q, Cai J. Thermogravimetric characteristics and kinetic of plastic and biomass blends co-pyrolysis. *Fuel Process Technol* 2006; 87:963 – 9.
55. Guo – qing LIU, Qing – cai LIU, Xiao qing WANG, Fei MENG, Shan REN, Zhen – peng JI. Combustion characteristics and kinetics of Anthracite blending with pine sawdust. *Journal of iron and steel research, international.* 2015, 22(9):812 – 817.

56. Shen DK, Gu S, Luo KH, Bridgwater AV, Fang MX. Kinetic study on thermal decomposition of woods in oxidative environment. *Fuel*. – 2009. V. 88. – P. 1024 – 1030.
57. Cumming JW, Mc Laughlin J. The thermogravimetric behavior of coal. *Thermochim Acta*. – 1982. V. 58. – P. 253 – 272.
58. International Energy Agency (IEA). *Bioenergy Project Development & Biomass Supply*, 2007. Available online: <http://www.iea.org>
59. Lars Storm Pedersen, Hanne Philbert Nielsen, Wren Kiil, Lone Aslaug Hansen, Kim Dam-Johansen, Finn Kildsig, Jan Christensen, Peer Jespersen. Full-scale co-firing of straw and coal. *Fuel*. – 1996. V. 75. – P. 1584 – 1590.
60. Mehmet Melikoglu. Vision 2023: Status quo and future of biomass and coal for sustainable energy generation in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 74 (2017) 800 – 808.
61. Giovanni Mainini. *Ansaldo Caldaie coal biomass co-firing testing experience. Firing Systems Manager – Ansaldo Caldaie SpA, Italy 2012.*
62. Veijonen, K.; Vainikka, P.; Järvinen, T.; Alakangas, E.; Processes, V. *Biomass Co-Firing: An Efficient Way to Reduce Greenhouse Gas Emissions; European Bioenergy Networks: Espoo, Finland, 2000.*
63. Yuanyuan Shao, Jinsheng Wang, Fernando Preto, Jesse Zhu and Chunbao (Charles) Xu. *Ash Deposition in Biomass Combustion or Co-Firing for Power/Heat Generation // Energies*. – 2012. V. 5. – P. 5171 – 5189.
64. Al-Mansour F. An evaluation of biomass co-firing in Europe / Al-Mansour F., Zuwala J. // *Biomass and Bioenergy* . – 2010. V. 34. – P. 620 – 629.
65. APX-ENDEX Successfully Launches the World’s First Exchange for Biomass Renewable (Press Release), Amsterdam/Brussels/London, 3 November 2011, Available at. <http://www.apxendex.com/index>.
66. Kati Veijonen, Pasi Vainikka, Timo Järvinen, Eija Alakangas, VTT Processes. *Biomass co-firing- AN EFFICIENT WAY TO REDUCE GREENHOUSE GAS EMISSIONS// This publication is produced by the European Bioenergy. Networks (EUBIONET) under the contract of the European. Commission. EUBIONET*

- promotes bioenergy utilisation and business opportunities in Europe through events, publications, meetings, study tours and contacts to key bioenergy organisations in Europe. <http://www.canadiancleanpowercoalition.com>
67. Growing Power - Advanced solutions for bioenergy technology from Finland, Tekes & VTT Processes & Teonsana Oy. Lahti 2002. 34 p.
 68. YEGM. TUBITAK Projects Biyokütle ve Biyokütle/Kömür Karışımlarının Dolasimli Akiskan Yatakta Yakma Teknolojilerinin Geliştirilmesi 2016. <http://www.eie.gov.tr>
 69. TUBITAK. Combustion and gasification technologies 2016. <http://ee.mam.tubitak.gov.tr>
 70. TUBITAK. Energy-Fossil Fuel: Coal Call for proposal 2016:3. <http://www.tubitak.gov.tr>.
 71. TUBITAK. Coal-Biomass Mixed Combustion Technology Call for proposal 2016:3. <http://www.tubitak.gov.tr>.
 72. Zenkov A., Yankovsky S., Matveeva A., Lavrinenko S., Gromov A. Research of heat rates effect on the process of fuel-bed gasification of "Balakhtinskoe", "Osinnikovskoe", "Krasnogorskoe" and "Borodinskoe" coal deposits // MATEC Web of Conferences Cep. "Heat and Mass Transfer in the System of Thermal Modes of Energy - Technical and Technological Equipment, HMTTSC 2016" 2016. C. 01131.
 73. Fouad Al-Mansour, Jaroslaw Zuwala. An evaluation of biomass co-firing in Europe/ biomass and bioenergy, Issue 5, May 2010, Pages 620-629.
 74. European Commission-Dg TREN. EUROPEANUNION – Energy & transport infigures, Statistical pocketbook, 2007/2008.
 75. 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).
 76. 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.

77. 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.
78. 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>
79. Commission of the European Communities: Biomass action plan, {SEC(2005) 1573}, COM (2005) 628 final, Brussels, 7.12. 2005. <http://ec.europa.eu>
80. The European Bioenergy Networks (EUBIONET): Biomass co-firing – an efficient way to reduce greenhouse gas emissions. <http://ec.europa.eu>.
81. Larry Baxter, Jaap Koppejan. Biomass-coal co-combustion: opportunity for affordable renewable energy. <http://www.ieabcc.nl>.
82. Netbiocof – Integrated European Network for Biomass Co-firing; 6th FP, no. SES6-CT-020007- (SES6). <http://www.netbiocof.net>.
83. First State-of-the-Art Report. Deliverable D14, Netbiocof Project (no. SES6-CT-020007). <http://www.netbiocof.net>.
84. First report “Best Practies in biomass co-firing in Europe”, Deliverable D15. NetbioCof Project (no. SES6-CT-020007). <http://www.netbiocof.net>.
85. IEA Bioenergy Task 32: Biomass Combustion and Co-firing, Database of Biomass Co-firing. <http://www.ieabcc.nl>.
86. Iea Clean Coal Centre Profiles. Fuels for biomass co-firing. November 2005. <http://www.ieacoal.org.uk>
87. Web-сайт Netzsch. <http://www.netzsch>.
88. ГОСТ 147-2013 – Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и расчет низшей теплоты сгорания (с Поправкой). – М.: Стандартиформ, 2014. – 43 с.
89. ГОСТ 11022-95 – Топливо твердое минеральное. Методы определения зольности. – М.: Стандартиформ, 2006. – 8 с.
90. ГОСТ 27314-91 – Топливо твердое минеральное. Методы определения влаги. – М.: Стандартиформ, 2007. – 11 с.

91. ГОСТ 6382-2001 – Топливо твердое минеральное. Методы определения выхода летучих веществ. – М.: Стандартиформ, 2008. – 11 с.
92. Yankovsky S.A. Coal char oxidation kinetics in air medium / Yankovsky S.A., Slyusarsky K.V., Korotkikh A.G., Sorokin I.V. / AIP Conference Proceedings. – 2017. – Vol. 1800, No. 020014.
93. Haykiri-Acma H, Yaman S. Effect of co-combustion on the burnout of lignite/biomass blends: a Turkish case study. *Waste Manage* 2008;28(11): 2077–84.
94. Medic D, Darr M, Shah A, Potter B, Zimmerman J. Effects of torrefaction process parameters on biomass feedstock upgrading. *Fuel*. 2012; 91:147 – 54.
95. 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.
96. Niu Z., Liu G., Yin H., Wu D., Zhou C. Investigation of mechanism and kinetics of non-isothermal low temperature pyrolysis of perhydrous bituminous coal by in-situ FTIR // *Fuel*. – 2016. – V.172. – P.1–10.
97. Yankovsky S.A. Study of electrophysical intrastratal gasification at different coal heating rate / Yankovsky S.A., Larionov K.B., Korjashov I.A., Gubin V.E., Zenkov A.V. // *Matec Web of Conferences*. – 2015. – Vol. 37, No. 01030.
98. Yankovsky S.A. Research of heating rates influence on layer coal gasification of Krasnogorsky and Borodinsky coal deposit / Yankovsky S.A., Luzhkovoj D. S., Larionov K.B., Matveeva A.A.// *Matec Web of Conferences*. – 2015. – Vol. 37, No. 01026.
99. Bai, F., Sun, Y., Liu, Y., Li, Q., Guo, M. Thermal and kinetic characteristics of pyrolysis and combustion of three oil shales (2015) *Energy Conversion and Management*. – V. 97. – P. 374–381.
100. Du Y, Jiang X, Lv G, Ma X, Jin Y, Wang F, et al. Thermal behavior and kinetics of bio-ferment residue/coal blends during co-pyrolysis. *Energy Convers Manage* 2014; 88:459 – 63.

101. Jain AA, Mehra A, Rande VV. Processing of TGA data: analysis of isoconversional and model fitting methods. *Fuel* 2016; 165:490–8.
102. Liu Zhenyu, Guo Xiaojin, Shi Lei, et al. Reaction of volatiles – a crucial step in pyrolysis of coals. *Fuel* 2015; 154:361–9.
103. Scholler MB. Comprehensive evaluation of coals in Western and Eastern Siberia as a raw material for making pulverized-coal fuel for blast furnaces. *Metallurgist* 2011;55(1):85–92.
104. Ivanov IA, Gagarin GS, Gyulmaliev AM. Regression dependence of technological indices of coals on their elemental composition. *Solid Fuel Chem* 2003;37(5):6–13.
105. Wang Y, Yang M, Luo Z, Wang Y, Li G, Hu R. Rapid coal classification based on confidence machine and near infrared spectroscopy. *Guang Pu Xue Yu Guang Pu Fen Xi/Spectroscopy and Spectral Analysis* 2016; 36:1685–9.
106. Starink MJ. The determination of activation energy from linear heating rate experiments: a comparison of the accuracy of isoconversion methods. *Thermochim Acta* 2003; 404:163–76.
107. Niu Z, Liu G, Yin H, Wu D, Zhou C. Investigation of mechanism and kinetics of non-isothermal low temperature pyrolysis of perhydrous bituminous coal by in-situ FTIR. *Fuel* 2016; 172:1–10.
108. Despina Vamvuka, Stelios Sfakiotakis Combustion behaviour of biomass fuels and their blends with lignite. *Thermochimica Acta* 526 (2011) 192– 199. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2011.09.021>.
109. Янковский С.А. Эффективность применения композитных топлив из угля и древесины в промышленной энергетике / С.А. Янковский, науч. рук. Г.В. Кузнецов // НТВ СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2017. - №3. – С. 23–32.
110. Янковский С.А. Потенциал использования композитного топлива на основе каменного угля и отходов лесопромышленного производства в теплоэнергетике / С.А. Янковский, науч. рук. Г.В. Кузнецов // Промышленная энергетика. – 2017. - №11. – С. 62–71.

111. Yankovsky S.A. Research of Heat Rates Effect on the Process of Fuel-Bed Gasification of "balakhtinskoe", "osinnikovskoe", "krasnogorskoe" and "borodinskoe" Coal Deposits / Yankovsky S.A., Zenkov A.V., Matveeva A.A., Lavrinenko S.V., Gromov A.A.// Matec Web of Conferences. – 2016. – Vol. 72, No. 01131.
112. Yankovsky S.A. Study of the influence of heating rate on the process of grate gasification of Balakhta and Osinnikovsky coal deposits / Yankovsky S.A., Gubin V.E., Tolokolnikov A.A., Zenkov A.V., Nikolaeva V.I. / Proceedings. – 2016. – P. 299 – 302, No. 7884252.
113. Yankovsky S.A. Research of wood waste concentration influence on composite fuel energy characteristics based on low-grade 2b coal from "borodinskoe" deposit / Yankovsky S.A., Zenkov A.V., Matveev A.S., Tolokolnikov A.A., Zenkov A.V.// Matec Web of Conferences. – 2016. – Vol. 92, No. 01036.
114. Yankovsky S.A. Coal char oxidation kinetics in air medium / Yankovsky S.A., Slyusarsky K.V., Korotkikh A.G., Sorokin I.V. / AIP Conference Proceedings. – 2017. – Vol. 1800, No. 020014.
115. Yankovsky S.A. Research of composite fuels thermophysical properties based on low-grade coals with addition of fine sawdust and flour industry wastes / Yankovsky S.A., Matveev A.S., Tolokolnikov A.A., Marysheva Y.V. // Matec Web of Conferences. – 2017. – Vol. 110, No. 01089.
116. Yankovsky S.A. Non-isothermal kinetic study of bituminous coal and lignite conversion in air and in argon/air mixtures / S.A. Yankovsky K.V. Slyusarsky, K.B. Larionov, V.I. Osipov, V.E. Gromov // Fuel – 2017. - Vol. 191, - P. 383-392
117. European Bioenergy Networks, Biomass Co-firing—An Efficient Way to Reduce Greenhouse Gas Emissions, 2003, <http://www.eubionet.vtt.fi>.
118. M. Aho, A. Gil, R. Taipale, P. Vainikka, H. Vesala, A pilot-scale fireside deposit study of co-firing Cynara with two coals in a fluidised bed, Fuel 87 (2008) 58.
119. C.L. Sun, J.A. Kozinski, Ignition behaviour of pulp and paper combustible wastes, Fuel 79 (2000) 1587.
120. M. Hupa, Interaction of fuels in co-firing in FBC, Fuel 84 (10) (2005) 1312.

121. E. Kastanaki, D. Vamvuka, A comparative reactivity and kinetic study on the combustion of coal-biomass char blends, *Fuel* 85 (2006) 1186.
122. 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* 91 (5) (2010) 550.
123. T. Grotkjaer An experimental study of biomass ignition / T. Grotkjaer, K. Dam-Johansen, P. Jensen // *Fuel*. – 2003. V. 82. – P. 825.
124. S.G. Sahu, P. Sarkar, N. Chakraborty, A.K. Adak, Thermogravimetric assessment of combustion characteristics of blends of a coal with different biomass chars, *Fuel Processing Technology* 91 (2010) 369.
125. L. Xiang-guo, M. Bao-guo, X. Li, H. Zhen-wu, W. Xin-gang, Thermogravimetric analysis of the co-combustion of the blends with high ash coal and waste tyres, *Thermochimica Acta* 441 (2006) 79.
126. M. Muthuraman, T. Namioka, K. Yoshikawa, A comparison of co-combustion characteristics of coal with wood and hydrothermally treated municipal solid waste, *Bioresource Technology* 101 (2010) 2477.
127. M. Varol, A.T. Atimtay, B. Bay, H. Olgun, Investigation of co-combustion characteristics of low quality lignite coals and biomass with thermogravimetric analysis, *Thermochimica Acta* 510 (2010) 195.
128. T. Grotkjaer, K. Dam-Johansen, P. Jensen, An experimental study of biomass ignition, *Fuel* 82 (2003) 825.
129. D.K. Shen, S. Gu, K.H. Luo, A.V. Bridgwater, M.X. Fang, Kinetic study on thermal decomposition of woods in oxidative environment, *Fuel* 88 (2009) 1024.
130. H. Haykiri-Acma, S. Yaman, Combinations of synergistic interactions and additive behavior during the co-oxidation of chars from lignite and biomass, *Fuel Processing Technology* 89 (2008) 176.
131. M. Yilgin Volatiles and char combustion rates of demineralized lignite and wood blends / M. Yilgin, D.D. Pehlivan // *Applied Energy*. – 2009. V. 86. – P. 1179.

132. A. Demirbas Effects of temperature and particle size on bio-char yield from pyrolysis of agricultural residues // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2004. V. 72. – P. 243.
133. D. Vamvuka Pyrolysis characteristics and kinetics of biomass residuals mixtures with lignite / D. Vamvuka, E. Kakaras, E. Kastanaki, P. Grammelis // *Fuel*. – 2003. V. 82. – P. 1949.
134. M. Jeguirim, G. Pyrolysis characteristics and kinetics of *Arundo donax* using thermogravimetric analysis / Jeguirim, G. // *Bioresource Technology*. – 2009. V. 100. – P. 4026.
135. A.G. Barneto Simulation of the thermogravimetry analysis of three non-wood pulps / A.G. Barneto, J.A. Carmona, J.E. Martin Alfonso, R.S. Serrano // *Bioresource Technology*. – 2010. V. 9. – P. 3220.
136. T. Mani Pyrolysis of wheat straw in a thermogravimetric analyzer: effect of particle size and heating rate on devolatilization and estimation of global kinetics / T. Mani, P. Murugan, J. Abedi, N. Mahinpey, // *Chemical Engineering Research and Design*. – 2010. V. 88. – P. 952.
137. A. Chouchene, M. Jeguirim, B. Khiari, F. Zagrouba, G. Trouvř, Thermal degradation of olive solid waste: influence of particle size and oxygen concentration, *Resources, Conservation and Recycling* 54 (2010) 271.
138. S. Dorge, M. Jeguirim, G. Trouvř, Thermal degradation of *Miscanthus* pellets: kinetics and aerosols characterization // *Waste and Biomass Valorization* 2 (2011) 149.
139. Heinzl T, Siegle V, Spliethoff H, Hein KRG. Investigation of slagging in pulverized fuel co-combustion of biomass and coal at a pilot-scale test facility // *Fuel Process Technology*. – 1998. V. 54. – P. 109 – 125.
140. Jenkins BM, Thy P, Turn SQ, Blevins LG, Baxter LL, Jakeway LA, et al. Composition and microstructure of ash deposits from co-firing biomass and coal. In: *Proceedings of the 10th biennial bioenergy conference, Boise, Idaho; 2002*.

141. Robinson AL Pilot-scale investigation of the influence of coal-biomass cofiring on ash deposition / Robinson AL, Junker H, Baxter LL. // *Energy Fuels*. – 2002. V. 16. – P. 343 – 355.
142. Annamalai K, Sweeten J, Freeman M, Mathur M, O'Dowd W, Walbert G, et al. Co-firing of coal and cattle feedlot biomass (FB) Fuels, Part III: fouling results from a 500,000 BTU/h pilot plant scale boiler burner // *Fuel*. – 2003. V. 82. – P. 1195 – 1200.
143. Turn SQ, Jenkins BM, Jakeway LA, Blevins LG, Williams RB, Rubenstein G, et al. Test results from sugar cane bagasse and high fiber cane co-fired with fossil fuels // *Biomass Bioenergy*. – 2006. V. 30. – P. 565 – 574.
144. Pronobis M. The influence of biomass co-combustion on boiler fouling and efficiency // *Fuel*. – 2006. V. 85. – P. 474 – 480.
145. Kupka T, Zajac K, Weber R. Influence of fuel type and deposition surface temperature on the growth and structure of an ash deposit collected during co-firing of coal with sewage sludge and sawdust // *Energy Fuels*. – 2009. V. 23. – P. 3429 – 3436.
146. Kupka T, Mancini M, Irmer M, Weber R. Investigation of ash deposit formation during co-firing of coal with sewage sludge, sawdust and refuse derived fuel // *Fuel*. – 2008. V. 87. – P. 2824 – 2837.
147. Casaca C, Costa M. Co-combustion of biomass in a natural gas fired furnace // *Combust Sci. Technol*. – 2003. V. 175. – P. 1953 – 1977.
148. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). Издание третье, переработанное и дополненное. Издательство НПО ЦКТИ, С-Пб, 1998 – 256 с.
149. Мушик Э., Мюллер П. Методы принятия технических решений / под. Ред. Д.М. Гвишнани, С.В. Емельянова. –М.: Машиностроение. 1978. – 210 с.
150. Макаров И.М., Виноградская Т.М., Рубчинский А.А., Соколов В.Б. Теория выбора и принятия решений. –М.: Наука. 1982. – 328 с.
151. Юдин Д.Б. Вычислительные методы теории принятия решений. –М.: Наука. 1989. – 320 с.

152. DECC (2011), Calculating the Level of the Renewables Obligation 2012/13, UK Department of Energy and Climate Change, Office for Renewable Energy Deployment, London, Available at: <http://www.decc.gov.uk>
153. DENA (2011), Die Mitverbrennung holzartiger Biomasse in Kohlekraftwerken. Ein Beitrag zur Energiewende und Klimaschutz. DENA, Berlin, 2011.
154. Deutscher Bundestag (2011), Mitverbrennung von holzartiger Biomasse in Kohlekraftwerken, Antwort der Bundesregierung, Drucksache 17 / 8037.
155. EC (2010), Report from the Commission to the Council and the European Parliament on sustainability requirements for the use of solid and gaseous biomass sources in electricity, heating and cooling. COM (2010) 11; Brussels.
156. ECN (2012a), Use of sustainable biomass to produce electricity, heat and transport fuels in EU27. A model-based analysis of biomass use for 2020 and 2030. Deliverable D5.3, ECN-E—12-021, March 2012.
157. ECN (2012b), Co-firing low cost fuels using indirect gasification. The economics of indirect gasification. Presented at Clearwater Clean Coal Conference, Florida, USA, 3-7 June 2012.
158. Hawkins Wright (2011), Forest Energy Monitor, Issue 15, September/October 2011.
159. GBEP (2011), The GBEP Sustainability Indicators for Bioenergy; Rome. <http://www.globalbioenergy.org>
160. IC (2011), Imperial College Centre for Energy Policy and Technology/ UK Energy Research Centre (2011), Energy from biomass: the size of the global resource. An assessment of the evidence that biomass can make a major contribution to future global energy supply; London: <http://www.ukerc.ac.uk>
161. IEA (2010), Energy Technology Perspectives 2010, IEA, Paris, 2010.
162. IEA (2011), World Energy Outlook 2011, IEA, Paris, 2011.
163. IEA (2012), Bioenergy for Heat and Power, Technology Roadmap, IEA, Paris, June 2012.
164. IEA Bioenergy (2009a), Bioenergy – a Sustainable and Reliable Energy Source, 2009.

165. IEA Bioenergy Task 32 (2009a), Database of Biomass Cofiring Initiatives, Available at: <http://www.ieabcc.nl/database/cofiring.html> (25 Nov. 2011).
166. IEA Bioenergy Task 32 (2009b), Technical status of biomass co-firing (Deliverable 4), 2009.
167. IEA Bioenergy (2011b), Summary and conclusions from IEA Bioenergy Task 40 country reports on international bioenergy trade, Utrecht, April 2011.
168. IEA Bioenergy (2011c), Update: Initiatives in the field of biomass and bioenergy certification schemes, April 2010, Available at: <http://www.bioenergytrade.org>
169. IEA ETSAP (2010a), Technology Brief E01 – April 2010.
170. IEA Clean Coal Centre (2012), information from personal email exchange, January 2012.
171. IPCC (2011), IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation; Edenhofer, Ottmar et al. (eds.); IPCC Working Group III. <http://srren.ipcc-wg3.de>
172. IRENA (2012), Biomass for Power Generation, Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series, Volume 1: Power Sector, Issue 1/5, June 2012.
173. Kiel (2011) Prospects of Torrefaction to Optimize Bioenergy Value Chains, ECN, Energy Delta Convention 2011, Groningen, 22 Nov. 2011.
174. Platts (2011a), UDI World Electric Power Plants Data Base (WEPP), Platts Washington, DC, December 2011.
175. Platts (2011b), WEPP Data base description and research methodology - UDI world electric power plants data base, Platts Washington, 17 June 2011.
176. Abdullah S.S.S., Shirai Y., Bahrin E.K., Hassan M.A., 2015, Fresh oil palm frond juice as a renewable, nonfood, non-cellulosic and complete medium for direct bioethanol production, *Industrial Crops and Products*, 63, 357-361.
177. EIA (U.S. Environmental Information Administration), 2016, Electric power monthly. www.eia.gov.
178. Fan S.P. Comparative studies of products obtained from solvolysis liquefaction of oil palm empty fruit bunch fibres using different solvents / Fan S.P., Zakaria S.,

- Chia C.H., Jamaluddin F., Nabihah S., Liew T.K., Pua, F.L. // *Bioresource Technology*. – 2011. V. 102. – P. 3521 – 3526.
179. *Металл Эксперт «Прогноз рынков угля РФ»*, квартальный отчет, Январь 2016г. 22-23. <http://metalexpert.ru>
180. Goh M., 2015, Malaysia pledges to cut CO2 emissions intensity by 45% by 2030. www.channelnewsasia.com
181. Griffin W.M Availability of biomass residues for co-firing in peninsular Malaysia: Implications for cost and GHG emissions in the electricity sector / Griffin W.M., Michalek J., Matthews H.S., Hassan, M.N.A. // *Energies*. – 2014. V. 7. – P. 804 – 823.
182. Федеральный закон № 458-ФЗ от 29.12.2014 «О внесении изменений в Федеральный закон «Об отходах производства и потребления».
183. Gutiérrez-Arriaga C.G. Sustainable integration of algal biodiesel production with steam electric power plants for greenhouse gas mitigation / Gutiérrez-Arriaga C.G., Serna-González M., Ponce-Ortega J.M, El-Halwagi M.M., // *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*. – 2014. V. 2. – P. 1388 – 1403.
184. First E.L A multi-scale framework for CO2 Capture, Utilization, and Sequestration: CCUS and CCU / Hasan M.M.F., First E.L., Boukouvala F., Floudas C.A. // *Computers and Chemical Engineering*. – 2015. V. 2. – P. 2 – 21.
185. Kadam K.L. Environmental implications of power generation via coal-microalgae cofiring // *Energy*. – 2002. V. 10. – P. 905 – 922.
186. Klaarenbeeksingel F.W. Greenhouse gas emissions from palm oil production: Literature review and proposals from the RSPO working group on greenhouse gases. – 2009. <http://www.rspo.org>
187. Lee S. Implication of CO2 capture technologies options in electricity generation in Korea / Lee S., Park J.W., Song H.J., Maken S., Filburn T // *Energy Policy*. – 2008. V. 36. – P. 326 – 334.
188. Lundquist, T.J. A realistic technology and engineering assessment of algae biofuel production / Lundquist, T.J., Woertz, I.C., Quinn, N. and Benemann, J.R. // *Civil and Environmental Engineering*. – 2010. V. 188. – P. 1 – 178.

189. Rezvani, S. Techno-economic assessment of CO₂ bio-fixation using microalgae in connection with three different state-of-the-art power plants / Rezvani, S., Moheimani, N.R., Bahri, P.A. // *Computers and Chemical Engineering*. – 2016. V. 84. – P. 290 – 301.
190. Rizwan, M. Optimal design of microalgae-based biorefinery: Economics, opportunities and challenges / Rizwan, M., Lee, J.H., Gani, R. // *Applied Energy*. – 2015. V. 150. – P. 69 – 79.
191. Sinadia, H., 2016, Coal mining update Indonesia: Coal price rises in July. <http://www.indonesiainvestments>.