

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» на кафедре атомных и тепловых электростанций.

Научный руководитель:

Кузнецов Гений Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Богомоллов Александр Романович, доктор технических наук, профессор, Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, лаборатория проблем тепломассопереноса, ведущий научный сотрудник

Козлов Александр Николаевич, кандидат технических наук, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, лаборатория Термодинамики, старший научный сотрудник.

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» (г. Красноярск).

Защита состоится 28 декабря 2017 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.13 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, д. 7, уч. корпус 8, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/2803/worklist>

Автореферат разослан 27 октября 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 212.269.13
кандидат технических наук, доцент

Матвеев Александр
Сергеевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы

По прогнозам специалистов 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 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.

На сегодняшний день запасы угля в РФ составляют 19 % от мировых показателей, а доля ТЭС, использующих это топливо, – 26 %. Для большинства тепловых электростанций уголь является привозным, что приводит к увеличению стоимости энергоресурсов для потребителей в 1,5 – 2 раза (в зависимости от региона). 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).

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

Известно, 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. Широкое использование смесевых топлив на основе угля и древесины может позволить суще-

ственно снизить объемы потребления привозного угля на многих тепловых электростанциях за счет использования местных биоэнергоресурсов.

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. Требования данной стратегии предписывают увеличение объемов выработки тепла и электроэнергии на ТЭС с использованием возобновляемых источников энергии (в том числе отходов лесопиления) на 4,5 %.

Известно, что объем запасов древесины в России превышает 80 млрд. куб. м. Отходы ее переработки составляют более 30 млн. куб. м в год. 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, а также ростом цен на первичные энергоносители.

Россия и многие другие государства ведут исследования по использованию в энергетике различных видов смесевых топлив: водоугольных, органоводоугольных, на основе отходов лесо- и агропромышленного производства и др. Определенных успехов в применении технологий совместного сжигания угля и биомассы добились в таких странах как Финляндия, Швеция, Китай, Индия, США, Канада. Значимые научные результаты по сжиганию биомассы и смесевых топлив на основе угля и биомассы получили Долгушин И.А., Федюхин А.В., Пузырёв Е.М., Жуйков А.В., Козлов А.Н., Стрижак П.А., Зройчиков Н.А., Богомолов А.Р. Козлов А.Н., Heinzl T., Muthuraman M., Franco A., Plis A., Nunes LJR., Annamalai K., Aboulkas A., Abreu P., Sonobe T., Kazagic A., Jumoke M., Sami M., Aerts D.J., Sampson G.R., Kaer S.K., Fahlstedt I., Christensen J., Siegel V., Andries J., Ohlsson O., Xiang-guo L., Vamvuka D., Rubiera F., Chen Wei-Hsin., Zakaria Z., Zhou L., Katsanaki E., Grotkjaer T. и др. По анализу публикаций в периодических изданиях можно сделать вывод о том, что сегодня известно три основных способа сжигания смесевых топлив на основе угля и биомассы: сжигание в псевдосжиженном слое, поточ-

ное в отдельных горелках со смешением в топочном устройстве и совместное в традиционных горелках. В Европе проведены испытания по совместному сжиганию угля и биомассы на 230 ТЭС, в том числе на 15 из них по сжиганию при концентрации биомассы до 10 % в пылевоздушных горелочных устройствах. В России исследования такого масштаба не проводились.

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 смесевого топлива с добавлением углерод-нейтральной компоненты – биомассы.

На основании анализа литературы по сформулированной проблеме, можно сделать обоснованный вывод о том, что исследования в данном направлении актуальны, а анализ возможности создания смесевых топлив на основе углей и отходов лесопромышленного производства РФ с энергетическими характеристиками, близкими к однородным углям, и скорее всего, лучшими экологическими и экономическими характеристиками, представляет достаточно высокий интерес как фундаментальная, так и практическая значимая научно-техническая задача.

Цель диссертационной работы заключается в обосновании по результатам экспериментальных исследований энергетических и экологических характеристик, а также оценки экономической эффективности смесевых 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 решались следующие задачи:

1. Установление основных факторов, оказывающих значимое влияние на характеристики получаемых смесевых топлив.
2. Разработка методик проведения экспериментальных исследований по определению теплотехнических, энергетических и экологических характеристик смесевых топлив на основе нескольких типичных углей и древесины.

3. Экспериментальное определение основных значимых теплотехнических, энергетических и экологических характеристик смесевых топлив на основе типичных углей и древесины.
4. Экспериментальное определение состава газов, выделяющихся при термическом разложении смесевых 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).

Научная новизна работы. Впервые проведены экспериментальные исследования процессов термического разложения группы смесевых топлив из нескольких типичных по своим характеристикам углей и отходов лесопромышленных производств (древесины). Выявлены соотношения компонентов (древесина / уголь) 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 смесевых топлив на основе углей марок Д (месторождение «Листвяжное»), Т (месторождение «Алардинское»), ЗБ («Балахтинское месторожде-

ние»), 2Б («Бородинское месторождение») и 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. Сформирована база данных характеристик смесевых топлив на основе типичных углей марок Д, Т, 3Б, 2Б с добавлением древесины (отходов лесопромышленного производства сосновых пород древесины) при соотношении концентраций основных компонент (древесина / уголь) 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 угли. 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. По результатам экспериментов установлен синергетический эффект замены углей на смесевые топлива, который 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.

Степень достоверности результатов экспериментальных исследований

Результаты экспериментальных исследований получены с использованием современного высокоточного аналитического и экспериментального оборудования.

Выполнены оценки систематических и случайных погрешностей. Достоверность полученных результатов экспериментов подтверждается удовлетворительной повторяемостью при использовании идентичных навесок всех исследовавшихся смесевых топлив.

Связь работы с научными программами и грантами

Тематика исследований соответствует приоритетному направлению развития науки, техники и технологий в Российской Федерации (указ Президента РФ № 899 от 7 июня 2011 г.) «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика», а также находится в сфере критических технологий федерального уровня, получивших высокий рейтинг по показателям состояния и перспективам развития («Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе», «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии»), так как применение смесевых топлив на основе типичных углей и древесины (мелкодисперсной) позволяет существенно (кратно) снизить антропогенные выбросы, полезно утилизировать многочисленные отходы деревоперерабатывающих предприятий, повысить технико-экономические индикаторы сжигания биомассы.

Научные 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 по отношению к углю от 1,6 % до 9 %, но при этом зольность падает до 48 %, а выбросы оксидов серы в окружающую среду – до 90 % 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 проек-

ного топлива (угля) при существенном (до 47,6 %) снижении затрат на приобретение топлива, значительном сокращении вредных газообразных выбросов (NO_x до 30,2 %, CO_2 до 22,1 %, SO_2 до 37,2 %), а также твердых (летучей золы) до 40 % от объема продуктов горения.

5. Установлен синергетический эффект сжигания смесевых топлив на основе двух углей и древесины, проявляющийся 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 угля и древесины основанная на использовании трех критериев: экономичности, энергетической эффективности, экологичности, позволяющая оценить возможность их использования в качестве основного топлива котлоагрегатов тепловых электрических станций.

Личный вклад автора диссертации состоит: в разработке нового подхода к оценке возможности эффективного применения смесевых топлив из угля и мелкодисперсной древесины для сжигания в топках котельных установок тепловых электрических станций; постановке, планировании экспериментальных исследований и их проведении; обработке, анализе и обобщении полученных результатов; формулировке защищаемых положений и выводов; в формировании рекомендаций по практическому использованию полученных результатов; 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. Естественные и инженерные науки», «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 содержание 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 191 наименование.

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 процессов сжигания смесевых топлив в условиях ТЭС. Показано, что на сегодняшний день результатов экспериментальных исследований характеристик смесевых топлив на основе углей и древесной биомассы недостаточно для их использования при разработке технологий сжигания таких топлив в топках энергетических котлов, отсутствуют 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 с применением аналитических методов проведения экспериментов. 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.

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. Перечень основных компонент, использовавшихся при приготовлении исследовавшихся смесевых топлив:

- древесина (отходы производства пиломатериалов ООО Дзержинский ЛПК г. Томск).
- уголь марки Д (месторождение «Листвяжное» Кемеровская область).
- уголь марки Т (месторождение «Алардинское» Кемеровская область).
- уголь марки 3Б (месторождение «Балахтинское» Красноярский край).
- уголь марки 2Б (месторождение «Бородинское» Красноярский край).

На основе перечисленных компонент приготовлены навески смесевых топлив и проведены экспериментальные исследования их характеристик. На рисунке 1 представлены зависимости калорийности исследовавшихся смесевых топлив на основе нескольких типичных углей от доли древесины.

Результаты выполненных исследований 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.

Результаты экспериментов, приведенные на рисунке 1, наглядно иллюстрируют установленный автором диссертации синергетический эффект, проявляющийся при термическом разложении и сжигании смесевых топлив на основе углей и древесины нелинейные зависимости $Q(\varphi)$ (рис.1), обусловлены тем, что происходит взаимодействие продуктов термического разложения угля и древесины. Реакции взаимодействия углерода с водяным паром и диоксидом углерода являются эндотермическими. Водяной пар выделяется в древесине не только при нагреве до температуры кипения воды. При более высоких температурах освобождается так называемая «связанная» влага. Поэтому калорийность смесевых топлив ниже рассчитанных при суммировании калорийности угля и древесины.

На рисунках 2, 3 представлены результаты определения зольности и выхода летучих веществ при термическом разложении исследовавшихся смесевых топлив.

Анализ полученных экспериментальных данных (рисунки 2, 3), показал, что

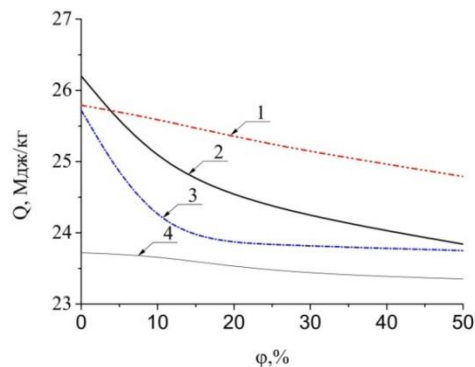


Рисунок 1. Зависимости калорийности смесевых топлив на основе углей марок Т – 1, Д – 2, ЗБ – 3, 2Б – 4 от доли древесины (Q – калорийность топлив, φ – доля древесины)

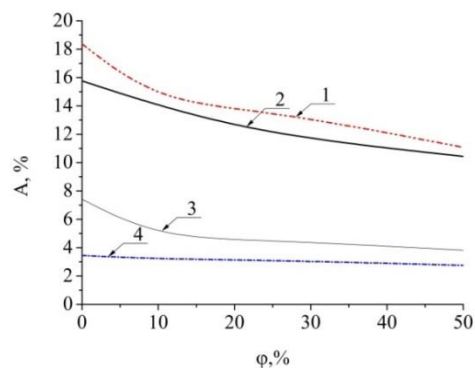


Рисунок 2. Зависимости зольности смесевых топлив на основе углей марок Т – 1, Д – 2, ЗБ – 3, 2Б – 4 от увеличения доли древесины (A – зольность топлив, φ – доля древесины)

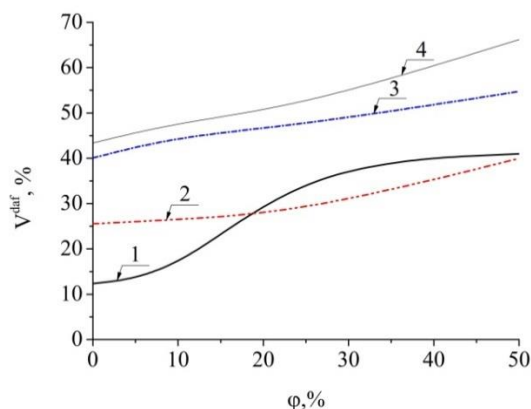


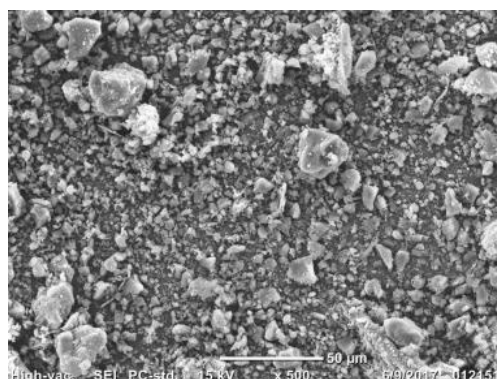
Рисунок 3. Зависимости выхода летучих веществ в смесевых топливах на основе углей марок Т – 1, Д – 2, ЗБ – 3, 2Б – 4 от увеличения доли древесины (V^{daf} – выход летучих веществ в топливах, φ – доля древесины)

при увеличении доли древесной компоненты в смесевом топливе до 50 % снижение зольности составляет до 50 %, выход летучих веществ растет до 52 %.

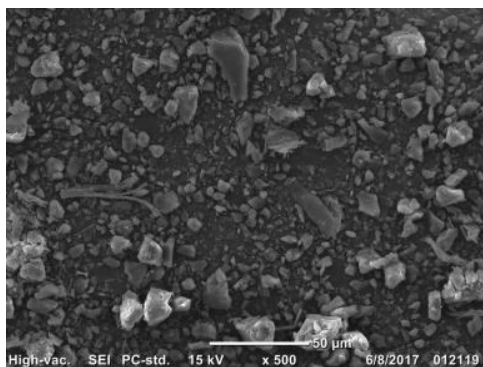
Важным является и то, что установленный эффект способствует существенно снижению температуры воспламенения исследуемых топлив. На рисунке 4 представлены фотографии поверхности четырех навесок исследовавшихся смесевых топлив, полученные с использованием микроскопа (РЭМ) JSM 6000С, которые показывают наглядные отличия структуры смесевых топлив на основе разных углей после их приготовления в одинаковых условиях. Проведенный анализ микрофотографий поверхности навесок исследовавшихся смесевых топлив позволил установить, что частицы древесины при смешении с углем подвергаются деформации с расщеплением волокон, что способствует формированию более однородных структур топлив.



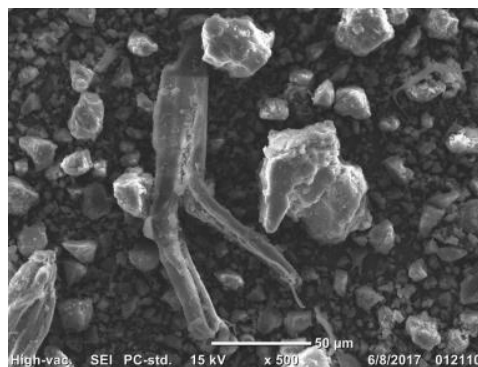
а)



б)



в)



г)

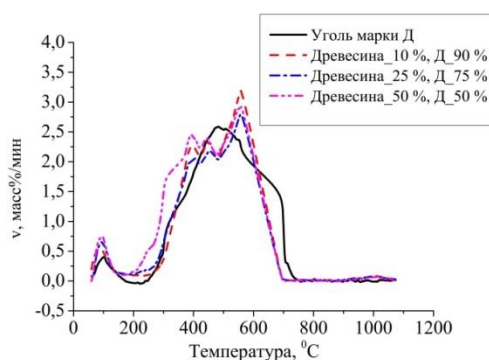
Рисунок 4. Фотографии поверхностей навесок смесевых топлив из углей марки Д (а), Т (б), 3Б (в) и 2Б (г) с древесиной при отношении компонент 50 % / 50 %

На рисунке 4 (б, в) видно, что характерный размер частиц в смесевых топливах 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

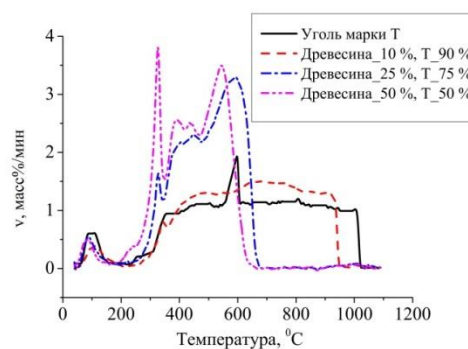
сравнению с смесевыми топливами из углей марок Т и ЗБ. Последнее позволяет сделать вывод о том, что навески двух бурых углей отличаются по своей структуре, что может оказать существенное влияние на характеристики их зажигания и горения. Скорее всего, это связано с составом и свойствами минеральной части бурых углей, которая в процессе их подготовки к сжиганию оказывает определенное влияние на процесс измельчения органической части. Кроме того, частицы 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 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 намного быстрее, чем при использовании, например, щепы.

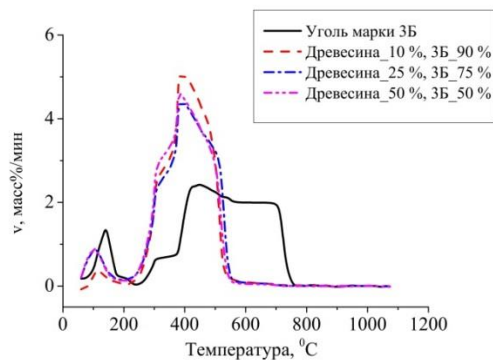
Определение скоростей термического разложения смесевых топлив на основе углей и древесины проведено с целью выделения возможных синергетических эффектов. Результаты совместной термогравиметрии и дифференциально-сканирующей калориметрии смесевых топлив из углей марок Д, Т, ЗБ, 2Б и мелко-дисперсной древесины показали, что при увеличении концентрации древесной биомассы в угле происходит снижение температуры начала термического разложения. При этом увеличивается реакционная способность топлива. На рисунке 5 представлены типичные результаты дифференциально-термической гравиметрии четырех смесевых топлив с более или менее выраженным синергетическим эффектом, полученным при смешении углей марок Д, Т, ЗБ, 2Б и древесины.



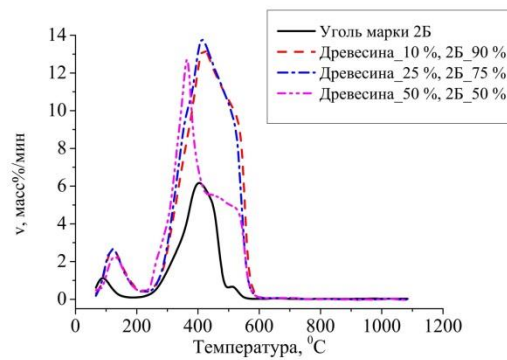
а)



б)



в)



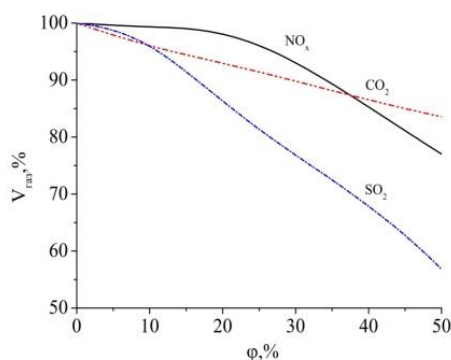
г)

Рисунок 5. Зависимости скоростей термического разложения смесевых топлив из углей марки Д (а), Т (б), 3Б (в), 2Б (г) и древесины от температуры.

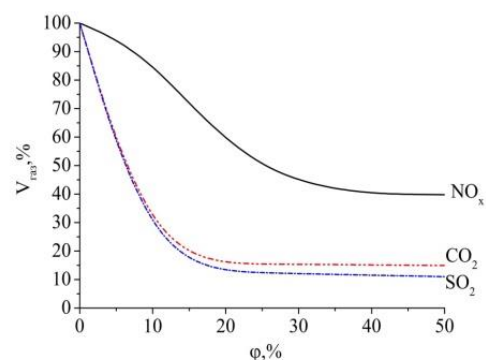
Сопоставление данных термогравиметрического анализа смесевых топлив из углей марок Д, Т, 3Б, 2Б показало, что у топлив на основе углей Д и Т с увеличением массовой доли биомассы можно выделить явные стадии разложения гемицеллюлозы, целлюлозы, лигнина и угля на термограммах. Результаты приведенных экспериментов позволяют так же сделать вывод, что древесина в исследовавшихся смесевых топливах на основе углей марок Т и 3Б способствует более эффективному снижению начальных температур термического разложения, увеличению максимальной скорости этого процесса, «смещению» «температурного» пика, соответствующего максимуму скорости пиролиза углей, в область более низких температур. Полученные результаты также наглядно иллюстрируют синергетический эффект сжигания исследовавшихся достаточно типичных смесевых топлив. Механизм этого эффекта обусловлен, очевидно, взаимодействием газообразных и твердых продуктов термического разложения угля и древесины между собой, а также возможным каталитическим влиянием отдельных компонент на интенсивность горения углерода и летучих. 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 (один из важных показателей работы котлоагрегатов).

Для оценки факторов, оказывающих значимое влияние на экологические параметры получаемых смесевых топлив, проведен хроматографический анализ состава газов, выделяющихся при термическом разложении смесевых топлив на основе углей марок Д, Т, 3Б, 2Б и древесины. На рисунке 6 показаны зависимости концентра-

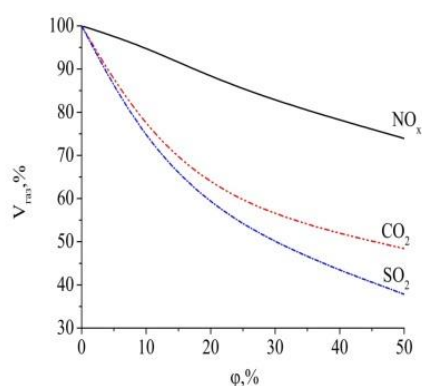
ций NO , CO_2 , SO_2 в продуктах пиролиза смесевых топлив из углей марок Д, Т, 3Б и 2Б от доли древесины.



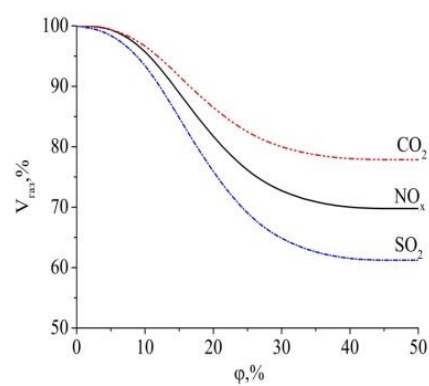
а)



б)



в)



г)

Рисунок 6. Концентрации основных антропогенных газов в продуктах термического разложения смесевых топлив на основе углей марок Д (а), Т (б), 3Б (в) и 2Б (г) и древесины (ϕ – доля древесины, $V_{\text{газ}}$ – выход газов)

Из рисунка 6 видно, что увеличение доли древесины до 50 % в смесевом топливе приводит к снижению выделения основных антропогенных оксидов: на основе угля марки Д – NO_x до 23,8 %, CO_2 до 17,1 %, SO_2 до 38,7 %; на основе угля марки Т – NO_x до 60,2 %, CO_2 до 85,1 %, SO_2 до 89,0 %; угля марки 3Б – NO_x до 26,1 %, CO_2 до 51,6 %, SO_2 до 62,2 %; угля марки 2Б – NO_x до 30,2 %, CO_2 до 22,1 %, SO_2 до 37,2 %.

Полученные результаты показывают возможность существенного (до 90 %) снижения негативного воздействия такими газами тепловых электрических станций на окружающую среду при использовании смесевых топлив на основе углей и древесины. Анализ полученных результатов позволяет подтвердить существенно улучшенные характеристики смесевых топлив такого рода по отношению к исходному углю, но масштаб положительного эффекта углей марок Д, 2Б много меньше, чем у

тощего (Т) и бурого (ЗБ) углей. Установленная закономерность еще раз иллюстрирует синергетический эффект сжигания смесевых топлив и необходимость детального исследования на стадии их формирования не только углей, являющихся основой, но и обязательно самого смесевого топлива. В этом случае может быть достигнут максимальный положительный эффект применения последних.

Для обоснования возможности использования исследуемых смесевых топлив на ТЭС проведен поверочный расчет котлоагрегата на «непроектное» смесевое топливо из типичного угля марки Д и древесины. В качестве прототипа принят действующий энергетический котлоагрегат БКЗ-220-100-4, расположенный на Томской ГРЭС-2. Выбранная для анализа энергоустановка работает на угле марки Д месторождения «Листвяжное». 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.

Поверочные расчеты показали следующие результаты. При концентрации компонентов смесевого топлива на основе угля и древесины в соотношении 50 % / 50 % снижение КПД котлоагрегата составило менее 1,2 %. При этом увеличение расхода такого топлива по сравнению с углем не превышает 13 % вследствие незначительного ухудшения его энергетических характеристик. 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 смесевых топлив. Результаты поверочных расчетов при анализе нескольких смесевых топлив позволяют обосновать возможность увеличения доли древесины до 50 % с минимальным снижением КПД котла.

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 заключается, скорее всего, в высокой

сложности 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 таком случае 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.

Исходя из общих положений теории принятия решений, возможны разные подходы к решению задачи выбора критериев. В настоящей диссертационной работе предлагается относительно простой подход (сущность которого изложена ниже), 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 результатов, а также затрат при сжигании смесевых топлив из углей и древесины по нескольким основным направлениям: инвестиции, эксплуатация, техническое обслуживание и формирование смеси.

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».

Параметр, характеризующий экономические преимущества смесевых топлив по сравнению с углем – коэффициент экономической эффективности определен как отношение:

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

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

Аналогично может быть проведена оценка влияния концентрации древесины в смесевом топливе на энергетические характеристики последнего. Для этого в работе введен в рассмотрение коэффициент энергетической эффективности $K_{\text{эн}}$, характеризующий отношение калорийности смесевых топлив к теплоте сгорания угля:

$$K_{\text{эн}} = \frac{Q_{\text{к}}}{Q_{\text{y}}};$$

где $Q_{\text{к}}$ – калорийность смесевого топлива, Q_{y} – калорийность угля.

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

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

$$K_{\text{экол}} = \frac{B_{\text{y}}}{B_{\text{к}}};$$

где B_{y} – суммарное выделение антропогенных газов при сжигании угля, $B_{\text{к}}$ – суммарное выделение антропогенных газов при сжигании смесевого топлива.

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

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

В таблице 1 представлены расчетные значения мультипликативного коэффициента эффективности использования смесевых топлив на энергетических установках тепловых электрических станций.

Таблица 1 – Суммарный коэффициент эффективности использования смесевых топлив на основе угля и древесины.

Топливо	$K_{\text{экон}}$	$K_{\text{эн}}$	$K_{\text{экол}}$	$K_{\text{эфф}}$
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 $K_{\text{эфф}}$, представленные в таблице 1, 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 1) 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. 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.

Обобщение результатов выполненных экспериментов позволяют сформулировать рекомендации по использованию разработанного подхода к оценке возможности использования смесевых топлив на основе углей и мелкодисперсной древесины.

1. Эффективны составы смесевых топлив (древесина / уголь) при соотношении компонент, соответственно, 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. Например для топлив на основе угля марки Т и древесины содержание NO_x уменьшается до 60,2 %, CO_2 до 85,1 %, SO_2 до 89,0 % относительно однородного угля.

3. Выполненные поверочные расчеты перевода котлоагрегата на смесевые топлива подтверждают возможность использования таких топлив при соотношении компонент (древесина / уголь) от 10 % / 90 % до 50 % / 50 %. При этом максимальное снижение КПД котла составляет менее 1,2 %.

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

Основные результаты и выводы

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 при снижении энергетических характеристик от 1,6 % до 9 %, зольность падает до 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 энерге-

тические характеристики смесевых топлив сопоставимы с однородными углями, а выбросы вредных веществ в окружающую среду существенно снижаются. Например, при соотношении компонент 50 % / 50 % (уголь марки Т / древесина) содержание NO_x уменьшается до 60,2 %, CO_2 до 85,1 %, SO_2 до 89,0 %.

6. Установлен синергетический эффект сжигания смесевых топлив на основе углей двух марок и древесины, проявляющийся 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, 3Б, 2Б и древесины на ТЭС.

8. По результатам поверочного расчета котлоагрегата типа БКЗ-220-100-4 (Томской ГРЭС-2) при его переводе на смесевое топливо установлено, что при доле древесины 25 % КПД котла снижается на 0,8 %, а при 50 % на 1,2 %.

9. Разработана методика оценки эффективности смесевых топлив по трем критериям: экономичности, энергетической эффективности, экологичности. Расчет коэффициента эффективности 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.

Основные публикации по теме диссертации

1. **Янковский С.А.** Потенциал использования композитного топлива на основе каменного угля и отходов лесопромышленного производства в теплоэнергетике / Янковский С.А., Кузнецов Г.В. // Промышленная энергетика. – 2017. - №11. – С. 62 – 71.
2. **Янковский С.А.** Эффективность применения композитных топлив из угля и древесины в промышленной энергетике / Янковский С.А., Кузнецов Г.В. // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2017. Т. 23. - №3. – С. 29 – 36.
3. **Yankovsky S.A.** Non-isothermal kinetic study of bituminous coal and lignite conversion in air and in argon / air mixtures / Yankovsky S.A., Slyusarsky K.V., Larionov K.B., Osipov V.I., Gubin V.E., Gromov A.A. // Fuel – 2017. - Vol. 191, - P. 383 – 392

4. **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.
5. **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.
6. **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.
7. **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.
8. **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.
9. **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.
10. **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.
11. **Yankovsky S.A.** Analysis of composite fuel application possibility based on coal and oats husks in industrial power engineering / Yankovsky S.A., Tolokolnikov A.A., Zaytsev V.V. // Matec Web of Conferences. – 2017. – Vol. 110, No. 01080.

Подписано в печать 24.10.2017 г.
 Формат А4/2. Ризография
 Тираж 100 экз. Заказ № 041017
 Отпечатано в ООО «Позитив-НБ»
 634050 г. Томск, пр. Ленина 34а