



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Косторева Жанна Андреевна

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДРЕВЕСНО-УГОЛЬНЫХ
СМЕСЕЙ В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

05.14.04 Промышленная теплоэнергетика

Томск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Научный руководитель: **Кузнецов Гений Владимирович**
доктор физико-математических наук,
профессор, профессор НОЦ И.Н.
Бутакова ИШЭ НИ ТПУ

Официальные оппоненты: **Богомолов Александр Романович**
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой теплоэнергетики
федерального государственного
бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Кузбасский государственный
технический университет имени Т.Ф.
Горбачева», г. Кемерово.

Шторк Сергей Иванович
доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий лабораторией
экологических проблем теплоэнергетики
Института теплофизики им. С.С.
Кутателадзе Сибирского отделения
Российской академии наук, г.
Новосибирск.

Защита состоится «23» 09 2022 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.18 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, 7, уч. корпус 8, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте: dis.tpu.ru.

Автореферат разослан « » _____ 20 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



Табакеев Роман
Борисович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В связи с негативным воздействием на окружающую среду теплоэлектростанций и котельных, использующих при выработке теплоты традиционные виды топлива (уголь, мазут), поиск альтернативных видов топлива становится всё более важным. Биомасса рассматривается уже многие годы как наиболее перспективный вариант возобновляемых источников энергии. При этом возможен положительный эффект использования биомассы и как компонента композиционных топлив на основе угля – значительное снижение выбросов антропогенных оксидов и летучей золы. Среди всего многообразия видов биомассы предпочтительным для сжигания в топках паровых и водогрейных котлов большой и малой энергетики является древесина. За последние 10 лет по тематике исследований совместного сжигания биомассы и угля опубликовано (в изданиях мировой научной периодики) более 4000 работ. Это связано с тем, что технология совместного сжигания древесины с углем имеет существенные экономические и экологические преимущества по сравнению с сжиганием однородного угля. В настоящее время на территории Европейского Союза (страны с самыми жесткими экологическими законами) работает 23 электрических станций, в качестве топлива использующих био-угольные смеси. Например, самая современная электрическая станция в мире Avedore (Дания) сжигает смесь отходов сельскохозяйственного производства (соломы) и угля. Но, несмотря на локальное применение процессов сжигания биомассы, на настоящее время не разработано общей теории процессов сжигания частиц древесно-угольных смесей, обеспечивающей высокий уровень достоверности прогностических оценок характерных времен основных стадий термической подготовки совокупности частиц угля и древесины, и, соответственно, эффективности использования таких смесей в промышленной теплоэнергетике.

Причиной отсутствия такой теории является недостаток экспериментальных данных об основных закономерностях процессов термической подготовки смесей частиц угля и древесины, несмотря на то, что в течение двух последних десятилетий исследователи многих стран предпринимают большие усилия для научно-технического обоснования возможности существенного увеличения объемов использования углей (в том числе и низкосортных) и биомассы для выработки тепловой энергии.

Важным при этом является то, что в качестве второго компонента угольно-древесных смесей могут быть использованы образующиеся при лесопилении и деревообработке отходы (доля их достигает 15% в большинстве случаев), характерные размеры частиц которых составляют от 0,5 мм до 6 мм. Дальнейшее измельчение таких достаточно малых частиц (в основном опилки) требует больших затрат энергии. Поэтому одной из

основных задач, возникающих при анализе возможности сжигания отходов лесопиления и деревообработки в топках водогрейных котлов в смеси углем, является оценка условий и характеристик процессов термической подготовки частиц древесной биомассы, размеры которых могут быть в сто раз больше частиц угольной пыли, образующихся после измельчения с использованием широко распространенных в энергетике аппаратов типа шаровых мельниц. Необходима оценка времен термической подготовки крупных частиц древесины по отношению к малым угольным. Возможно использование отходов лесопиления самых разных видов древесной биомассы, как хвойных, так и лиственных пород, цена которых во многих случаях по существу сводится к стоимости погрузки и транспортировки.

Но использование смесей угля и биомассы в качестве топлива в промышленной теплоэнергетике сопряжено с решением ряда технических и технологических проблем, одной из которых (возможно, важнейшей) является устойчивое сжигание древесно-угольных смесей. Разные свойства (теплофизические и термохимические) углей и древесины являются причиной того, что времена термической подготовки даже малой группы угольных и древесных частиц могут достаточно существенно отличаться от аналогичных характеристик одиночных частиц первой или второй компоненты.

Научно - техническая проблема. Необходимо по результатам экспериментальных исследований процессов термической подготовки смесей частиц угля и древесины установить основные закономерности этих процессов и обосновать возможность использования древесно-угольных смесей в качестве топлив теплоэлектроцентралей и котельных с целью сбережения энергетических ресурсов и защиты окружающей среды.

Цель работы. Обоснование возможности сбережения энергетических ресурсов и более эффективной защиты окружающей среды при работе объектов промышленной теплоэнергетики в результате использования в качестве топлив паровых и водогрейных котлов смесей на основе углей и древесины.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработка экспериментального стенда и методики эксперимента для исследований процессов термической подготовки древесно-угольных смесей.

2. Установление по результатам экспериментов основных закономерностей термической подготовки смесей измельченных угля и древесины.

3. Оценка степени влияния вида биомассы на основные характеристики термической подготовки композитных био-угольных топлив.

4. Установление влияния концентрации древесины и расположения частиц био-угольных топлив относительно друг друга на характеристики и условия их термической подготовки.

5. Определение наиболее перспективного (с целью минимизации времён термической подготовки) соотношения компонент в смеси уголь/древесина.

6. Обоснование возможности эффективного сжигания древесно-угольных смесей в условиях, соответствующих по тепловым режимам топкам паровых и водогрейных котлов промышленной теплоэнергетике.

Научная новизна. По результатам впервые проведенных экспериментальных исследований процессов термической подготовки смесей частиц угля и древесины установлены основные закономерности исследовавшихся процессов (условия, механизмы и характеристики термической подготовки смеси частиц угля и древесины). Обоснована возможность использования древесно-угольных смесей в качестве топлив теплоэлектроцентралей и котельных с целью сбережения энергетических ресурсов и защиты окружающей среды.

Практическая значимость работы. Обоснована возможность вовлечения в энергетический сектор отходов лесопиления и лесопереработки в качестве значимой по объему добавки, ускоряющей процесс термической подготовки древесно-угольных смесей, снижающей себестоимость производство теплоты и уменьшающей содержание в дымовых газах теплоцентралей и котельных антропогенных веществ.

Достоверность. Эксперименты проводились с использованием современных средств регистрации характеристик исследовавшихся процессов с малыми методическими погрешностями. Для каждого набора исходных данных по условиям эксперимента проводилась серия минимум из 15 опытов. Определялись доверительные интервалы времен термической подготовки древесно-угольных топлив. Результаты экспериментальных исследований подтверждаются их хорошей повторяемостью.

Связь работы с научными программами и грантами.

Диссертационные исследования выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда (проект 18-79-10015-п «Разработка основных элементов теории процессов термической подготовки, воспламенения и горения смесевых топлив на основе угля и древесины применительно к камерам сгорания котельных агрегатов»).

Научные положения, результаты и выводы, выносимые на защиту.

1. Разработана методика экспериментального исследования процессов термической подготовки счетного количества частиц угля и древесины в смеси.

2. Разработаны методики экспериментального исследования влияния концентрации биомассы в древесно-угольных смесях на время термической подготовки.

3. По результатам впервые проведенных экспериментальных исследований процессов термической подготовки частиц типичных углей и древесины в смеси установлены основные закономерности исследовавшихся процессов (условия, механизмы и характеристики термической подготовки смеси частиц угля и древесины).

4. Впервые экспериментально установлено влияние концентрации биомассы (от 10% до 50%) в древесно-угольных смесях на время термической подготовки последних.

5. Добавление 40% мелкодисперсной древесной биомассы (с характерным размером древесных частиц до 2 мм) снижает период термической подготовки био-угольной смеси (с характерным размером угольных частиц до 0,05 мм) до 45% при относительно низких температурах топочной среды (до 873 К) по сравнению с однородным углем.

6. Установлено перспективное соотношение концентраций компонент в системе уголь/древесина - 70/30 (по критерию минимизации времени термической подготовки).

7. При массовом соотношении в топливной смеси 50/50 древесина/уголь времена термической подготовки частицы угля снижаются на 30-40% (по сравнению с однородным углем).

8. Минимальные времена термической подготовки угольных частиц зарегистрированы при температуре 873 К для топливной смеси, концентрация угля в которой составляет 70-75%. Увеличение и снижение доли угля в смеси приводит к росту времени термической подготовки. При относительно высоких температурах (1073 – 1273 К) времена термической подготовки от концентрации угля в смеси не зависят.

9. Вид древесной биомассы оказывает незначительное влияние на характеристики термической подготовки древесно-угольной смеси.

10. Изменение влажности древесины в диапазоне от 10 до 45% приводит к росту времени термической подготовки для частиц осины почти в 11 раз (с 17,7 до 186,6 секунд), а для частиц сосны почти в 14 раз (с 19 до 261 секунд) при температуре окружающей среды 1273 К.

11. Период термической подготовки любой совокупности частиц древесины происходит интенсивнее аналогичных процессов одиночной частицы в идентичных условиях.

12. Обоснована возможность эффективного сжигания древесно-угольных смесей в топочных условиях паровых и водогрейных котлов промышленной теплоэнергетики.

Личный вклад. Автор диссертации провела планирование и подготовку экспериментальных исследований, выполнила эксперименты,

обработку и анализ полученных результатов, оценку погрешностей, анализ и обобщение результатов. Также автор проводила написание статей и подготовку докладов для выступления на конференциях. Автором сформулированы основные защищаемые положения и выводы.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодых ученых «XXXV Сибирский теплофизический семинар», посвященная 75 – летию заслуженного деятеля науки РФ Терехова Виктора Ивановича (Новосибирск, 2019);

2. XVI Всероссийская школа-конференция молодых ученых с международным участием “Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики” (Новосибирск, 2020);

3. XI Всероссийская конференция с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (Новосибирск, 2021);

4. XII Семинар вузов по теплофизике и энергетике (Сочи, 2021);

5. VIII Всероссийская научная конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск, 2019);

6. IX Всероссийская научная конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск, 2020);

7. X Всероссийская научная конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск, 2021);

8. Международная молодежная научная конференция «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» (Томск, 2019);

9. Международная молодежная научная конференция «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» (Томск, 2021);

10. I Всероссийская молодежная конференция с международным участием «Бутаковские чтения» (Томск, 2021).

Публикации. Опубликованы пять статей в международных научных журналах, индексируемых базами «Scopus» и «Web of Science»: «Journal of the Energy Institute», «Fuel», «Thermal Science and Engineering Progress» и статья в журнале, рекомендованном ВАК РФ для публикации материалов кандидатских диссертаций: «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов».

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, изложена на 110 страницах, содержит 28 рисунков и 6 таблиц. Список литературы включает 141 источник.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы и сформулирована проблема. Также сформулированы цель диссертационной работы и задачи для ее достижения. Показана практическая значимость и научная новизна проведенных исследований.

Первая глава содержит анализ современного состояния теории и практики использования в промышленной теплоэнергетике древесно-угольных смесей. Проведен анализ публикаций по исследованиям сжигания древесно-угольных смесей в мировой научной периодике. Обоснована перспективность таких топлив.

Вторая глава посвящена описанию методики проведения экспериментальных исследований. Эксперименты проводились на двух экспериментальных установках. В качестве объектов исследования рассматривались два типа древесно-угольных смесей. Первый вариант - угольная пыль и отходы лесопиления (древесные опилки) (рисунок 1). Второй вариант - относительно большие по размерам (3-4 мм) частицы древесины и угля (рисунок 2). Исследовались пять видов древесины и один достаточно типичный (длиннопламенный) уголь, широко использующийся в настоящее время в промышленной теплоэнергетике. Разработана методика проведения экспериментальных исследований процессов зажигания частиц угля и древесины с воспроизведением условий, в наибольшей степени соответствующих условиям топок паровых и водогрейных котлов.

Экспериментальные исследования проведены на стенде, схема которого показана на рисунке 1. Частицы топлива вводились в канал полого, вертикально расположенного керамического цилиндра, на внешнюю поверхность которого крепился электрический нагреватель. Такая конфигурация области нагрева позволяет изучать процессы термической подготовки большой совокупности (150-200 шт) топливных частиц малых размеров в условиях их свободного падения в высокотемпературной окислительной среде и обеспечивает минимальные погрешности измерений (отсутствуют держатели частиц). Частицы древесно-угольной смеси распылялись с помощью пневматического устройства в канал нагретого до высоких температур (максимально возможная температура 1473 К) керамического цилиндра. Регистрация процессов термической подготовки топливных частиц проводилась высокоскоростной видеокамерой Photron FASTCAM CA45 (скорость видеосъемки до 20 000 кад/с). Температура воздуха внутри цилиндра (T_g) в экспериментах варьировалась в достаточно широком диапазоне (от 873 до 1273 К), соответствующем температурам среды в топочных камерах котельных агрегатов.

Период времени от начала теплового воздействия (момент ввода частиц в полость цилиндра) до появления пламени считался временем термической подготовки (t_{ign}), которое определялось после анализа кадров видеogramм, как разность моментов времени ввода смеси в канал с нагретым до высоких температур воздухом и моментом появления пламени вблизи поверхности хотя бы одной частицы.

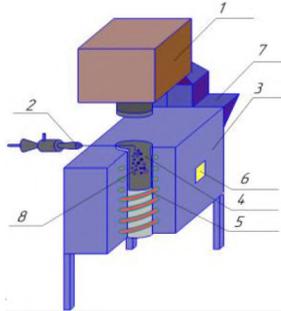


Рисунок 1 – Экспериментальный стенд

1 – высокоскоростная видеокамера; 2 – распылитель частиц; 3 – высокотемпературная печь; 4 – керамический полый цилиндр; 5 – электрический нагреватель; 6 – терморегулятор, 7 – крепление высокоскоростной видеокамеры, 8 – частицы топлива

В реальных топочных условиях частицы твердых топлив малых (как правило, не более 1,5 мм) размеров перемещаются в топочном пространстве со скоростями, незначительно отличающимися от скоростей несущей высокотемпературной среды. Поэтому основным механизмом нагрева частиц топлив является излучение. Кроме того, малые относительные скорости движения частиц, незначительно отличающихся по размерам, минимизируют вероятность их столкновений и агломерации. В период индукции (прогрева перед зажиганием), который составляет, как правило, для углей и древесины 1-2 секунды, можно обоснованно полагать, что расстояния между частицами не меняются (и если меняются, то незначительно). Эти характерные расстояния могут быть рассчитаны исходя из условий подачи топлива (или топливной смеси) и параметров работы форсуночных устройств.

Экспериментальные исследования также проводились на стенде, схема которого приведена на рисунке 2. Последний представлял собой горизонтально расположенный керамический цилиндр, на внешнюю поверхность которого крепился электрический нагреватель. Частицы угля и частица древесины закреплялись на металлических держателях и вводились дистанционно-управляемым координатным устройством в канал

керамического цилиндра. Температура внутрикамерного пространства варьировалась в достаточно широком диапазоне от 873 К до 1473 К.

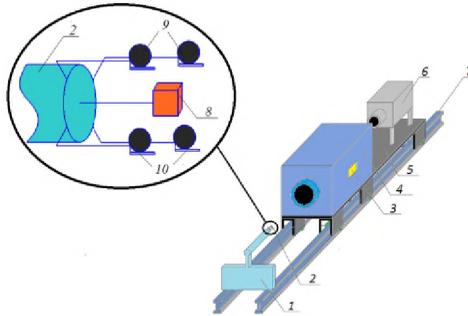
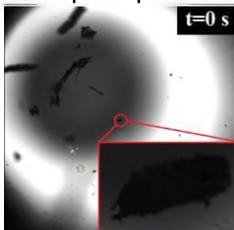


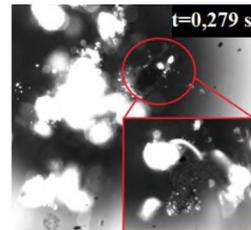
Рисунок 2 – Экспериментальный стенд

1 – подставка для держателя; 2 – металлический держатель; 3 – панель управления; 4 – высокотемпературная печь; 5 – передвижная платформа; 6 – высокоскоростная видеокамера; 7 – рельсы; 8 – частица древесины; 9 – частицы угля; 10 – держатель частиц угля

В третьей главе представлены результаты проведенных экспериментальных исследований процессов термической подготовки частиц древесно-угольных топлив. На рисунке 3 приведены кадры типичной видеогаммы процесса термической подготовки и воспламенения древесно-угольных (на основе угля и отходов лесопиления- березы) смесей в условиях высоких температур газовой среды. Можно отметить, что в начальный период времени (попадания совокупности частиц в высокотемпературную камеру экспериментального стенда на рисунке 1) топливная смесь представляет собой дисперсный поток относительно крупных частиц древесины (характерный размер до 2 мм) и угольной пыли (с характерными размерами частиц 40-60 мкм).



Начало теплового воздействия



Момент воспламенения

Рисунок 3 – Кадры типичной видеогаммы процессов термической подготовки и воспламенения древесно-угольной смеси на основе березы при $T=1073$ К

При этом процесс термической подготовки топлива можно разделить на два взаимосвязанных этапа: на первом инициируется воспламенение малых по размеру частиц угля. Последние являются своеобразными «ускорителем» термохимической реакции окисления продуктов пиролиза древесины. Установлено, что период времени между процессами зажигания угля и древесины незначителен (менее 0,001 сек). Соответственно можно сделать вывод, что сжигание древесно-угольных смесей можно проводить в одной камере сгорания с использованием общих горелок и нет необходимости измельчать частицы древесины до микронных размеров.

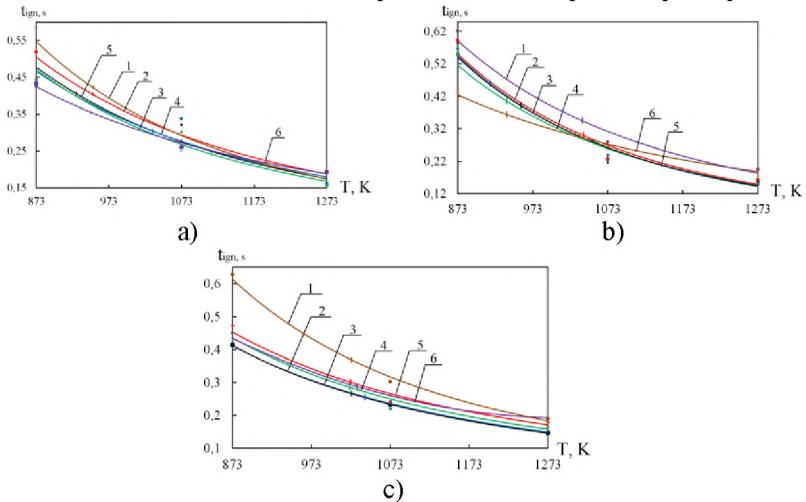


Рисунок 4 – Зависимости времён термической подготовки древесно-угольных смесей от температуры внешней среды (а – береза/уголь; б – сосна/уголь; в – лиственница/уголь) при разных концентрациях угля: 1 – 0%, 2 – 60%, 3 – 70%, 4 – 80%, 5 – 90%, 6 – 100%

Уголь и древесина могут быть разного состояния (пыль или относительно крупные частицы), в зависимости от того, какой фракции используется уголь (есть ли дробилка) и какие есть отходы лесопиления. Концентрация угольной компоненты смесевое топлива (φ), как правило, в несколько раз выше доли древесины. Поэтому в экспериментах исследовались группы частиц (экспериментальный стенд рисунок 2), в состав которых входила одна частица древесины и несколько угля. С целью установления влияния концентрации частиц древесины на время термической подготовки древесно-угольного топлива, были проведены эксперименты с относительно крупными частицами топлив с характерным размером 3 и 3,5 мм. На рисунке 5 приведены зависимости времен термической подготовки частиц древесно-угольной смеси при различных

соотношениях в системе уголь/древесина (характерный размер которых 3 и 3,5 мм). Минимальное значение $T_g=873$ К соответствует предельным условиям устойчивого зажигания смеси. При $T_g<873$ К зажигание было неустойчивым - времена термической подготовки в отдельных экспериментах при фиксированных значениях T_g отличались в 10-20 раз и достигали значения в десятки секунд.

Анализ зависимостей $t_{ign}(T_g)$ (рисунок 5) показывает, что с ростом значений T_g от 873 К до 1273 К влияние концентрации древесной компоненты на процесс термической подготовки смеси становится всё менее значимым. При этом необходимо отметить, что как показали испытания котельных установок, работающих на углях с добавлением измельченной древесины, концентрацию последней в смеси не целесообразно повышать более 20% вследствие более низкой теплотворной способности древесины по сравнению с углем. Поэтому для практики наибольший интерес представляют значения t_{ign} смеси при $\varphi=80-90\%$. На основании полученных результатов (рисунок 5) можно сделать вывод, что при относительно низких температурах внешней среды древесина в топливной смеси (при концентрации 10%) приводит к снижению t_{ign} угля почти в 2 раза по сравнению с однородным углем, то есть при соотношении 1/9 частица древесины начинает гореть первой и существенно ускоряет процесс термической подготовки частиц угля. С ростом температуры среды роль древесины, как «ускорителя» процесса термической подготовки снижается, и при $T_g=1273$ К её влияние становится минимальным (рисунок 5).

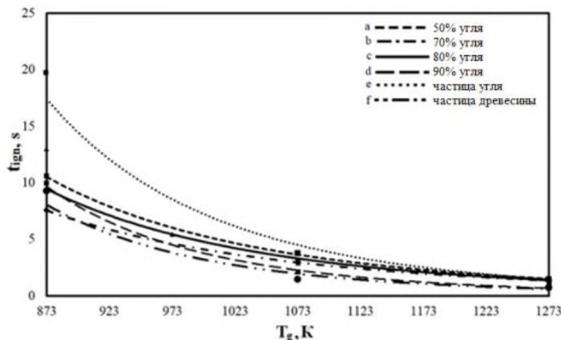


Рисунок 5 – Времена термической подготовки в зависимости от температуры внешней среды при различной концентрации угля в смеси «уголь-древесина»

В реальной практике размеры топочных пространств могут существенно варьироваться. Следовательно, представляет интерес анализ влияния характерного расстояния между частицами на характеристики и

условия их термической подготовки. Экспериментальные исследования проводились на аналогичном рисунку 2 стенде.

На рисунке 6 приведены зависимости времен термической подготовки частиц древесины и угля (как одиночных, так и в составе древесно-угольной смеси) от температуры внешней среды. Анализ зависимости показывает, что температура окислителя оказывает существенное влияние на характеристики и условия термической подготовки. При этом стоит отметить, что зависимости $t_{\text{ign}}(T_g)$ нелинейные. Это обусловлено существенным влиянием комплекса совместно-протекающих теплофизических (инертный радиационно-конвективный нагрев, испарение внутрипоровой и адсорбционно-связанной влаги) и термохимических (термическое разложение органической части угля и основных компонентов древесины, воспламенение летучих) процессов термической подготовки и воспламенения частиц древесно-угольных топлив.

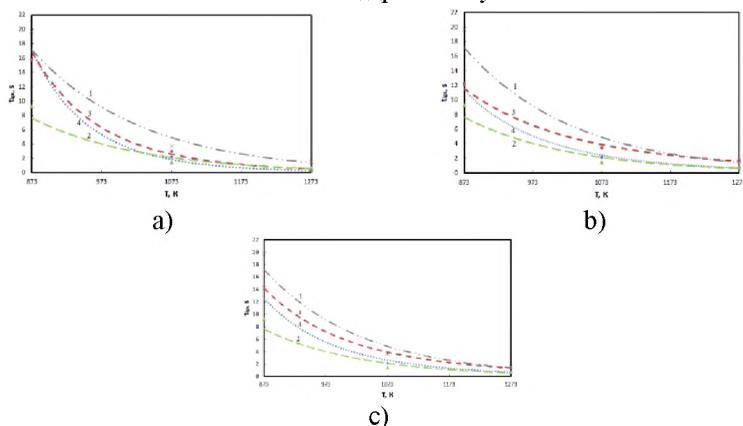


Рисунок 6 – Зависимости времён термической подготовки частиц угля и древесной биомассы от температуры окружающей среды при различных расстояниях между частицами: а – $d=2$ мм; б – $d=7$ мм; с – $d=10$ мм

1 – одиночная частица угля, 2 – одиночная частица древесины, 3 – частица угля при совместной термической подготовке смеси древесина/уголь, 4 – частица древесины при совместной термической подготовке смеси древесина/уголь

Также анализ зависимостей на рисунке 6 показывает, что у относительно крупных одиночных древесных частиц времена термической подготовки меньше относительно крупных угольных. Но при этом по результатам экспериментов установлено, что при расстоянии между частицами $d=7$ мм в условиях относительно низких температур внешней среды ($T_g \approx 873$ К) времена термической подготовки частиц угля

и биомассы сопоставимы. Это, скорее всего, обусловлено тем, что в условиях низкотемпературного нагрева ($T_g \approx 873$ К) процесс термического разложения угля и древесины протекает относительно медленно. По этой причине газообразные продукты пиролиза как угля, так и древесины успевают выйти и сформировать общую зону газофазного реагирования с окислителем. В результате после зажигания древесной частицы происходит быстрое (практически мгновенное) воспламенение угля. На рисунке 7 приведены зависимости времен термической подготовки частиц угля (рисунок 7 а) и древесной биомассы (рисунок 7 б) от расстояния между частицами при различных температурах внешней среды. Анализ зависимостей показывает, что в условиях относительных низких температур значение L оказывает существенное влияние на t_{ign} . Можно отметить, что при $T_g = 873$ К зависимость $t_{ign}(L)$ параболическая. Другими словами, существует некоторое оптимальное (по условиям минимизации времен термической подготовки) расстояние между частицами топлива. Тенденция характерна для процесса термической подготовки как угольной, так и древесной частиц с увеличением температуры внешней среды влияние расстояния между частицами на характеристики термической подготовки существенно уменьшается.

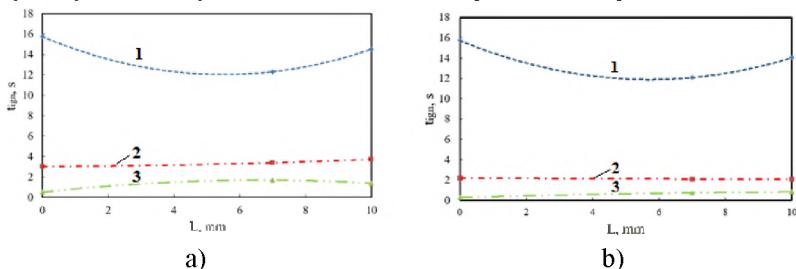


Рисунок 7 – Зависимости времён термической подготовки частицы угля (а) и древесины (б) от среднего расстояния между ними при разных температурах окружающей среды: 1 – 873 К; 2 – 1073 К; 3 – 1273 К

Для промышленной теплоэнергетики актуальна проблема сжигания влажной древесной биомассы, поэтому с целью обоснования возможности использования такой древесины, в качестве топлива паровых и водогрейных котлов, были проведены экспериментальные исследования по определению условий и характеристик термической подготовки частиц влажной древесины. По результатам экспериментов можно сделать обоснованный вывод, что сушка древесины на стадии топливоподготовки является инструментом повышения эффективности технологий термической подготовки древесной биомассы в топках котельных

установок. На рисунке 8 представлены результаты экспериментов с влажными частицами древесины в виде традиционной зависимости - времён термической подготовки от температуры среды.

Приведенные на рисунке 8 результаты экспериментов показывают, что естественное влагосодержание пористой структуры любой древесины (из четырёх исследовавшихся) приводит к росту в 3-4 раза времён процесса термической подготовки по сравнению с сухой древесиной при относительно низких температурах внешней среды (873 К). Такое большое увеличение t_{ign} характерно для всего диапазона (возможного в топочных условиях) изменения температур внешней по отношению к частице биомассы среды (даже при $T_g \sim 1273$ К).

Влияние влаги, насыщающей пористую структуру древесины в её естественном состоянии, на численные значения времен термической подготовки достаточно очевидно, но не очевидна степень этого влияния. Объяснить приведенные на рисунке 8 (зависимости 3-4) увеличения t_{ign} при увлажнении древесины можно тем, что процесс выхода паров воды из пористой структуры древесины приводит к образованию вокруг частицы слоя паров, температура которых существенно ниже температуры горячего воздуха, окружающего частицу. В результате этого резко снижается температура в каждой точке частицы, тепловой поток к поверхности частицы и градиент концентрации паров воды вблизи поверхности испарения (от которого линейно зависит скорость этого фазового перехода). Можно сказать, что слой водяных паров вокруг древесины защищает её от нагрева и последующего зажигания.

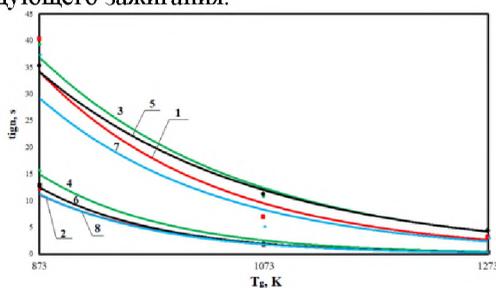


Рисунок 8 – Зависимости времен термической подготовки влажных и сухих древесных частиц от температуры внешней среды:

1 – насыщенная влагой частица кедра; 2 – сухая частица кедра; 3 – насыщенная влагой частица лиственницы; 4 – сухая частица лиственницы; 5 – насыщенная влагой частица сосны; 6 – сухая частица сосны; 7 – насыщенная влагой частица осины; 8 – сухая частица осины

Для практики важен анализ характеристик и условий термической подготовки не одной частицы, а группы частиц. Экспериментально

установлено влияние числа частиц в группе и их положения относительно друг друга на характеристики и условия их термической подготовки.

Экспериментальные исследования процессов термической подготовки одиночной частицы и группы частиц проводились в условиях по температуре и интенсивности нагрева, соответствующих топочным камерам котельных агрегатов. В таких топках частицы твердого топлива (угля или древесины) движутся со скоростями, незначительно отличающимися от скорости несущей среды (смеси высокотемпературных продуктов сгорания и нагретого воздуха). Поэтому нагрев топливных частиц происходит в основном за счет излучения. Аналогичные условия теплообмена обеспечивались и при проведении экспериментов. Типичные видеок cadры экспериментов с частицами древесины при температуре внешней среды $T = 873 \text{ K}$ приведены на рисунке 9.

На кадрах рисунок 9 (I) показаны частицы (все пять исследовавшихся вариантов их расположения) в момент начала теплового воздействия ($t = 0 \text{ с}$), на кадрах рисунок 9 (II) в момент зажигания (появления пламени - t_{ign}). Кадры рисунок 9 (III) соответствуют времени устойчивого горения древесины.

Установлено, что чем больше частиц в совокупности, тем меньше время термической подготовки первой из нескольких. Так, например, t_{ign} одиночной частицы при температуре воздуха $T_{\text{г}} = 873 \text{ K}$ составляет 6,476 с, двух частиц – 6,155 с, трех – 4,154 с, а четырех – менее 3,817 с. Установленная в проведенных экспериментах закономерность обусловлена, скорее всего, тем, что с ростом числа частиц совокупности увеличиваетсякратно площадь их поверхности и, соответственно, интенсивность поступления газообразных продуктов пиролиза древесины в области вокруг верхних частиц. Растет концентрация газообразного горючего (летучих) в верхней части газовой области, которую заполняют частицы древесины. В результате же роста концентрации горючего увеличивается скорость его взаимодействия с окислителем – быстрее инициируется процесс газозафазного зажигания летучих продуктов пиролиза древесной биомассы.

Анализ результатов экспериментов (например, рисунок 9 с) показывает, что верхняя частица совокупности нескольких начинает гореть раньше остальных. При этом газозафазное воспламенение локализуется, как правило, вблизи её ребер. В этих зонах не только достигается максимальная концентрация летучих (газообразных продуктов разложения древесины). Верхние поверхности верхних частиц группы двух или трех, например, рядов частиц нагреваются в результате излучения наиболее интенсивно. Соответственно, температура летучих в этой зоне вблизи поверхностей нагрева поднимается до существенно более высоких значений по сравнению с зонами в глубине объема, занимаемого большой совокупностью частиц (условно, между вторым и третьим рядами, между

третьим и четвертым и т.д.). При достаточно высоких концентрациях частиц, характерных для топок водогрейных котлов, по мере удаления от границы облака распыленных частиц, которые рассеивают и поглощают излучение, снижается интенсивность лучистого теплового потока.

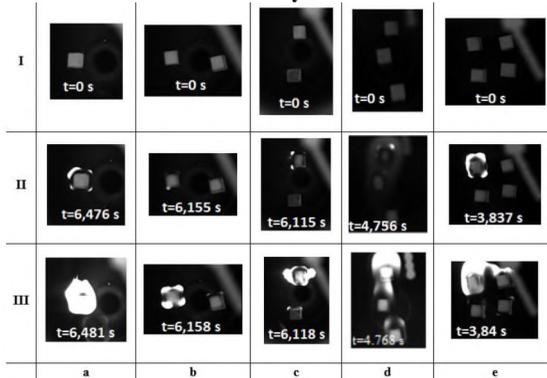


Рисунок 9 – Типичные кадры процесса термической подготовки частиц древесины при $T_g=873$ К: а – одна, б – две расположенные горизонтально, с – две расположенные вертикально, d – три, е – четыре

На рисунке 10 приведены результаты статистической обработки экспериментальных данных - зависимости времен термической обработки разного числа частиц группы от температуры среды.

Анализ приведенных на рисунок 10 зависимостей показывает, что при относительно низких температурах ($T_g < 1000$ К) среды время термической подготовки одной частицы заметно отличается от аналогичной величины для трех и четырех частиц, расположенных на расстоянии одного и того же характерного размера одна от другой.

При $T_g=960$ К разность t_{ign} составляет до 50 % от меньшего значения. Такие отклонения можно объяснить тем, что концентрации газообразных продуктов пиролиза в малой окрестности частиц последних в момент воспламенения разные. На рисунке 9 е хорошо видно, что первыми в группе из четырех частиц начинают гореть частицы верхнего ряда, которые окружены не только “своими” газообразными продуктами пиролиза, но поступающими из нижнего ряда. Концентрация летучих вокруг частиц верхнего ряда существенно более высокая по сравнению с частицами нижнего ряда. Скорость же химического взаимодействия газов с окислителем (воздухом) прямо пропорциональна концентрации летучих. Поэтому верхние частицы начинают гореть при умеренных T_g раньше нижних. Если же температура среды велика (более 1100 К) то, так как скорость реакции горения зависит от T_g экспоненциально, характерные времена химического реагирования летучих существенно меньше

характерных времён их диффузии и конвекции, в результате пиролиз нижних частиц не оказывает значительного влияния на условия и характеристики зажигания верхних.

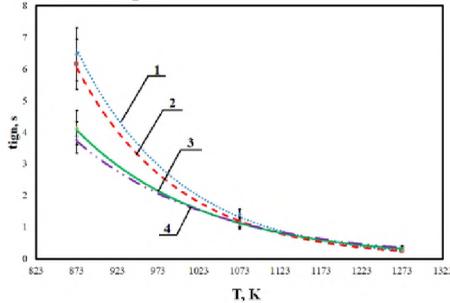


Рисунок 10 – Зависимости времен термической подготовки частиц древесины от температуры внешней среды при разном числе частиц в группе:

1 – одна (рисунок 9 а), 2 – две (рисунок 9 с), 3 – три (рисунок 9 d), 4 – четыре (рисунок 9 е)

Четвертая глава посвящена анализу возможности сбережения энергетических и материальных ресурсов малой энергетики на примере г. Томска в результате использования древесно-угольных смесей в качестве топлива котельных агрегатов, а также обоснованию возможности более эффективной защиты окружающей среды при сжигании в топках водогрейных котлов таких смесей.

РАЗРАБОТАНЫ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИИ.

1. При выборе режимов и условий сжигания древесно-угольных смесей в топках котельных агрегатов необходимо учитывать, что время термической подготовки (индукционный период) большой совокупности частиц смеси в несколько раз (2-3) меньше аналогичных времён для одиночной частицы.

2. В связи с тем, что вид древесины не влияет на условия и характеристики процесса термической подготовки древесно-угольной смеси к сжиганию в топках котельных агрегатов, при выборе условий сжигания древесной компоненты древесно-угольных смесей можно использовать экспериментальные данные по любому из реально возможных вариантов видов древесины.

3. Вследствие того, что влажность древесины влияет существенно на условия и характеристики процессов термической подготовки древесно-угольных смесей к сжиганию, влажность древесины необходимо контролировать и обеспечивать возможность регулирования влажности древесно-угольных смесей перед их сжиганием.

4. При подготовке древесной компоненты к сжиганию нет необходимости дополнительного измельчения частиц древесины с начальным характерным размером до трех миллиметров.

5. Сжигание древесно-угольных смесей в топках котельных агрегатов возможно без реконструкции топок последних.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана методика экспериментального исследования процессов термической подготовки счетного множества частиц угля и древесины в смеси
2. Разработаны методики экспериментального исследования влияния концентрации биомассы в древесно-угольных смесях на время термически подготовки последних
3. Установлено влияние расстояния между частицами топлив на условия и характеристики совместной термической подготовки частиц угля и биомассы
4. Установлено, что вид древесной биомассы в составе древесно-угольных смесей не оказывает существенного влияния на условия и характеристики термической подготовки частиц смесей.
5. В большой группе частиц древесной биомассы, состоящей из нескольких рядов, период термической подготовки у частиц верхнего ряда ниже аналогичных периодов верхних при расстояниях между рядами равными характерным размерам самих частиц во всем исследуемом диапазоне температур окружающей среды (от 873 до 1073 К).
6. При относительно низких температурах внешней среды (до 923 К) времена термической подготовки частицы угля в топливной смеси 50/50 древесина/уголь снижаются на 30-40% (по сравнению с однородным углем)
7. Минимальные времена термической подготовки угольных частиц зарегистрированы при температуре 873 К для топливной смеси, концентрация угля в которой составляет 70-75%. Увеличение и снижение доли угля в смеси приводит к росту времени термической подготовки. При относительно высоких температурах (1073 – 1273 К) времена термической подготовки от концентрации угля в смеси не зависят.
8. Изменение влажности древесины в диапазоне от 10 до 45% приводит к росту времени термической подготовки для частиц осины почти в 11 раз (с 17,7 до 186,6 секунд), а для частиц сосны почти в 14 раз (с 19 до 261 секунд) при температуре окружающей среды 1273 К.
9. Период термической подготовки любой совокупности частиц древесины происходит интенсивнее аналогичных процессов одиночной частицы в идентичных условиях.
10. Обоснована возможность эффективного сжигания древесно-угольных смесей в топочных условиях паровых и водогрейных котлов промышленной теплоэнергетики.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kuznetsov, G. V. Mechanism of sulfur and nitrogen oxides suppression in combustion products of mixed fuels based on coal and wood / G.V Kuznetsov., S. A. Jankovsky, A. A. Tolokolnikov, A. V. Zenkov // Combustion Science and Technology. – 2019. - V. 191. - № 11. – P. 2071-2081.
2. Кузнецов Г. В. Условия и характеристики зажигания композиционных топлив на основе угля с добавлением древесины/ Г. В. Кузнецов, С. А. Янковский // Теплоэнергетика. – 2020. - №2. - С. 70-75.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Статьи в международных научных журналах, индексируемых базами данных «Scopus» и «Web of Science»:

1. Kostoreva, J. A. Ignition of wood and coal particle mixtures in conditions of steam and water boiler furnaces / S.V. Syrodoy, J.A. Kostoreva, A.A. Kostoreva, L.I.Asadullina // Journal of the Energy Institute. – 2020. – V. 93. – p. 443-449.
2. Kostoreva, Zh. A. Effect of concentration and relative position of wood and coal particles on the characteristics of the mixture ignition process / G. V. Kuznetsov, S. V. Syrodoy, A. A. Kostoreva, Zh. A. Kostoreva, N.A.Nigay // Fuel. – 2020. – V. 274. – p. 117843.
3. Kostoreva, Zh. A. Characteristics and conditions for ignition of bio-coal mixtures based on coal and forest combustible material / S.V. Syrodoy, G. V. Kuznetsov, N. Y. Gutareva, Zh. A. Kostoreva, A. A. Kostoreva, N. A. Nigay // Journal of the Energy Institute. – 2020. – V. 93. – p. 1978-1992.
4. Kostoreva, Zh. A. Ignition of a group of the woody biomass particles / S. V. Syrodoy , G. V. Kuznetsov , Zh. A. Kostoreva, I. K. Zabrodina , D. Yu. Malyshev // Thermal Science and Engineering Progress. – 2021. – V. 25. - p. 101017.
5. Kostoreva, Zh. A. The effect of the distance between wood and coal particles on the characteristics of their joint ignition under conditions of high-temperature radiation-convective heating / S. V. Syrodoy, G. V. Kuznetsov, Zh. A. Kostoreva, D. Yu. Malyshev, N. Y. Gutareva // Journal of the Energy Institute. – 2021. – V. 97. – p. 13-26.

Статья из Перечня ВАК рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук:

1. Kostoreva, Z. A. Definition of wet wood particles ignition conditions and characteristics to increase the resource efficiency of heat power engineering / Z. A. Kostoreva, D. Yu. Malyshev, S. V. Syrodoy // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. – 2021. – V.332. – p. 97-105.