

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

На правах рукописи

Косторева Жанна Андреевна

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

05.14.04 Промышленная теплоэнергетика

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук, профессор
Кузнецов Гений Владимирович

Томск – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДРЕВЕСНО-УГОЛЬНЫХ ТОПЛИВ В ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ	14
1.1 Экономическая и экологическая перспективность применения древесно-угольных смесевых топлив в энергетике	14
1.2 Анализ мирового опыта сжигания древесно-угольных смесей	16
1.3 Выводы по первой главе	20
ГЛАВА 2. МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ	22
2.1. Подготовка топлива	22
2.2. Исследованные материалы	23
2.3. Конфигурации взаимного расположения частиц для воспроизведения условий их горения в топочном пространстве	25
2.4. Методика проведения экспериментов	29
2.5. Выводы по второй главе	36
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ЗАЖИГАНИЯ ДРЕВЕСНО-УГОЛЬНЫХ ТОПЛИВ	37
3.1. Термическая подготовка смесей измельченной древесины и угля в условиях, соответствующих топкам паровых и водогрейных котлов	37
3.2. Влияние концентрации и взаимного положения частиц древесины и угля на характеристики процесса термической подготовки смеси	42
3.3. Влияние расстояния между частицами древесины и угля на характеристики их совместной термической подготовки	52
3.4. Термическая подготовка группы частиц древесной биомассы	58
3.5. Влияние влажности на эффективность использования древесины как компоненты топлива в промышленной теплоэнергетике	68
3.6. Выводы по третьей главе	75
ГЛАВА 4. СБЕРЕЖЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И МАТЕРИАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ ПРИ СОВМЕСТНОМ СЖИГАНИИ УГЛЯ И ДРЕВЕСИНЫ. ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ	77

4.2. Оценка возможности снижения антропогенной нагрузки предприятий промышленной теплоэнергетики на окружающую среду в результате сжигания угля совместно с древесиной.....	83
4.3. Оценка возможности снижение выхода твёрдых отходов при совместном сжигании угля с древесиной	86
4.4. Сравнительный анализ радиоактивного загрязнения, создаваемого АЭС и ТЭС, работающими на угле	88
4.5. Выводы по четвертой главе	89
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ	92
ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	94
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	95

ВВЕДЕНИЕ

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 [1, 2]. Биомасса рассматривается уже многие годы как наиболее перспективный вариант возобновляемых источников энергии [3, 4]. При этом возможен положительный эффект использования биомассы и как компонента композиционных топлив на основе угля – значительное снижение выбросов антропогенных оксидов и летучей золы [5]. Среди всего многообразия видов биомассы предпочтительным для сжигания в топках паровых и водогрейных котлов большой и малой энергетики является древесина [6, 7]. 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 [8]. 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 [9]. 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 [10,11] (в том числе и низкосортных) [12, 13] и биомассы [14,15] для выработки тепловой энергии.

Основными проблемами применения в промышленной теплоэнергетике этих двух достаточно перспективных энергоносителей являются: высокие концентрации антропогенных оксидов и летучей золы в продуктах сгорания углей [16,17] и относительно низкая по сравнению с другими энергоносителями теплотворная способность типичных видов биомассы [18,19]. С целью решения этих проблем предпринимались попытки обоснования эффективности использования в энергетике неоднородных углей или однородной биомассы (наиболее перспективным видом этого топлива является древесина), а различных композитных топлив на их основе [20,21]. Например, интенсивно ведутся экспериментальные [22, 23] и теоретические [24] исследования процессов сжигания водоугольных, органо-водоугольных [25] топлив, а также смесей измельченных углей и древесины [26, 27]. Установлено, что достаточно масштабным положительным эффектом сжигания таких композитных топлив является существенное снижение антропогенных выбросов [26,27] (оксидов серы и азота, а также летучей золы), в условиях умеренного (во многих приемлемых на практике случаях) снижения энергетических показателей теплоэлектроцентралей или локальных котельных [28,29]. С технологической точки зрения наиболее простыми представляются технологии сжигания измельченных углей и диспергированной древесины в топках водогрейных котлов [30, 31].

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, щепа) 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.

Наиболее перспективным для большой группы стран Азии является сжигание древесины в первую очередь лиственных пород, выращиваемых специально как энергоресурс. Можно отметить, что скорость роста последних в несколько раз больше аналогичных характеристик хвойных деревьев, что даёт основание для обоснованных выводов о целесообразности выращивания, например, липы, эвкалиптов, тополя и других видов энергетической древесины на специальных плантациях для последующего сжигания в топках котельных установок разного назначения. Важным при этом является также, и высокая способность деревьев лиственных пород вырабатывать кислород и поглощать углекислый газ (особенно тополя). То есть такие плантации могут выполнять две важные задачи, вытекающие из двух основных проблем мирового сообщества (энергетической и экологической безопасности), - снижение объемов использования органических топлив и поглощение углекислого газа.

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 цели были поставлены и решены 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 теплоэлектростанций 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 производства теплоты и уменьшающей содержание в дымовых газах теплоэлектростанций 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.

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.

Связь работы с научными программами и грантами. Исследования проводились в рамках выполнения работ по проектам:

1. Российского научного фонда (РНФ): 18-79-10015 «Разработка основных элементов теории процессов термической подготовки, воспламенения и горения смесевых топлив на основе угля и древесины применительно к камерам сгорания котельных агрегатов». 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».

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 состоит из 141 источников.

Краткое содержание диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук.

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, подготовке топлива, методу оценки погрешностей результатов экспериментальных исследований.

В третьей главе представлены результаты проведенных экспериментальных исследований процессов зажигания и горения частиц древесно-угольных топлив.

Проведен анализ влияния вида и концентрации измельченного древесного горючего материала на времена термической подготовки древесно-угольных смесей. Установлено, что вид древесной биомассы не оказывает существенного влияния на времена термической подготовки смеси крупных частиц древесины и малых угля, так как первыми начинают гореть малые по размерам частицы угля. Для относительно крупных частиц

древесины и угля установлено оптимальное соотношение концентрации компонент в системе уголь/древесина, по критерию минимизации времени термической подготовки.

Приведены результаты анализа влияния расстояния между частицами древесины на характеристики их совместного зажигания.

Установленные в экспериментах времена термической подготовки для группы частиц древесины показывают, что период термической подготовки любой совокупности частиц древесины происходит интенсивнее аналогичных процессов одиночной частицы в идентичных условиях.

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 решена задача защиты окружающей среды.

В заключении приведены основные результаты и выводы, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДРЕВЕСНО-УГОЛЬНЫХ ТОПЛИВ В ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

1.1 Экономическая и экологическая перспективность применения древесно-угольных смесевых топлив в энергетике

Несмотря на широкомасштабные попытки внедрения возобновляемых источников энергии (ВИЭ, например, ветро-электрогенераторы [34] или фотоэлектрические преобразователи [35]), в общий баланс тепло- и электрогенерации, в 2020 году большая часть электроэнергии (не менее 30%) производилась на угольных тепловых электрических станциях (ТЭС) [36]. Это обусловлено объективными экономическими и энергетическими преимуществами угольных топлив над ВИЭ. В первую очередь угольные электростанции обеспечивают бесперебойное производство электроэнергии с возможностью адаптации к изменениям режима электропотребления промышленными мануфактурами и городскими агломерациями [37].

На примере экономики Китая [38] можно отметить корреляцию уровня потребления угольного топлива тепловыми электрическими станциями и экономическими показателями (внутренний валовой продукт). Но экстенсивное потребление угля привело к существенному увеличению антропогенных выбросов ТЭС [39]. Последнее вызвало масштабное загрязнение атмосферы в районах крупных мегаполисов. Так по данным [40] уровень загрязнения воздуха в Пекине составляет 250 mg/m^3 (2019 г). Это приводит к интенсивному росту уровня сердечных и легочных заболеваний за последние 10 лет [41]. Сжигание же экологически «чистого» природного газа на ТЭС экономически невыгодно вследствие необходимости использования его в качестве сырья для химической промышленности [42]. В этих условиях особую актуальность приобретают новые эколого- и энергоэффективные топливные композиции на основе мелко диспергированных угля и древесины [43].

Такие топливные смеси на основе угля и биомассы обладают безусловными экономическими преимуществами перед традиционным углем. Проведенный авторами [44] технико-экономический анализ сжигания древесно-угольного топлива на основе бурого угля и опилок показал, что при сжигании таких смесевых топлив экологические штрафы снижаются на 9-12% (в зависимости от марки угля).

Технико-экономический анализ технологий сжигания древесно-угольных смесей в камерах сгорания парогенераторов тепловых электростанций показал [45], что с увеличением концентрации древесины в топливной смеси максимально-установленная мощность ТЭЦ, при которой соблюдается минимум эксплуатационных затрат на производство 1 МВт, даже увеличивается.

Craig Johnston and Cornelis van Kooten [46] установили положительный экономический эффект при сжигании древесно-угольных смесей (по сравнению с углем и природным газом) за счет снижения экологических штрафов.

В [46] приведены результаты технико-экономического анализа целесообразности совместного сжигания угля и типичных отходов сельскохозяйственного производства (на примере кукурузного стебля) на ТЭС на севере США. Показано [46], что для штатов с развитым агропромышленным комплексом совместное сжигание биомассы с углем существенно выгоднее, чем использование только угля. Исключение составляет лишь штат Иллинойс. Это обусловлено слабым агропромышленным комплексом, вследствие того, что южные районы этого штата находятся в пустынной части США.

Результаты исследований совместного сжигания угля и биомассы на ТЭС в Турове [47] (Польша) показали существенное снижение антропогенных выбросов по сравнению с угольными ТЭС (при идентичных электрической и тепловой мощности). Проведенный в [48] химический анализ продуктов сгорания древесно-угольных смесей показал, что при их сжигании

формируется значительно меньше (по сравнению с углем) оксидов азота (NO_x) и серы (SO_x). Последнее объясняется [48] низким содержанием серы и азота в биомассе. Также предполагается [48], что щелочные компоненты, содержащиеся в древесной золе, способны связывать NO_x и SO_x .

Результаты исследований [49] также показали, что при сжигании древесно-угольных смесей формируется существенно меньше (по сравнению с угольным топливом) шлаковых отложений на поверхностях нагрева. В этих условиях эксплуатационные затраты на очистку топочных экранов котельного агрегата значительно снижаются.

1.2 Анализ мирового опыта сжигания древесно-угольных смесей

К настоящему времени опубликован ряд работ (например, [50-54]), посвященных изучению характеристик зажигания и горения частиц угля и биомассы в высокотемпературной среде. Но в работах [50-54] исследовались характеристики и условия воспламенения только одиночных частиц угля и биомассы. Совместное зажигание частиц древесно-угольного топлива в одной камере сгорания не исследовалось.

Авторами [50] проведены экспериментальные исследования зажигания и горения частиц измельченной кукурузной соломы и рисовой шелухи. Определены оптимальные (для совместного сжигания с углем) степени диспергирования для каждого вида биомассы. По результатам экспериментов установлены времена задержки зажигания и времена горения частиц биомассы. Но в [50] установлены значения t_{ing} отдельных (не в составе смеси) топливных частиц (биомассы и угля). В тоже время, очевидно, что при нагреве топливной смеси частицы угля и биомассы воспламеняются в условиях взаимодействия газообразных продуктов пиролиза обоих топлив как с окислителем, так и между собой. По этой причине результаты [50] не в полной мере описывают процессы воспламенения таких смесевых топлив.

Целью работы [51] было сопоставление временных характеристик основных этапов термической подготовки и зажигания (инертный нагрев, пиролиз, воспламенение) частиц угля и биомассы. Но совместное зажигание частиц этих двух топлив в одной камере сгорания в [51] не исследовалось.

Результаты экспериментальных исследований процесса зажигания частиц угля и отходов сельскохозяйственного производства (кукурузный стебель) в условиях нагрева в кислород-азотной и кислород-паровой среде приведены в [52]. Установлены времена задержки воспламенения частиц угля и кукурузного стебля. Показано, что уголь, как правило, воспламеняется примерно на 30% быстрее биомассы. Также в [52] установлено, что в среде «кислород - водяной пар» процессы окисления протекают более интенсивно, чем в среде «кислород-азот». Это объясняется реакцией углерода с парами воды и формированием горючих продуктов реакции ($C + H_2O = CO + H_2$). В [52] приведены результаты исследования процессов воспламенения только отдельных частиц топлива (угля или биомассы).

В [53] приведены результаты анализа концентраций двуокиси углерода, оксида азота и хлористого водорода, формирующихся при сжигании топливных смесей на основе рисовой соломы и высокосернистого каменного угля. Установлено [53], что при совместном сжигании такой биомассы с углем содержание диоксида углерода в продуктах сгорания существенно снижается (по сравнению с окислением однородного угля). Такая же закономерность установлена и при анализе выбросов оксидов азота и серы. Но в [53] не определены времена задержки зажигания.

Результаты экспериментальных исследований процесса совместного сжигания древесно-угольного топлива в форме пеллет в высокотемпературной среде приведены в [54]. Но авторы [54] не определяли значений времен задержки воспламенения. Установлены [54] характерные значения скорости убыли массы в процессе термической подготовки и окисления древесно-угольных пеллет. При этом проведены экспериментальные исследования

процессов горения кокса. Но в настоящее время использование пеллет ограничивается только малой (мощность установок не более 1МВт) энергетикой [54].

В [54] приведены результаты экспериментальных исследований сжигания целлюлозы на основе отходов лесопиления и бытовых (бумага) отходов. Установлено, что реакционные способности трех видов целлюлозы отличаются друг от друга не более чем на 10%.

Результаты экспериментальных исследований процессов сжигания древесно-угольного топлива в псевдосжиженном слое в среде окислителя (воздуха, обогащенного кислородом) приведены в [55]. Проанализировано влияние концентрации кислорода на характеристики горения древесно-угольной смеси. Показано, что состав окислителя оказывает существенно влияние на температурный профиль слоя топлива. Также установлено, что обогащение окислителя кислородом ($O_2 > 25\%$) приводит к существенному снижению выбросов монооксида углерода в атмосферу. Показано, что при сжигании древесно-угольного топлива в окислителе с высоким содержанием O_2 ($\approx 32\%$) существенно снижаются выбросы оксидов азота. Но в [55] приведены результаты анализа горения топливных смесей без рассмотрения начальной стадии горения. Соответственно, не определялись времена задержки воспламенения.

Авторы [56, 57] провели анализ золы остатка, образующегося при совместном сжигании бурого угля и биомассы (соломы или сои). Анализ золы показал, что сжигание угля совместно с биомассой привело к значительному изменению морфологии золы. Существенно увеличилась адгезионность золы остатка древесно-угольного топлива по сравнению с твердыми продуктами горения однородного угля. Показано, что при совместном сжигании угля и биомассы существенно снижается механический недожог топлива. Но в [56, 57] не анализировались процессы тепло- и массопереноса, протекающие на начальной стадии горения топлива при зажигании.

В [58] приведены результаты экспериментальных исследований процессов совместного сжигания угля и биомассы в модельной камере сгорания мощностью 1 МВт. Установлено незначительное изменение степени выгорания кокса топливных частиц при сжигании однородного угля и древесно-угольной смеси. Показано существенное влияние конструктивных характеристик камеры сгорания на выгорание коксовых (как угля, так и биомассы) частиц. Однако в [57], в основном, рассматривались только процессы горения смеси угля и биомассы. Результатов исследований динамики зажигания частиц древесно-угольного топлива в [57] нет.

Авторы [58-60] не анализировали возможность влияния одних частиц на процесс зажигания других. В работе [61] экспериментально исследовалось зажигание отдельных частиц биомассы сосны, эвкалипта и ивы с использованием горелки типа Макера. Так же зажигание отдельных частиц биомассы исследовалось с использованием модели одиночной частицы с учетом изменения ее размера и градиентов температуры по радиусу частицы [62]. Зажигание одной большой частицы древесины с характерными размерами 10-15 см исследовалось авторами [63].

Результаты численного моделирования процесса совместного сжигания угля и биомассы в кипящем слое приведены в [64]. В работе [65] решена сложная задача математической физики. Достаточно подробно описана кинетическая схема образования оксидов азота, при этом принята простая кинетическая схема процесса зажигания газообразных продуктов пиролиза (метан – CH_4 ; водород – H_2 ; окись углерода - CO) с брутто реакциями. Также в [65] рассмотрены процессы горения потока древесно-угольной смеси. Но динамика воспламенения отдельных частиц древесины и угля не изучалась.

В [66] приведены результаты компьютерного моделирования процесса воспламенения и горения смесей угля и биомассы в модельном котельном агрегате мощностью 550МВт. Показано, что при добавлении биомассы к углю температура факела снижается. По результатам теоретических исследований [66] установлено, что увеличение концентрации биомассы в топливной смеси

приводит к росту числа несгоревших частиц углерода в продуктах сгорания. Но в [66] не изучены процессы горения, протекающие на начальной стадии термической подготовки.

По результатам теоретических исследований [67] установлены интегральные характеристики воспламенения частицы биомассы в потоке высокотемпературного окислителя. Установлены предельные (по размерам частиц топлива) режимы воспламенения: газофазный и гетерогенный. Также установлено, что форма частиц биомассы оказывает значительное влияние на характеристики и условия воспламенения. Но в [67] не изучено совместное воспламенение частиц угля и биомассы.

Вышеприведенный анализ позволяет сделать вывод, что проведенные ранее исследования посвящены, в основном, процессам горения древесно-угольных смесей или оценке минеральной части их золового остатка. При этом исследований процессов совместного воспламенения (начальной стадии горения) частиц древесно-угольного топлива практически не проводилось.

1.3 Выводы по первой главе

1. Публикационная активность по проблеме использования древесно-угольных смесей в энергетике за последние годы говорит о том, что данное направление исследований является весьма актуальным.

2. Анализ результатов экспериментальных исследований, посвященных зажиганию древесно-угольных топлив показал, что основным достоинством совместного сжигания древесной биомассы с углем является то, что при их сжигании в окружающую среду выделяется значительно меньше антропогенных оксидов (серы и азота). Применение био-угольных смесей может позволить существенно снизить затраты на выработку теплоты и снизить экологическую нагрузку ТЭЦ и котельных на окружающую среду, тем самым дать новый вектор развития промышленной теплоэнергетики.

3. Анализ основных публикаций по теме диссертационной работы показал, что одной из ключевых проблем, сдерживающих использование древесно-угольных смесей в промышленной теплоэнергетике, является отсутствие достоверных данных о закономерностях зажигания и горения таких топлив. По этой причине древесно-угольные смеси в качестве топлива пока не широко применяются на предприятиях промышленной теплоэнергетики.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

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). Второй вариант –относительно большие по размерам (3-4 мм) частицы древесины и угля. Исследовались пять видов древесины и один достаточно типичный уголь, широко использующийся в настоящее время в промышленной теплоэнергетике.

2.1. Подготовка топлива

С целью подготовки топлива для экспериментальных исследований проводился последовательный ряд технологических операций, включающий в себя этапы:

1. Подготовка частиц древесины. Они вырезались при помощи лазерного станка RABBIT NX-1290 из монолитного сухого фрагмента древесины больших размеров, относительная влажность которого составляла 5-8%. В дальнейшем при помощи шлифовального и фрезерного устройств проводилась шлифовка поверхности частиц и придание им соответствующей формы и нужного размера.

2. Подготовка измельченной древесины. Сортированные опилки (отходы лесопиления), высушивались в сушильном шкафу при температуре 373 К (выдержка составляла 120 минут). Затем древесина измельчалась в дисковой мельнице и просеивалась через вибросито с размером ячейки 0,2 мм

3. Дробление угля. Частицы угля готовилось по следующей схеме: крупнокусковый (характерный размер кусков до 0,2 м) уголь измельчался в щековой дробилке (до характерных размеров 0,01 м) и просеивался через сито (с размером ячейки сот – 0,01 м). После этого просеянный уголь засыпался в валковую мельницу и дробился до фракции 1,5-2 мм. На финальном этапе

дробленный уголь выдерживался (время выдержки ≈ 1 час) в сушильном шкафу при температуре воздуха 373К.

2.2. Исследовавшиеся материалы

В теплоэнергетике возможно использование самых разных видов древесной биомассы, как хвойных, так и лиственных пород. Наиболее перспективно использование отходов переработки древесных хвойных пород (сосна), цена которых во многих случаях по существу сводится к стоимости погрузки и транспортировки. Также перспективным для большой группы стран Азии является сжигание древесины в первую очередь лиственных пород, выращиваемых специально как топливо. Можно отметить, что скорость роста последних в несколько раз больше аналогичных характеристик хвойных деревьев [68], что даёт основание для обоснованных выводов [69] о целесообразности выращивания, например, липы, эвкалиптов, тополя и других видов энергетической древесины на специальных плантациях для последующего сжигания в топках котельных установок разного назначения. В этой связи актуальной является задача сравнения характеристик зажигания смесей древесины нескольких типичных пород с широко используемым углем и оценка эффективности зажигания таких топлив на основе древесины лиственных пород

Длиннопламенный уголь достаточно типичен и широко используется в теплоэнергетике многих государств. В качестве второй компоненты смесей исследовалась древесина трех видов (береза, сосна, лиственница). Эти виды древесины достаточно широко распространены в Европе, Азии и Америке [70] и являются типичными представителями «энергетической биомассы» (таблица 2.1). Теплофизические характеристики компонентов исследовавшихся топлив приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.1 - Составы исследовавшихся древесно-угольных смесей

Номер состава	Уголь		Древесина	
	Марка	Содержание %	Вид	Содержание %
№1	Д	60	Берёза	40
		70		30
		80		20
		90		10
№2	Д	60	Лиственница	40
		70		30
		80		20
		90		10
№3	Д	60	Сосна	40
		70		30
		80		20
		90		10

Таблица. 2.2 - Основные характеристики компонентов исследовавшихся топлив.

Компонент	C_p Дж/(кг·К)	λ Вт/(м·К)	ρ кг/м ³	V^{daf} %	C^r %	Q_T Дж/кг
Длиннопламенный уголь (Д)	1150	0,116	1253	46	76	$26,2 \cdot 10^6$
Берёза	1250	0,15	610	85	48,6	$15 \cdot 10^6$
Лиственница	-	0,13	370	85	50,1	$15,5 \cdot 10^6$
Сосна	2300	0,14	500	85	49,6	$15,5 \cdot 10^6$
Кедр	950	0,095	550			
Осина	-	-	490			

2.3. Конфигурации взаимного расположения частиц для воспроизведения условий их горения в топочном пространстве

Наиболее предпочтительной (по оценкам [71]) является технология сжигания древесно-угольных смесей в топках водогрейных котлов, предназначенных для сжигания углей. В этом случае нет необходимости кардинального изменения систем подачи топлива в топочную камеру и его сжигания. Но если при подготовке углей они измельчаются в обычных системах топливоприготовления на теплоэлектроцентралях до характерных размеров 40-60 мкм (и даже ниже), то древесина может поступать в котельную в разном состоянии (даже если используются отходы лесопиления или деревообработки). Поэтому одной из задач проведенных экспериментальных исследований была оценка условий и характеристик зажигания древесно-угольных смесей, при существенно отличающихся характерных размерах частиц древесины и угля (до 100 раз). Достаточно очевидно, что измельчение древесины до микронных размеров частиц, скорее всего, нецелесообразно. В этом случае затраты энергии на топливоприготовление существенно увеличиваются. Рациональным является сжигание частиц древесной биомассы размерами не более 4-5 мм. При этом гарантируется их полное сгорание в топках современных котлов и минимизируются затраты на измельчение.

При распылении древесно-угольного топлива в камере сгорания формируются частицы различных форм. Как правило последние представляют собой неправильные многогранники. Учесть все многообразие форм частиц древесно-угольной смеси в реальной экспериментальной практике не представляется возможным. По этой причине при проведении экспериментов исследовались частицы древесины в форме куба, вероятность существования которых не больше и не меньше частиц любой другой формы.

Также стоит сказать, что в период термической подготовки частиц древесно-угольной смеси их расположение и среднее расстояние между ними может существенно меняться, в зависимости от степени воздействия группы

значимых факторов: скорости распыления топлива и внутрикамерной окислительной среды, конфигурации топочного пространства, характерных размеров частиц топлива, их влажности и т.д. В то же время, промышленные испытания древесно-угольных котельных агрегатов показывают [72], что воспламенение частиц смесового топлива происходит практически у корня факела. Соответственно можно обосновано предположить, что среднее расстояние между частицами топлива будет составлять не более десятка миллиметров. По этой причине в работе исследовалось зажигание частиц угля и биомассы, взаимное расположение которых в экспериментах приведено в рисунке 2.1.

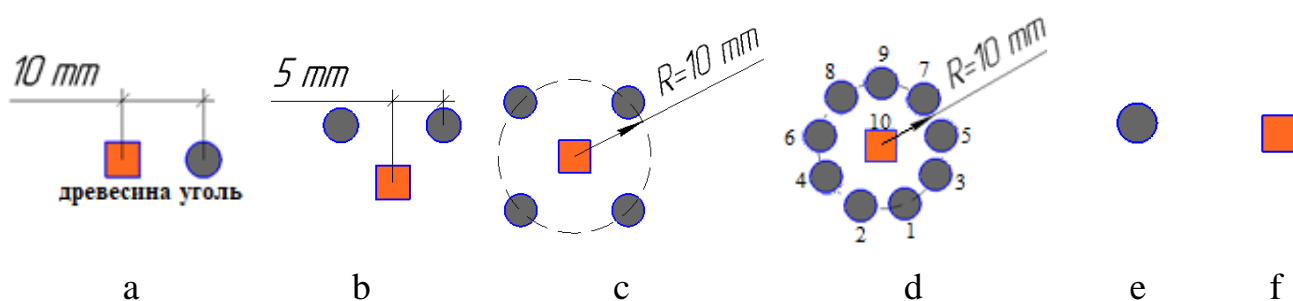


Рисунок 2.1 - Варианты взаимного расположения частиц древесины и угля.

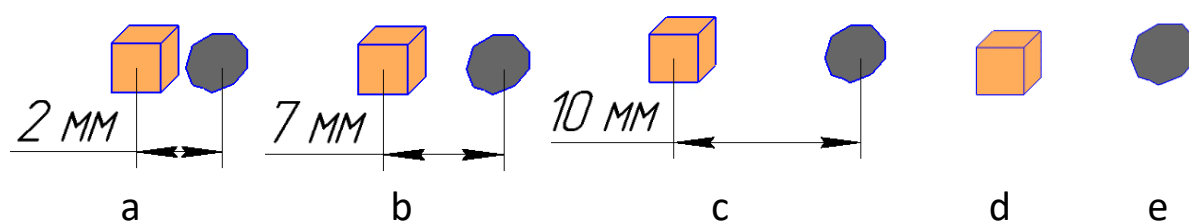


Рисунок 2.2. - Варианты расположения двух частиц древесно-угольного топлива в камере экспериментальной установки

Можно отметить, что, скорее всего, самый перспективным всё-таки в большой и малой энергетике является использование отходов лесопиления и деревообработки (опилки, щепа, стружка) [73-75]. В этом случае, достаточно часто нет необходимости в специальном измельчении древесины, для

которого необходимы большие затраты электроэнергии. Но отходы лесопиления и деревообработки разных производств существенно отличаются фракционным составом частиц древесин [76]. Например, характерные размеры отдельных опилок и щепы отличаются во много раз [77]. Но при этом известно [78, 79], что времена термической подготовки частиц любых конденсированных веществ сильно зависят от их характерных размеров. Поэтому необходимы знания условий и характеристик зажигания не только сухих опилок, но частиц существенно более крупных размеров, образующихся, например, после дробления щепы или в условиях транспортировки и перегрузки отходов лесопиления.

Кроме того, при подаче в топочное пространство котельных установок большой совокупности частиц каждая из них оказывается в разных условиях нагрева [80]. Так, например, при инжекции через специальные форсуночные устройства смеси воздуха и древесных частиц в топочном пространстве формируется гетерогенная топливовоздушная струя. Эта струя разрушается по мере удаления от форсунки [81]. Условия нагрева частиц топлива на периферии этой струи (по внешнему контуру) и в её ядре (вблизи оси симметрии) существенно отличаются по интенсивности как конвективного, так и лучистого нагрева. Частицы внешнего контура будут нагреваться быстрее (вследствие интенсивного радиационного нагрева) расположенных в ядре струи. Поэтому необходима оценка времен задержки зажигания частиц

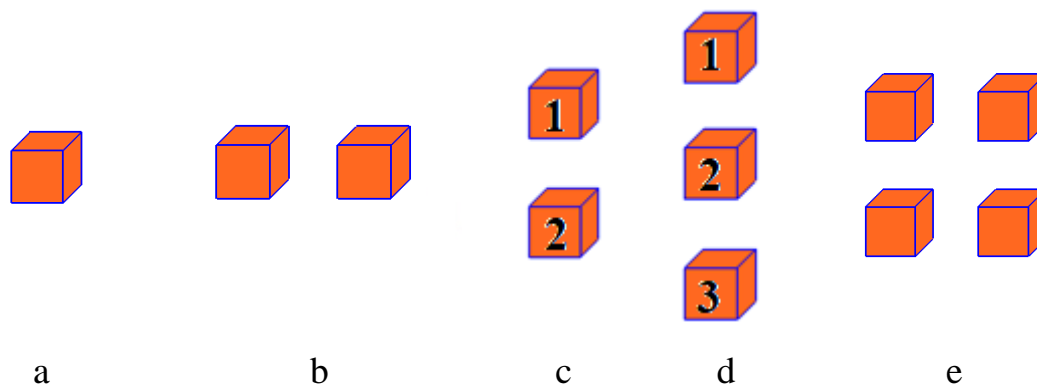


Рисунок 2.3 - Схемы расположения нескольких (двух, трех, четырёх) частиц в высокотемпературной газовой среде.

древесины, распределенных по поперечному сечению струи (или облака частиц после распада струи) в реальных условиях лучисто-конвективного нагрева (рисунок 2.3). Пока результатов экспериментального или теоретического анализа условий и характеристик зажигания счетного множества частиц древесины не опубликовано.

Выбор схем расположения (относительно друг друга) частиц при планировании экспериментов проводился с учетом следующих факторов. Первый – целесообразным для практики является определение времен задержки зажигания частиц древесины достаточно большой (несколько десятков или даже сотен) единиц. Но при этом важным является то, что при любом числе частиц совокупности всегда можно выделить достаточно малую характерную группу частиц, анализ условий и характеристик зажигания которых даёт объективные основания для оценки аналогичных условий и характеристик большой совокупности. Вторым фактором – наиболее представительной, скорее всего, является группа из четырех частиц (рисунок 2.3 е), которую можно назвать характерной ячейкой большой совокупности частиц. Последнюю всегда можно представить сочетанием большого числа таких ячеек. Третий – для понимания физики процессов зажигания большой совокупности частиц также целесообразны эксперименты с двумя и тремя частицами при их ориентациях, соответствующих рисунку 2.3 б-е.

При подготовке древесной биомассы к сжиганию в топках паровых и водогрейных котлов измельчение топлива проводится, как правило, в условиях, которые не обеспечивают стабильную конфигурацию частиц при измельчении исходного сырья в мельницах или дробилках. Установлено [82], что в результате измельчения в основном образуются частицы в форме неправильных многогранников с произвольным числом граней (от 4 до 15). Варьировать в экспериментах весь возможный набор конфигураций частиц практически невозможно. Поэтому эксперименты проводились с частицами в форме куба, которая наиболее близка ко всем возможным вариантам формы частиц древесины, образующихся после лесопиления.

Важным фактором, скорее всего, является расстояние между частицами, от которого зависит интенсивность процессов нагрева частиц топлива и концентрации газообразных продуктов пиролиза древесины в зоне химического реагирования. Последняя характеристика определяет скорость химической реакции между горючим (летучие продукты пиролиза) и окислителем (воздух).

В реальном топочном пространстве расстояние между частицами твердого топлива является, как правило, переменной величиной, зависящей от условий распыления диспергированного (до определенного фракционного состояния) топлива [83], конфигурации тракта котла [84], свойств топлива [85] и других факторов. Поэтому при выборе расстояния между частицами основным исходным параметром была концентрация топлива в струе несущего воздуха после распыления через форсунки и выхода струи топливовоздушной смеси в зону температур, достаточных для зажигания топлива [86]. По концентрации и характерным размерам частиц рассчитывалось их число в единице объема окружающего воздуха, и после этого определялось среднее (по объему) расстояние между частицами. Установлено [87], что оно незначительно отличается в типичных условиях сжигания топлива от характерного размера частиц (чем больше частиц в единице объема, тем меньше их размер и, соответственно, расстояние между ними).

2.4. Методика проведения экспериментов

Разработана методика проведения экспериментальных исследований процессов зажигания частиц угля и древесины с воспроизведением условий, в наибольшей степени соответствующих условиям топок котельных агрегатов.

Экспериментальные исследования проведены на стенде, схема которого показана на рисунке 2.4. Частицы топлива вводились в канал полого, вертикально расположенного керамического цилиндра, на внешнюю поверхность которого крепился электрический нагреватель. Такая

конфигурация области нагрева позволяет изучить процессы зажигания большой совокупности (150-200 шт) топливных частиц малых размеров в условиях их свободного падения в высокотемпературной окислительной среде и обеспечивает минимальные погрешности (отсутствуют держатели частиц топлива как, например, в [88]) моделирования реальных топочных условий котельного агрегата.

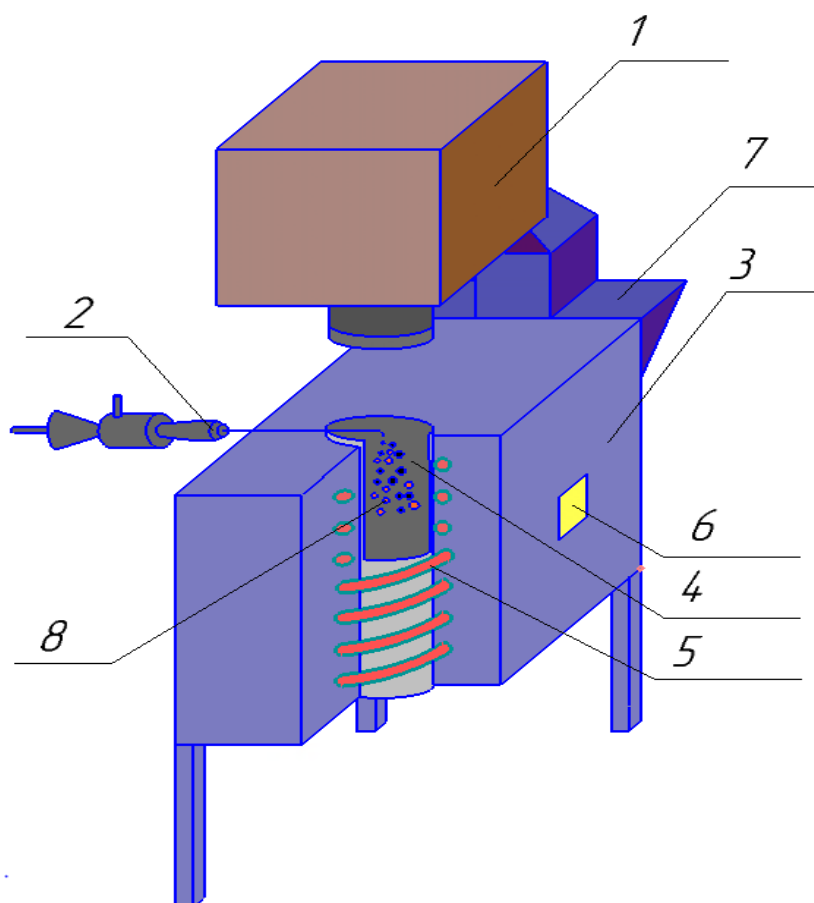


Рисунок 2.4 - Экспериментальный стенд

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.

Частицы древесно-угольной смеси распылялись с помощью пневматического устройства в канал нагретого до высоких температур (максимально возможная температура 1473К) керамического цилиндра. Регистрация процессов тепломассопереноса и воспламенения топливных

частицы проводилось высокоскоростной видеокамерой Photron FASTCAM SA45 (скорость видеосъемки до 20 000 кад/с). Температура воздуха внутри цилиндра (T_g) в экспериментах варьировалась в достаточно широком диапазоне (от 873К до 1273К), соответствующем температурам среды в топочных камерах котельных агрегатов. Измерения T_g выполнялись термоэлектрическим преобразователем (хромель-алюмелевые) с диаметром сужения 0,5 мм (инерционность - не более 3 сек). Эксперименты проводились только в условиях достижения стационарных значений T_g во всем канале по высоте после полного прогрева воздуха в канале цилиндра.

Период времени от начала теплового воздействия (момент ввода частиц в полость цилиндра) до зажигания (появление 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.

Масса навески смеси в одном опыте составляла $m=1-2$ г. при объеме канала $0,157$ м³. Такое значение соответствует реальной концентрации частиц топлива, достигаемой в древесно-угольных котельных агрегатах. Размеры частиц угля составляли от 40 до 60 мкм. Характерные размеры второй компоненты смеси варьировались в пределах от 3 до 5 мм. Систематическая погрешность термопар, используемых для измерения температуры среды, не превышала 2% (по паспорту изделия).

Проводились серии экспериментов (не менее 15 опытов) в идентичных условиях нагрева и подачи частиц топлива. По их результатам определялись случайные погрешности измерений t_{ign} .

Необходимо отметить, что в экспериментах использовались сухие частицы всех трех видов биомассы (проводилась их сушка перед экспериментами). Можно в этой связи отметить, что в реальных системах топливоподачи котельных установок температуры, как правило, достаточны для удаления влаги из частицы древесины на глубину 1-1,5 мм от её внешней

поверхности, даже при высокой начальной влажности древесины. Такие глубины прогрева, как показывают результаты исследований [89], достаточны для зажигания частицы размерами несколько миллиметров и последующего устойчивого горения.

Известно [90], что 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 [91], 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 2.5. 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 $T_g=873\text{K}$ до $T_g=1473\text{K}$.

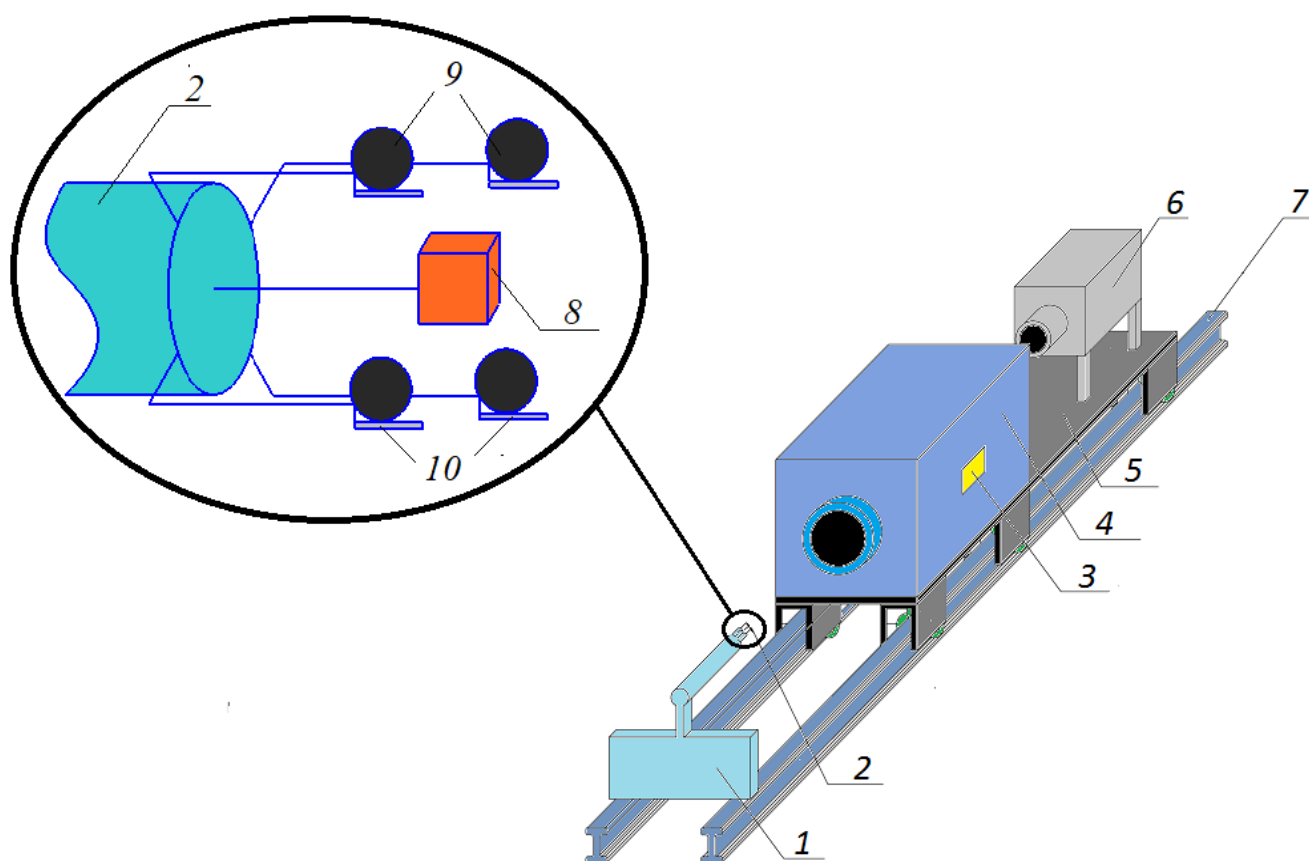


Рисунок 2.5.а - Схема экспериментальной установки

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

При проведении экспериментальных исследований влияния расстояния между частицами древесины и угля на характеристики их совместного зажигания (рисунок 2.2) в экспериментах использовался стенд, приведённый на рисунке 2.5 а, но с видоизменённым держателем (рисунок 2.5.б).

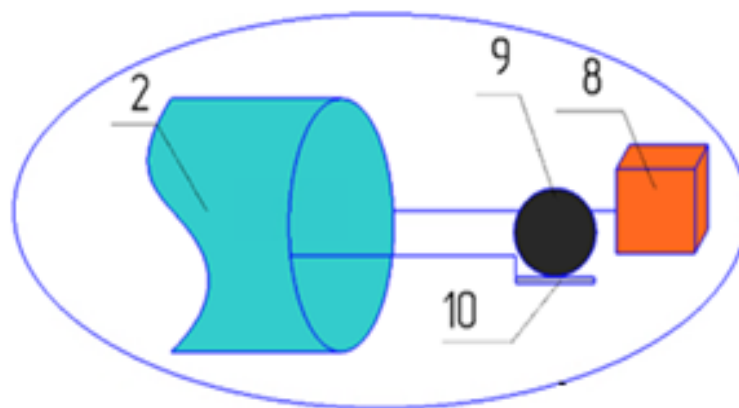


Рисунок 2.5.b - Держатель для двух частиц топлива

2 – металлический держатель; 8 – частица древесины; 9 – частица угля;
10 – угле-держатель.

Аналогично вышеизложенному при зажигании нескольких (группы) частиц древесиной биомассы (от одной до четырёх) рисунок 2.3, последние закреплялись на металлическом держателе, схема которого приведена на рисунке 2.5.c.

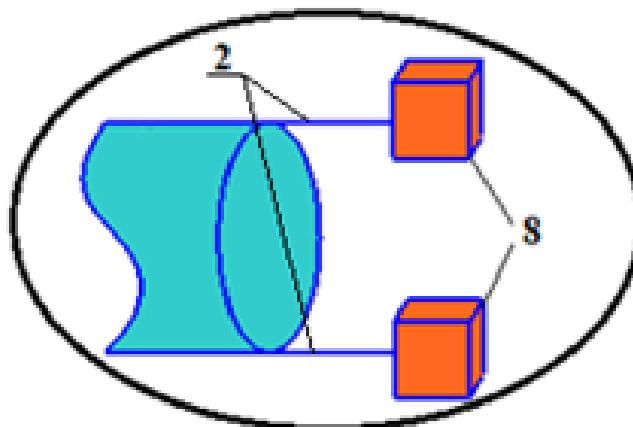


Рисунок 2.5.c - Держатель для группы древесных частиц
2 – металлический держатель; 8 – частицы древесины;

В таблице 2.3 приведены систематические погрешности основных использовавшихся средств измерений (неопределённости по новой терминологии).

Таблица 2.3 - Погрешности средств измерений

Физическая величина	Средство измерения	Погрешность прибора
Температура окислителя (T_g)	Термический преобразователь (ТХА)	$\pm 0,004 \cdot T_g$
Расстояние между частицами топлива	Photron FASTCAM CA4 5	$\leq 4 \%$
Время термической подготовки	Photron FASTCAM CA4 5	$\leq 5 \cdot 10^{-5} \%$
Масса топлива	Аналитические весы VIBRA HT 84RCE	0,0001 г

Для каждой топливной смеси проводилась серия экспериментов не менее чем из 15 опытов. Для оценки случайных отклонений результатов определяли доверительные интервалы по следующему алгоритму [92]:

1. По результатам проведенных экспериментов определяли средние значения t_{ign} ($\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$), где t_i – значение времени термической подготовки в одном опыте.

2. После этого рассчитывались среднеквадратичные отклонения серии измерений $S_{\bar{x}}^n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{t} - t_i)^2}{n \cdot (n-1)}}$.

3. Далее определяли доверительный интервал времен задержки зажигания ($\Delta t = t(\alpha, n) \cdot S_{\bar{x}}^n$), где $t(\alpha, n)$ – коэффициент Стьюдента. Доверительный интервал при доверительной вероятности $\alpha=0,95$ составлял не более $\pm 10,4 \%$.

4. После вычисления доверительного интервала, выполняли отбраковку промахов (значений времен, не входящих в доверительный интервал).

5. После исключения промахов, проводили дополнительную серию экспериментов, чтобы их общее число было не менее 15 опытов.

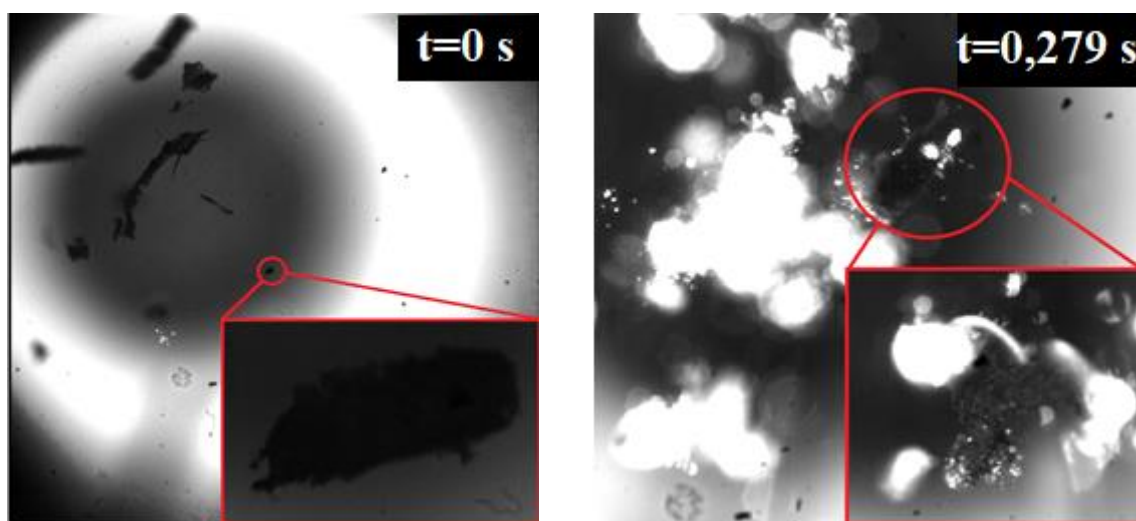
2.5. Выводы по второй главе

Разработана методика проведения экспериментальных исследований по изучению времен термической подготовки древесно-угольных смесей в условиях, соответствующих топочным пространствам котельных агрегатов промышленной теплоэнергетики.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ЗАЖИГАНИЯ ДРЕВЕСНО- УГОЛЬНЫХ ТОПЛИВ

3.1. Термическая подготовка смесей измельченной древесины и угля в условиях, соответствующих топкам паровых и водогрейных котлов

На рисунке 3.1 приведены кадры типичной видеозаписи процесса нагрева 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) 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 3.1 - Кадры типичной видеозаписи процессов термической подготовки древесно-угольной смеси на основе березы при $T=1073\text{ K}$

При этом процесс зажигания 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 [93], 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.

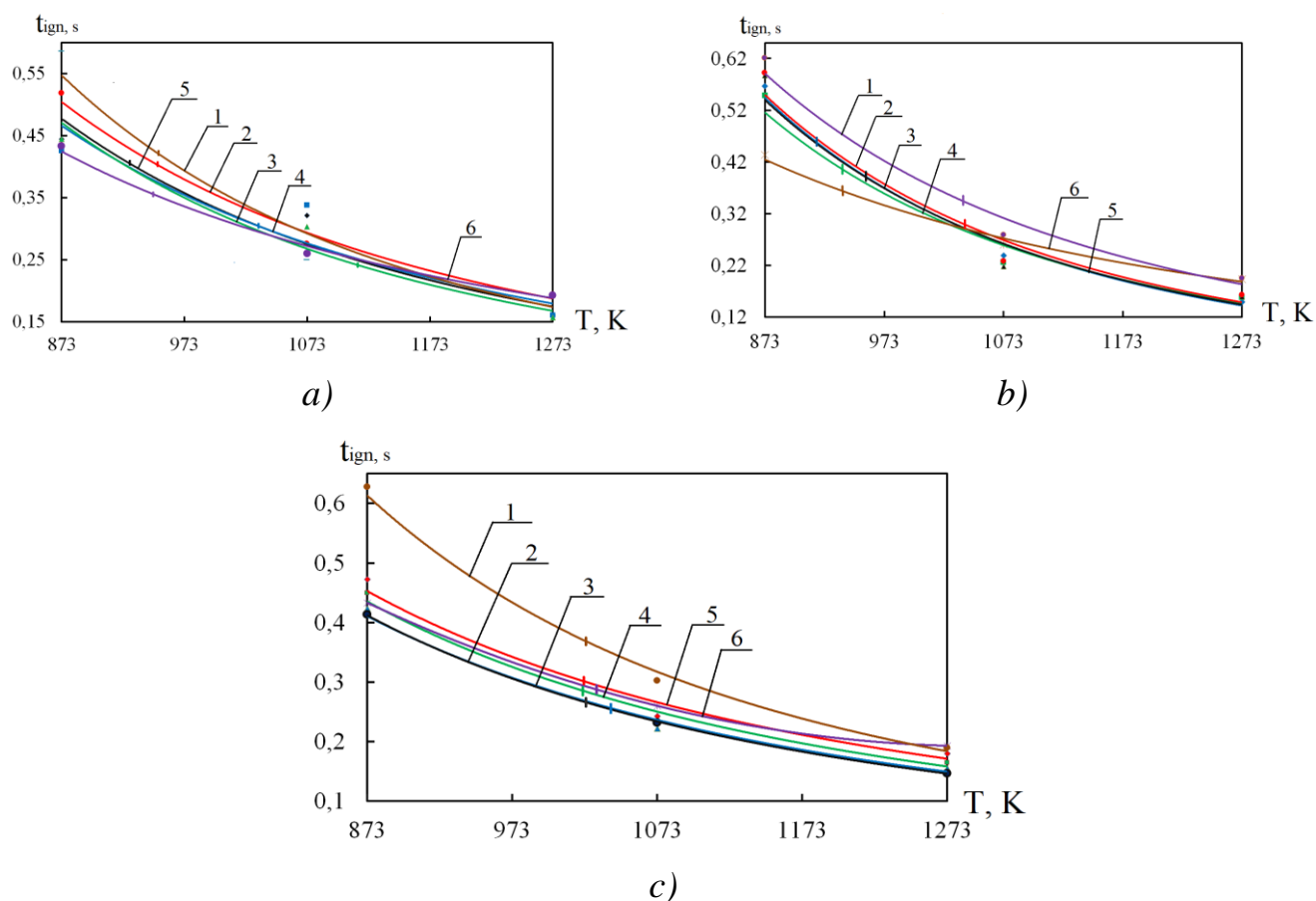


Рисунок 3.2 - Зависимости времён термической подготовки древесно-угольной смеси от температуры внешней среды (а - береза/уголь; б - сосна/уголь; в - лиственница/уголь) при разных концентрациях угля: 1 - 0%, 2 - 60%, 3 - 70%, 4 - 80%, 5 - 90%, 6 - 100%.

На рисунке 3.2 приведены зависимости времён термической подготовки исследовавшихся угольно-древесных смесей от температуры внешней среды. Такого рода зависимости являются основными характеристиками процессов зажигания твердых [94], жидких [95] и разного рода композиционных топлив [96].

Анализ зависимостей $t_{\text{ign}}(T)$ показывает, что их вид достаточно существенно отличается от аналогичных кривых для твердых [97] и жидких [98] топлив (аппроксимирующие экспериментальные значения кривые скорее соответствуют линейным зависимостям, а не экспоненциальным). Такие результаты могут быть обусловлены тем, что при зажигании смеси мелкодисперсных частиц угля и почти в 100 раз больших по размерам частиц древесины последние начинают гореть после угольных, но при этом частицы древесной биомассы существенно влияют на условия теплообмена угольных частиц с внешней средой – аккумулируют энергию, поступающую в единицу объема смеси. То есть фактически для зажигания малой по размерам частицы угля, окруженной существенно более крупными частицами древесины, необходимо больше теплоты по сравнению с условиями зажигания однородной угольной пыли адекватных размеров (кривые б на рисунке 3.2).

В дополнении к вышеизложенному следует отметить, что исследовавшийся вариант сочетания микронных частиц угля и миллиметровых размеров частиц древесины соответствует возможным условиям сжигания таких смесей в топках котлов теплоэлектростанций. На этих предприятиях уголь перед сжиганием измельчают до микронного (в большинстве случаев) диспергированного состояния. При работе угольных котельных разного рода мельницы и дробилки угля по существу не используются. Поэтому, как будет показано ниже, в последнем случае целесообразно исследовать другие фракционные составы древесно-угольных смесей с большими характерными размерами частиц.

Результаты выполненных экспериментов представлены ниже в другом формате для лучшего обоснования ответа на вопрос о влиянии вида древесной биомассы (породы древесины) на условия и характеристики зажигания древесно-угольной смеси.

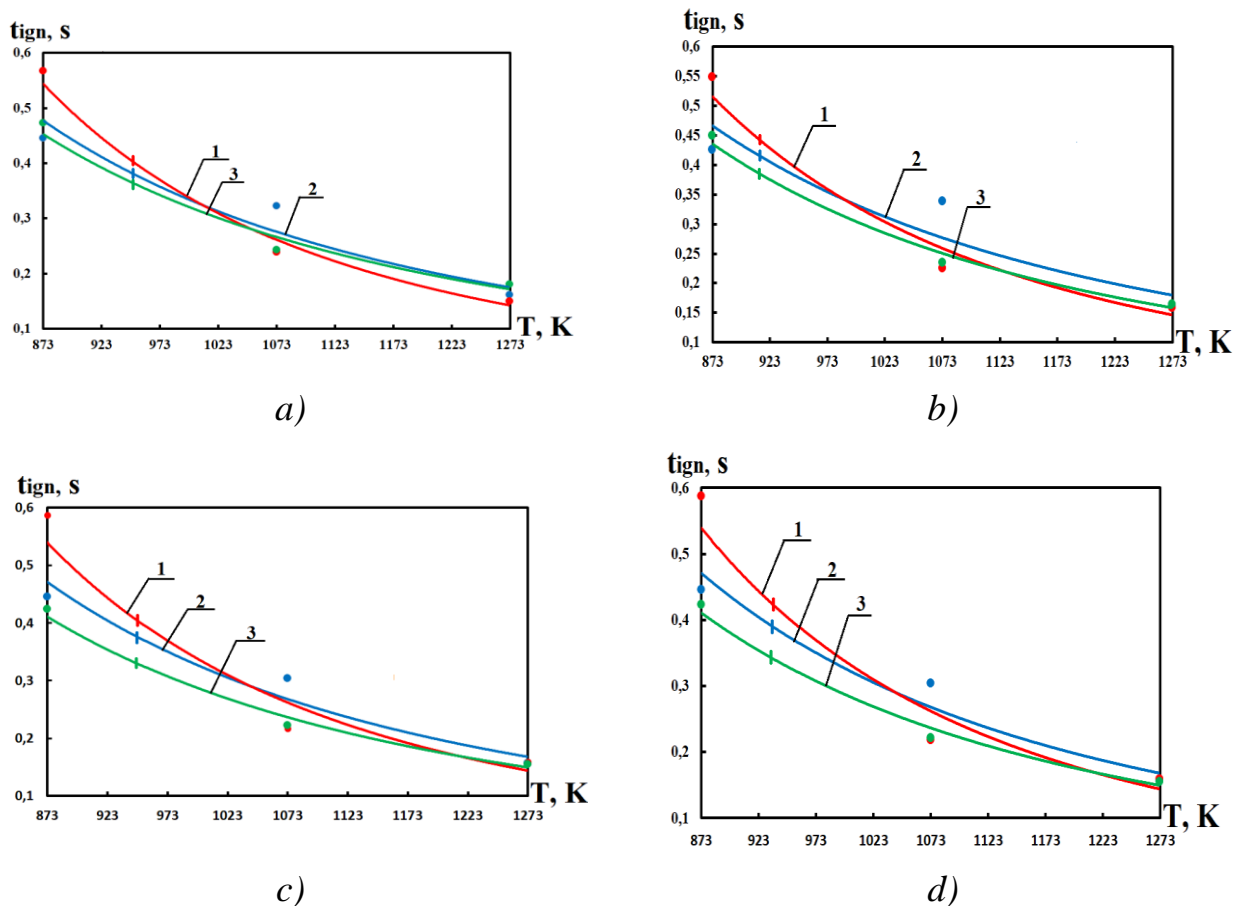


Рисунок 3.3 - Зависимости времён термической подготовки древесно-угольной смеси от температуры внешней среды (1 – сосна, 2 – береза, 3 – лиственница) при различных концентрациях компонентов в системе уголь/древесина:

a) 90/10; b) 80/20; c) 70/30; d) 60/40

На рисунке 3.3 хорошо видно, что в достаточно широком и соответствующем практике диапазоне изменения температур окислительной среды времена термической подготовки древесно-угольных смесей не превышают 0,65с. При этом значения t_{ign} смесей длиннопламенного угля и разных пород древесины (береза, сосна, лиственница) отличаются не более чем на 0,18с (при минимальных $T_g=873K$). С ростом T_g (рисунок 3.3) разность

t_{ign} уменьшается и при $T=1273$ К не превышает доверительных интервалов определения значений времён термической подготовки. Можно сделать вывод, что индивидуальные свойства древесины не оказывают существенного влияния на условия и характеристики зажигания достаточно типичных древесно-угольных смесей, так как первыми начинают гореть малые по размерам частицы угля. Эти экспериментальные данные имеют, скорее всего, фундаментальное значение. По своей структуре и свойствам [99] берёза, сосна и лиственница отличаются очень существенно (таблица 2.2). В экспериментах же установлено устойчивое зажигание и горение древесно-угольной смеси при высоких концентрациях каждого вида биомассы. Это даёт основание для вывода о незначительном влиянии вида древесины на характеристики и условиях воспламенения смесевых топлив на основе угля и древесной биомассы.

В дополнение к вышеизложенному необходимо отметить, что три исследованных в качестве второй компоненты угольно-древесных смесей породы древесины достаточно существенно отличаются по содержанию структурно-связанной влаги [100] (наиболее отличаются берёза и сосна). Но как показали эксперименты, эта влага практически не оказывает влияния на характеристики процессов зажигания частиц древесины этих пород и их последующего горения. Можно сделать вывод, что выделяющиеся при пиролизе, например, берёзы пары воды почти не тормозят процесс нагрева частицы и слоя газа вблизи её поверхности, в котором происходит горение (взаимодействие газообразных продуктов термического разложения древесины и нагретого до высоких температур воздуха). Если учесть, что берёза является одной из самых влагонасыщенных в естественном состоянии пород древесины, можно сделать вывод, что условия и характеристики зажигания подавляющего большинства лиственных пород древесины в рассматриваемых условиях нагрева (типичных для теплоэнергетики стран Юго-Восточной Азии) будут соответствовать установленным по результатам проведенных экспериментов. Анализ результатов выполненных исследований

также показывает, что изменение концентрации одной из компонент смеси в 1,5-2 раза приводит к изменению времен термической подготовки не более чем 0,3 с. Такие изменения t_{ign} при организации топочного процесса не оказывают сколько-нибудь существенного влияния на стабильность воспламенения и последующего горения смеси. Поэтому можно сделать вывод, что смешение двух компонент может проводиться не на стадии подготовки топливной смеси, а непосредственно в топочном пространстве. Локальная неоднородность смеси не будет играть большой роли в иницировании горения. Даже малая концентрация мелких угольных частиц достаточна, как показали эксперименты для начала горения частиц древесины, даже лиственной породы, при относительно низких температурах среды (873 К). С ростом же T_g влияние концентраций компонент минимизируется, потому что величина t_{ign} становится очень малой (менее 0,2 с при $T_g=1273$ К).

3.2. Влияние концентрации и взаимного положения частиц древесины и угля на характеристики процесса термической подготовки смеси

На рисунке 3.4 приведены типичные кадры видеogramмы процесса воспламенения частиц древесно-угольной смеси в условиях высокотемпературного нагрева. Наименование серий кадров соответствует вариантам расположения частиц угля (размером 2,5-3,5 мм) и древесины (размером 3,5 мм) относительно друг друга, приведенным на рисунке 2.1. Анализ кадров показывает, что зажигание исследовавшихся групп частиц можно условно разделить на три последовательных этапа. После попадания в высокотемпературную газовую среду частицы угля и древесины нагреваются за счет конвекции и излучения (кадр 1). Нагрев инициирует процесс термического разложения основных компонентов древесины (целлюлоза, гемицеллюлоза, лигнина), сопровождающийся выходом летучих. Дальнейший нагрев приводит к термическому разложению органической части угля и, соответственно, выходу газообразных продуктов пиролиза. В результате между частицами топлива формируется газовая смесь, состоящая из воздуха и

продуктов термического разложения древесины и угля. Это смесь воспламеняется при критических значениях температуры и концентраций (кадр 2, рисунок. 3.4).

Анализ кадров видеogramмы показывает, что для всех исследовавшихся вариантов концентраций компонент в системе биомасса/уголь относительно крупная частица древесины зажигается (в газовой фазе) быстрее относительно крупных угольных. Последнее, очевидно, обусловлено более высоким содержанием летучих в древесине и низким пороговым значением температуры [101] инициирования и процесса термического разложения по сравнению с углем. В результате формируется сфера пламени, которая многократно (в 10 раз) превышает размер частицы древесины. В этих условиях радиационный тепловой поток к поверхности частиц угля существенно возрастает. Последнее способствует ускорению процесса термического разложения органической части угля. Это приводит к зажиганию угольной компоненты топливной смеси.

Детальный анализ кадров видеосъемки показывает, что оптимальное (с точки зрения минимизации времени термической подготовки) соотношение в системе древесина/уголь находится в диапазоне 30/70 – 35/65. Увеличение (выше 40%) или уменьшение (ниже 20%) концентрации древесины приводит к росту времени термической подготовки. Это, скорее всего, обусловлено группой влияющих на динамику воспламенения факторов. Можно выделить два основных. Во-первых, в период термической подготовки окружающие древесную частицу угольные играют роль своеобразного «барьера», препятствующего конвективной диффузии продуктов пиролиза древесины во внешнюю газовую область. Соответственно, при малой концентрации угольного топлива (рисунок.3.4а) в смеси газообразные продукты пиролиза древесины быстро «распыляются» в среде окислителя (воздуха) и, соответственно, критическая (по условиям воспламенения) концентрация летучих не достигается.

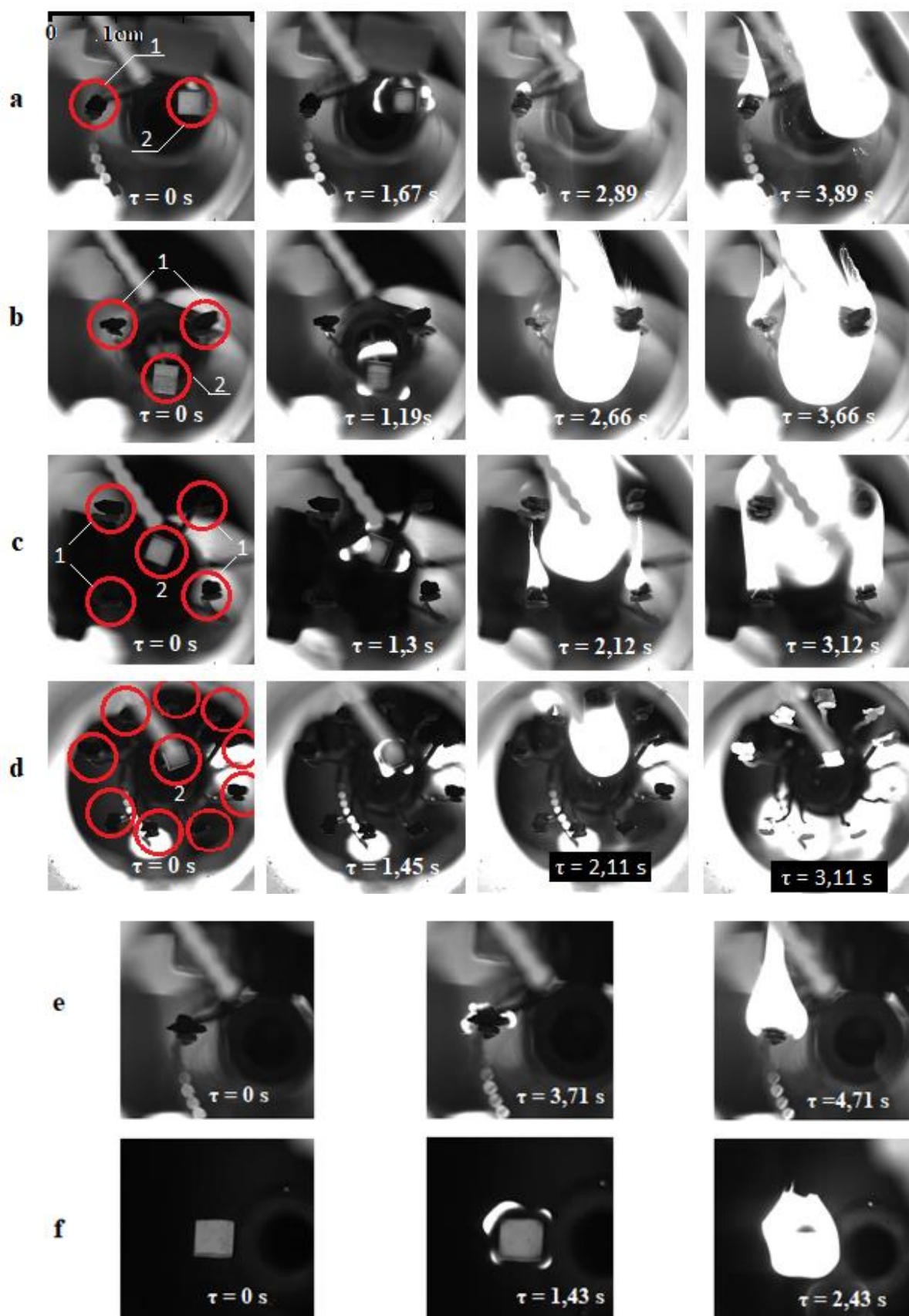


Рисунок 3.4 - Типичные кадры процесса термической подготовки частиц древесины и угля при $T_g=1073$ К при разных концентрациях компонентов (рис.2) 1 – частица угля; 2 – частица древесины.

Во-вторых, увеличение концентрации угольного топлива в смеси приводит к тому, что в период термической подготовки и воспламенения древесной частицы окружающие ее угольные (рисунок 3.4 d1) «блокируют» тепловое излучение от внешней среды. Последнее приводит существенному торможению процесса термического разложения и, соответственно, затягиванию всего периода индукции.

На рисунке 3.5 приведены зависимости времен термической поготовки частиц древесно-угольной смеси при различных соотношениях в системе уголь/древесина [102]. Минимальное значение $T_g=873\text{K}$ соответствует предельным условиям устойчивого зажигания смеси. При $T_g<873\text{K}$ 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.

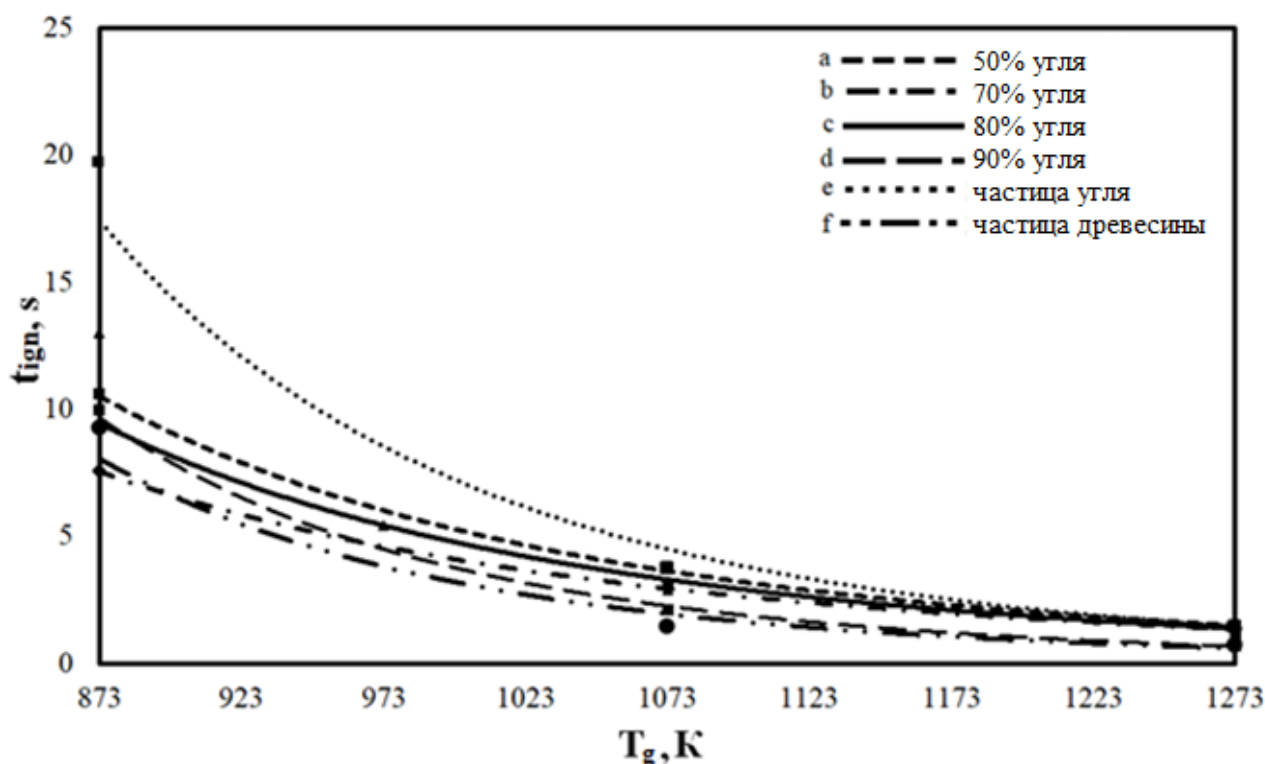


Рисунок 3.5 - Времена термической подготовки в зависимости от температуры внешней среды при различной концентрации угля в смеси «уголь-древесина» (соответствует рисунку 3.4)

Анализ зависимостей $t_{\text{ign}}(T_g)$ (рисунок 3.5) показывает, что с ростом значений T_g от 873К до 1273К влияние концентрации древесной компоненты на динамику воспламенения смеси становится всё менее значимым. При этом необходимо отметить, что как показали испытания [103] котельных установок, работающих на углях с добавлением измельченной древесины, концентрация последней в смеси и не должна превышать 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 3.5) 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 зажигания частиц угля. С ростом температуры среды роль древесины, как «ускорителя» процесса зажигания снижается, и при $T_g=1273\text{К}$ её влияние становится минимальным (рисунок 3.5).

С целью более детального анализа результатов выполненных экспериментов на рисунках 3.6-3.9 приведены зависимости $t_{\text{ign}}(T_g)$ для каждой частицы из исследованных комбинаций. Значения t_{ign} определялись после обработки видеogramм нагрева и зажигания всех частиц исследовавшихся комбинаций (рисунок 2.1).

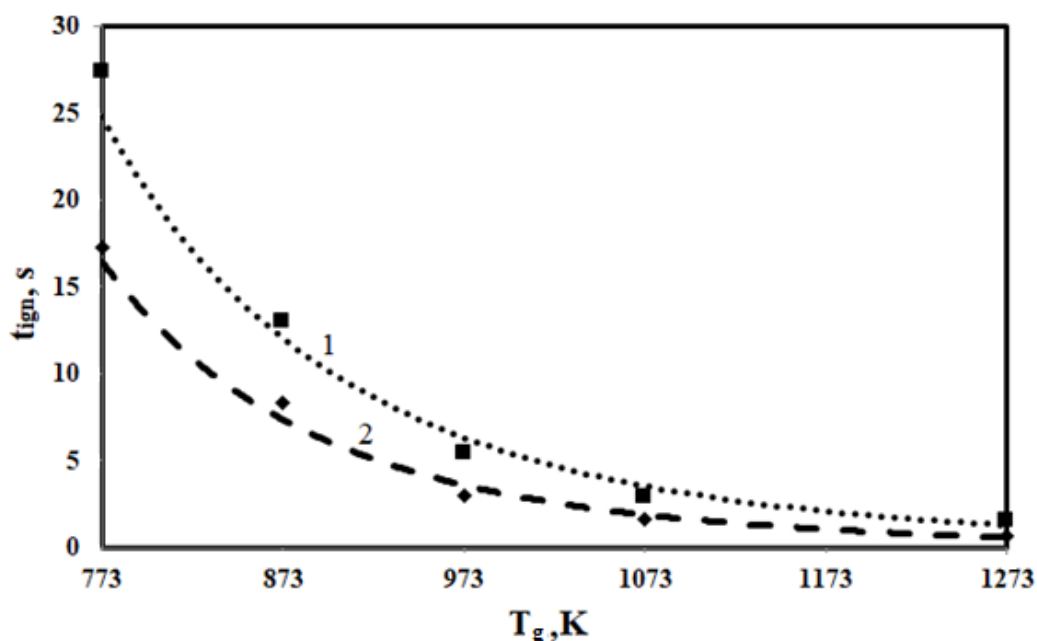


Рисунок 3.6 - Времена термической подготовки частиц угля и древесины в составе древесно-угольного топлива

(соотношение древесина/уголь 50/50 % (Рисунок 2.1а))

1 – частиц угля, 2 – частица древесины

На рисунке 3.6 приведены зависимости времени термической подготовки частиц угля и древесины при массовом соотношении 50/50% в системе древесина/уголь. Можно отметить, что при всех температурах среды ($T_g=773-1273\text{К}$) частицы древесины зажигаются быстрее угля. Но при относительно высоких $T_g=1273\text{К}$ значения t_{ign} древесных и угольных частиц почти идентичны (находятся в пределах доверительных интервалов проведенных экспериментов). В то же время в условиях низкотемпературного нагрева ($T_g=773\text{К}$) разница между временами термической подготовки частиц древесины и угля становится значимой (разница до 35%). Приведенные на рисунке 3.6 зависимости $t_{ign}(T_g)$ показывают, что при малых концентрациях частиц угля и древесины в единичном объеме (рисунок 2.1а) термическая подготовка угольных частиц по сравнению с древесными составляет от 8 с (при $T_g=773\text{ К}$) до 1,0 с (при $T_g=1273\text{ К}$).

На рисунке 3.7 приведены времена термической подготовки одной частицы древесины и двух (соотношение уголь/древесина – 70/30 рисунок 2.1b). Можно отметить, что аналогично другим соотношениям компонент при всех температурах внешней среды древесина загорается быстрее угля. Анализ зависимостей рисунка 3.7 показывает, что обе частицы угля загораются практически одновременно.

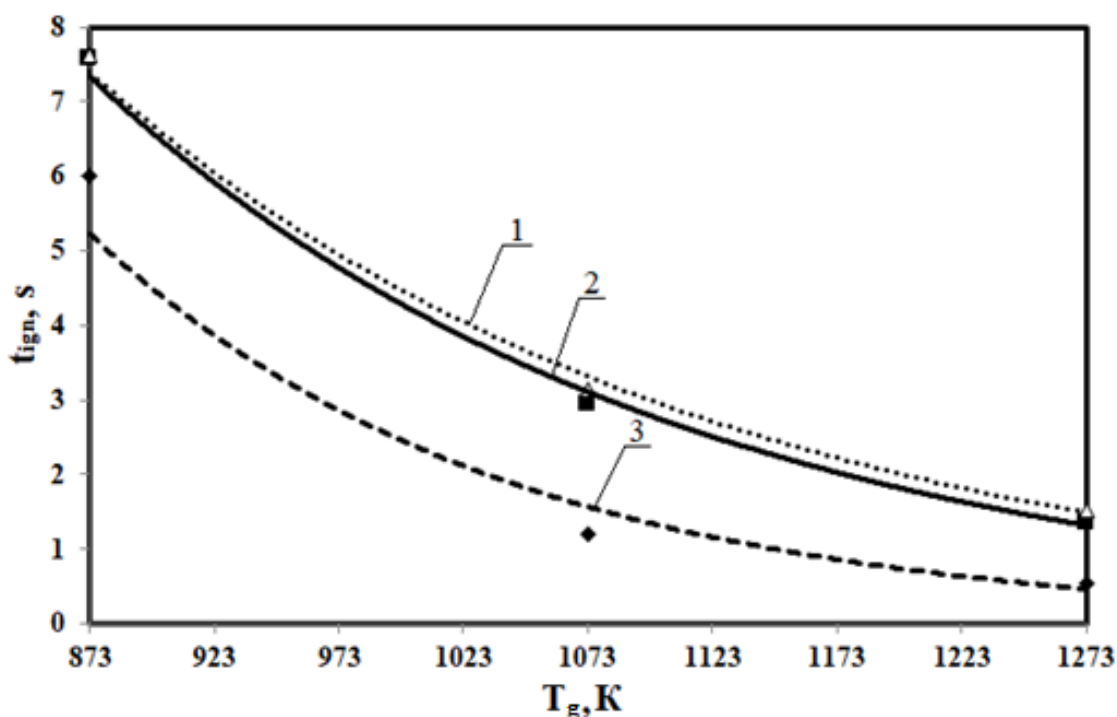


Рисунок 3.7 - Времена термической подготовки частиц угля и древесины в составе древесно-угольного топлива (Рисунок 2.1 b)

1- 2 частицы угля, 3- частица древесины

При дальнейшем повышении доли угля в смеси (рисунок 2.1c) соотношение t_{ign} частиц угля и древесины изменяется заметно (рисунок 3.8). При низких температурах (873 К) разность t_{ign} составляет около 6 с, при высоких T_g (1273 К) - меньше секунды.

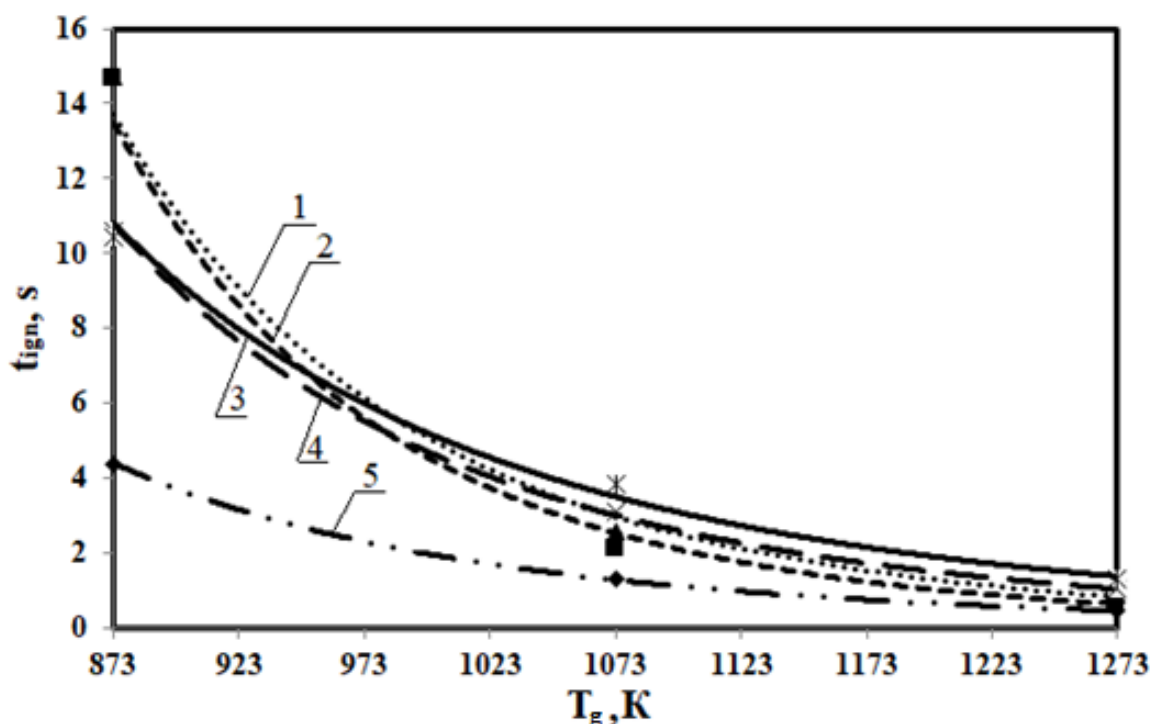


Рисунок 3.8 - Времена термической подготовки частиц угля и древесины в составе древесно-угольного топлива (Рисунок 2.1 с)

1- 4 частицы угля, 5 - частица древесины

Проанализировав зависимости на рисунке 3.8, можно сделать вывод, что расположение частиц не оказывает существенного влияния на время зажигания, в отличие от состава топлива. При концентрации уголь/древесина 80/20% и относительно низких температурах $T_g=873$ К разница времен термической подготовки частиц угля и частицы древесины достигает 10 секунд, то есть время термической подготовки угля в 3 раза выше t_{ign} древесины. При сопоставлении зависимостей рисунка 3.8 и рисунка 3.5 можно сделать вывод, что 20% древесины в смеси с углем, снижает время термической подготовки (при температуре 1073 К) от 15 до 25%.

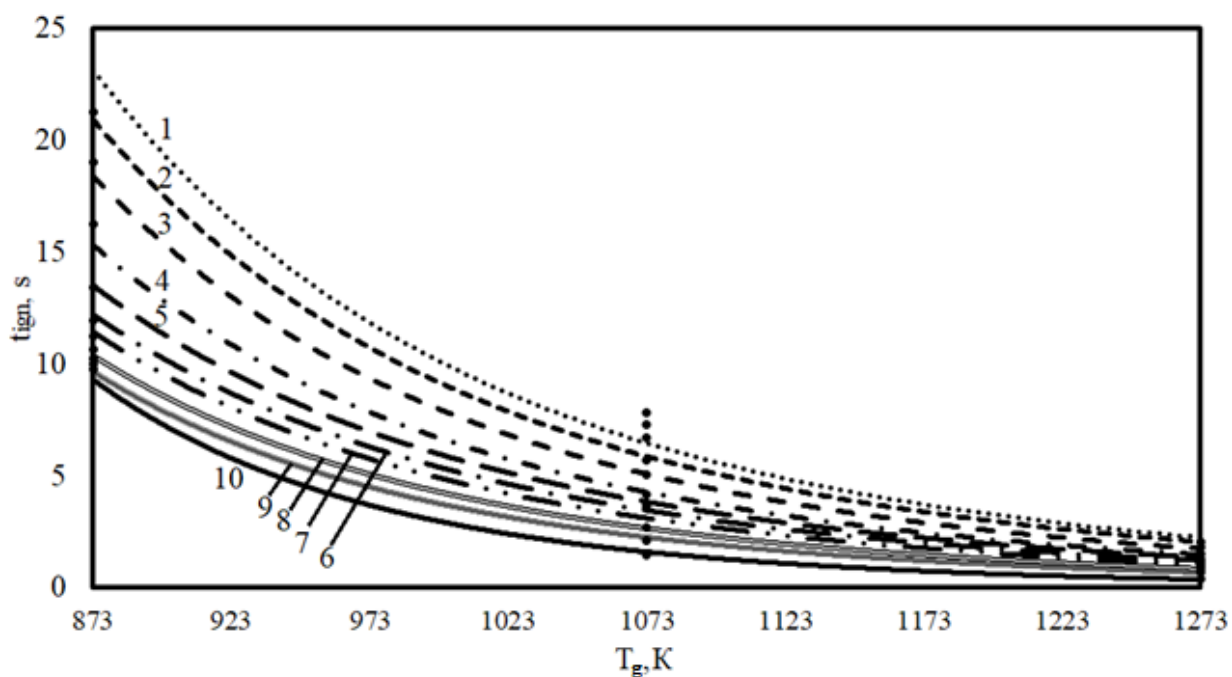


Рисунок 3.9 - Времена термической подготовки частиц угля и древесины в составе древесно-угольного топлива (Рисунок 2.1 d)

1- 9 частицы угля, 10 - частица древесины (номера кривых соответствуют номерам частиц топлива, приведенным на схеме – рисунок 2d)

На рисунке 3.9 приведены зависимости времён термической подготовки частиц древесины и угля при концентрации смеси 90/10% (уголь/древесина). Видно, что на характеристики зажигания древесно-угольной смеси значительное влияние оказывает концентрация частиц угля. Можно отметить, что частицы верхнего ряда (частицы 5-9 Рисунок 2.1d) зажигаются раньше частиц нижнего ряда (частицы 1-4 Рисунок 2.1d). Это обусловлено тем, что газообразные продукты пиролиза нижних частиц поднимаются вверх и концентрация газообразных продуктов пиролиза вокруг частиц верхнего ряда становится существенно выше концентрации летучих вокруг частиц нижнего ряда. В результате времена термической подготовки последних существенно (в 2-3 раза в зависимости от T_g) больше.

Значения времен термической подготовки частиц нижнего ряда в смеси (кривые 1-4) выше чем одиночной частицы угля (Рисунок 3.5 e). Аналогичный вывод можно сделать после анализа зависимостей времен термической

подготовки частиц древесины. При относительно низкой температуре окружающей среды t_{ign} частицы древесины в смеси выше на 20% по сравнению с одиночной частицей (Рисунок 3.5 f).

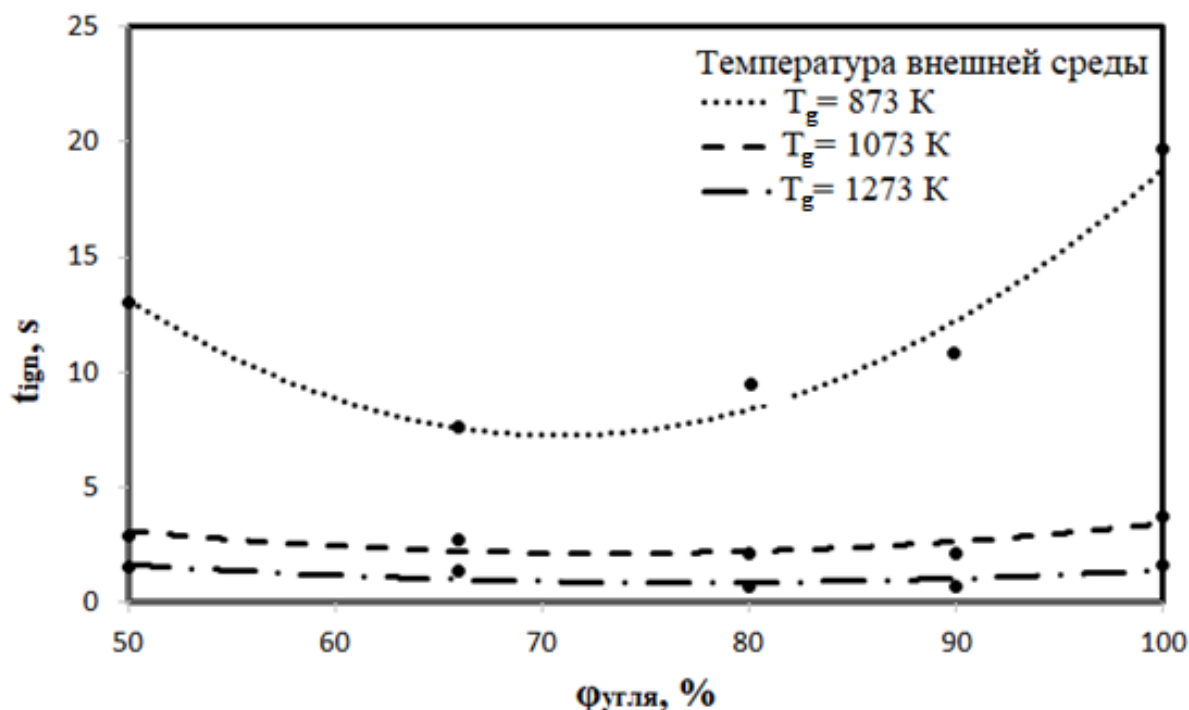


Рисунок 3.10 - Времена термической подготовки частицы угля в зависимости от концентрации угольного топлива в системе «уголь-древесина»

С целью более наглядной иллюстрации влияния температуры среды на времена термической подготовки частиц угля при разной концентрации компонент смеси основные результаты экспериментов приведены на рисунке 3.10 в виде зависимостей $t_{\text{ign}}(\varphi)$ при разных T_g . Анализ зависимостей, приведенных на рисунке 3.10, показывает что при всех температурах внешней среды есть «некая оптимальная» (по условию минимизации $t_{\text{ign}}^{\text{coal}}$) концентрация угольной компоненты в смеси (имеет место экстремум кривой $t_{\text{ign}}^{\text{coal}}(T_g)$). Можно отметить, что минимальные времена термической подготовки угольных частиц зарегистрированы при воспламенении топливной смеси, концентрация угля в которой составляет 70-75%. Увеличение φ_{coal} и снижение приводит к росту времени термической

подготовки. Это, скорее всего, обусловлено тем, что при малой концентрации угольной компоненты газообразные продукты пиролиза быстро «распыляются» во внешнюю газовую область и зажигание затягивается (вследствие малой концентрации горючего). При большой концентрации угля последний выступает в качестве «защитного» экрана, блокирующего тепловое излучение внешней среды к частице древесины. В результате нагрев и пиролиз древесной компоненты топлива существенно замедляется.

Приведенные на рисунке 3.10 зависимости $t_{\text{ign}}(\varphi_{\text{угля}})$ показывают, что при температурах внешней среды 1073К и более частица древесины в смеси незначительно (в пределах 1,4%) влияет на времена термической подготовки основного топлива – угля. При относительно низких T_g и, соответственно, высоких t_{ign} влияние древесной компоненты значительно.

3.3. Влияние расстояния между частицами древесины и угля на характеристики их совместной термической подготовки

На рисунке 3.11 приведены кадры типичных видеogramм процессов воспламенения и горения частиц древесно-угольного топлива (с характерным размером $\delta=3\text{мм}$). Температура внешней среды $T_g=1073\text{ К}$. Время термической подготовки одиночной частицы древесины $t_{\text{ign}}\approx 1,43\text{ с}$; частицы угля $t_{\text{ign}}\approx 3,71\text{ с}$.

Как показывают эксперименты [104] совместное воспламенение относительно крупных частиц древесно-угольного топлива происходит, как правило, в два этапа. На первом этапе происходит газофазное воспламенение частицы древесной биомассы. В результате существенно интенсифицируется нагрев частицы угля. Последнее приводит к ускорению процесса термического разложения органической части угля и, соответственно, выхода летучих. При достижении критической концентрации горючего в малой окрестности частиц происходит их газофазное воспламенение.

Стоит отметить, что воспламенение частицы древесины также протекает в несколько взаимосвязанных стадий. Каждую из них можно охарактеризовать

доминированием одного конкретного физического процесса (инертный нагрев, испарение воды, термическое разложение органической части топлива, воспламенение, горение летучих, зажигание и горение коксового остатка).

В начальный период времени после попадания частиц древесно-угольного смесового топлива в высокотемпературную окислительную среду нагрев инициирует испарение воды и термическое разложение древесиной компоненты топлива. Детальный (при большом увеличении) анализ кадра показывает характерное потемнение поверхности частицы древесины в районе ребер куба (формирование коксового остатка в результате пиролиза). После нагрева до температур начала горения происходит воспламенение летучих. Можно отметить, что зона воспламенения локализуется в районе ребер куба. Это обусловлено тем, что такие точки являются своеобразными концентраторами тепловых потоков, поступающих от поверхностей нагрева.

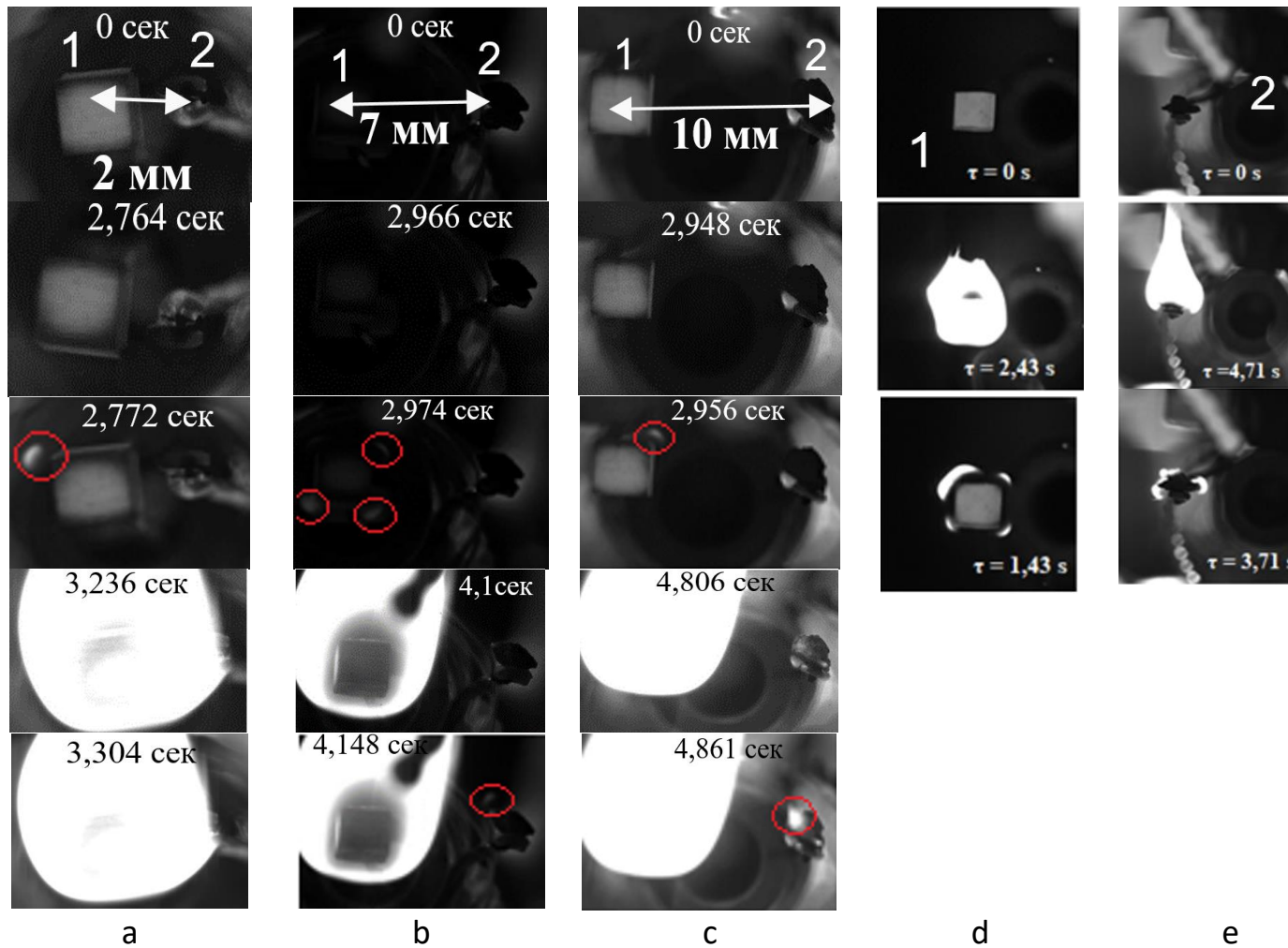


Рисунок 3.11 - Типичные кадры процесса термической подготовки частиц древесины и угля при $T_g = 1073\text{K}$.

1 – частица древесины; 2 – частица угля.

Обозначение кадров соответствует схеме, приведенной на рисунке 2.2

После зажигания летучих формируется сфера пламени, размер которой в несколько раз (2-3) превышает характерный размер частицы древесной биомассы. В результате горения газообразных продуктов пиролиза древесины существенно интенсифицируется (вследствие усиления теплового излучения) нагрев угольной компоненты топливной смеси. В результате термическое разложение угля и выход летучих также ускоряются - происходит воспламенение частицы угля.

На рисунке 3.12 приведены зависимости времен термической подготовки частиц древесины и угля (как по отдельности, так и в составе древесно-угольной смеси) от температуры внешней среды. Анализ зависимости показывает, что температура окислителя оказывает существенное влияние на характеристики и условия воспламенения. При этом стоит отметить, что зависимости $t_{ign}(T_g)$ нелинейная. Это обусловлено существенным влиянием комплекса совместно-протекающих теплофизических (инертный радиационно-конвективный нагрев, испарение внутриводной 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.

Также анализ зависимостей на рисунке 3.12 показывает, что относительно крупные одиночные древесные частицы практически всегда зажигаются раньше относительно крупных угольных. Но при этом по результатам экспериментов установлено, что при расстоянии между частицами $d=7\text{мм}$ (схема - а (рисунок 2.2)) в условиях относительно низких температур внешней среды ($T_g \approx 873\text{К}$) времена термической подготовки частиц угля и биомассы сопоставимы. Это, скорее всего, обусловлено тем, что в условиях низкотемпературного нагрева ($T_g \approx 873\text{К}$) 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.

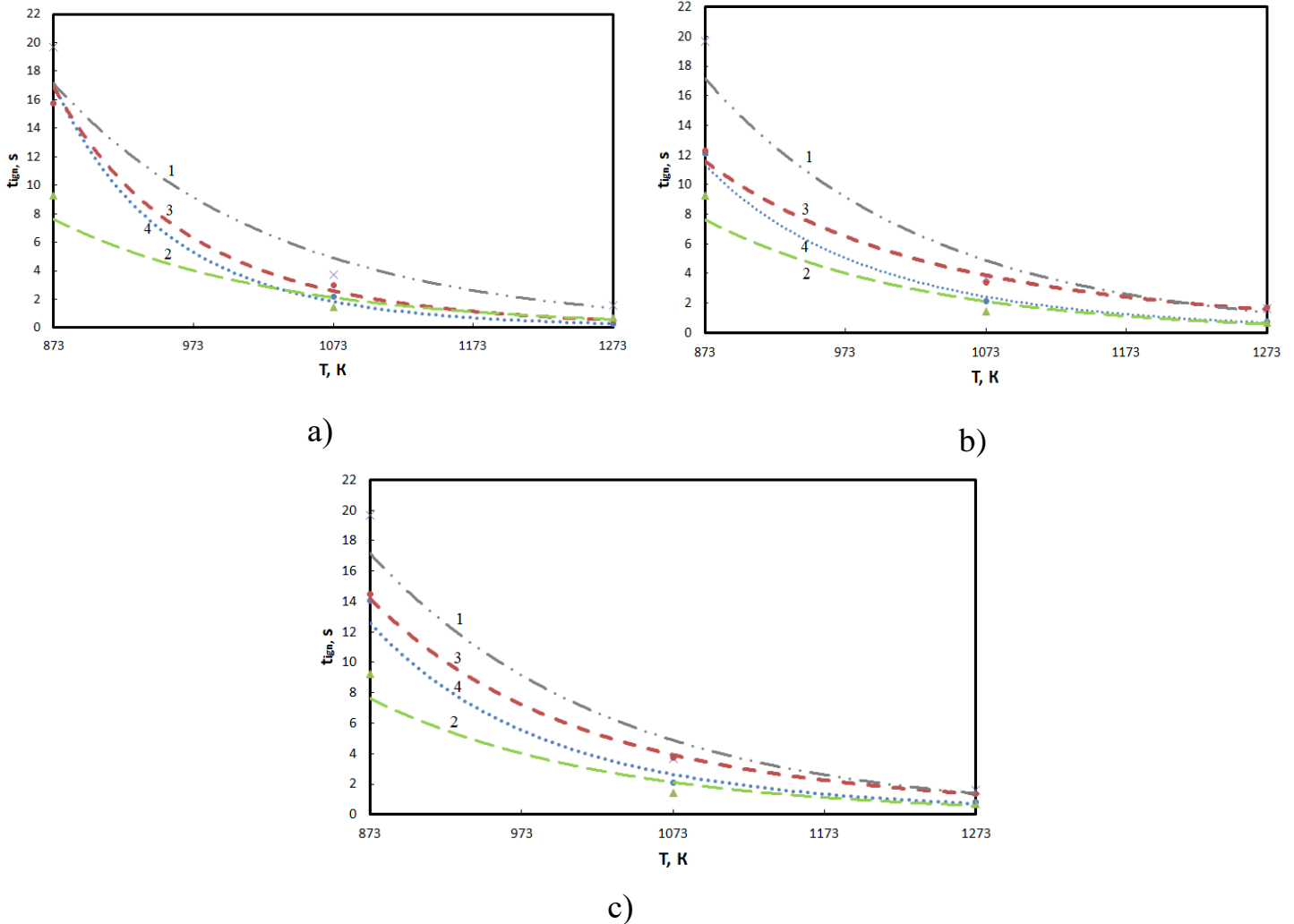


Рисунок 3.12 - Зависимости времён термической подготовки частиц угля и древесной биомассы от температуры окружающей среды при различных вариантах расположения частиц. Обозначения рисунков (а-с) соответствуют обозначениям, приведенным на рисунке 2.2:

1 - одна частица угля, 2 – одна частицы древесины, 3 – частица угля при совместной термической подготовке древесина/уголь, 4 – частицы древесины при совместной термической подготовке древесина/уголь

Также стоит сказать, что при нагреве в условиях относительно низких температур ($T_g \leq 873\text{K}$) окислителя значения t_{ign} частиц угля и биомассы в составе смеси находятся в диапазоне между временами термической подготовки одиночных частиц угля t_{ign}^{coal} и древесины t_{ign}^{wood} (где значения t_{ign}^{wood} и t_{ign}^{coal} являются нижней и верхней оценками времен термической подготовки).

Анализ зависимостей $t_{ign}(T_g)$ при низких температурах внешней среды позволяет сделать вывод, что в условиях совместного сжигания частицы угля и древесины оказывают существенное влияние на динамику воспламенения друг друга. Можно сказать, что частица древесины существенно ускоряет процесс зажигания угольной частицы, в тоже время последняя существенно замедляет зажигание древесины. Увеличение температуры окислителя приводит к тому, что времена термической подготовки частиц угля и древесины в составе смеси становятся сопоставимы со значениями t_{ign} одиночных частиц угля и древесины, соответственно. Также стоит сказать, что анализ зависимостей, приведенных на рисунке 3.12, показывает, что расстояние между частицами угля и биомассы оказывает существенное влияние на характеристики и условия зажигания.

На рисунке 3.13 приведены зависимости времен термической подготовки частиц угля (рисунок 3.13 а) и древесной биомассы (рисунок 3.13 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 $T_g=873\text{K}$ зависимость $t_{ign}(L)$ параболическая. Другими словами, существует некоторое оптимальное (по условиям зажигания) расстояние между

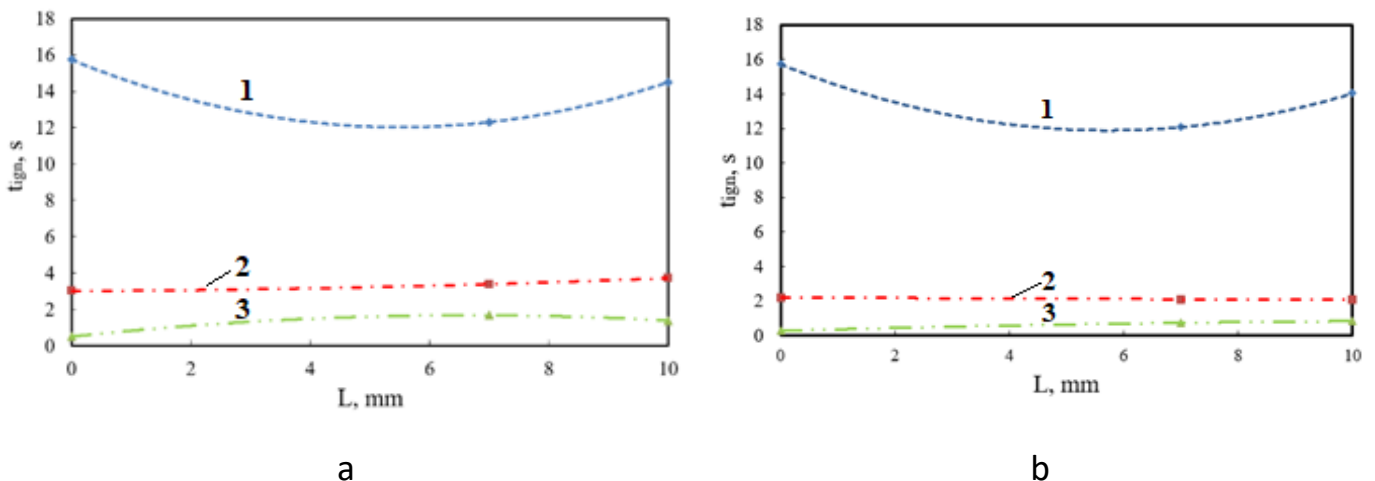


Рисунок 3.13 - Зависимости времён термической подготовки частицы угля (а) и древесины (б) от среднего расстояния между ними при разных температурах окружающей среды: 1 – 873 К; 2 – 1073К; 3 – 1273К.

частицами топлива. Тенденция характерна при зажигании как угольной, так и древесной частиц. С увеличением температуры внешней среды влияние расстояния между частицами на характеристики их зажигания существенно уменьшается.

3.4. Термическая подготовка группы частиц древесной биомассы

Экспериментальные исследования процессов зажигания 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 видеокadres экспериментов с частицами древесины при температуре внешней среды $T = 873 \text{ K}$ приведены на рисунке 3.14.

На кадрах рисунок 3.14 (I) показаны частицы (все пять исследовавшихся вариантов их расположения) в момент начала теплового воздействия ($t = 0 \text{ c}$), на кадрах рисунок 3.14 (II) в момент зажигания (появления пламени - t_{ign}). Кадры рисунок 3.14 (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 $T_g = 873 \text{ K}$ 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 увеличивается кратно площадь 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 газофазного зажигания летучих продуктов пиролиза древесной биомассы.

Анализ результатов экспериментов [105] (например, рисунок 3.14 с) показывает, что верхняя частица совокупности нескольких начинает гореть раньше остальных. При этом газофазное 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 и паровых котлов, по мере удаления от границы облака распыленных частиц, которые рассеивают и поглощают излучение, снижается интенсивность лучистого теплового потока.

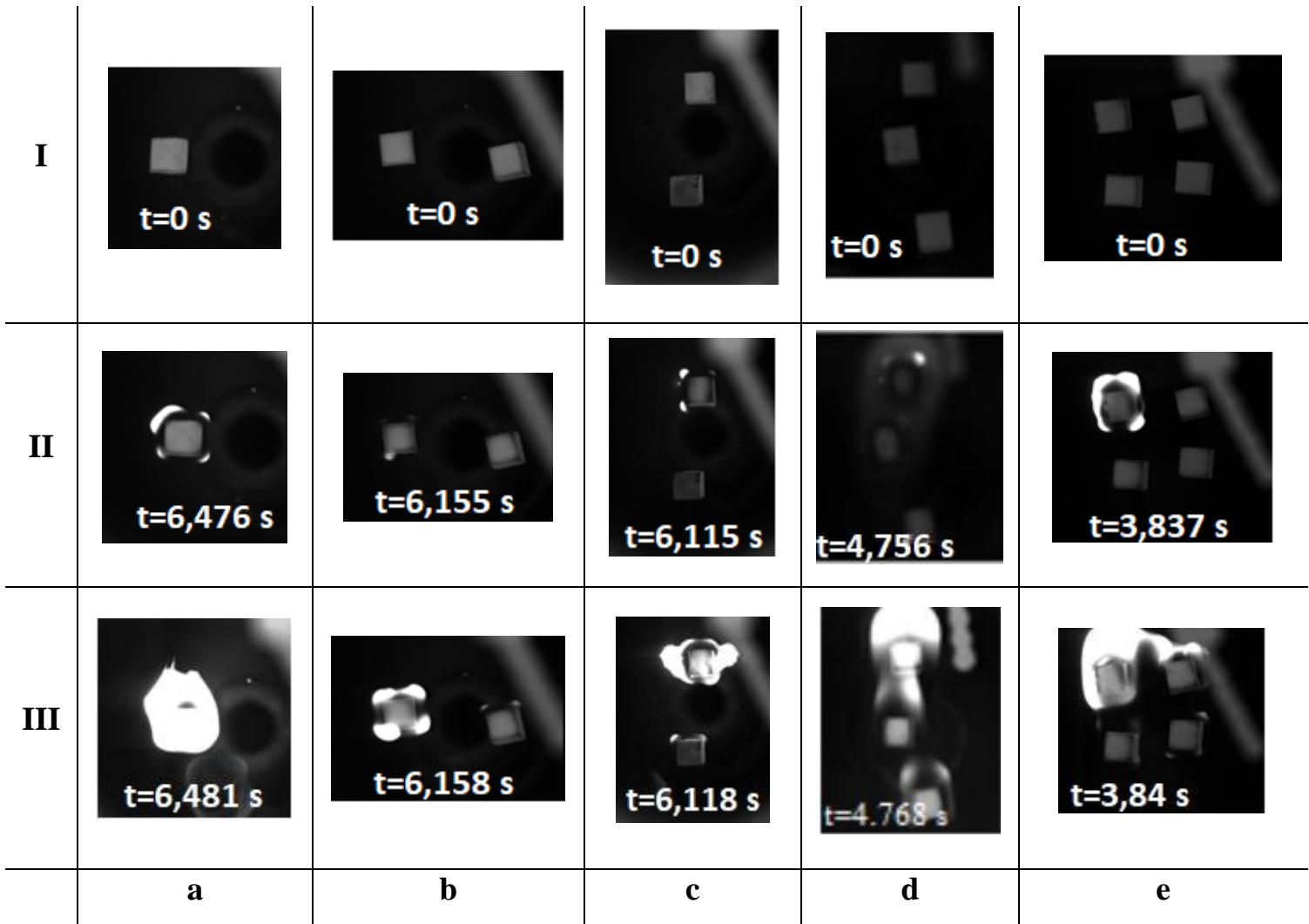


Рисунок 3.14 - Типичные кадры процесса термической подготовки частиц древесины при $T_g=873$ К: 1 – одна (рисунок 3.14 a), 2 – две (рисунок 3.14 b), 2 – две (рисунок 3.14 c), 3 – три (рисунок 3.14 d), 4 – четыре (рисунок 3.14 e)

На рисунок 3.15 приведены результаты статистической обработки экспериментальных данных - зависимости времен термической подготовки разного числа частиц группы от температуры среды.

Анализ приведенных на рисунок 3.15 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 3.14 h хорошо видно, что первыми в группе из четырех

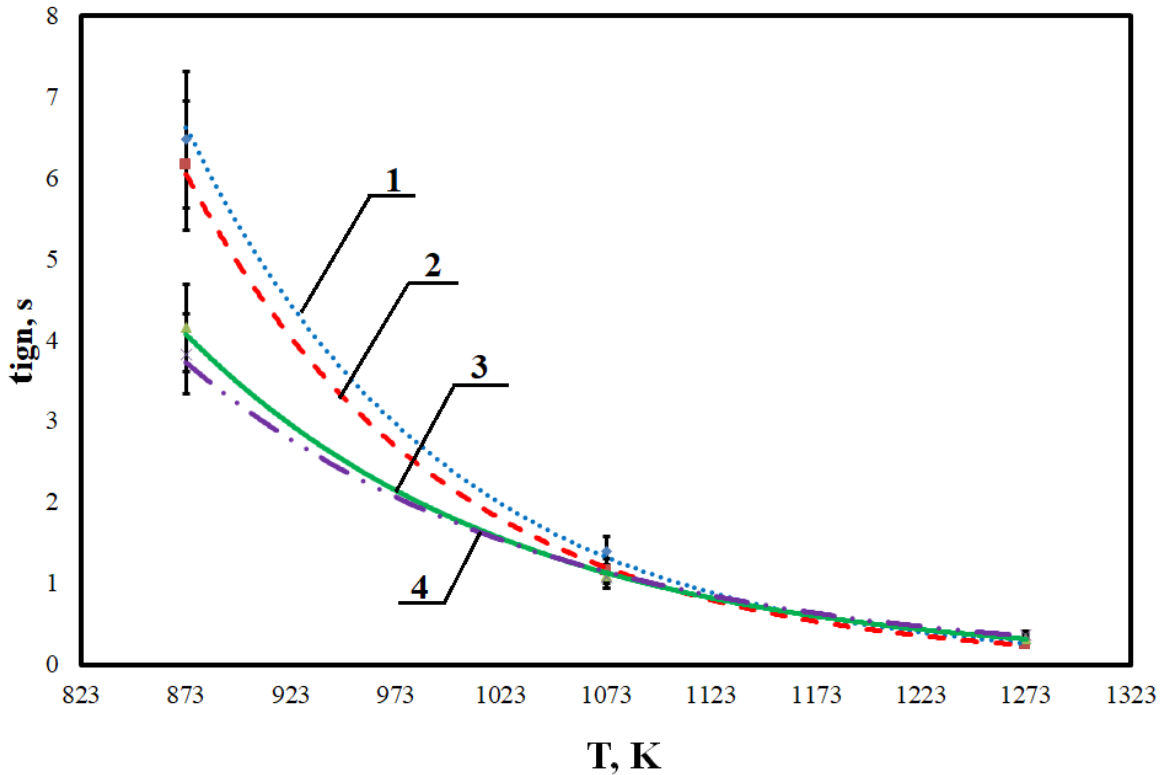


Рисунок 3.15 - Зависимости времен термической подготовки частиц древесины от температуры внешней среды при разном числе частиц в группе: 1 – одна (рисунок 3.14 а), 2 – две (рисунок 3.14 с), 3 – три (рисунок 3.14 d), 4 – четыре (рисунок 3.14 е)

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 [106]. 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 [107], 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.

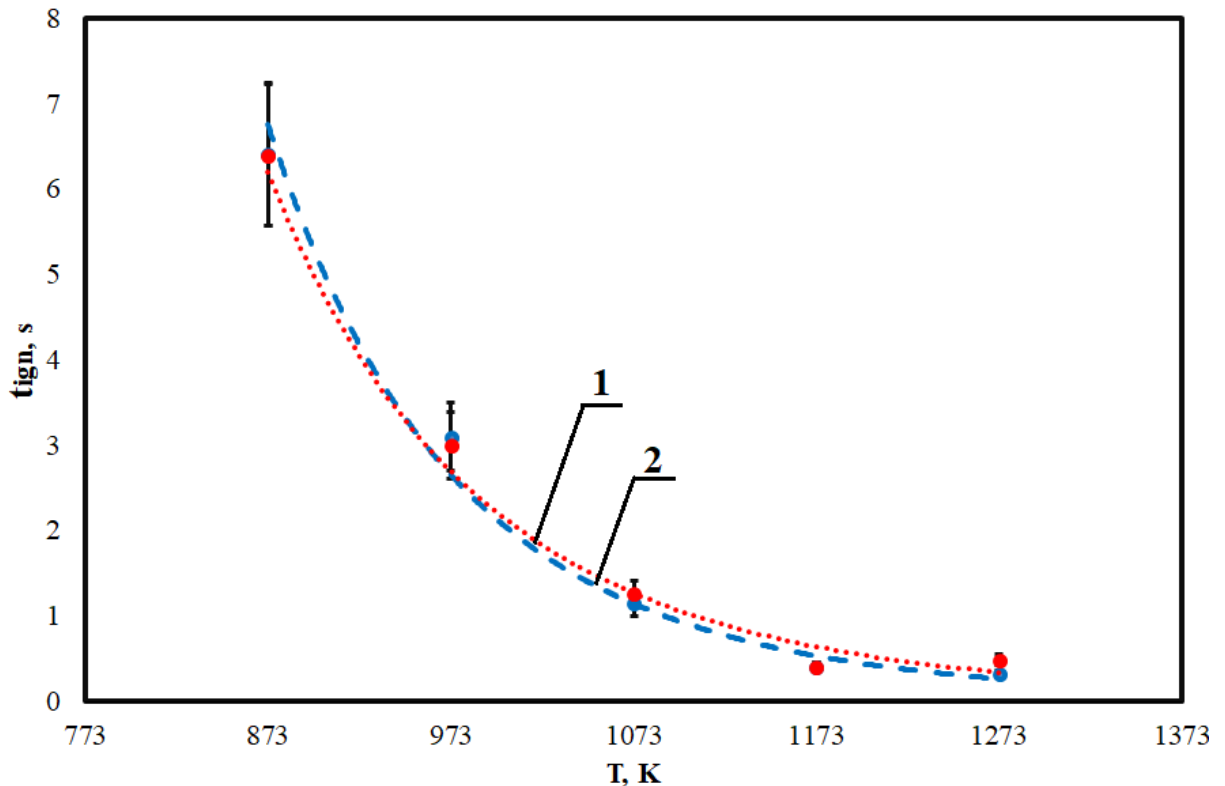


Рисунок 3.16 - Зависимости времен термической подготовки двух частиц древесины от температуры внешней среды (рисунок 3.14 с):

1- нижняя частица, 2- верхняя частица

Анализ видеogramм проведенных экспериментов также даёт основание для вывода о том, что при зажигании группы из четырех частиц горение всегда начинается на внешних по отношению к центру симметрии этой группы (верхних) поверхностях частиц (рисунок 3.14 h). Эти экспериментальные данные наглядно иллюстрируют доминирующую роль лучистого нагрева при зажигании большой совокупности частиц. Последнее же даёт основания для вывода и о том, что при оценке условий и характеристик зажигания большой группы частиц следует учитывать доминирование процесса излучения в топочной среде.

Результаты выполненных экспериментов показывают также, что зажигание частиц каждого нижнего ряда (рисунках 3.16-3.18) происходит с задержкой по отношению к частицам верхнего ряда не более 0,01 с, т.е. практически

одновременно при расстояниях между рядами равными характерным размерам частиц. Эта закономерность обуславливается тем, что при горении частиц каждого верхнего ряда совокупности многократно увеличивается лучистый

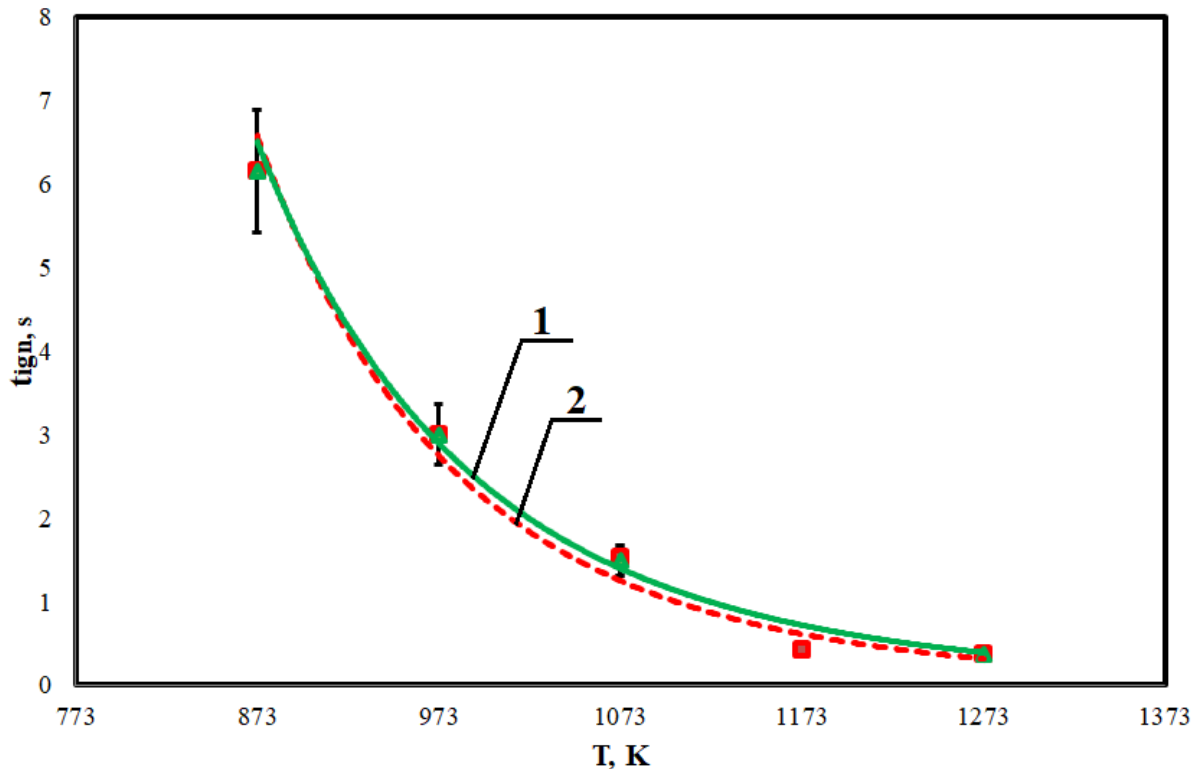


Рисунок 3.17 - Зависимости времен термической подготовки древесины от температуры внешней среды (рисунок 3.14 b): 1 – правая частица, 2 – левая частица

тепловой поток к поверхности частиц следующего (нижнего) ряда (пламя достигает поверхности частиц нижнего ряда). В результате зажигание последних происходит с минимальными (не более чем 0,1 с, как показали эксперименты) временами термической подготовки по отношению ко времени начала горения частиц верхнего ряда. Следовательно, в условиях, соответствующих времени термической подготовки первой (самой верхней частицы) от 6,5 с до 3,8 с, воспламенение большой совокупности частиц (до 10 рядов) произойдет за время не более одной секунды.

В то же время эксперименты с двумя частицами, ориентированными идентично относительно лучистого теплового потока, показывают (рисунок 3.16), что их времена термической подготовки не отличаются. В дополнение к

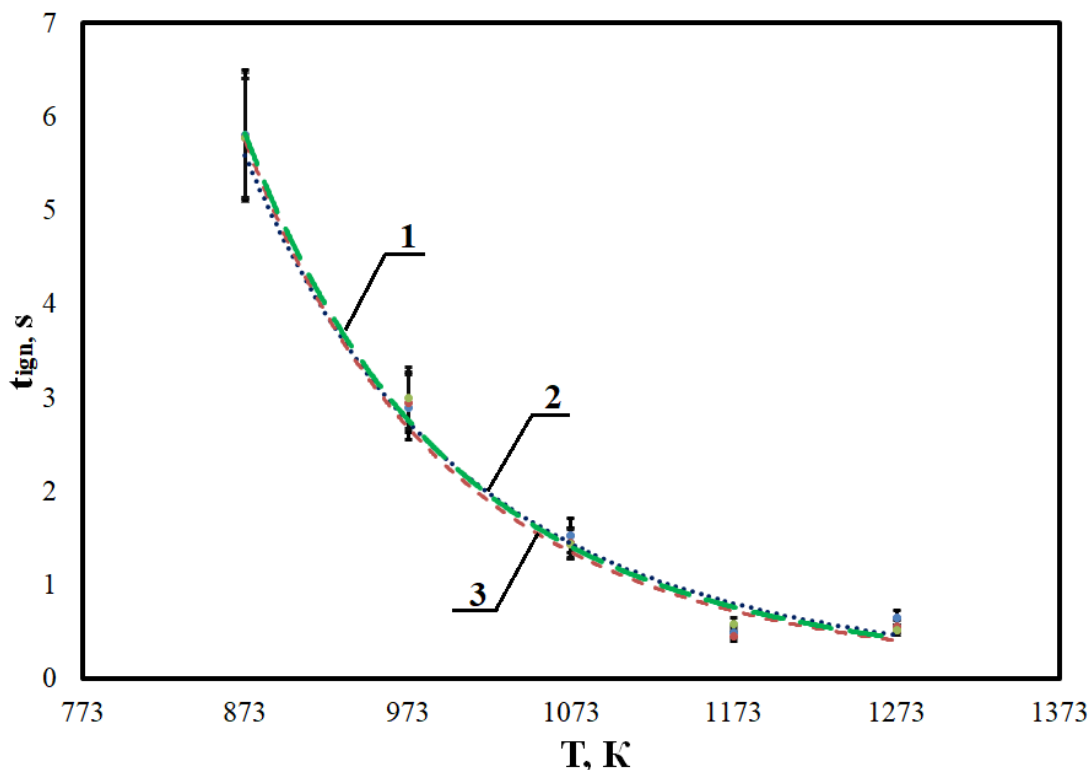


Рисунок 3.18 - Зависимости времен термической подготовки частиц древесины от температуры внешней среды (номера кривых соответствуют номерам частиц, приведенным на рисунок 3.14 d). 1 – нижняя, 2 – средняя, 3 - верхняя

экспериментам, результаты которых приведены на рисунках 3.16-3.17., выполнены эксперименты с группами из трех частиц, по-разному ориентированных относительно друг друга. Результаты, приведенные на рисунке 3.18, показывают, что, как и во всех рассмотренных выше вариантах (рисунок 3.15) первой начинают гореть верхние частицы группы, а время задержки зажигания нижних незначительно (на 0,025 сек) отличается от таких времен, установленных для верхних частиц.

Анализ и обобщение результатов выполненных экспериментов являются основой для формулировки физической модели процесса зажигания группы частиц древесной биомассы, в условиях, соответствующих условиям нагрева в топочных пространствах водогрейных котлов.

Известно, что в топках таких котлов скорости движения малых по размеру частиц любого твердого топлива (уголь, древесина, другие виды биомассы) незначительно (не более 5-10%) отличаются от скоростей движения несущей

среды – смеси нагретого воздуха и продуктов сгорания. При этом, чем меньше размер топливной частицы, тем меньше разность скоростей дисперсной и несущей фаз. По этим причинам в топках водогрейных и паровых котлов доминирующим является лучистый нагрев частиц топлива. Соответственно, интенсивность нагрева каждой частицы зависит от ее положения относительно других – чем ближе частица расположена к поверхностям нагрева, тем больше тепловой поток к ее поверхности. Если же в среду нагретого газа через форсунки вдувается много частиц, то интенсивность нагрева каждой определяется её положением в струе, выходящей из форсунки. Чем ближе частица к периферии струи, тем быстрее она нагревается в условиях доминирования лучистого теплового потока.

При интенсивном нагреве температура каждой частицы растет, и после достижения температуры начала термического разложения начинается пиролиз древесины с образованием летучих (газообразных продуктов термического разложения). Последние вдуваются в газовую среду вблизи поверхности частицы. Если концентрации φ летучих недостаточна, то зажигание не происходит. Отличие механизма зажигания совокупности нескольких частиц от механизма зажигания одиночной заключается в том, что концентрация горючих газов вокруг каждой частицы большой совокупности (например, после выхода струи из форсунки при распылении твердого топлива) будет разной.

Максимальное значение φ достигается вблизи поверхности частицы, расположенной на границе области частиц (например, на границе струи), не только вследствие того, что тепловые потоки к поверхности таких частиц максимальны. Кроме этого важную роль играют процессы пиролиза частиц, находящихся не на границе облака (можно сказать, в его ядре). Такие частицы также нагреваются, но существенно менее интенсивно, так как частицы, расположенные на границе облака (или вблизи её) поглощают и рассеивают излучение. В результате процессы пиролиза частиц в ядре облака так же происходят (все они окружены газами с температурой выше температуры начала пиролиза), но с существенно меньшими скоростями. Поэтому газофазное

горение летучих может начаться только в малой окрестности частиц, расположенных на границе облака. Кроме того, необходимо учитывать и процессы фильтрации газообразных продуктов разложения из ядра (центральной части) облака к его периферии вследствие небольшого перепада давления, обусловленного выходом летучих при пиролизе всех частиц совокупности. По этой причине концентрация горючих газов вокруг частиц, расположенных вблизи границы облака, будет выше, чем у расположенных в ядре. Соответственно, первыми начинают гореть крайние частицы, условия зажигания которых наиболее благоприятны.

Так же необходимо отметить, что после зажигания расположенных на границе облака и вблизи её частиц условия нагрева частиц «второго» слоя, расположенных на некотором расстоянии от границы облака, кардинально изменяются – частицы «второго» слоя попадают в пламя расположенных на границе частиц. Тепловой поток к поверхности частиц «второго» слоя в результате существенно увеличивается и происходит зажигание газов вблизи поверхности частиц «второго» слоя. Комплекс описанных выше процессов приводит к тому, что, хотя каждая частица второго, третьего и других слоев по мере удаления от границы облака начинает гореть с некоторой задержкой по сравнению с частицами, расположенными на границе, но времена этих задержек малы и не превышают в наиболее типичных условиях работы 0,1 секунды ко времени начала горения предшествующего слоя.

Результаты проведенных экспериментальных исследований также показывают, что при проведении опытно-конструкторских работ по отработке технологий сжигания измельченной древесины в топках паровых и водогрейных котлов нельзя использовать в качестве базового параметра время термической подготовки одиночной частицы древесины. Это объясняется тем, что условия и характеристики зажигания частиц большой (более четырех) совокупности достаточно существенно отличаются от условий и характеристик зажигания одиночной частицы.

Установленные, по результатам выполненных экспериментов, закономерности иллюстрируют преимущества использования древесины в качестве второй компоненты топлива паровых и водогрейных котлов (или добавки к углям) по сравнению с водоугольными [108] и органоводоугольными [109] топливами. Последнее особенно актуально, если в качестве функции цели рассматривать концентрации выбросов оксидов серы и азота, а также летучей золы в продуктах сгорания. Потери в теплоте сгорания (по сравнению с однородным углем) на единицу массы топлива минимальны (не более 10%) у смеси угля и древесины (и даже однородной древесины). При сжигании же ВУТ и ОБУТ потери теплоты существенно выше вследствие затрат энергии на нагрев и испарение воды. Концентрации же всех антропогенных оксидов и летучей золы в продуктах сгорания древесной биомассы или древесно-угольной смеси на единицу массы исходного топлива, как показали эксперименты [110], не выше, чем при сжигании ВУТ и ОБУТ (во многих случаях даже ниже) [111]. Главным же преимуществом древесины или древесно-угольной смеси является их технологичность [112]. Технологии подготовки водоугольных или органоводоугольных суспензий существенно сложнее подготовки древесно-угольных смесей [113]. Другим важнейшим преимуществом последних являются малые времена задержки зажигания по сравнению с ВУТ и ОБУТ (в идентичных условиях нагрева они почти в десять раз меньше).

Также необходимо учитывать, что, как показали эксперименты [114, 115], процессы распыления ВУТ и ОБУТ сопряжены с эрозией материала форсунок, через которые эти суспензии подаются в камеры сгорания. В этой связи необходимо использовать для изготовления форсуночных устройств или эрозионостойкие металлы (например, молибден или вольфрам), что экономически нецелесообразно в энергетике, или использовать специальные системы распыления с формированием слоя воды у поверхности форсунок. При сжигании же древесной биомассы в качестве основного топлива или добавки к основному (углю) не требуется создания специальных эрозионостойких

форсунок - могут использоваться применяющиеся в пылеугольных котельных установках- горелки.

Подводя итоги проведенным экспериментальным исследованиям следует отметить, что основным и абсолютно не очевидным их результатом является вывод о том, что зажигание любой счетной совокупности частиц древесины происходит заметно быстрее, чем зажигание одиночной частицы в идентичных (по тепловым потокам) условиях. При этом чем больше частиц в совокупности, тем меньше время термической подготовки первых частиц. По этим причинам опубликованные ранее результаты исследований процессов зажигания одиночных частиц древесной биомассы, например [102], могут использоваться только как верхние оценки времен термической подготовки первых частиц большой совокупности – реальные значения этих времен будут в 2-2,5 раза ниже.

В дополнение к выше изложенному целесообразно подчеркнуть, что установленные в проведенных экспериментах закономерности дают основания и для развития математических моделей, описывающих процессы зажигания частиц твердых топлив и композиций на их основе (например [116]). Основой вывод, который можно сделать: в области высоких (более 1100 К) температур при расчете времен термической подготовки частиц (или капель на начальной стадии) топлив можно использовать модель зажигания одиночных частиц или капель [117]. При анализе условий и характеристик зажигания при относительно низких температурах необходимо использовать более сложные модели, описывающие процессы переноса теплоты и массы в пространстве между частицами.

3.5. Влияние влажности на эффективность использования древесины как компоненты топлива в промышленной теплоэнергетике

На рисунок 3.19 представлены результаты экспериментов с влажными частицами древесины в виде традиционной для теории зажигания

конденсированных веществ форме – зависимости времен термической подготовки от температуры среды.

Анализ зависимостей $t_{ign}(t)$ (рисунок 3.19) показывает [118], что вид древесины может оказывать достаточно значимое (до 25%) влияние на характеристики и условия воспламенения её частиц при относительно умеренных температурах среды. Так статистический анализ по непараметрическому критерию Вилкоксона-Мана-Уитни [119] показывает, что времена термической подготовки частиц древесины на основе лиственницы существенно отличаются от значений $t_{ign}(t)$ сосны, кедра и осины. При этом такой же статистический сравнительный анализ значений $t_{ign}(t)$ частиц кедра и осины показывает, что при критерии значимости $\zeta=0.01$ в условиях относительно низких температур внешней среды ($T_g \sim 873\text{K}$) времена термической подготовки этих двух видов древесины не отличаются статистически значимо.

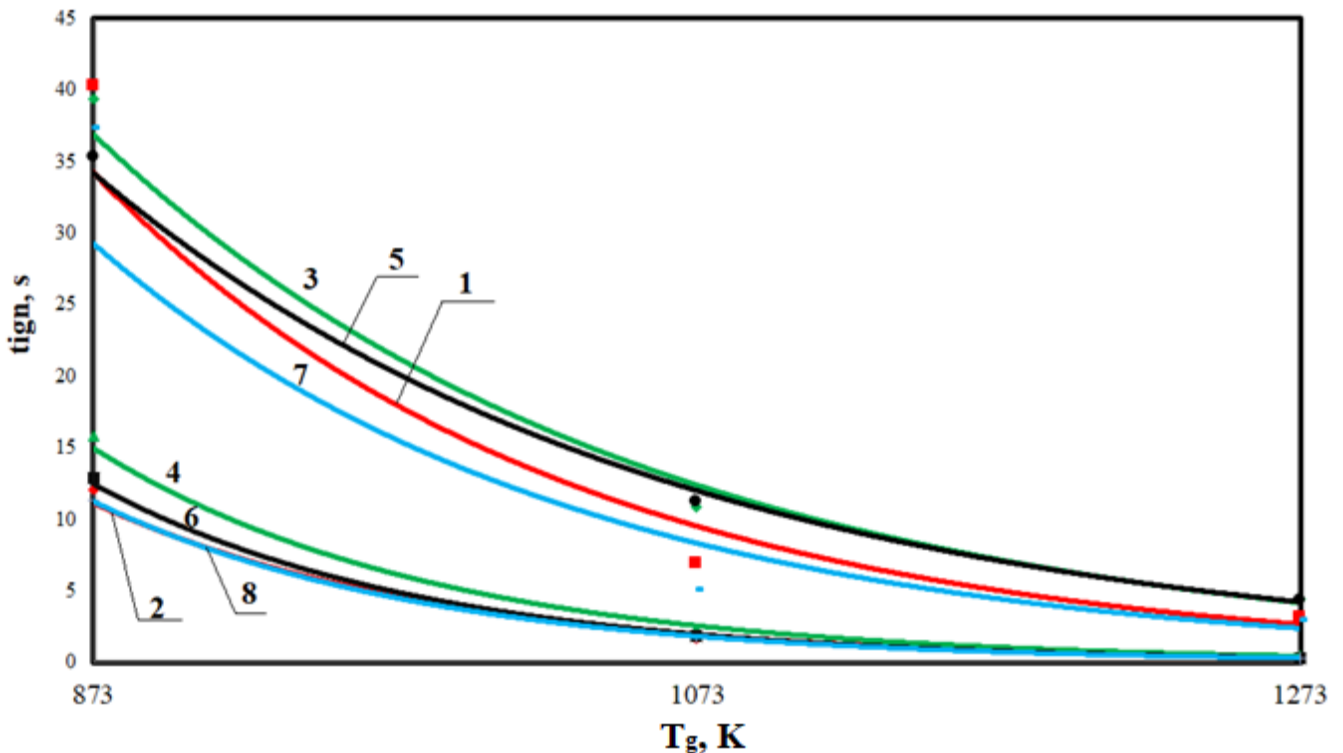


Рисунок 3.19 - Зависимости времен термической подготовки влажных и сухих древесных частиц от температуры внешней среды:

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

Приведенные на рисунке 3.19 результаты экспериментов показывают, что естественное влагосодержание пористой структуры любой древесины (из четырёх исследовавшихся) приводит к росту в 3-4 раза времён термической подготовки по сравнению с сухой древесиной. Такое большое увеличение t_{ign} характерно для всего диапазона (возможного в топочных условиях) изменения температур внешней по отношению к частице биомассы среды (даже при $T_g \sim 1273\text{K}$).

Влияние влаги, насыщающей пористую структуру древесины в её естественном состоянии, на численные значения времён термической подготовки достаточно очевидно, но не очевидна степень этого влияния. Объяснить приведенные на рисунке 3.19 (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.

Следует так же отметить, что в экспериментах установлены предельные условия зажигания влажных частиц древесины. При температуре окружающей среды $T_g < 873\text{K}$ времена задержки зажигания насыщенных влагой частиц превышали 60 секунд, а сухой более 35 секунд (рисунок 3.20). Очевидно, что такие большие t_{ign} неприемлемы на практике.

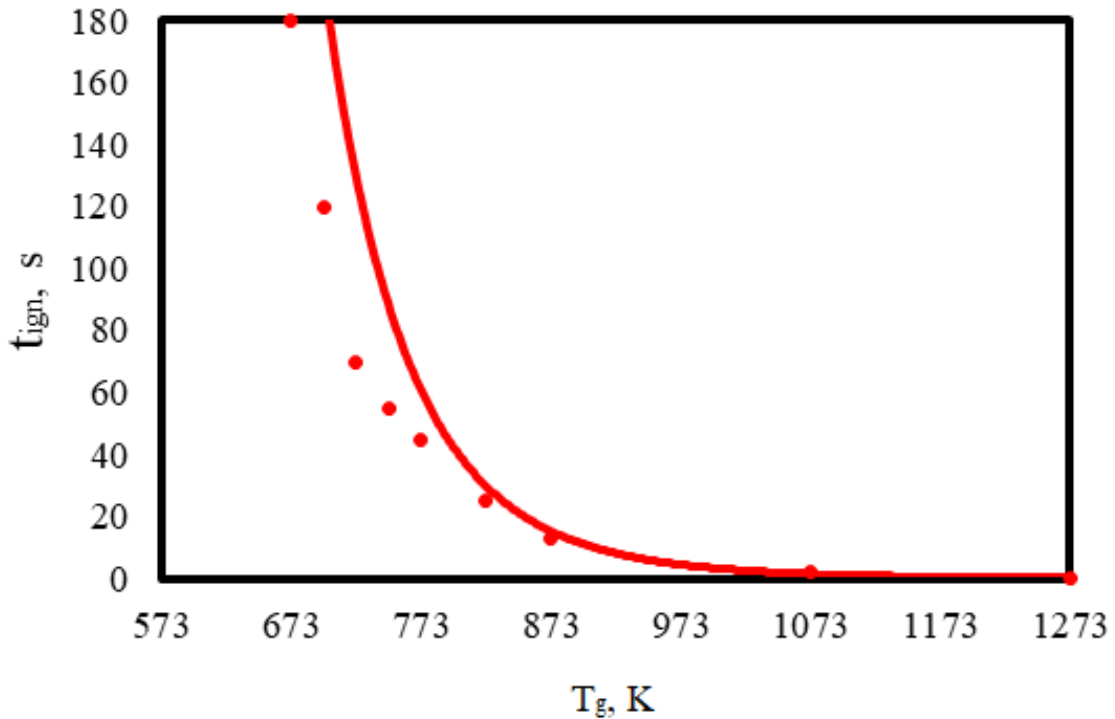


Рисунок 3.20 - Зависимость времен термической подготовки сухих древесных частиц осины от температуры внешней среды

На рисунке 3.21 приведены типичные кадры видеороликов экспериментов, на которых хорошо видны все основные стадии процесса как инертного нагрева частиц исследовавшихся видов древесины, так и непосредственно их зажигания. Третьи кадры каждого ряда соответствуют моменту появления пламени на поверхности частиц (как правило, это угловые точки частиц).

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что в реальной практике сжигания древесины в топках паровых и водогрейных котлов необходимо минимизировать содержание влаги в биомассе до допустимых предельных значений концентраций. Это можно делать на стадии топливоподготовки в результате использования тепла отводимых топочных газов. В этой связи становится актуальной задача определения оптимальной по группе основных критериев (затраты энергии на измельчение древесины и её сушку, пожаробезопасности процесса топливоподготовки, экономической эффективности использования древесины как топлива в теплоэнергетике) технологии сжигания влажной на стадии топливоподготовки древесины.

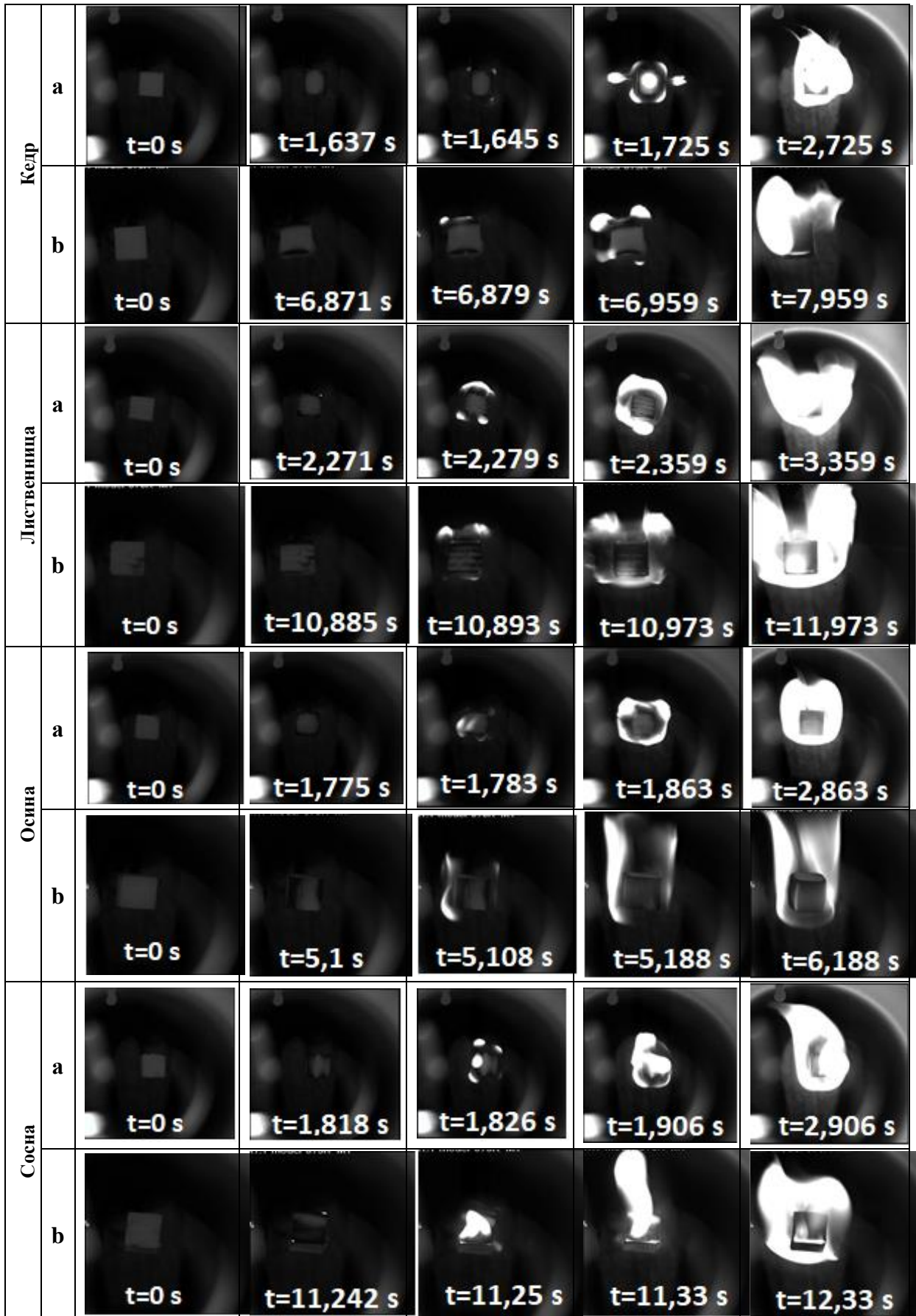


Рисунок 3.21 - Типичные кадры процесса термической подготовки частицы древесины при $T_g=1073\text{K}$

a – сухая частица; b – насыщенная влагой частица

Поэтому также проведены эксперименты с целью установления зависимостей времен термической подготовки исследованных видов древесины от начальной влажности частиц. Результаты экспериментов приведены на рисунок 3.21.

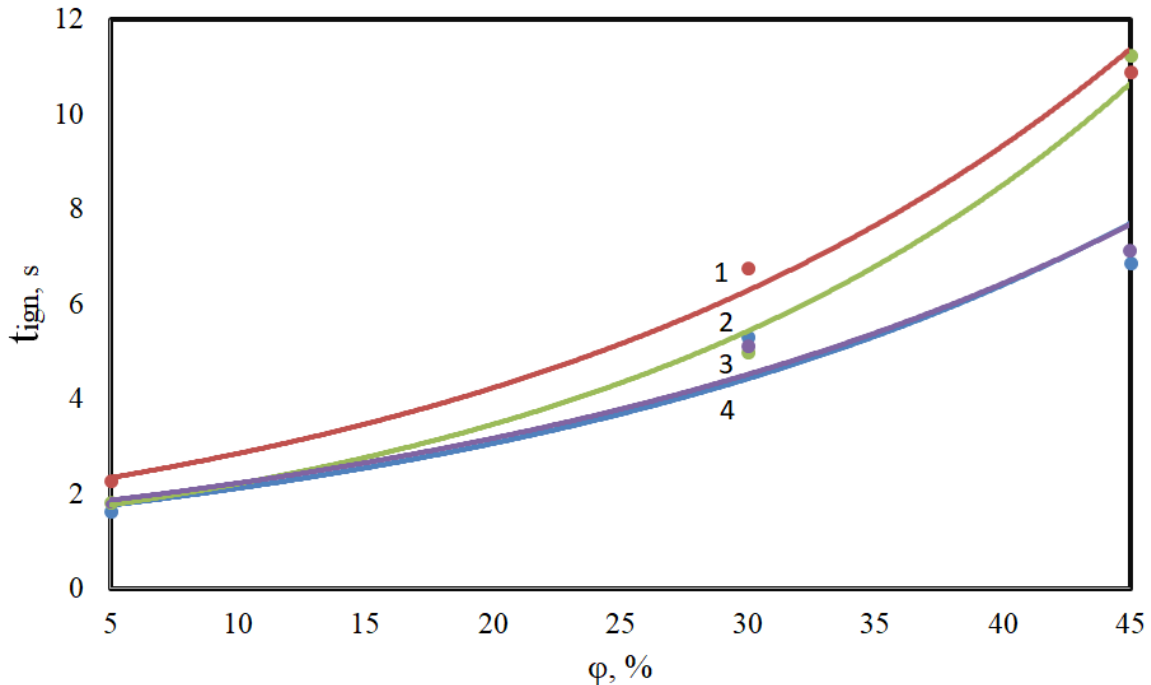


Рисунок 3.22 - Зависимость времен термической подготовки древесных частиц от их относительной влажности φ при температуре внешней среды $T=1073\text{K}$: 1 – лиственница; 2 – сосна; 3 – осина; 4 – кедр

$$\varphi = \frac{m_k - m_0}{m_k} \cdot 100\%$$

m_k – масса насыщенной влагой частица, m_0 – начальная масса частицы.

Анализ экспериментальных зависимостей $t_{\text{ign}}(\varphi)$ (рисунок 3.22) показывает, что увеличение влажности древесины в диапазоне от 10 до 45% приводит к росту времен термической подготовки для частиц осины почти в 4 раза, а для частиц сосны почти в 5 раз. Можно сделать обоснованный вывод, что сушка древесины на стадии топливоподготовки является эффективным инструментом повышения эффективности технологий топливосжигания древесной биомассы в топках водогрейных котлов.

Также приведенные на рисунке 3.22 результаты экспериментов дают основание для вывода о сильном влиянии структуры древесины на характеристики ее зажигания во влажном состоянии. Пример лиственницы, которая вследствие своей прочности и высокой плотности является уникальной породой древесины для строительства деревянных домов на многие десятилетия, показывает, что характеристики ее зажигания (t_{ign}) в сухом состоянии незначительно отличаются от времен термической подготовки древесины двух других хвойных пород (кедра и сосны) – отличия t_{ign} составляют около 0,5 с. Во влажном же состоянии высокая плотность лиственницы (и, соответственно, низкая проницаемость) приводит к тому, что t_{ign} лиственницы превышает при $T=1073\text{K}$ время термической подготовки сосны на 4 секунды. Этот результат дает основание для вывода о том, что на интенсивность процесса влагоудаления из частицы древесины влияет не только температура среды, но, в значительной степени, и условия выхода паров воды из пористой структуры древесины.

Анализ установленных в проведенных экспериментах закономерностей позволяет сделать заключение и о том, что даже при относительной влажности частиц древесины 25% их времена термической подготовки в 3-4 раза меньше аналогичных характеристик водоугольных топлив [120] идентичных размеров. Ранее [121] установлено, что совместное сжигание измельченных углей и древесины приводит к достаточно существенному снижению концентрации антропогенных выбросов (NO_x и SO_x) в газообразных продуктах сжигания древесно-угольных смесей уже при концентрации древесной биомассы 10-15%. Поэтому при сжигании даже относительно крупных частиц древесины в смеси с углем возможно достижение низких концентраций антропогенных оксидов в дымовых газах в условиях, соответствующих топкам паровых и водогрейных котлов при малых временах термической подготовки. Кроме того, известно [43], что при нагреве смеси измельченных частиц угля и древесины первыми начинают гореть частицы более мелких фракций (такими чаще всего являются в реальных условиях угольные), которые инициируют в дальнейшем зажигание более крупных частиц древесной биомассы. Соответственно нет необходимости

кардинально изменять конструкцию топки при переходе от сжигания угля на древесно-угольную смесь, как, например, при переходе на водоугольное топливо. В последнем случае необходимо использовать или специальный предтопок, или организовать циркуляционное движение капель водоугольного топлива в большой по размерам (по сравнению с предназначенной для сжигания углей) топке.

3.6. Выводы по третьей главе

1. Период времени между процессами зажигания малых по размерам частиц угля и древесины незначителен (менее 0,001 сек). Соответственно допустимо сжигание древесно-угольных смесей в одной камере сгорания с использованием общих горелок и нет необходимости измельчать частицы древесины до микронных размеров.

2. Индивидуальные свойства древесины не оказывают существенного влияния на условия и характеристики процесса термической подготовки достаточно типичных древесно-угольных смесей (разница значений t_{ign} менее 19% при $T=873$ К), так как первыми начинают гореть малые по размерам частицы угля.

3. Исследования влияния положения отдельных частиц древесины в группе на времена термической подготовки показывают, что зажигание частиц нижнего ряда происходит с задержкой по отношению к частицам верхнего ряда не более 0,01 с при расстояниях между рядами равными характерным размерам частиц.

4. Условия и характеристики зажигания частиц большой (более четырех) совокупности достаточно существенно (t_{ign} уменьшается более чем на 40%) отличаются от условий и характеристик зажигания одиночной частицы.

5. Экспериментально установлено влияние концентрации биомассы (от 10% до 50%) в древесно-угольных смесях на времена термической подготовки последних

6. 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.

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. Разница времен задержки зажигания для всех видов древесины при температуре окислителя 873К не превышает 0,1 с

9. Для всех видов древесной биомассы при её концентрации 30-40% в биоугольной смеси время задержки зажигания при $T_g=1073$ К составляет около 0,25 с

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.

ГЛАВА 4. СБЕРЕЖЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И МАТЕРИАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ ПРИ СОВМЕСТНОМ СЖИГАНИИ УГЛЯ И ДРЕВЕСИНЫ. ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

4.1. Сбережение энергетических ресурсов Период термической подготовки любой совокупности частиц древесины происходит интенсивнее аналогичных процессов одиночной частицы в идентичных условиях.

Необходимо отметить, что в теплоэнергетике может использоваться (как в качестве основного топлива, так и добавки к углю) древесная биомасса двух видов. Первый – специально заготовленная для этих целей древесина, второй – отходы лесопиления и деревообработки (опилки, стружка, щепа). Для значительной части регионов России (Северо-Запад, Урал, Сибирь, Дальний Восток) характерным является большой объем отходов переработки древесины. Поэтому анализ возможного экономического эффекта от замены части угля на предприятиях промышленной теплоэнергетики выполнен на примере Томской области с достаточно развитой системой лесозаготовки и лесопиления.

Проведен анализ возможной экономии ресурсов при сжигании древесно-угольных смесей в топках угольных котлов теплоэлектроцентралей и котельных. Анализ выполнен по данным 68 лесоперерабатывающих предприятий, расположенных на территории г. Томска. Эти предприятия могут быть потенциальными поставщиками измельченной древесины для, например, водогрейных котлов типа НР-18, работающих в котельных города Томска.

Следует особо отметить, что 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» [122]. 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 [122]. Но пока многие предприятия высыпают отходы в лесу или в отвалы, хотя с 2017 года лесопереработчикам выгодно поставлять отходы лесопиления по минимальным ценам или с оплатой транспортно-погрузочных работ на предприятия промышленной теплоэнергетики.

По оценкам специалистов в сутки на территории Томска на предприятиях лесозаготовки после ленточного распила образуется около 300 м³ не сортированных (сосна, лиственница, береза, кедр) опилок. Средняя насыпная плотность древесных опилок колеблется в пределах 120-200 кг/м³ для сухих (8-15% влажности) и 320-580 кг/м³ для влажных (более 15% влажности) опилок.

Выполнен расчет объема V_{bio} отходов лесопиления 68 предприятий за 2021 год:

$$V_{\text{bio}}=300 \cdot 365=109500 \text{ м}^3$$

Масса этих отходов:

$$M_{\text{bio}}= V_{\text{bio}} \cdot \rho_{\text{bio}}=109500 \cdot 300=32850000 \text{ кг}= 32850 \text{ т/год}$$

В таблице 4.1 приведены угольные котельные г. Томска, работающие в 2021 году [123].

№	Наименование локального источника	Адрес локального источника	Уст. Мощность Гкал/ч	Вид топлива основное /резервное	Кол-во уст. котлов	Марка котла	Нормативы удельного расхода условного топлива на отпущенную тепловую энергию кг.у.т/Гкал
1	Котельная «Большая Подгорная 153/1»	634026, Томская область, г. Томск, ул. Большая Подгорная, 153/1	1,28	уголь	2	НР-18	226,6
2	Котельная «Севастопольская 108» (д/с №21)	634026, Томская область г. Томск, ул. Севастопольская 108	1,28	уголь	2	НР-18	230
3	Котельная «Басандайская 47/3» (Шк №52)	634016, Томская область, г. Томск, ул. Басандайская, 47/3	1,28	уголь	2	НР-18	229
4	Котельная «Басандайская 11/3» (СЛШ)	634016, Томская область, г. Томск,	1,28	уголь	2	НР-18	232,7

		ул. Басандайская,11/3					
5	Котельная Геологов, 11 стр.1 (ТГРЭ)	634016, Томская область, г. Томск, п. Геологов, ул. Геологов,11 стр.1	1,92	уголь	3	НР-18	225,7
6	Котельная «Спутник, 44/1»	634058, Томская область, г. Томск, п. Спутник, 44/1	1,28	уголь	2	НР-18	234,4
7	Котельная «Чапаева, 11/1»	634510 г. Томск, с. Тимирязевское, ул. Чапаева, 11/1	0,48	уголь	1	НР-18	159,6
8	Котельная «Крылова, 15/2»	634510 г. Томск, с. Тимирязевское, ул. Крылова, 15/2	0,3	уголь	2	«Сибирь»	
9	Котельная «Октябрьская, 71/9»	634510 г. Томск, с. Тимирязевское, ул. Октябрьская, 71/9	1,2	уголь	4	НР-18	

Таблица 4.1 – Локальные источники теплоты г. Томска [123]

Как видно из таблицы 4.2 на территории г. Томска к началу 2022 году работает 18 угольных котлов малой мощности марки НР-18, основные параметры которых приведены в таблице 4.1, и два котла марки «Сибирь».

Таблица 4.2 – технические характеристики котла НР-18 [124]

Мощность, МВт	Расход топлива при максимальной нагрузке котла (уголь), кг/ч	Расход теплоносителя среды, м ³ /ч	Вид топлива	Тип котла	Расход топлива среднечасовой за отопительный сезон, кг/ч
0.48	132	18	Каменный уголь	Водогрейный, Промышленный	66

Расход угля по нормативам удельного расхода условного топлива на отпущенную тепловую энергию кг.у.т/Гкал всех котлов малой мощности в год составляет:

- 1) $D_{\text{coal1}}=365 \cdot 24 \cdot 226,9 \cdot 1,28=2544\ 184$ кг/год
- 2) $D_{\text{coal2}}=365 \cdot 24 \cdot 230 \cdot 1,28=2578\ 944$ кг/год
- 3) $D_{\text{coal3}}=365 \cdot 24 \cdot 229 \cdot 1,28=2567\ 731$ кг/год
- 4) $D_{\text{coal4}}=365 \cdot 24 \cdot 232,7 \cdot 1,28=2609\ 218$ кг/год
- 5) $D_{\text{coal5}}=365 \cdot 24 \cdot 225,7 \cdot 1,92=3796\ 093$ кг/год
- 6) $D_{\text{coal6}}=365 \cdot 24 \cdot 234,4 \cdot 1,28=2628\ 280$ кг/год
- 7) $D_{\text{coal789}}=365 \cdot 24 \cdot 159,6 \cdot 1,98=2768\ 230$ кг/год

В сумме это:

$$D_{\text{coal}}=19463 \text{ т/год}$$

Объем древесной биомассы на год для всех угольных котлов малой мощности г. Томска при условии замены 20% от общего расхода угля:

$$D_{\text{bio}}=19463 \cdot 0,2=3892,6 \text{ т/год}$$

Нужно отметить, что реальное количество отходов предприятий лесопиления превышает требуемого на все котлы марки НР-18 в 8,5 раз.

Цена на внутреннем рынке РФ в зависимости от марки угля (фракции 5-20 мм) и удаленности от угледобывающих предприятий варьируется от 3200 до

6650 руб./т. [125]. Пример, цена каменного угля марки Д (фракции 5-20 мм) в г. Кемерово компании ООО «КемУглеСбыт» составляет 4500 руб./т.

В этом случае, экономия на всех котельных за отопительный период:

$$S=3892,6 \cdot 4500=17516700 \text{ руб./год}=17,5 \text{ млн руб./ год}$$

Но существенно более значимый эффект может быть достигнут при замене части угля на отходы лесопиления на ТЭЦ филиала АО «ОТЭК» в г. Северске. В состав ТЭЦ входит 4 котла типа ТП-230, основные характеристики которого представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – технические характеристики котла ТП-230 [126]

Мощность, МВт	Расход топлива (уголь), м ² /ч	Производительность котла –, т/ч	Вид топлива	Тип котла
449	132	230	Каменный уголь	Паровой

Расход топлива (уголь) в кг/ч котла ТП-230, при плотности каменного угля $\rho=1500 \text{ кг/м}^3$:

$$D_{\text{coal}}=1500 \cdot 132=198000 \text{ кг/ч}=198 \text{ т/ч}$$

Расход топлива (уголь) в кг/ч для 4 котлов ТП-230:

$$D_0=198 \cdot 4 =792 \text{ т/ч}$$

Расход топлива (уголь) в кг/ч для 4 котлов ТП-230 в календарный год:

$$D=792 \cdot 365 =289080 \text{ т/год}$$

Объем древесной биомассы на год для 4 паровых котлов ТЭЦ филиала АО «ОТЭК» в г. Северске при условии замены 10% от общего расхода угля:

$$D_{\text{bio}}=289080 \cdot 0,1=28908 \text{ т/год}$$

Цена на внутреннем рынке РФ в зависимости от марки угля (фракции 25-50 мм) и удаленности от угледобывающих предприятий варьируется от 3200 до 6650 руб./т. [125]. Цена каменного угля марки Д (фракции 25-50 мм) в г. Кемерово компании ООО «КемУглеСбыт» 2300 руб./т, следовательно, экономия на всех котельных за отопительный период:

$$S=2300 \cdot 2898=66488400 \text{ руб./год}=66,4 \text{ млн руб./ год}$$

Такой экономический эффект может быть достигнут с минимальными изменениями технологии сжигания топлива. Возможны разные варианты. Самый простой - при подаче угля в систему распыления топлива подмешивается 10% опилок, прошедших определенную сортировку.

4.2. Оценка возможности снижения антропогенной нагрузки предприятий промышленной теплоэнергетики на окружающую среду в результате сжигания угля совместно с древесиной

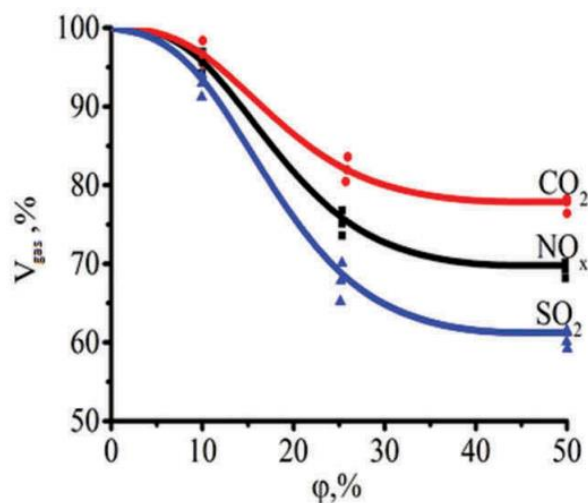
Федеральным законом от 04.05.1999 № 96-ФЗ «Об охране атмосферного воздуха» [127] установлены принципы государственного управления в области охраны атмосферного воздуха, приоритет охраны жизни и здоровья человека, настоящего и будущего поколений; обязательность соблюдения требований законодательства Российской Федерации в области охраны атмосферного воздуха, ответственность за нарушение данного законодательства.

В силу прямого указания части 2 статьи 12 Федерального закона от 04.05.1999 № 96-ФЗ «Об охране атмосферного воздуха» в отношении загрязняющих веществ, перечень которых устанавливается Правительством Российской Федерации, для стационарного источника и (или) совокупности стационарных источников определяются предельно допустимые выбросы. В настоящее время Перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды, утвержден распоряжением Правительства Российской Федерации от 08.07.2015 № 1316-р. В него включены 254 загрязняющих вещества. За нарушение законодательства Российской Федерации в области охраны атмосферного воздуха установлена уголовная, административная и иная ответственность в соответствии с законодательством Российской Федерации. Так, статьей 8.21 Кодекса Российской Федерации об административных правонарушениях предусмотрена административная ответственность за нарушение правил охраны атмосферного воздуха. Максимальный размер

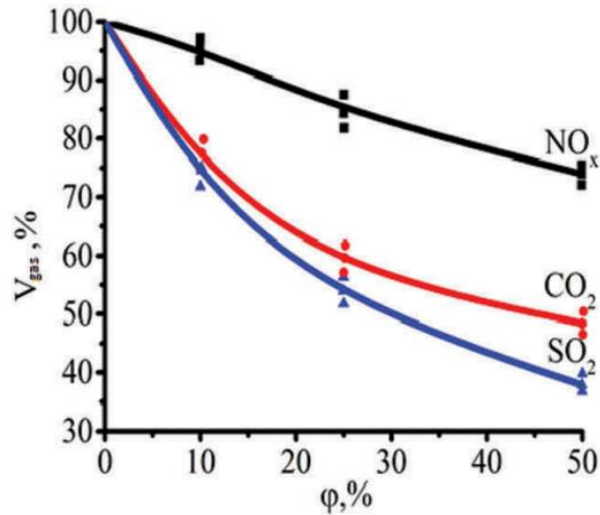
санкции данной статьи предусматривает назначение административного наказания для хозяйствующих субъектов в виде административного штрафа до 250 тысяч рублей или административное приостановление деятельности на срок до 90 суток.

Уголовное наказание предусмотрено статьей 251 Уголовного кодекса Российской Федерации за нарушение правил выброса в атмосферу загрязняющих веществ или нарушение эксплуатации установок, сооружений и иных объектов, если эти деяния повлекли загрязнение или иное изменение природных свойств воздуха, причинение вреда здоровью человека, либо по неосторожности его смерть. В зависимости от тяжести наступивших последствий осужденному может быть назначено наказание в виде штрафа до 200 тысяч рублей, принудительных либо обязательных работ с лишением занимать определенные должности, либо лишения свободы на срок до 5 лет (если загрязнение воздуха повлекло по неосторожности смерть человека).

Установлено [128], что при сжигании древесной биомассы в смеси с углем значительно снижаются (до 60% для соотношения уголь / древесина 50/50%) концентрации оксидов серы и азота в газообразных продуктах сгорания угля (например, бурый ЗБ). Это также приводит к изменению содержания этих антропогенных оксидов в продуктах сгорания топлива на основе угля 2Б (до 40%).



a)



б)

Рисунок 4.1 - Концентрации основных антропогенных оксидов при термическом разложении смеси угля и древесины: а) угля 2Б; б) угля 3Б (φ - доля древесины (сосна) в топливе) [128].

На основе результатов [127] можно обоснованно полагать, что внедрение в малую энергетику древесной биомассы, в качестве компоненты топлива, будет способствовать существенному снижению рисков возникновения чрезвычайных ситуаций, приводящих к значительным экологическим и материальным ущербам. Например, по данным [128], добавление 20% биомассы к углю приводит к снижению объема антропогенных (оксиды азота и серы, диоксид углерода) выбросов от 20% до 40%. Последнее создает предпосылки для значительного повышения уровня конкурентоспособности объектов теплоэнергетического комплекса, использующих древесно-угольные смеси. Это обусловлено практически гарантированным исключением возможных штрафов или возникновения рисков административной и даже уголовной ответственности по статье 12 части 2 Федерального закона от 04.05.1999 № 96-ФЗ «Об охране атмосферного воздуха».

4.3. Оценка возможности снижения выхода твёрдых отходов при совместном сжигании угля с древесиной

Теплотворная способность древесины связана с ее химическим составом [128, 129]. Основными элементами, влияющими на теплотворную способность, являются углерод, водород, азот, кислород и сера. Обычно породы хвойной древесины имеют более высокое содержание углерода, и их теплотворные способности достигают $20,5 \cdot 10^6$ Дж/кг, немногим меньше теплоты сгорания лиственных пород древесины $20,2 \cdot 10^6$ Дж/кг [130,131]. Удельная теплота сгорания углей зависит от его типа (бурый, каменный или антрацит) и марки (длиннопламенный, жирный, тощий и др.) и составляет от $12,98 \cdot 10^6$ до $28,05 \cdot 10^6$ Дж/кг.

Установлено, что при сжигании древесины образуется очень мало золы. Последнее, приведено в таблице 4.4.

Таблица 4.4 Распределение золы в частях дерева для различных пород [132]

Порода	Количество золы в абсолютно сухой массе, %		
	Ствол	Кора	Ветки, корни, сучья
Сосна	0,2-0,7	1,4-2,2	0,3-0,7
Ель	0,2	2,3	0,3-0,4
Береза	0,2-0,4	2,4	0,3-0,6
осина	0,2-0,3	2,7	0,3

Авторами [133] экспериментально установлено, что при совместном термическом разложении смесей частиц тощего угля и древесины (сосны) происходит увеличение концентрации серы, кальция и алюминия в золе смесей с увеличением доли древесной компоненты в смеси по отношению к однородному углю. Также установлено существенное увеличение (по сравнению с однородным углем) концентрации сульфатов кальция и алюминия (до 50%) при совместном пиролизе угля и древесины в диапазоне температур от 400 до

1000°С. Полученные результаты позволяют обосновать высокую достоверность сформулированной ранее гипотезы [134] о механизме секвестирования оксидов серы, образующихся при термическом разложении углей, в результате взаимодействия с газообразными продуктами пиролиза древесины.

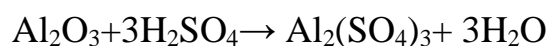
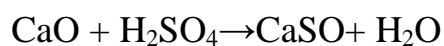


Таблица 4.5 - Результаты экспериментальных исследований по определению теплоты сгорания, влажности, зольности и выхода летучих веществ [130]

Соотношение древесина/уголь, %	Марка угля	Теплота сгорания, МДж/кг	Влажность, % (по массе)	Зольность, % (по массе)	Выход летучих, % (по массе)
100/0	-	21.73	6.96	0.29	80.25
0/100	Д	26.20	5.83	15.76	12.36
10/90	Д	24.92	5.42	14.00	14.55
25/75	Д	24.31	5.23	11.91	38.89
50/50	Д	23.84	5.35	10.44	40.96
0/100	Т	25.72	5.52	18.37	25.56
10/90	Т	25.60	5.42	14.24	26.46
25/75	Т	25.22	5.34	13.65	28.33
50/50	Т	24.79	5.41	11.08	39.95

При этом авторами [134] экспериментально доказано, что увеличение концентрации древесины в древесно-угольной смеси до 50% снижает зольность смеси до 10,44% для длиннопламенного угля (15,76%) и до 11,08% для тощего угля (18,37%).

4.4. Сравнительный анализ радиоактивного загрязнения, создаваемого АЭС и ТЭС, работающими на угле

Атомная энергетика в современном мире дает не более 0.1% от всей дозы облучения людей на Земле [135]. На порядок больше дают вклад в радиоактивное облучение выбросы ТЭС и ТЭЦ, работающие на органическом топливе – угле, сланце, нефти, которые, наряду с другими энергетическими предприятиями, работающими на этом же топливе, являются самым мощным источником поступления радионуклидов (РН), и в частности радона, в атмосферу. Так, по данным [136], выбросы газообразных радиоактивных изотопов ^{220}Rn и ^{222}Rn , не улавливаемых действующими системами очистки ТЭС, составляют около $6 \cdot 10^{10}$ Бк/ГВт (эл) год. Следует добавить, что согласно проведенной оценке, количество извлекаемых при добыче угля естественных радионуклидов (ЕРН) в Российской Федерации превышает количество извлекаемых ЕРН при эксплуатации урановых месторождений [137]. При сжигании угля, даже для современных ТЭС, работающих на угле с содержанием золы не более 10 % и оборудованных фильтрующей системой, позволяющей задерживать 97.5 % золы, они практически полностью попадают во внешнюю среду. В результате, удельная радиоактивность выбросов ТЭС в 5-10 раз выше, чем для АЭС [138].

Естественная радиоактивность угля формируется за счет природных радионуклидов. Уголь всегда содержит природные радиоактивные вещества уранового и актиноуранового рядов (^{238}U и продукты его распада ^{234}U , ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{210}Pb , ^{210}Po и т.д.; ^{235}U и продукты его распада ^{219}Rn и т.д.), ториевого ряда (^{232}Th и продукты его распада ^{220}Rn , ^{216}Po), а также долгоживущий радиоактивный изотоп ^{40}K . Уран в окислительных условиях земной поверхности, как правило, присутствует в виде хорошо растворимых соединений, и поэтому значительно более широко рассеян, чем торий, хотя среднее содержание урана в земной коре почти на порядок ниже, чем тория.

Несмотря на то, что дымовые газы ТЭС, как правило, очищаются в золоуловителях с коэффициентом полезного действия 94-99 % [139], ядерная

энергетика оказывается пока существенно чище традиционной теплоэнергетики и по химическим показателям. Помимо долгоживущих радионуклидов опасными компонентами дымовых газов ТЭС являются твердые частицы, диоксид серы, окислы азота и углекислый газ. Кроме того, в дымовых газах содержатся ароматические углеводороды канцерогенного воздействия, пары соляной и плавиковой кислот, токсичные металлы. Сравнительная таблица по данным [140] концентрации некоторых химических выбросов от ТЭС и АЭС на 1 ГВт.ч выработанной энергии приведены в таблице 4.5.

Таблице 4.6 - Сравнительная таблица химических выбросов от ТЭС и АЭС на 1 ГВт.ч выработанной энергии [140].

Химический загрязнитель	Концентрация выбросов, отн.ед.	
	ТЭС	АЭС
SO ₂	1.18·10 ⁻³	1.68·10 ⁻⁷
Твердые частицы	3.33·10 ⁻⁴	2.08·10 ⁻⁸
NO _x	1.28·10 ⁻⁴	1.92·10 ⁻⁸
CO ₂	1.09·10 ⁻⁵	1.82·10 ⁻⁸

В то же время, имеющиеся в разных странах данные свидетельствуют, что по реальному воздействию на человека атомная промышленность находится во втором десятке вредных факторов. На первом месте по показателям профзаболеваний находится угольная промышленность (20-50 заболеваний против 0.4-0.7 в атомной промышленности на 10000 работающих) [141].

4.5. Выводы по четвертой главе

Внедрение древесно-угольных смесей в качестве топлива в баланс теплогенерации позволит не только снизить стоимость, вырабатываемой теплоэлектроцентралями электрической и тепловой энергии, а также тепловой энергии котельными, но и значительно улучшить экологическую обстановку, за

счет снижения объема антропогенных выбросов (оксидов серы и азота) и твердых частиц в атмосферу при топливосжигании.

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 термической 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.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

C^{daf} – содержание углерода на сухое беззольное состояние, %;

Q_i^r – высшая теплота сгорания, МДж/кг;

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

C_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

ρ – плотность, кг/м³;

t_{ign} – время термической подготовки, с;

T_g – температура окислителя, К;

δ – характерный размер, мм;

φ – относительная влажность, %;

Q_T – теплотворная способность, Дж/кг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dziok T. Possibility of using alternative fuels in Polish power plants in the context of mercury emissions / T. Dziok, M. Bury, K. Bytnar, P. Burmistrz // *Waste Management*. – 2021. – V. 126. – P. 578-584.
2. Glushkov D.O. Composition of gas produced from the direct combustion and pyrolysis of biomass / D.O. Glushkov, G. S. Nyashina, R. Anand, P. A. Strizhak // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2021. – V. 156. – P. 43-56.
3. Kumar R. Lignocellulose biomass pyrolysis for bio-oil production: A review of biomass pre-treatment methods for production of drop-in fuels / R. Kumar, V. Strezov, H. Weldekidan, J. He, S. Singh, T. Kan, B. Dastjerdi // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2020. – V. 123. – P. 109763.
4. Nune L. J. R. Biomass for energy: A review on supply chain management models / L. J. R. Nunes, T. P. Causer, D. Ciolkosz // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2019. – V. 120. – P. 109658.
5. Gonzalez-Salazar M. A. Review of the operational flexibility and emissions of gas- and coal-fired power plants in a future with growing renewables / M. A. Gonzalez-Salazar, T. Kirsten, L. Prchlik // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – V. 82. – P. 1497-1513.
6. Gehrman H.-J. Waste wood characterization and combustion behaviour in pilot lab scale / H.-J. Gehrman, H. Matzing, P. Nowak, D. Baris, H. Seifert, C. Dupont, F. Defoort, M. Peyrot, F. Castagno // *Journal of the Energy Institute*. – 2020. – V. 93. – P. 1634-1641.
7. Lucadamo L. Power plants: The need for effective bio-monitoring of the contribution of bio (wood) fuelled stations to atmospheric contamination / L. Lucadamo, L. Gallo, A. Corapi // *Atmospheric Pollution Research*. – 2019. – V. 10. – P. 2040-2052.
8. Ozonoh M. Techno-economic analysis of electricity and heat production by co-gasification of coal, biomass and waste tyre in South Africa / M. Ozonoh, T.C.

Aniokete, B. O. Oboirien, M.O. Daramola // *Journal of Cleaner Production*. – 2019. – V. 201. – P. 192-206.

9. Voytenko Y. Organisational frameworks for straw-based energy systems in Sweden and Denmark / Y. Voytenko, P. Peck // *Biomass and Bioenergy*. – 2012. – V. 38. – P. 34-48.

10. Deng J. Thermal properties of coals with different metamorphic levels in air atmosphere / J. Deng, Shuai-Jing Ren, Y. Xiao, Qing-Wei Li, Chi-Min Shu // *Applied Thermal Engineering*. – 2018. – V. 143. – P. 542-549.

11. Arigoni A. Optimizing global thermal coal shipments / A. Arigoni, A. Newman, C. Turner, C. Kaptur // *Omega*. – 2017. – V. 72. – P. 118-127.

12. Meshram P. Demineralization of low grade coal – A review / P. Meshram, B. K. Purohit, M. K. Sinha, S. K. Sahu, B. D. Pandey // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – V. 4. – P. 745-761.

13. Michalis Agraniotis, Christian Bergins, Malgorzata Stein-Cichoszewska, Emmanouil Kakaras. 5 - High-efficiency pulverized coal power generation using low-rank coals. *Low-Rank Coals for Power Generation, Fuel and Chemical Production*. – 2017. – P. 95-124.

14. Mao G. Research on biomass energy and environment from the past to the future: A bibliometric analysis /, N. Huang, L. Chen, H. Wang // *Science of The Total Environment*. – 2018. – V. 635. – P. 1081-1090.

15. Toklu E. Biomass energy potential and utilization in Turkey / E. Toklu // *Renewable Energy*. – 2017. – V. 107. – P. 235-244.

16. Qi G. A general mechanistic model of fly ash formation during pulverized coal combustion / G. Qi, L. Shuiqing, X. Yang, L. Jianmin // *Combustion and Flame*. – 2018. – V. 200. – P. 374-386.

17. Matzenbacher C. A. DNA damage induced by coal dust, fly and bottom ash from coal combustion evaluated using the micronucleus test and comet assay in vitro / C. A. Matzenbacher, A. L. H. Garcia, M. S. d. Santos, C. C. Nicolau, S. Premoli, D.S. Corrêa, C. T. de Souza, L. Niekraszewicz, J. F. Dias, T. V. Delgado, W. Kalkreuth,

I. Grivicich, J.d. Silva // *Journal of Hazardous Materials*. – 2017. – V. 324. – P. 781-788.

18. He J. Should China support the development of biomass power generation? / J. He, Y. Liu, B. Lin // *Energy*. – 2018. – V. 163. – P. 416-425.

19. Naqvi S. R. Potential of biomass for bioenergy in Pakistan based on present case and future perspectives / S. R. Naqvi, S. Jamshaid, M. Naqvi, W. Farooq, M. Bilal, K. Niazi, Z. Aman, M. Zubair, M. Ali, M. Shahbaz, A. Inayat, W. Afzal. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – V. 81. – P. 1247-1258.

20. Vershinina K. Yu. Relative combustion efficiency of composite fuels based on of wood processing and oil production wastes / K. Yu. Vershinina, N. E. Shlegel, P. A. Strizhak // *Energy*. – 2018. – V. 169. – P. 18-28.

21. Glushkov D. Environmental aspects of converting municipal solid waste into energy as part of composite fuels / D. Glushkov, K. Paushkina, D. Shabardin, P. Strizhak // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – V. 201. – P. 1029-1042.

22. Glushkov D. O. Ignition of promising coal-water slurry containing petrochemicals: Analysis of key aspects / D. O. Glushkov, S. V. Syrodoy, A. V. Zhakharevich, P.A. Strizhak // *Fuel Processing Technology*. – 2016. – V. 148. – P. 224-235.

23. Salomatov V.V. Ignition of coal-water fuel particles under the conditions of intense heat / V.V. Salomatov, G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, N.Y. Gutareva // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – V. 106. – P. 561-569.

24. Glushkov D. O. Mathematical model simulating the ignition of a droplet of coal water slurry containing petrochemicals / D. O. Glushkov, G. V. Kuznetsov, P. A. Strizhak, S.V. Syrodoy // *Energy*. – 2016. – V. 150. – P. 262-275.

25. Syrodoy S. V. The influence of the structure heterogeneity on the characteristics and conditions of the coal–water fuel particles ignition in high temperature environment / S. V. Syrodoy, G. V. Kuznetsov, A. V. Zhakharevich, N. Y. Gutareva, V. V. Salomatov // *Combustion and Flame*. – 2018. – V. 180. – P. 196-206.

26. María V. Gil, Fernando Rubiera. 5 - Coal and biomass cofiring: fundamentals and future trends. *New Trends in Coal Conversion. Combustion, Gasification, Emissions, and Coking.* – 2019. – P. 117-140.
27. Seepana S. Evaluation of feasibility of pelletized wood co-firing with high ash Indian coals / S. Seepana, S. Arumugam, K. Sivaramakrishnan, M. Muthukrishnan. // *Journal of the Energy Institute.* – 2017. – V. 91. – P. 1126-1135.
28. Kleinhans U. Ash formation and deposition in coal and biomass fired combustion systems: Progress and challenges in the field of ash particle sticking and rebound behavior / U. Kleinhans, C. Wieland, F. J. Frandsen, H. Spliethoff // *Progress in Energy and Combustion Science.* – 2018. – V. 68. – P. 65-168.
29. Sami M. Co-firing of coal and biomass fuel blends / M. Sami, K. Annamalai, M. Wooldridge // *Progress in Energy and Combustion Science.* – 2021. – V. 27. – P. 171-214.
30. Wang Q. Combustion behaviors and kinetics analysis of coal, biomass and plastic / Q. Wang, G. Wang, J. Zhang, Jui-Yuan Lee, H. Wang, C. Wang // *Thermochimica Acta.* – 2018. – V. 669. – P. 140-148.
31. Riaza J. Ignition and combustion of single particles of coal and biomass / J. Riaza, J. Gibbins, H. Chalmers. // *Fuel.* – 2020. – V. 202. – P. 650-655.
32. Dhyani V. A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass / V. Dhyani, T. Bhaskar // *Renewable Energy.* – 2017. – V. 129. – P. 695-716.
33. Li Y. Urban biomass and methods of estimating municipal biomass resources./ Y. Li, L. W. Zhou, R. Z. Wang // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* – 2017. – V. 80. – P. 1017-1030.
34. Tripathy M. A new perspective on wind integrated optimal power flow considering turbine characteristics, wind correlation and generator reactive limits / M. Tripathy, R. K. Samal. // *Electric Power Systems Research.* – 2019. – V. 170. – P. 101-115
35. Wang G. Solar energy conversion through thermally enhanced external photoelectric emission from NaCsSb photocathodes / G. Wang, B. Chang, X. Li, R.

Fu, L. Yang, K. Wang // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. – 2017. – V. 159. – P. 73-79.

36. Rentier G. Varieties of coal-fired power phase-out across Europe/ G. Rentier, H. Lelieveldt, G. J. Kramer // *Energy Policy*. – 2019. – V. 132. – P. 620-632.

37. Hansson J. Co-firing biomass with coal for electricity generation—An assessment of the potential in EU27 / J. Hansson, G. Berndes, F. Johnsson, J.Kjärstad // *Energy Policy*. – 2009. – V. 37. – P. 1444-1455.

38. Tang X. China's coal consumption declining—Impermanent or permanent? / X. Tang, Y.Jin, B.C. Mc Lellan, J. Wang, S. Li // *Resources, Conservation and Recycling*. – 2016. – V. 129. – P. 307-313.

39. Lin J. Has coal use peaked in China: Near-term trends in China's coal consumption / J. Lin, D. Fridley, H. Lu, L. Price, N. Zhou // *Energy Policy*. – 2018. – V. 123. – P. 208-214.

40. Li S. Identifying the main contributors of air pollution in Beijing / S. Li, K. Feng, M. Li // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – V. 163. – P. 359-365.

41. Zhang H. Air pollution and control action in Beijing/ H. Zhang, S. Wang, J. Hao, X. Wang, S. Wang, F. Chai, M. Li // *Journal of Cleaner Production*. – 2016. – V. 112. – P. 1519-1527.

42. Pio G. Flammability parameters of liquified natural gas / G. Pio, E. Salzano // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. – 2018. – V. 56. – P. 424-429.

43. Syrodoy S.V. 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 Available*. – 2019. – V. 93. P. 443-4459.

44. Liu Z. The optimal biopower capacity in co-firing plants – An empirical analysis / Z. Liu // *Energy Economics*. – 2018. – V. 78. – P. 392-400.

45. Gosens J. Biopower from direct firing of crop and forestry residues in China: A review of developments and investment outlook / J. Gosens // *Biomass and Bioenergy*. – 2015. – V. 73. – P. 110-123.

46. Craig M.T. Economics of co-firing coal and biomass: An application to Western Canada / Craig M.T. Johnstona G. Cornelisvan Kooten // *Energy Economics*. – 2015. – V. 48. – P. 7-17.
47. Dzikuć M. Ecological and economic aspects of electric energy production using the biomass co-firing method: The case of Poland/ M. Dzikuć, A. Piwowar // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – V. 55. – P. 856-862.
48. Rokni E. Emissions of SO₂, NO_x, CO₂, and HCl from Co-firing of coals with raw and torrefied biomass fuels / E. Rokni, X. Ren, A. Panahi, Y. A. Levendis // *Fuel*. – 2016. – V. 211. – P. 363-374.
49. Priyanto D. E. Ash transformation by co-firing of coal with high ratios of woody biomass and effect on slagging propensity / D. E. Priyanto, S. Ueno, N.Sato, H. Kasai, T. Tanoue, H. Fukushima // *Fuel*. – 2016. – V. 174. – P. 172-179.
50. Panahi A. On the particle sizing of torrefied biomass for co-firing with pulverized coal / Panahi A., Tarakcioglu M., Schiemann M., Delichatsios M., Levendis Y. A. // *Combustion and Flame*. – 2018. – V. 194. – P. 72-84.
51. Riaza J. Ignition and combustion of single particles of coal and biomass / Riaza J., Gibbins J., Chalmers H // *Fuel*. – 2020. – V. 202. – P. 650-655.
52. Zhou H. Experimental investigation of ignition and combustion characteristics of single coal and biomass particles in O₂/N₂ and O₂/H₂O / H. Zhou, Y. Li, N.Li, K. Cen. // *Journal of the Energy Institute*. – 2020. – V. 92. – P. 502-511.
53. Guo F. Optimization of the co-combustion of coal and composite biomass pellets / F. Guo, Zh. Zhong. // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – V. 185. – P. 399-407.
54. Isemin R. Torrefaction and combustion of pellets made of a mixture of coal sludge and straw / R. Isemin, A. Mikhalev, D. Klimov, P. Grammelis, N. Margaritis, D.-S. Kourkoumpas, V. Zaichenko // *Fuel*. – 2017. – V. 210. – P. 859-865.
55. Liu Q. Co-firing of coal and biomass in oxy-fuel fluidized bed for CO₂ capture: A review of recent advances / Qinwen Liu, Yan Shi, Wenqi Zhong, Aibing Yu // *Chinese Journal of Chemical Engineering*. – 2019. – V. 27. – P. 2261–2272.

56. Yao Xi. Systematic study on ash transformation behaviour and thermal kinetic characteristics during co-firing of biomass with high ratios of bituminous coal / Yao Xi., Hao. Zhou , K. Xu , Sh. Chen, Ji Ge // Qingwei Xu. *Renewable Energy*. – 2020. – V. 147. – P. 1453-1468.
57. Alobaid F. Experimental measurements for torrefied biomass Co-combustion in a 1 MWth pulverized coal-fired furnace / F. Alobaid, J.-P. Busch, A. Stroh, J. Strohle, B. Epple // *Journal of the Energy Institute*. – 2020. – V. 93. – P. 833-846.
58. Fatehi H. Numerical simulation of ignition mode and ignition delay time of pulverized biomass particles / H. Fatehi, W. Weng, M. Costa, Zh. Li, M. Rabaçal, M. Aldén, Xue-Song Ba // *Combustion and Flame*. – 2019. – V. 206. – P. 400-410.
59. Rybak W. Dust ignition characteristics of different coal ranks, biomass and solid waste / W. Rybak, W. Moroń, W. Ferens // *Fuel*. – 2019. – V. 237. – P. 606-618.
60. Magalhães D. Ignition behavior of Turkish biomass and lignite fuels at low and high heating rates / D. Magalhães, F. Kazanç, A. Ferreira, M. Rabaçal, M. Costa // *Fuel*. – 2017. – V. 207. – P. 154-164.
61. Mahmoudi A. H. Numerical modeling of self-heating and self-ignition in a packed-bed of biomass using XDEM / A. H. Mahmoudi, F. Hoffmann, M. Markovic, B. Peters, G. Brem. // *Combustion and Flame*. – 2016. – V. 163. – P. 358-369.
62. Fatehi H. Numerical simulation of ignition mode and ignition delay time of pulverized biomass particles // H. Fatehi, W. Weng, M. Costa, Zh. Li, M. Rabaçal, M. Aldén, Xue-Song Bai // *Combustion and Flame*. – 2019. – V. 206. – P. 400–410.
63. Shan F. An experimental study of ignition and combustion of single biomass pellets in air and oxy-fuel / F. Shan, Q. Lin, K. Zhou, Y. Wu, W. Fu, P. Zhang, L. Song, Ch. Shao, B. Yi // *Fuel*. – 2017. – V. 188. – P. 277-284.
64. Gungor A. Two-dimensional biomass combustion modeling of CFB / A. Gungor // *Fuel*. – 2008. – V. 87. – P. 1453-1468.

65. Gungor A. Prediction of SO₂ and NO_x emissions for low-grade Turkish lignites in CFB combustors/ A. Gungor // Chem. Eng. J. – 2009. – V. 146. – P. 388-400.
66. Bhuiyan A.A. CFD modelling of co-firing of biomass with coal under oxy-fuel combustion in a large scale power plant / A.A. Bhuiyan, J. Naser // Fuel. – 2015. – V. 159. – P. 150-168.
67. Syrodoy S.V. Influence of filtration heat transfer on parameters and conditions for ignition of coal-water fuel particles/ S.V. Syrodoy, V.V. Salomatov // Thermophys. Aeromechanics. – 2019. – V. 26. – P. 745-760.
68. Dhyani V. A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass / V. Dhyani, Th. Bhaskar // Renewable Energy. – 2018. – V. 129. – P. 695-716.
69. Li Y. Urban biomass and methods of estimating municipal biomass resources / Y. Li, L. W. Zhou, R. Z. Wang // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – V. 80. – P. 1017-1030.
70. Pretzsch H. Wood density reduced while wood volume growth accelerated in Central European forests since 1870 / H. Pretzsch, P. Biber, G. Schütze, J. Kemmerer, E. Uhl // Forest Ecology and Management. – 2018. – V. 429. – P. 589-616.
71. Gil M.V., Rubiera F. Coal and biomass cofiring: fundamentals and future trends. New Trends in Coal Conversion. Combustion, Gasification, Emissions, and Coking, (2019) 117-140
72. Melikoglu M. Vision 2023: Status quo and future of biomass and coal for sustainable energy generation in Turkey / M. Melikoglu // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – V. 74. – P. 800 – 808.
73. Kuznetsov G.V. Conditions and characteristics of mixed fuel granules ignition based on coal and finely dispersed wood / G.V. Kuznetsov, S.A. Yankovsky, A.A. Tolokolnikov, A.V. Zenkov, I.V. Cherednik // Energy. – 2020. – V. 194. – P. 116896.

74. Yankovsky, S.A. Ignition of granulated mixed fuel based on lignite and wood waste / Yankovsky, S.A., Cherednik, I.V., Kuznetsov, G.V. // *J. Phys.: Conf. Ser.* – 2019. – V. 1359. – P. 01213.
75. 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.* – V. 191. – P. 2071-2081.
76. Charis G. A review of timber waste utilization: Challenges and opportunities in Zimbabwe / G. Charis, G. Danha, E.Muzenda// *Procedia Manufacturing.* – 2019. – V. 35. – P. 419–429.
77. Chithra A. Carbon foams with low thermal conductivity and high EMI shielding effectiveness from sawdust / A. Chithra, P. Wilson, S. Vijayan, R. Rajeev, K. Prabhakaran // *Industrial Crops & Products.* – 2020. – V. 145. – P. 112076.
78. Вилюнов В.Н. Теория зажигания конденсированных веществ. Наука, Сибирское отделение, 1984.
79. Я. Б. Зельдович, “К теории зажигания”, Докл. АН СССР, 150:2 (1963), 283–285
80. Surapoom Somwangthanaroj, Suneerat Fukuda. CFD modeling of biomass grate combustion using a steady-state discrete particle model (DPM) approach. *Renewable Energy.* 148 (2020) 363-373
81. Г. Н. Абрамович, “О влиянии примеси твердых частиц или капель на структуру турбулентной газовой струи”, Докл. АН СССР, 190:5 (1970), 1052–1055.
82. Zhou K. The ignition characteristics and combustion processes of the single coal slime particle under different hot-coflow conditions in N₂/O₂ atmosphere / Kun Zhou, Qizhao Lin, Hongwei Hu, Huiqing Hu, Lanbo Song. // *Energy.* – 2017. – V. 136. – P. 173-184.
83. Tymoszuk M. An investigation of biomass grindability /, Kazimierz Mroczek, Sylwester Kalisz, Henryk Kubiczek // *Energy.* – 2019. – V.183. – P. 116-126.

84. Silva J. CFD Modeling of Combustion in Biomass Furnace / João Silva, José Teixeira, Senhorinha Teixeira, Simone Preziati, João Cassiano // *Energy Procedia*. – 2017. – V.120. – P. 665–672.
85. Zhanghao W. Distribution and particle-scale thermochemical property of biomass in the gasifier of a dual fluidized bed / Zhanghao Wan, Shiliang Yang, Yuhao Sun, Yonggang Wei, Jianhang Hu, Hua Wang // *Energy Conversion and Management*. – 2020. – V.209. - P. 112672.
86. Zhang Sh. Online monitoring of the two-dimensional temperature field in a boiler furnace based on acoustic computed tomography/ Shiping Zhang, Guoqing Shen, Liansuo An, Yuguang Niu // *Applied Thermal Engineering*. – 2015. – V.75. – P. 958-966.
87. Bhuiyan A. A. CFD modelling of co-firing of biomass with coal under oxy-fuel combustion in a large scale power plant / Arafat A. Bhuiyan, Jamal Naser // *Fuel*. – 2015. – V.159. - P. 150-168.
88. Syrodoi S. V Influence of the temperature dependence of the thermophysical properties of coal–water fuel on the conditions and characteristics of ignition / Syrodoi S. V. Kuznetsov G.V., Zakharevich A.V., Salomatov V.V.// *Solid Fuel Chemistry*. – 2017. – V.51. – P. 160-165.
89. Syrodoy S.V The influence of the structure heterogeneity on the characteristics and conditions of the coal–water fuel particles ignition in high temperature environment / Syrodoy S.V., Kuznetsov G.V., Zhakharevich A.V., Gutareva N. Y., Salomatov V.V. // *Combustion and Flame*. – 2017. – V.180. – P. 196-206.
90. Perrone D. Numerical simulations on Oxy-MILD combustion of pulverized coal in an industrial boiler/ Diego Perrone, Teresa Castiglione, Adam Klimanek, Pietropaolo Morrone, Mario Amelio. // *Fuel Processing Technology*. – 2018. - V.181. – P. 361-374.
91. Rybak W. Dust ignition characteristics of different coal ranks, biomass and solid waste / Wiesław Rybak, Wojciech Moroń, Wiesław Ferens // *Fuel* . – 2019. – V.237. – P. 606-618.

92. Борисов Б.В. Практикум по технической термодинамики и тепломассообмену / Б.В. Борисов, А.В. Крайнов, В.Е. Юхнов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 141 с.
93. Syrodoy S.V. 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.
94. Glushkov D.O. Ignition of a composite propellant by a hot particle under conditions of a nonideal thermal contact / Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. // Russian Journal of Physical Chemistry. – 2015. - V. 9. - P. 631-636.
95. 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.
96. Kuznetsov G.V. Condition and characteristics in ignition of composite fuels based on coal with the addition of wood / Kuznetsov G.V., Yankovskii S.A. // Thermal Engineering. – 2019. – V.66. – P. 133-137.
97. Zhou K. The ignition characteristics and combustion processes of the single coal slime particle under different hot-coflow conditions in N₂/O₂ atmosphere/ Kun Zhou, Qizhao Lin, Hongwei Hu, Huiqing Hu, Lanbo Song // Energy. – 2017. – V. 13. - P. 173-184.
98. Kijo–Kleczkowska A. Combustion of coal–water suspensions / Agnieszka Kijo–Kleczkowska. // Fuel. – 2011. – V.90. - P. 865-877.
99. Borovikov A.M., Ugolev B.N. Wood reference book. (1989) P. 294
100. Asante B. Influence of wood moisture content on the hardened state properties of geopolymer wood composites / Bright Asante, Hanzhou Ye, Martin Nopens, Goran Schmidt, Andreas Krause // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing – 2022. – V.152. – P.106680.
101. Varma A. K. Pyrolysis of wood sawdust: Effects of process parameters on products yield and characterization of products / Anil Kumar Varma, Lokendra Singh Thakur, Ravi Shankar, Prasenjit Mondal // Waste Managemen. – 2019. – V. 89. - P. 224-235.

102. Kuznetsov G.V. 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.
103. Gil M.V. Thermal behavior and kinetics of coal/biomass blends during co combustion / Gil M.V, Casal D, Pevida C, Pis J. J, Rubiera F. // *Bioresour Technology*. – 2010. – V. 101. - P. 5601 – 5608
104. Kuznetsov G.V. 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 / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, Zh.A. Kostoreva, D.V. Malyshev, N. Yu Gutareva // *Journal of the Energy Institute*. – 2021. - V. 97. - P. 13-26.
105. Syrodoy S.V. 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
106. Wu X. Interaction between volatile-N and char-N and their contributions to fuel-NO during pulverized coal combustion in O₂/CO₂ atmosphere at high temperature / Xiaofeng Wu, Weidong Fan, Peng Ren, Jun Chen, Zhuang Liu Pinghong Shen // *Fuel*. – 2019. - V.255. - P. 115856.
107. Nyashina G. S. Effective incineration of fuel-waste slurries from several related industries / G. S. Nyashina, K. Yu. Vershinina, N. E. Shlegel, P. A. Strizhak // *Environmental Research*. – 2019. - V. 176. - P. 108559.
108. Kuznetsov G.V. Numerical simulation of ignition of particles of a coal-water fuel / G.V. Kuznetsov, V.V. Salomatov, S.V. Syrodoy, // *Combust. Explos. Shock Waves*. – 2015. - V.51. - P. 409–415.
109. Svoboda K. Fluidized bed gasification of coal–oil and coal–water–oil slurries by oxygen–steam and oxygen–CO₂ mixtures / K. Svoboda, M. Pohořelý, M. Jeremias, P. Kameníková, M. Hartman, S. Skoblja, M. Syc // *Fuel Process. Technol.* – 2012. V.95. - P. 16–26

110. Rokni E. Emissions of SO₂, NO_x, CO₂, and HCl from Co-firing of coals with raw and torrefied biomass fuels / E. Rokni, X. Ren, A. Panahi, Y.A. Levendis // *Fuel*. 2018. – V.211. - P. 363–374.
111. Jianzhong L. Pilot-scale investigation on slurring, combustion, and slagging characteristics of coal slurry fuel prepared using industrial wasteliquid / L. Jianzhong, W. Ruikun, X. Jianfei, Z. Junhu, C. Kefa // *Appl. Ener.* – 2014. – V.115. - P. 309–319
112. Chungen Y. Grate-firing of biomass for heat and power production / Chungen Yin, Lasse A. Rosendahl, Søren K. K. // *Progr. Energy Combust. Sci.* – 2008. – V.3. - P. 725–754.
113. Kijo–Kleczkowska A. Combustion of coal–water suspensions / A. Kijo–Kleczkowska // *Fuel*. – 2011. – V.90 (2). - P. 865–877
114. Jianxin D. Erosion wear mechanisms of coal–water–slurry (CWS) ceramic nozzles in industry boilers, *Mater* / D. Jianxin, D. Zeliang, Y. Dongling // *Sci. Eng. A* . – 2006. – V. 417. – P. 1–7.
115. Ding Z. Wear surface studies on coal water slurry nozzles in industrial boilers / Z. Ding, J.Deng, J. Li // *Mater. Design*. – 2007. – V. 28. – P. 1531–1538.
116. Glushkov Dmitrii O. Mathematical model simulating the ignition of a droplet of coal water slurry containing petrochemicals / Dmitrii O. Glushkov, Geniy V. Kuznetsov, Pavel A. Strizhak, Semen V. Syrodoy // *Energy*. – 2018. – V.150. – P. 262-275.
117. Kuznetsov G.V. Influence of a wet wood particle form on the characteristics of its ignition in the high-temperature medium / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, N.Y. Gutareva // *Renew. Energy*. – 2020. – V. 145. – P. 1474–1486.
118. 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.

119. Mann H.B. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other / H.B. Mann, D.R. Whitney // *Annals of Mathematical Statistics*. – 1947. – V.18. – P. 50–60.

120. Малышев Д.Ю. Совместное зажигание водоугольной суспензии и древесной биомассы / Д. Ю. Малышев, С.В. Сыродой, Ж.А. Косторева // *Промышленная энергетика*. – 2020. – № 5. – С. 44–49.

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

122. 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.

123. Локальные источники г. Томска [Электронный ресурс]. – <https://tomskrts.ru/rts/harakteristiki-proizvodstvennih-moshnostey/>

124. технические характеристики котла НР-18 [Электронный ресурс]. – <https://kotel-kv.ru/kotel-nr-18.html>

125. Цена каменного угля марки Д [Электронный ресурс]. – <https://kemuglesbit.ru/ugol-semechka-5-20>

126. Технические характеристики котла ТП-230 [Электронный ресурс]. – <https://vmasshtabe.ru/mashinostroenie-i-mehanika/teplotexnika-mashinostroenie-i-mehanika/kotly/energeticheskiy-kotel-tp-230.html>

127. Федеральный закон от 04.05.1999 г. № 96-ФЗ «Об охране атмосферного воздуха» принят Государственной Думой 2 апр. 1999 г. // *Собрание законодательства РФ*. — 1999. — № 1. — Ст. 12.

128. Friedl A. Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition/ A. Friedl, E. Padouvas, H. Rotter, K. Varmuza // *Anal. Chim. Acta*. – 2005. V.544. - P. 191-198.

129. Telmo C. Bioresource backwards stepwise regression between gross calorific value, ultimate and chemical analysis of wood / C. Telmo, J. Lousada, N. Moreira // *Technology Proximate analysis*. – 2010. – V. 510. – P. 3808-3815.

130. 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. - P. 2071-2081.

131. Wang Ch. Calorific value variations in each component and biomass-based energy accumulation of red-heart Chinese fir plantations at different ages/ Ch.Wang, X. Deng, W. Xiang, W. Yan // *Biomass and Bioenergy*. – 2020. - V.134. - P. 105467.

132. Качелкин Л. И., Рушнов Ц. П. и др. Использование отходов лесозаготовок.— М.: Лесная промышленность, 1965.— 323 с.

133. Кузнецов Г.В., Янковский С.А. // *Thermal Engineering*. 2019. vol. 66, no. 2, p. 133.

134. Янковский С.А., Кузнецов Г.В. Механизм подавления оксидов серы в продуктах окислительного термолиза углей при их сжигании в смеси с диспергированной древесиной // *ХТТ*. 2019. № 1. С. 26. *Solid Fuel Chemistry*. 2019. vol. 53, no. 1, p. 22

135. Крышев И.И., Рязанцев Е.П. Экологическая безопасность ядерно-энергетического комплекса России. М.: ИздАТ. 2010.

136. Акимов А.М., Ковалев Н.И. // *Збірник наукових праць СНУЯЕтаП екологічна безпека*. 2009. С.70.

137. Uranium. Resources, production and demand. ONEA. IAEA. Paris. 1997.

138. Тихонов М.Н., Муратов О.Э. // *Экология промышленного производства*. 2009. № 4. С. 40

139. Мауричева Т.С. Количественная оценка поступления радионуклидов в окружающую среду при работе угольных ТЭЦ (на примере ТЭЦ-1 г. Северодвинска). Автореф. дис. канд. геол.-мин. наук. М. 2007

140. Коваленко Г.Д., Пивень А.В. // Ядерна та радіаційна безпека. 2010. № 4(48). С.50.

141. Тихонов М.Н., Муратов О.Э., Петров Э.Л. // Экологическая экспертиза. Обз. инф. М.: ВИНТИ РАН. 2006. № 6. С. 38