

На правах рукописи



**Малышев Дмитрий Юрьевич**

**ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ И ПРИРОДООХРАННЫЕ  
ПРИНЦИПЫ ТЕХНОЛОГИЙ РАБОТЫ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК  
ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ НА ОСНОВЕ  
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИО-ВОДОУГОЛЬНЫХ ТОПЛИВ**

05.14.04 Промышленная теплоэнергетика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Томск – 2021

Работа выполнена в НОЦ И. Н. Бугакова Инженерной школы энергетики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

**Научный руководитель:**

**Кузнецов Гений Владимирович**, доктор физико-математических наук, профессор.

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

**Крайнов Алексей Юрьевич**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой математической физики Физикотехнического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г. Томск.

Защита состоится «22» апреля 2021 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.18 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, д. 7, уч. корпус 8, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: [dis.tpu.ru](http://dis.tpu.ru)

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук



Табакаев Роман  
Борисович

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы.** Наибольшая доля производства электрической энергии приходится на уголь. Последний является самым «грязным», по определению экологов, энергоносителем и процесс его сжигания интенсивно загрязняет окружающую среду. При этом уголь является относительно распространенным ископаемым топливом. Разработано множество серийных проектов теплоэлектроцентралей и котельных различных мощностей, возведение которых возможно в относительно короткие сроки. Стоит сказать, что к 2040 г., по прогнозам специалистов, ожидается серьезный дефицит основных энергоносителей, в том числе нефти и газа, в среднесрочной перспективе на теплогенерирующих установках доля угольного топлива будет только увеличиваться. Из анализа основных прогнозов будущего энергетики можно предположить, что в ближайшие 40-50 лет отказаться от традиционных источников энергии, таких как уголь, не представляется возможным. Поэтому можно сделать обоснованный вывод, что уголь не только будет востребован в энергетике в ближайшем будущем, но и скорее всего, укрепит свои позиции на рынке энергоресурсов.

С целью предотвращения глобальной экологической катастрофы сжигание угля традиционным способом в дальнейшем нецелесообразно, так как при работе угольных теплоэлектроцентралей и котельных в атмосферу Земли выбрасываются большие объемы загрязняющих веществ и антропогенных газов. Последние же являются одной из причин негативного изменения климата на Земле. Поэтому в последние годы активно ведутся разработки по созданию новых, более экологически чистых способов сжигания угля в топках паровых и водогрейных котлов.

Наиболее перспективным по критериям экологической и экономической эффективности является применение в теплоэнергетике новых видов топлив (композитных).

Одним из наиболее перспективных композиционных топлив является смесь угля и воды. Водоугольные суспензии (ВУС) представляют собой высоковязкую систему, состоящую из мелкоизмельченного угля, смешанного с водой и стабилизирующими присадками.

Главным преимуществом ВУТ перед угольным топливом является то, что при сжигании водоугольных суспензий существенно (на 20 – 60 %) уменьшаются выбросы антропогенных газов.

Но, несмотря на ряд таких важных преимуществ, водоугольные технологии пока не получили широкого распространения в энергетике. В первую очередь, это обусловлено тем, что в топливной композиции содержание воды должно быть на уровне 50 - 60% по массе. По этой причине время термической подготовки топлива (инертный нагрев капли ВУТ, испарение влаги, прогрев и воспламенение частицы (после удаления

влаги из приповерхностного слоя)) может достигать несколько десятков секунд (до 30 с).

Одним из возможных способов уменьшения периода индукции (времени задержки зажигания) водоугольного топлива является добавление в его структуру ускоряющей процесс зажигания добавки (например, биомассы). Топливо с растительными добавками можно отнести к новому классу водоугольных суспензий – био-водоугольным топливам (Био-ВУТ).

Актуальность работы подтверждает тот факт, что до последнего времени очень мало изучались (Г. С. Няшина, П. А. Стрижак, К. Ю. Вершинина и др.) процессы зажигания и горения топливных композиций на основе угля, воды и растительной биомассы в условиях, соответствующих камерам сгорания котельных агрегатов. На настоящее время не опубликовано результатов системных экспериментальных исследований по определению времен задержки воспламенения капель представительной группы био-водоугольных топлив.

**Научно - техническая проблема.** Внедрение в промышленную теплоэнергетику перспективных водосодержащих композиционных топлив на основе углей различной степени метаморфизма сдерживается высокими временами задержки зажигания капель таких топлив.

**Цель работы.** Обоснование возможности сбережения энергетических ресурсов и защиты окружающей среды при работе теплоэлектроцентралей и котельных в результате использования суспензий на основе воды и углей различной степени метаморфизма при добавлении в состав топливной композиции лесного горючего материала (ЛГМ) или древесного угля.

**Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:**

1. Разработка экспериментальной методики и создание стенда для исследований процессов зажигания био-водоугольных топлив.

2. Анализ сырьевой базы (вид угля, вид лесного горючего материала), которая может использоваться с целью развития технологий Био-ВУТ и снижения негативного воздействия предприятий промышленной теплоэнергетики на окружающую среду.

3. Выбор перспективных компонентов и разработка технологии приготовления Био-ВУТ.

4. Экспериментальное определение зависимостей времен задержки зажигания био-водоугольных топлив от основных параметров (температура окислительной среды, начальный характерный размер капель и концентрации компонентов топлива).

5. Анализ влияния вида биомассы и степени метаморфизма угля на основные характеристики зажигания суспензионных топлив.

**Научная новизна.** Впервые по результатам экспериментальных исследований обоснованы возможности применения нового класса топлив (био-водоугольных) для паровых и водогрейных котлов на предприятиях

промышленной теплоэнергетики и повышения эффективности использования ВУТ в качестве основного топлива теплоэлектроцентралей и котельных.

**Практическая значимость работы.** Обоснована возможность вовлечения в энергетический сектор лесного горючего материала и отходов лесопиления и лесопереработки в качестве добавки, ускоряющей процесс зажигания водоугольных суспензий, снижающей себестоимость топлива и уменьшающей выход антропогенных веществ. Также обоснована перспектива расширения сырьевой базы промышленной теплоэнергетики новым видом топлива – био-водоугольным.

**Достоверность.** Эксперименты проводились с использованием средств регистрации характеристик исследовавшихся процессов с малыми методическими погрешностями. Для каждого набора исходных данных по условиям эксперимента проводилась серия из 15 опытов. Определялись доверительные интервалы времен задержки зажигания частиц био-водоугольных топлив. Результаты экспериментальных исследований подтверждаются их хорошей повторяемостью.

**Связь работы с научными программами и грантами.**

Диссертационные исследования выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда (проект 18-79-10015 «Разработка основных элементов теории процессов термической подготовки, воспламенения и горения смесевых топлив на основе угля и древесины применительно к камерам сгорания котельных агрегатов») и государственного задания «Наука» (проекты № FSWW-2020-0022 и № 8.13264.2018/8.9).

**Научные положения, результаты и выводы, выносимые на защиту.**

1. Обоснована возможность использования био-водоугольных суспензий в качестве топлива угольных паровых и водогрейных котлов теплоэлектроцентралей и котельных, что обеспечивает снижение антропогенной нагрузки последних на окружающую среду при сжигании углей.

2. Впервые теоретически и экспериментально установлено значение периода химической индукции био-водоугольного топлива в условиях, соответствующих камерам сгорания котельных установок промышленной теплоэнергетики.

3. Добавление лесных горючих материалов в состав водоугольного топлива позволяет уменьшить время задержки зажигания более чем в три раза при температурах до 1073 К, что позволяет снизить существенно энергозатраты на термическую подготовку водоугольного топлива к сжиганию (например, уменьшение размеров предтопка).

4. Частицы Био-ВУТ на основе угля марки Т с добавлением лесного горючего материала зажигаются быстрее смесей на основе

длиннопламенного и бурого углей в условиях относительно низких температур.

5. Выявлено, что вид листового опада не оказывает существенного влияния на временные характеристики зажигания био-водоугольного топлива.

6. Время развития термохимической реакции не превышает 0,02 % от всего времени задержки зажигания капли топлива в условиях, соответствующих топкам паровых и водогрейных котлов.

7. Для капель био-водоугольного топлива характерным является не мгновенное распространение пламени по всей поверхности частицы.

**Личный вклад.** Автор диссертации провел планирование и подготовку экспериментальных исследований, выполнил эксперименты, обработку и анализ полученных результатов, оценку погрешностей, анализ и обобщение результатов. Также автор проводил написание статей и подготовку докладов для выступления на конференциях. Автором сформулированы основные защищаемые положения и выводы.

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

1. VIII Всероссийская научная конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск, 2019, 2020);

2. 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);

3. XVII Международная научно-практическая конференция "Энерго- и ресурсосбережение - XXI век" (МИК-2019, г. Орел);

4. 4-я Международная научная конференция перспективных разработок молодых ученых «Наука молодых - будущее России» (МЛ-41, г. Курск, 2019).

**Публикации.** Опубликованы пять статей в международных научных журналах, индексируемых базами «Scopus» и «Web of Science»: «Energy», «Applied Thermal Engineering», «Combustion Science and Technology» «AIP Conference Proceedings». Опубликованы две статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов кандидатских диссертаций: «Промышленная энергетика», «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов».

**Структура и объем работы.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, изложена на 140 страницах, содержит 42 рисунок и 14 таблиц. Список литературы состоит из 255 источников.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

**Первая глава** содержит анализ современного состояния теории и практики использования в промышленной теплоэнергетике водоугольных топлив. Представлены примеры промышленного использования суспензий на теплогенерирующих установках. Обоснована их перспективность. Показано, что на сегодняшний день не опубликовано результатов экспериментальных исследований зажигания и горения био-водоугольных суспензий.

**Вторая глава** посвящена описанию методики проведения экспериментальных исследований. Экспериментальные исследования процессов зажигания и горения одиночных капель Био-ВУТ проводились на стенде (рисунок 1), состоящем из электрической высокотемпературной трубчатой печи сопротивления и высокоскоростной видеокамеры, установленных на подвижной платформе. Последняя перемещалась по специальным рельсам. Печь представляет собой полый керамический цилиндр, на внешней поверхности которого крепился нагреватель, по которому протекал электрический ток. Электрическая энергия нагревателя преобразовывалась в тепловую. Для предотвращения тепловых потерь вся нагревательная система покрывалась многослойной теплоизоляцией из минеральной ваты. Зона нагрева разделена на три части с независимым управлением в каждой секции. Температура во внутреннем пространстве печи контролировалась хромель-алюмелевыми термоэлектрическими преобразователями. Торцы цилиндра закрывались жаростойким шамотным кирпичом и открывались в момент времени, предшествующий вводу капли топлива в полость керамического цилиндра. На металлическом держателе закреплялась капля топлива. Температура воздуха ( $T_g$ ) в печи варьировалась при помощи регулятора в достаточно широком диапазоне (от 873 К до 1273 К). Такой диапазон соответствует температурам внутритопочной среды типичных паровых и водогрейных котлов. Процессы зажигания и термической подготовки фиксировала высокоскоростная видеокамера Photron FASTCAM CA4 (скорость видеосъемки ( $frame$ ) до 20 000 кад/с). Период времени от начала теплового воздействия (момент ввода капли в печь, кадр  $m1$ ) до зажигания (появление пламени, кадр  $m2$ ) считался временем задержки воспламенения ( $t_{ign}$ ), которое вычислялось по формуле:

$$t_{ign} = \frac{m2 - m1}{frame}.$$

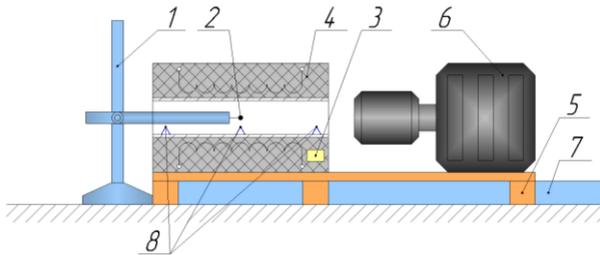


Рисунок 1 - Экспериментальный стенд

1 – держатель капли; 2 – капля топлива; 3 – регулятор температуры; 4 – высокотемпературная печь, 5 – подвижная платформа; 6 – высокоскоростная видеокамера, 7 – направляющая подвижной платформы, 8 – термопары.

Для приготовления суспензионного топлива использовались угли марок «2Б», «Д», «Т», «А» и широкий перечень растительных добавок (листья березы, дуба, ивы, еловая и сосновая хвоя, твердые продукты пиролиза древесины). Для каждой топливной композиции проводилась серия экспериментов не менее чем из 15 опытов.

**В третьей главе** представлены результаты проведенных экспериментальных исследований процессов зажигания и горения частиц био-водоугольных топлив. Анализ кадров типичных видеogramм процессов термической подготовки и последующего зажигания одиночных капель топливных суспензий показывает, что весь период термической подготовки и зажигания топлива можно разделить на ряд последовательных и взаимосвязанных стадий (рисунок 2). Каждую из них можно охарактеризовать доминированием одного физического процесса, такого как инертный нагрев, испарение воды, термическое разложение органической части угля и лесного горючего материала, непосредственное зажигание топливной частицы. В начальный момент времени (кадр а,  $t=0$  с) Био-ВУТ представляет собой каплю топлива в суспензионном состоянии. Инертный нагрев инициирует процесс интенсивного испарения воды (кадр б). В результате влагоудаления из приповерхностного слоя капля трансформируется в существенно неоднородную по структуре (с водонасыщенной и сухой зонами) частицу био-водоугольного топлива. Дальнейший нагрев инициирует процесс термического разложения органической части угля и лесного горючего материала и, соответственно, выход горючих газов. Через промежуток времени  $t=t_{\text{ign}}$  после начала нагрева происходит зажигание частицы (кадр с).

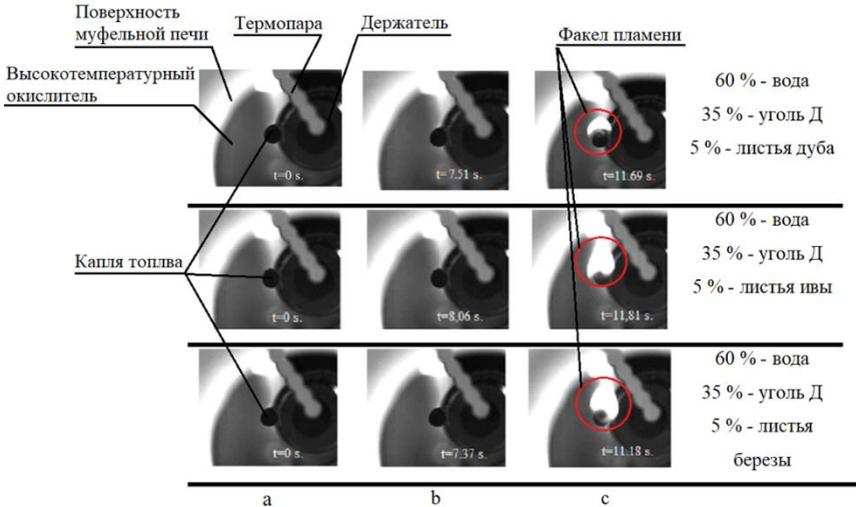


Рисунок 2 – Типичные кадры процесса воспламенения капель Био-ВУТ (на основе длинопламенного угля с добавлением листьев различных пород древесины) размером 2,5 мм при температуре окислителя  $T=1073$  К (а - начало инертного нагрева капли Био-ВУТ, б – кадр, характеризующий окончание процесса влагоудаления с поверхности частицы био-водоугольного топлива, с – зажигание частицы Био-ВУТ)

На рисунке 3 приведены зависимости времен задержки зажигания от температуры внешней среды для капель размером  $d=2,5$  мм (в начальном состоянии) био-водоугольного топлив, выполненных из углей различной степени метаморфизма.

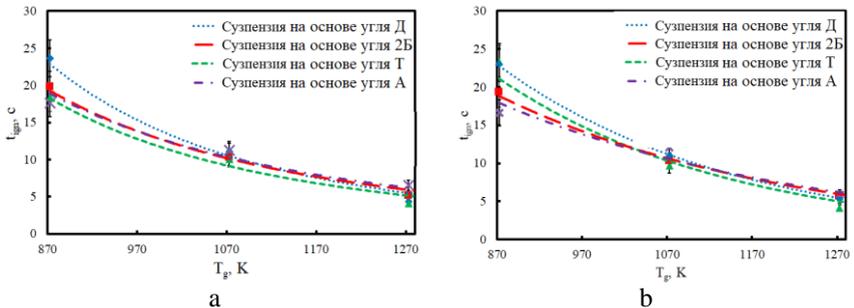
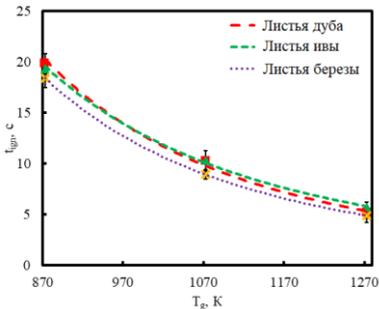


Рисунок 3 - Зависимости времён задержки зажигания капель био-водоугольных топлив, выполненных на основе углей различной степени метаморфизма с добавлением (а - листьев дуба, б - листьев ивы) от температуры окислительной среды

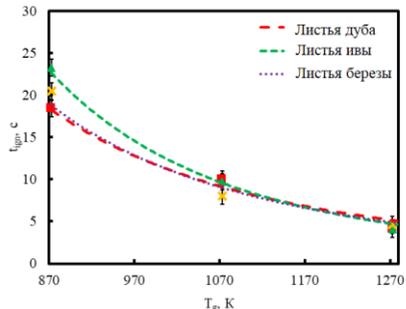
Установлено, что в условиях относительно высоких температур внешней среды ( $T_g \geq 1073\text{K}$ ) значения  $t_{\text{ign}}$  топлив на основе разных углей практически идентичны (не выходят за пределы доверительного интервала определения  $t_{\text{ign}}$ ).

В условиях же относительно низких значений  $T_g$  (менее  $1073\text{K}$ ) капли Био-ВУТ, выполненных на основе длиннопламенного угля, воспламеняются медленнее других био-водоугольных топлив (на основе бурого угля, антрацита и тощего угля). В то же время известно, что капли водоугольных топлив на базе антрацита воспламеняются медленнее капель ВУТ, приготовленных на основе бурого или длиннопламенного угля. Обусловлено это тем, что в антраците мало (по сравнению с бурыми или каменными углями) летучих. Соответственно, процесс инициирования горения у таких углей протекает медленнее, чем у длиннопламенного или бурого (которые богаты летучим). Этот результат обуславливается двумя факторами. Во-первых, как известно из теории формирования углей, увеличение степени метаморфизма приводит к увеличению коэффициента теплопроводности и снижению теплоемкости угля. Во – вторых, в структуре био-водоугольного композита есть биомасса (на основе лесного горючего материала). Известно, что ЛГМ является высоко «реакционным» топливом. В результате совместного влияния вышеперечисленных факторов прогрев капель Био-ВУТ на основе антрацита или тощего угля протекает интенсивнее, чем у идентичных (по размерам) топливных капель на основе бурых или длиннопламенных углей. Соответственно, глубина прогрева антрацита больше, а пиролиз ЛГМ и органической частиц угля иницируется на большей глубине. В итоге увеличивается скорость притока массы горючих газообразных продуктов пиролиза в зону реакции зажигания летучих.

На рисунке 4 приведены зависимости времен задержки зажигания топливных композиций от температуры окислителя для капель с характерным размером 2,5 мм.



а



б

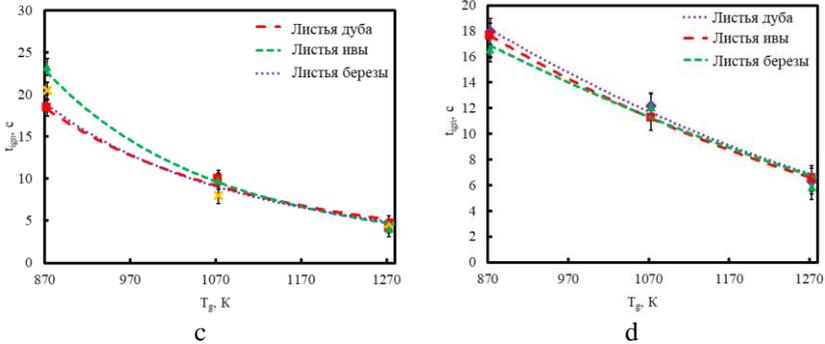


Рисунок 4 - Зависимости времён задержки зажигания капель био-водоугольного топлива от температуры внешней среды (а – тощий; б – бурый; с – длиннопламенный; д – антрацит)

Установленные зависимости  $t_{ign}(T_g)$  показывают (рисунок 4), что вид опада лиственных пород древесины практически не оказывает заметного влияния на условия и характеристики зажигания Био-ВУТ. С целью проведения сравнительного анализа влияния вида биомассы на характеристики зажигания на рисунке 5 приведены экспериментальные значения  $t_{ign}$  частиц ВУТ на основе длиннопламенного угля от температуры окислителя (воздуха).

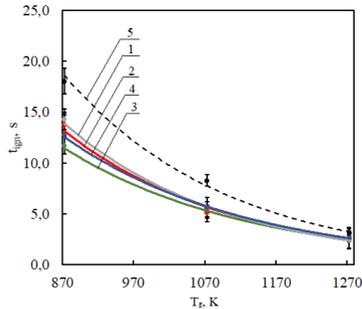


Рисунок 5 – Зависимости времён задержки зажигания био-водоугольных и водоугольных суспензий на основе длиннопламенного угля от температуры окислителя при начальном размере капель 2 мм (1 – с добавлением листьев березы, 2 – с добавлением хвой сосны, 3 – с добавлением хвой ели, 4 – с добавлением древесного угля, 5 – ВУТ без добавок)

Можно сделать вывод, что биомасса является существенно ускоряющей процесс зажигания ВУТ добавкой. В условиях относительно низких температур внешней среды ( $T_g \leq 1073$  К) капли Био-ВУТ загораются значительно быстрее (времена задержки зажигания снижаются более чем на 30 %), чем идентичные по размерам и марке угля капли водоугольного

топлива. Это можно объяснить большим содержанием летучих веществ в ЛГМ (по сравнению с каменным углем). Соответственно, в реальной практике Био-ВУТ можно применять в качестве растопочного топлива для вывода на производственную мощность теплогенерирующих установок промышленной теплоэнергетики.

Необходимо отметить, что существенное влияние на времена задержки зажигания оказывает характерный размер капель суспензионных топлив. Экспериментальные данные, иллюстрирующие зависимость времени задержки зажигания от начального характерного размера капель топлив при различных температурах, приведены на рисунке 6.

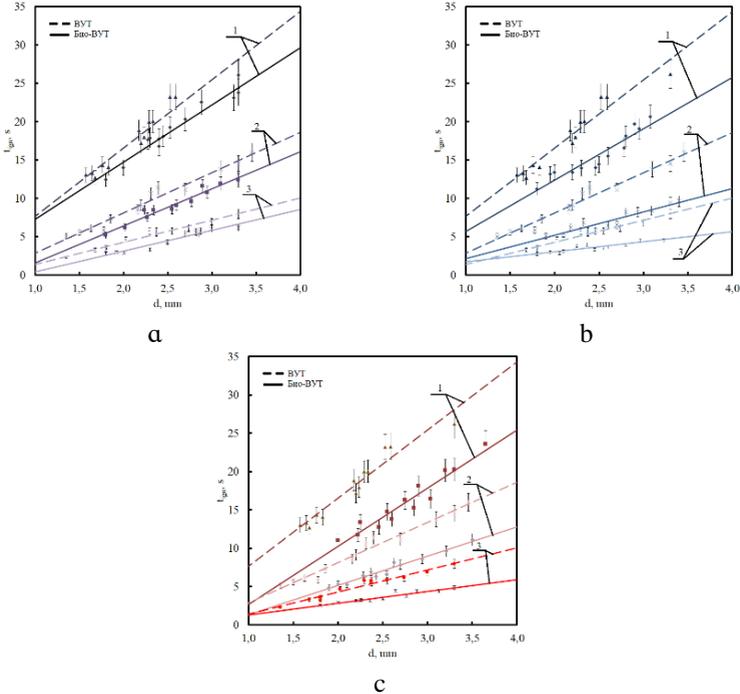


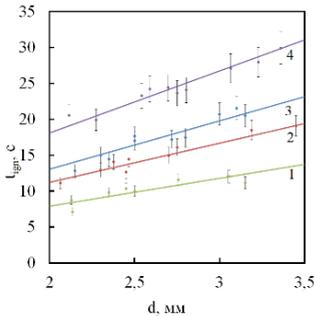
Рисунок 6 – Зависимости времени задержки зажигания капель Био-ВУТ на основе угля марки Д (а – смесь с добавлением листьев дуба, б – смесь с добавлением листьев ивы, с – смесь с добавлением листьев березы) от размера при разных температурах (1 –  $T = 873$  К, 2 –  $1073$  К, 3 –  $1273$  К)

Анализ приведенных на рисунке 6 зависимостей  $t_{ign}(d)$  показывает, что, как и следует из общей теории зажигания капель и частиц топлива, время задержки зажигания существенно зависит не только от температуры среды, в которой находится капля или частица, а также от характерного размера последних. На рисунке 6 хорошо видно, что время задержки зажигания

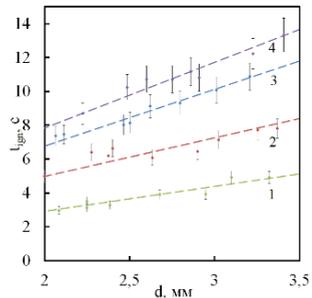
топлив линейно растет с увеличением размеров частиц Био-ВУТ. При этом, чем выше температура окислителя, тем меньше угол наклона зависимости  $t_{ign}(d)$ . Установленные закономерности, скорее всего, обусловлены тем, что зажигание газообразных продуктов пиролиза органической части угля происходит после полного испарения всей влаги, содержащейся в топливе. Чем больше размер капли топлива, тем длительнее процесс влагоудаления и, соответственно, больше время задержки зажигания при любых температурах среды. С ростом  $T_g$  скорость испарения воды возрастает, и значение  $t_{ign}$  в результате снижается. Эффективного сжигания био-водоугольного топлива можно достичь путем тонкодисперсного распыла суспензии в топках котлов промышленной теплоэнергетики. Результаты экспериментов, приведенные на рисунке 6, наглядно иллюстрируют, что добавление ЛГМ существенно уменьшает период индукции капель био-водоугольной суспензии с характерным размером до 2 мм (снижение  $t_{ign}$  до 30% по сравнению с ВУТ).

Также представляет научный интерес влияние концентрации биомассы на характеристики зажигания суспензионного топлива. Концентрация горючей компоненты принималась 50 %. Стоит отметить, что механизм зажигания для всех исследовавшихся топливных композиций является общим, но длительность отдельных стадий существенно отличается и зависит от составов топлив.

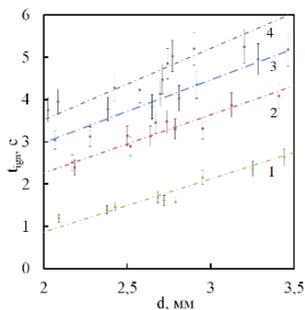
Содержание ЛГМ оказывает существенное влияние на зажигание Био-ВУТ. На рисунке 7 приведены значения времен задержки зажигания одиночных капель био-водоугольного топлива (в начальный период времени, а затем частиц после испарения влаги из приповерхностного слоя).



а



б



с

Рисунок 7 – Зависимости времен задержки зажигания каплей водугольных суспензий (массовая концентрация биомассы: 1 – 15 %, 2 – 10 %, 3 – 5 %, 4 – 0 %) от начального размера при различных температурах окислителя (а – 873 К, b – 1073 К, c – 1273 К)

Основным результатом проведенных экспериментов можно считать то, что смеси с добавлением лесного горючего материала зажигаются значительно быстрее (для смеси с добавлением 15 % биомассы времена задержки зажигания уменьшаются более чем в три раза), по сравнению с ВУТ без добавления ЛГМ (рисунок 7). Это обусловлено тем, что биомасса богата летучими, по сравнению с углем, в котором, как известно из теории формирования углей, содержание горючих газов меньше, чем в древесине. С увеличением массовой доли ЛГМ приток горючих газов в область вблизи поверхности частицы увеличивается, поэтому зажигание в газовой фазе происходит быстрее. Можно сделать обоснованный вывод, что биомасса является более реакционным топливом и в составе водугольной суспензии выступает в качестве «разгонщика» реакции зажигания частиц Био-ВУТ.

При существенном снижении (в 2,5-3 раза) времен задержки зажигания каплей водугольных топлив с добавками ЛГМ снижается и общее время термической подготовки таких топлив. Кроме того, добавление 10-15 % ЛГМ снижает потребление угля на теплоэлектростанциях и в котельных. Это, в свою очередь, приводит к существенному повышению ресурсоэффективности технологий сжигания ВУТ.

Возможны и другие способы улучшения динамики горения водугольных суспензий - подсветка факела ВУТ другим (более реакционным) топливом (например, газ, мазут, дизельное топливо) или плазмой. Одним из таких возможных способов улучшения характеристик воспламенения и горения водугольных топлив является технология комбинированного сжигания ВУТ и биомассы в одном топочном устройстве. Измельченная древесина является перспективным топливом паровых и водогрейных котлов промышленной теплоэнергетики. Повысить эффективность ВУТ можно в результате совместного сжигания с

мелкодисперсными частицами древесины. В любых условиях древесная частица начнет гореть первой, как более сухое конденсированное вещество.

Проведены эксперименты, в которых использовались частицы древесины (сосна) с характерным размером 3 мм, влажность которых составляла 1,0 - 1,5 %. Расстояния между частицами приняты таким, какие могут быть в реальной топке парового или водогрейного котла при распылении ВУТ и древесных частиц определённой дисперсности (фракционного состава).

Установлено, что процессы зажигания частиц древесной биомассы и водоугольной суспензии существенно отличаются. Воспламенение частиц ВУТ протекает в условиях интенсивных фазовых (испарение воды) и термохимических (термическое разложение органической части угля) превращений. Это обусловлено большим содержанием воды (50 % по массе) в суспензии.

В отличие от водоугольного топлива частицы древесины сухие. По этой причине характерные времена задержки зажигания биомассы существенно меньше. Это обусловлено тем, что практически отсутствует самый длительный и энергозатратный этап термической подготовки – испарение воды.

На рисунке 8 представлены типичные кадры термической подготовки и совместного зажигания частиц древесной биомассы и водоугольного топлива.

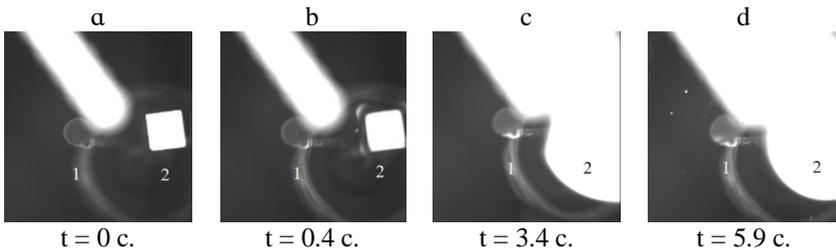


Рисунок 8 – Видеogramма процесса прогрева и последующего зажигания капли водоугольного топлива (1) и частицы древесины (2) в высокотемпературной среде ( $T_g=1273K$ )

На рисунке 8 представлены типичные кадры нагрева и последующего воспламенения частицы древесины и капли ВУТ. Высокотемпературный нагрев приводит к термическому разложению основных компонентов биомассы, в результате выделяются газообразные продукты пиролиза. Дальнейший нагрев приводит к газофазному воспламенению древесной биомассы (кадр b, рисунок 8). Воспламенение локализуется в районе ребер куба частицы. Это обусловлено тем, что такие угловые точки выступают в роли концентраторов тепловых потоков. В результате формируется сфера пламени, которая по своим размерам в несколько раз превышает размеры

частицы (кадр с, рисунок 8). Горящий факел газообразных продуктов пиролиза существенно интенсифицирует нагрев капли водоугольной суспензии. В результате процессы термической подготовки (испарение воды и термическое разложение органической части угля) значительно ускоряются. В момент времени  $t=t_{ign}$  происходит зажигание водоугольной суспензии (кадр d, рисунок 8).

На рисунке 9 а приведены значения времен задержки зажигания одиночных частиц древесины и при совместном зажигании ВУТ и биомассы. В интервале температур от 873 К до 1073 К одиночная частица древесины загорается быстрее (на 15 %), чем совместно с каплей водоугольной суспензии. Это связано с тем, что нагрев капли ВУТ интенсифицирует испарение воды. Фазовый переход является эндотермическим процессом, в результате температура газовой среды в малой окрестности древесных частиц снижается, и как следствие, времена задержки зажигания такой частицы увеличиваются на 15 %.

В условиях же высоких температур (свыше 1073 К) значения  $t_{ign}$  одиночной частицы древесины и сжигаемой совместно с ВУТ идентичны.

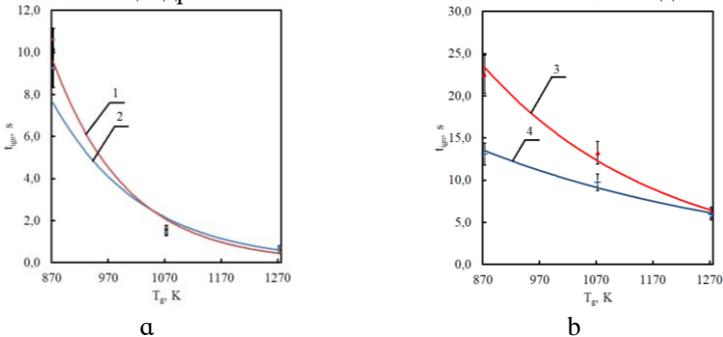


Рисунок 9 – Зависимости времен задержки зажигания от температуры окислителя: а - древесины (1 в составе топливной композиции, 2 – одиночной частицы); б - водоугольного топлива (3 – одиночной капли, 4 – в составе топливной композиции)

На рисунке 9 б приведены зависимости времен задержки зажигания одиночной капли ВУТ и в условиях совместного зажигания с частицей древесины. Анализ зависимостей  $t_{ign}(T_g)$  показывает, что в условиях совместного зажигания частиц биомассы и ВУТ последняя воспламеняется значительно быстрее (на 58% по сравнению с процессом зажигания одиночной частицы водоугольного топлива). Это связано с тем, что на начальном этапе происходит воспламенение древесины. В результате интенсивного радиационного нагрева существенно интенсифицируются все процессы термической подготовки (испарение внутрипоровой и адсорбционно – связанной влаги, термическое разложение органической

части угля) частицы водоугольного топлива. В этих условиях древесина выступает в качестве «разгонщика» термохимической реакции зажигания капли водоугольной суспензии.

**Четвертая глава** посвящена анализу интегральных характеристик «химической» стадии воспламенения био-водоугольных топлив. Впервые выделен период химической индукции капель суспензионных топлив по результатам экспериментальных и теоретических исследований.

На рисунке 10 приведены типичные кадры процесса непосредственного зажигания (интенсивного термохимического реагирования газообразных продуктов пиролиза угля и биомассы с высокотемпературным окислителем) капли био-водоугольного топлива на основе угля марки Д с добавлением листьев березы.

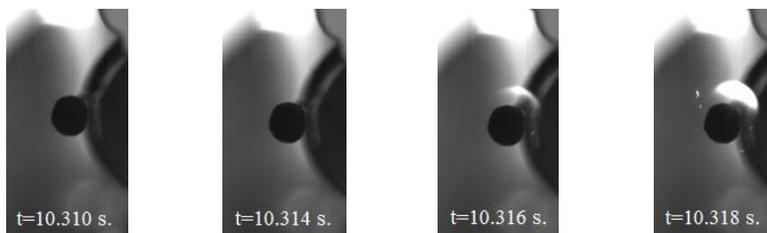


Рисунок 10 – Фрагмент видеогаммы процесса воспламенения водоугольной суспензии на основе угля марки Д с добавлением листьев березы в высокотемпературной среде ( $T_g=1073$  К)

При более детальном анализе видеогаммы (рисунок 10) процесса воспламенения установлено, что длительность стадии «химической индукции» не превышает 0,002 секунды. Время же всего периода термической подготовки топлива (от момента ввода в высокотемпературную среду окислителя до появления первого пламени) составляет  $t_{ign}=10,314$  секунд. Другими словами, непосредственно процесс воспламенения (химической реакции) составляет 0,02 % от общего периода индукции. Но стоит отметить, что несмотря на высокую скорость видеосъемки (до 20 000 кадров в секунду), возможности камеры ограничены (не позволяет регистрировать более малые интервалы времени). Поэтому является актуальным расчет времени химической индукции  $t_{ind}$ . О. М. Тодесом получена формула (1), позволяющая определить  $t_{ind}$ :

$$t_{ind} = \left( 1 + 2 \cdot \left( \frac{R \cdot T_c}{E} \right) \right) \cdot \frac{R \cdot T_c^2}{E} \cdot \frac{C_p}{Q \cdot k} \cdot \exp \left( \frac{E}{R \cdot T_c} \right), \quad (1)$$

где  $R$ - универсальная газовая постоянная,  $T_c$  – температура среды,  $E$  – энергия активации,  $k$  – предэкспоненциальный множитель в законе Аррениуса,  $Q$  – тепловой эффект реакции,  $C_p$  – удельная теплоемкость.

При вычислении  $t_{\text{ind}}$  принималось, что основными газообразными продуктами термического разложения угля и биомассы являются окись углерода (CO), водород (H<sub>2</sub>) и метан (CH<sub>4</sub>), а содержание других выделяющихся горючих газов мало. Поэтому вклад других газов в загорание топлива при расчете не учитывался.

Используя математическое выражение (1) рассчитаны периоды химической индукции для каждого из газов при температурах, достигнутых в проведенных экспериментах. Полученные результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Период «химической индукции» основных горючих продуктов пиролиза ВУТ и древесины

	$t_{\text{ind}}, \text{c}$			
	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C
$T_g = 873 \text{ K}$	$7,660 \cdot 10^{-4}$	$1,919 \cdot 10^{-10}$	$1,680 \cdot 10^{-9}$	4,3480
$T_g = 1073 \text{ K}$	$1,010 \cdot 10^{-4}$	$1,058 \cdot 10^{-11}$	$1,810 \cdot 10^{-10}$	0,215
$T_g = 1273 \text{ K}$	$2,670 \cdot 10^{-5}$	$1,548 \cdot 10^{-12}$	$4,21 \cdot 10^{-11}$	0,029

На основании результатов выполненных экспериментов можно сделать вывод, что при загорании частиц био-водоугольного топлива самым продолжительным и энергозатратным этапом является период, предшествующий непосредственному газофазному воспламенению – период инертного прогрева. Так, например, при проектировании промышленных котельных агрегатов можно не учитывать промежуток времени необходимый на развитие термохимической реакции био-водоугольных топлив, потому что его продолжительность крайне мала.

Выполнен анализ влияния температуры окислительной среды, основных компонентов (степень метаморфизма угля, массовая концентрация горючих компонентов) суспензии на времена распространения пламени по всей поверхности частиц Био-ВУТ. Анализ результатов экспериментов показывает, что при температуре окислительной среды  $T_g = 873 \text{ K}$  имеет место гетерогенное загорание топливных частиц. Это обусловлено тем, что процесс термического разложения органической части угля и основных компонентов биомассы протекает с относительно невысокой скоростью. Выделившиеся летучие вещества в результате молекулярной диффузии распределяются по всему объему, окружающему частицу топлива. В результате вблизи поверхности частицы концентрация горючей смеси недостаточна для интенсивного газофазного горения.

В случае же относительно высоких температур ( $T_g \geq 1073 \text{ K}$ ) пиролиз органической части угля и основных компонентов биомассы протекает с достаточно высокой скоростью. Соответственно, существенно интенсифицируется процесс выхода летучих веществ. В результате формируется смесь газообразного горючего и окислителя с высоким

градиентом концентраций, и критические условия (соотношение горючес-окислитель) достигаются быстрее. Вследствие этого зажигание капель водоугольных топлив при ( $T_g \geq 1073$  К) протекает, как правило, в газовой фазе.

Стоит отметить, что в некоторых случаях размер сферы пламени больше при температуре  $T_g = 1073$  К по сравнению с установленными при более высоких температурах, в особенности, при содержании биомассы 15 %. Скорее всего, это вызвано тем, что в условиях относительно высоких температур ( $T_g \geq 1273$  К) разница температур горения факела и внешней среды незначительна. Поэтому конвективная диффузия оказывает слабое влияние при относительно низких температурах ( $T_g \leq 1073$  К). В этом случае конвективный подвод кислорода воздуха в область горения становится менее интенсивным.

На рисунке 11 приведены зависимости периода распространения пламени по поверхности частиц био-водоугольных смесей с характерным размером 2,5 мм на основе углей различной степени метаморфизма от температуры окислителя.

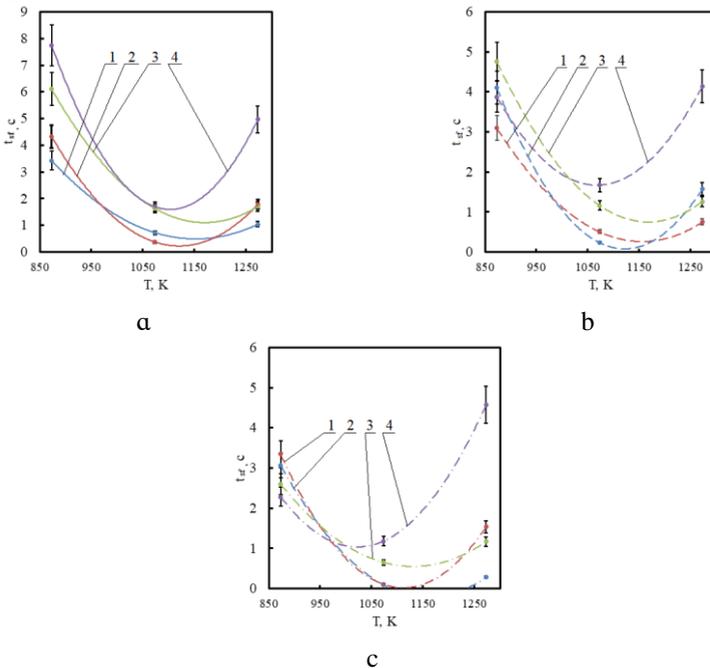


Рисунок 11 – Зависимость времени распространения пламени по поверхности частиц био-водоугольных суспензий с различными концентрациями биомассы (а - 5 %, b - 10 %, c - 15 %,) на основе углей

различной степени метаморфизма (1 – уголь марки 2Б, 2 – уголь марки Д, 3 – уголь марки Т, 4 – антрацит) от температуры окислителя

Анализ результатов проведенных экспериментов дает основания для вывода, о том, что зависимости времени полного распространения пламени по поверхности частиц существенно нелинейны. Более того, функция  $t_{sf} = f(T_g)$  с ростом температуры (до 1073 К) монотонно убывает. Затем, достигнув определенного минимума, начинает возрастать. При этом, значение минимума  $t_{sf}$  зависит от группы факторов. Можно отметить, что с увеличением содержания биомассы в составе топлива происходит смещение минимума  $t_{sf}$  в область более низких температур.

Установлено, что полученные зависимости хорошо описывает полином второй степени  $t_{sf}(T_g) = a \cdot T_g^2 + b \cdot T_g + c$ .

Значения температуры окислителя и времени распространения пламени по поверхности частиц топлива приведены в таблице 3.

Таблица 2 – значения температуры окислителя и времен полного распространения пламени по поверхности частицы Био-ВУТ на основе антрацитового угля при различных концентрациях биомассы

		Содержание биомассы 5 %		Содержание биомассы 10 %		Содержание биомассы 15 %	
$T_{g1}$	873 К	$t_{sf11}$	7,7 с	$t_{sf21}$	3,8 с	$t_{sf31}$	2,2 с
$T_{g2}$	1073 К	$t_{sf12}$	1,7 с	$t_{sf22}$	1,6 с	$t_{sf32}$	1,1 с
$T_{g3}$	1273 К	$t_{sf13}$	4,9 с	$t_{sf23}$	4,1 с	$t_{sf33}$	4,5 с

Для различных концентраций лесного горючего материала получили значения точек перегиба функций  $t_{sf} = f(T_g)$ , при которых период индукции с ростом температуры окислителя перестает убывать и начинает расти (таблица 3).

Таблица 3 – значение температурных точек локального минимума зависимости  $t_{sf} = f(T_g)$  био-водоугольного топлива на основе антрацита при различных концентрациях биомассы

Концентрация биомассы	Температуры
5 %	1102 К
10 %	1067 К
15 %	1022К

Проведенные эксперименты показали, что при увеличении массовой концентрации ЛГМ в составе био-водоугольной суспензии с 5 % до 15 % температура, соответствующая минимальному значению времени распространения пламени по всей поверхности частиц, уменьшается на 7,8 %.

Схожая динамика наблюдается при увеличении степени метаморфизма угля, на основе которого приготовлено био-водоугольное топливо (смещение точки минимума функции  $t_{sf} = f(T_g)$  в область более низких температур). Это обусловлено тем, что теплофизические характеристики топлива играют одну из ключевых ролей в процессе до зажигания. С увеличением степени метаморфизма теплоемкость угля уменьшается, а теплопроводность возрастает. Поэтому время от появления первого пламени до развитого горения антрацита меньше, чем у каменных и бурых углей.

Возможной причиной вида зависимостей  $t_{sf}(T_g)$ , приведенных на рисунке 11, является совместное влияние нескольких взаимосвязанных процессов. Рост температуры приводит к увеличению скорости испарения воды, заполняющей поры частицы топлива. И чем выше температура, тем больше скорость испарения и, соответственно, концентрация паров воды вокруг частицы. При выходе водяных паров из частицы идет несколько параллельных процессов: пиролиз основных компонентов биомассы и органической части угля и испарение влаги в глубинных слоях частицы топлива. Скорость горения горючих газов определяется их концентрациями и температурами. При температурах, близких к 1073 К, скорость испарения влаги из топлива выше, чем скорость притока горючих газов в область вблизи частицы. Другими словами, при высоких температурах окислительной среды концентрация водяного пара вблизи поверхности частицы будет велика. Это приводит к снижению концентрации горючих газов вблизи поверхности частицы и, соответственно, динамики воспламенения био-водоугольных топлив в условиях относительно высоких температур.

Также стоит отметить, что при концентрации биомассы 5 % период индукции увеличивается (в области относительно низких температур) со степенью метаморфизма углей (от бурых углей до антрацита), на основе которых выполнены суспензии. Но, с ростом концентрации лесного горючего материала (до 15 %) зарегистрирован диаметрально противоположенный результат. Наименьший период индукции соответствует смеси на основе антрацитового угля, а наибольший для био-водоугольной суспензии, выполненной из длиннопламенного угля. Поэтому можно сделать вывод, что биомасса начинает гореть первой и инициирует горение угля.

На рисунке 12 приведены зависимости времени распространения пламени по всей поверхности частицы Био-ВУТ от концентраций лесного горючего материала в суспензиях, выполненных на основе группы типичных углей.

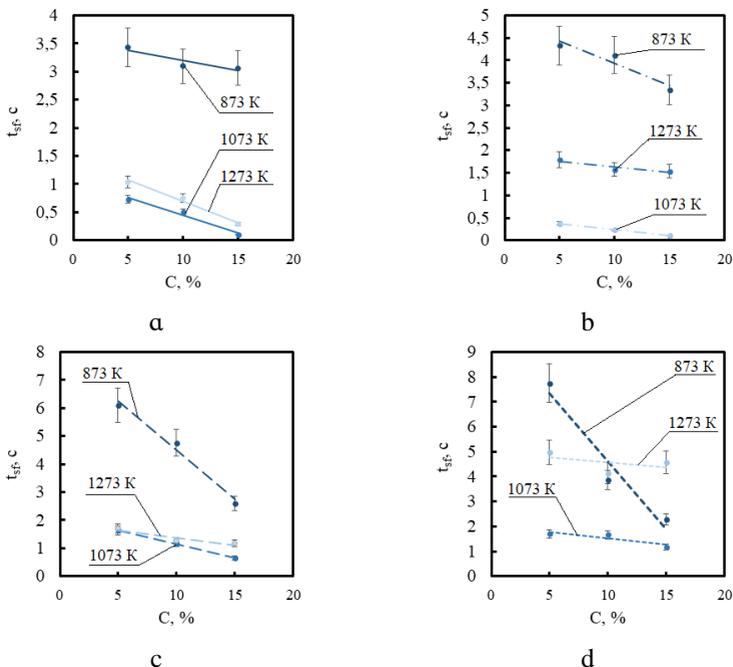


Рисунок 12 – Зависимость времени распространения пламени по всей поверхности частиц био-водоугольных суспензий на основе углей различных марок (а - бурый, б – длиннопламенный, с – тощий, d - антрацит) от концентрации лесного горючего материала

Из анализа рисунка 12 видно, что для всех смесей био-водоугольных суспензий увеличение доли растительной компоненты приводит к снижению времени, необходимого для полного охвата топливной частицы пламенем. Это вызвано тем, что при пиролизе биомассы выделяется существенно больше летучих веществ, по сравнению с углем. Кроме того, с увеличением степени метаморфизма угля и увеличением концентрации биомассы угол наклона кривой увеличивается (влияние биомассы на процессы воспламенения возрастает). Это связано с ростом значения коэффициента теплопроводности и уменьшением теплоемкости угля с увеличением степени метаморфизма, поэтому топливо прогревается быстрее и пиролиз идет на больших глубинах.

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

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Обоснована возможность использования био-водоугольных суспензий в качестве топлива угольных паровых и водогрейных котлов теплоэлектроцентралей и котельных, что обеспечивает снижение антропогенной нагрузки последних на окружающую среду при сжигании углей.
2. Впервые теоретически и экспериментально установлено значение периода химической индукции био-водоугольного топлива в условиях соответствующих камерам сгорания котельных установок промышленной теплоэнергетики.
3. Добавление лесных горючих материалов в состав водоугольного топлива позволяет уменьшить время задержки зажигания более чем в три раза при температурах до 1073 К, что позволяет снизить существенно энергозатраты на термическую подготовку водоугольного топлива к сжиганию (например, уменьшение размеров предтопка).
4. Частицы Био-ВУТ на основе угля марки Т с добавлением лесного горючего материала зажигаются быстрее смесей на основе длиннопламенного и бурого углей в условиях относительно низких температур.
5. Выявлено, что вид листового опада не оказывает существенного влияния на временные характеристики зажигания био-водоугольного топлива.
6. Время развития термохимической реакции не превышает 0,02 % от всего времени задержки зажигания капли топлива в условиях соответствующих топкам паровых и водогрейных котлов.
7. Для капель био-водоугольного топлива характерным является не мгновенное распространение пламени по всей поверхности частицы.
8. По результатам экспериментальных исследований установлено, что водоугольное топливо можно эффективно сжигать совместно с древесной биомассой в условиях соответствующих топкам паровых и водогрейных котлов. Совместное сжигание позволяет снизить времена задержки зажигания такой смеси до 58 %, по сравнению с одиночной каплей ВУТ, особенно в условиях низкотемпературного сжигания (873 К – 1073 К).

### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО РАБОТЕ

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

1. Malyshev, D. Yu. Theoretical justification of utilization of forest waste by incineration in a composition of bio-water-coal suspensions. Ignition stage / G.V.Kuznetsov, D. Yu. Malyshev, S.V.Syrodoy, N.Yu.Gutareva, N.A.Nigay // Applied Thermal Engineering. – 2020. – V. 170. – 115034.
2. Malyshev, D. Yu. The ignition of the bio water-coal fuel particles based on coals of different degree metamorphism / G.V. Kuznetsov, D. Yu. Malyshev, Zh. A. Kostoreva, S.V. Syrodoy, N. Yu. Gutareva // Energy. – V. 201. – 117701.
3. Malyshev, D. Yu. Ignition of bio-water-coal fuels based on coal and charcoal / G.V. Kuznetsov, D. Yu. Malyshev, S.V. Syrodoy, N. Gutareva, M. V. Purin, Z. A. Kostoreva // Combustion Science and Technology. – 2020. - DOI: 10.1080/00102202.2020.1799203.
4. Malyshev, D. Yu., Kostoreva, Z.A., Naumkin, A.S. The study of coal-based bio-hydrous coal suspensions of varying degrees of metamorphism with the addition of fine sawmill and woodworking waste addition of fine sawmill and woodworking waste / D. Yu. Malyshev, Z.A. Kostoreva, A.S. Naumkin // AIP Conference Proceedings. – 2020. – V. 2212. – 020032.
5. Malyshev D. Yu. Changing the characteristics of the ignition process of hydrocarbon fuels when used in the third component of charcoal / D. Yu. Malyshev, S. V. Syrodoy, Y.V. Shchegolihina // AIP Conference Proceedings. – 2019. – V. 2135. – 020035.

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

1. Мальшев Д. Ю. Совместное зажигание водоугольной суспензии и древесной биомассы / Д. Ю. Мальшев, С.В. Сыродой, Ж. А. Косторева // Промышленная энергетика. – 2020. – № 5. – С. 44-49.
2. Мальшев Д.Ю. Обоснование ресурсоэффективности технологий сжигания водоугольных топлив с добавками биомассы / Д. Ю. Мальшев, С.В. Сыродой // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. - №6. – С. 77-85.