

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

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата технических наук

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

Томск – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОУГОЛЬНЫХ ТОПЛИВ В ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ	18
1.1. Опыт практического применения водоугольных топлив в теплоэнергетике	19
1.2. Экспериментальные исследования процессов сжигания водоугольных топлив	27
1.3. Теоретические исследования процессов горения водоугольных топлив ..	33
1.4. Выводы по первой главе	38
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА	40
2.1. Подготовка топлив	40
2.2. Основные компоненты био-водоугольных топлив	40
2.3. Методика проведения экспериментов	45
2.4. Выводы по второй главе	48
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ БИО-ВОДОУГОЛЬНЫХ ТОПЛИВ	49
3.1. Влияние степени метаморфизма на процесс зажигания био- водоугольных топлив	49
3.2. Оценка эффективности использования лесного горючего материала в качестве добавки, ускоряющей процесс зажигания био-водоугольных топлив	56
3.3. Влияние температуры окислителя и начального размера капель на условия и характеристики зажигания био-водоугольных топлив	63
3.4. Зажигание био-водоугольных топлив при варьировании концентрации древесной компоненты	66
3.5. Совместное зажигание водоугольной суспензии и древесной биомассы ..	71

3.6. Выводы по третьей главе	77
ГЛАВА 4. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ «ХИМИЧЕСКОЙ» СТАДИИ ПРОЦЕССА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ	79
4.1. Анализ влияния термохимических характеристик био-водоугольных суспензий на продолжительность периода развития непосредственно химической реакции.....	79
4.2. Факторы, влияющие на время полного охвата пламенем частиц био- водоугольных топлив	84
4.3. Выводы по четвертой главе	109
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	110
ОБОЗНАЧЕНИЯ	112
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	113

ВВЕДЕНИЕ

Ежегодное увеличение населения Земли приводит к активному развитию технологий обеспечения необходимого уровня жизни людей в части потребления тепловой энергии. [1-3]. В течении последних десятилетий происходит увеличение производства энергии (Таблица 1) на теплоэлектроцентралях (ТЭЦ) и котельных [4, 5], топливо значительной части которых - уголь [5]. Но уголь является самым «грязным» по определению экологов энергоносителем и процесс его сжигания интенсивно загрязняет окружающую среду.

Таблица 1. - Потребление энергии в ряде стран в период с 2008 по 2018 год [4]

Страна	Год										
Млн. тонн эквивалент нефти	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
США	2258,6	2148,7	2223,3	2204,1	2148,5	2208,0	2221,1	2232,9	2212,7	2222,5	2300,6
Канада	321,5	304,9	312,0	327,2	324,7	337,0	341,8	339,0	338,2	343,7	344,4
Германия	335,5	315,1	327,9	316,1	320,5	329,8	316,4	322,5	328,1	333,9	323,9
Польша	97,4	93,9	100,0	100,5	97,5	97,8	94,2	95,2	99,4	103,4	105,2
Турция	100,8	102,2	107,6	115,1	122,3	121,5	125,4	137,2	144,6	152,7	153,5
Россия	673,1	676,6	644,6	668,2	691,7	694,7	683,9	689,6	676,8	689,6	698,3
Индия	450,4	476,3	512,0	538,0	570,7	600,3	623,6	666,8	686,9	722,3	753,7
Китай	2150,3	2231,2	2329,5	2491,3	2690,1	2799,1	2907,0	2973,5	3009,8	3047,2	3132,2
Бразилия	239,9	238,6	263,1	275,8	281,3	292,4	299,4	295,9	289,4	293,9	297,6

С целью предотвращения ухудшения экологической обстановки на планете, альтернативные источники энергии (фотоэлектрические панели [6], ветровые генераторы [7]) все активнее внедряются в энергосистему (рисунок 1). Но их возможности существенно ограничены. Так, например, по прогнозам развития мировой энергетики на ближайшие десятилетия [8], такие основные альтернативные источники энергии через 30-40 лет смогут заменить не более 30 % вырабатываемой на тепловых электрических станциях (ТЭС) электроэнергии [9]. Их вклад в производство тепловой энергии много меньше по целому ряду

объективных причин [9]. Кроме того, солнечные панели и ветрогенераторы являются дорогостоящими источниками энергии. При производстве и утилизации фотоэлектрических панелей в окружающую среду выбрасывается много токсичных веществ [10-12]. Генерация энергии на ветроустановках нестабильна и существенно зависит от погодных условий и времени года [13]. К тому же, затраты на производство, монтаж и демонтаж ветроустановок очень высоки [14].

На рисунке 1 представлен вклад различных источников энергии в общий мировой баланс производства электроэнергии по состоянию на 2018 год [4]. Наибольшая доля производства электрической энергии приходится на уголь (38%). Значим вклад станций, работающих на природном газе (24%) и гидроэнергетики (16%). При этом суммарная мощность двух последних источников энергии немногим превышает объемы производимой электроэнергии на угольных тепловых электростанциях. Аналогичных сведений по производству тепловой электроэнергии нет в доступных источниках информации. Но достаточно очевидно, что на теплоцентралях и при работе котельных (как проработавших многие десятилетия, так и введенных в эксплуатацию недавно) уголь используется в качестве основного топлива в существенно больших относительных объемах.

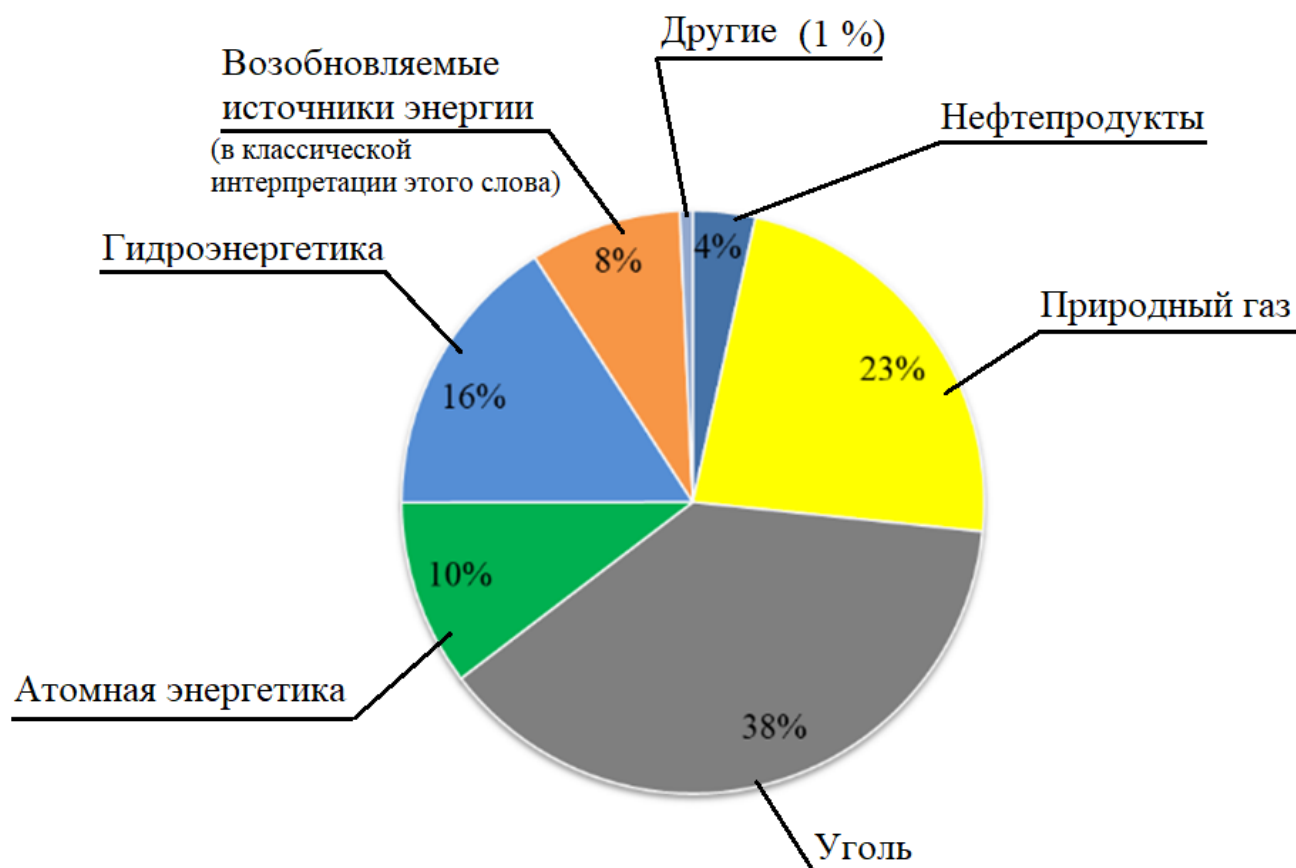


Рисунок 1 – Мировой баланс генерации электроэнергии по состоянию на 2018 год по данным корпорации British Petroleum [4]

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 [15-17]. При этом уголь является относительно распространенным ископаемым топливом [18-20]. Разработано множество серийных проектов теплоэлектроцентралей и котельных различных мощностей, возведение которых возможно в относительно короткие сроки.

В связи с тем, что к 2040 г., по прогнозам специалистов [21-23], ожидается серьезный дефицит основных энергоносителей, в том числе нефти и газа, в среднесрочной перспективе на теплогенерирующих установках доля угольного топлива будет только увеличиваться, а газа уменьшается [24, 25]. Такая, совершенно не очевидная на первый взгляд, тенденция подтверждается уникальными данным по энергетической стратегии Германии [26]. В 2015 году в

этой стране, которая небезосновательно считается «локомотивом» Евросоюза, проектировались двадцать угольных электростанций, которые должны были заменить атомные электрические станции и работающие на газе ТЭС. 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. Все вышеизложенное имеет еще большее значение и для промышленной теплоэнергетики. Скорее всего, мировое сообщество уже через 10 – 15 лет не сможет эксплуатировать из-за высокой стоимости топлива газовые котельные, и придется переходить на уголь, как основное топливо для водогрейных и паровых котлов относительно малой производительности.

Необходимо отметить, что несмотря на ряд достоинств (например, технологичность и сравнительно низкая в большинстве случаев себестоимость отпускаемой тепловой энергии), работа угольных ТЭЦ и котельных ограничивается жесткими экологическими требованиями, особенно в странах ЕЭС [27-29]. При окислении углерода угля кислород также вступает в реакции с серой и азотом, входящими в состав органической части углей. В результате образуются: оксиды углерода (CO_x), серы (SO_x) и азота (NO_x). Последние являются причиной кислотных дождей [30-32], которые оказывают негативное воздействие на растения, почву и отравляют водоемы [33]. Дымовые газы наносят вред не только экосистеме, но и живым организмам. Попадая в кровоток, SO_x и NO_x , вступают в реакции на клеточном уровне, приводя к нарушению сердечной деятельности [34-36]. Помимо этого, высокая концентрация диоксида азота ($> 1500 \text{ мг/м}^3$) в воздухе вызывает снижение легочной функции у людей, а также приводит к генетическим мутациям [37].

Еще одним немаловажным фактором, влияющим на экологию, является угольная пыль [38]. Мелкодисперсные частицы, содержащиеся в окружающей среде, при длительном воздействии на организм человека приводят к различным заболеваниям (бронхиты, астмы, дерматиты и др.) [39-41]. Болезням подвержены не только люди, работающие в угольной промышленности, но в зоне риска находится и проживающее рядом местное население.

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 [42-44]. Последние же являются одной из причин негативного изменения климата на Земле [45-47]. Поэтому в последние годы активно ведутся разработки по созданию новых, более экологически чистых способов сжигания угля в топках паровых и водогрейных котлов [48-50].

К настоящему времени разработаны различные способы существенного уменьшения выбросов NO_x и SO_x теплогенерирующих установок, сжигающих уголь. Первый основан на предварительной подготовке топлива [51-53] (удаление минеральной части угля на обогатительных фабриках). Данный метод позволяет значительно уменьшить долю серы (до 30 % [54]) в угле, поступающем в топку котлов.

Как известно [55-57], основная причина образования оксидов – высокие температуры в области горения факела, которые могут достигать 1273 К [58]. Соответственно, можно сказать, что организация низкотемпературного сжигания топлива позволяет в значительной степени уменьшить выбросы NO_x [59, 60]. Так, например, в экспериментах [61] с целью уменьшения эмиссии оксидов азота в топку подавался перегретый пар для снижения температуры факела пламени. Но такой метод, как известно [57], оказывает негативное влияние на полноту сгорания топлива.

Другим способом, позволяющим уменьшить выход антропогенных газов, образующихся при сжигании углей, является введение в эксплуатацию котлов нового типа [62-65]. К таким можно отнести котельные агрегаты, работающие по технологии циркулирующего кипящего слоя (ЦКС). Температура в зоне горения таких котлов не превышает 1100 К. Поэтому выбросы оксидов азота котлов ЦКС находятся в диапазоне 200-300 мг/нм³. При этом ввод в топочное пространство известняка (конструкция топки позволяет частицам известняка циркулировать продолжительное время) связывает более 90 % оксидов серы [66].

Существенного снижения выбросов SO_x и NO_x при сжигании углей можно добиться и применением специализированных систем очистки дымовых газов. Эффективность последних может достигать 97-99 % [67]. Разработано несколько, отличных друг от друга по принципу действия, методов: каталитический (основан на восстановительной реакции катализирующих веществ [68-74]), адсорбционный (избирательное извлечение из газовой среды определенных компонентов [67, 75-77]) и абсорбционный (работает по принципу избирательной растворимости веществ в жидкости (физическая абсорбция) [78-82] или извлечение примесей путем химических реакций на поглотителе (хемосорбция)) [67]. Но, несмотря на достаточно высокую степень очистки, перечисленные методы являются дорогостоящими [54]. Это в значительной мере оказывает влияние на стоимость отпускаемой потребителю единиц тепловой и электрической энергии.

Наиболее перспективным по критериям экологической и экономической эффективности является применение в теплоэнергетике новых видов топлив (композитных) [83, 84]. В последние десятилетия активно ведутся работы по расширению сырьевой базы теплоэнергетики [85-87]. Топливо для сжигания в топках паровых и водогрейных котлов должно удовлетворять следующим критериям: энергоэффективность, экологичность, экономическая эффективность. Анализ многочисленных экспериментальных исследований (например, [88-94]), посвящённых сжиганию топлив в смеси углей с биомассой, показал их перспективность (эффективность котлоагрегатов возрастает на 15 % [95-97]). Во многих развитых странах (например, Дания, Великобритания, США, Канада, Финляндия и др.) уже реализованы схемы сжигания пылевидных топливных композитов на основе угля. Основным достоинством смесей углей и биомассы являются их существенно более высокие экологические характеристики по сравнению с углем (существенно снижаются выбросы оксидов азота и серы) [98-100], а также более низкая себестоимость топлива (цена биомассы значительно ниже стоимости любого угля) [101, 102].

Одним из наиболее перспективных композиционных топлив является смесь угля и воды [103-106]. Водугольные суспензии (ВУС) представляют собой

высоковязкую систему, состоящую из мелкоизмельченного угля, смешанного с водой и стабилизирующими присадками. Особый интерес к этому виду топлива вызван огромными объемами отходов углеобогащения и угледобычи с фракцией частиц до 250 мкм [107]. Вовлечение этих отходов в топливный баланс тепло- и электрогенерации позволит в значительной мере уменьшить площади, отведенные под хранение угольных отходов. Кроме того, водоугольное топливо (ВУТ) можно транспортировать на большие расстояния трубопроводным транспортом [108-113]. Последнее позволит существенно снизить затраты на транспортировку топлива, которые в отдельных случаях могут достигать 50 % от стоимости угля [114-116]. Хранение ВУТ в закрытых заглубленных резервуарах позволяет значительно уменьшить производственные площади теплоэлектроцентралей и котельных.

Главным же преимуществом ВУТ перед угольным топливом, если судить по результатам многочисленных исследований (например, [117-120]) 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 [121]. 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) [122].

Одним из возможных способов уменьшения периода индукции (времени задержки зажигания) водоугольного топлива является добавление в его структуру ускоряющей процесс зажигания добавки (например, биомассы) [123]. Топливо с растительными добавками можно отнести к новому классу водоугольных суспензий – био-водоугольным топливам (Био-ВУТ).

Леса занимают около третьей части территорий суши (примерно 4 млрд. гектаров) [124-126]. Практически половина лесных ресурсов сосредоточена на территориях России, Китая, Бразилии, Соединенных Штатов Америки и Канады

[126-129]. Общие запасы этих стран составляют 155 млрд. куб. метров лиственной и 127 млрд. куб. метров хвойной древесины [126].

Запасы древесины в России составляют 82,8 млрд. метров кубических, ежегодное потребление которых составляет примерно 704 млн. куб. м. [126]. Основной объем древесины идет на нужды целлюлозно-бумажной промышленности, на производство пиломатериалов и другие отрасли, связанные с переработкой древесины. В России в лесоперерабатывающей промышленности работают свыше 500 тыс. человек, и, согласно стратегии развития лесной промышленности до 2030 года, численность персонала планируется увеличить более чем на 50% (до 820 тыс. человек) [126], что говорит о перспективности этой отрасли.

С ростом объемов потребляемой древесины, растут и объемы отходов [130] ее переработки: опилки, щепа, сучья, ветки, листва, кора, пни и другие. Эти отходы практически не перерабатываются, а хранятся в отвалах. Хранение таким образом повышает риски возникновения пожара [131-133]. Кроме того, на открытом воздухе происходит гниение биомассы, вследствие чего в окружающую среду выделяется метан, который является парниковым газом.

Решением проблемы утилизации отходов лесоперерабатывающих комплексов может служить развитие биоэнергетики [89, 90, 134, 135]. Это соответствует современному вектору развития энергетической отрасли. Интерес к биомассе вызван, в первую очередь, стремительно ухудшающейся экологией и истощением запасов ископаемых ресурсов на фоне нестабильной экономической обстановки. Это приводит к непредсказуемой динамике цен на основные углеводородные энергоносители [136, 137]. Также стоит сказать, что лесные ресурсы являются возобновляемым источником энергии, восстановление которого может происходить в относительно короткие сроки [138] при правильной организации природопользования. Поэтому топлива растительного происхождения все активнее внедряются в энергетику.

Лесные отходы могут использоваться как самостоятельное энергетическое сырье, так и в составе смесевых топлив (уголь+биомасса). Применение последних

вполне обосновано [139-141]. В ряде стран, таких как Китай, Япония, Финляндия, Швеция, Канада, Соединенные Штаты Америки, топливные смеси активно сжигаются в топках паровых и водогрейных котлов [142-146]. Смесь угля и биомассы позволит уменьшить объемы потребления угля и, соответственно, уменьшить стоимость топлива. Только в России за год образуется 30 миллионов метров кубических отходов деревообработки [126]. Из этих отходов с малыми затратами можно получить ценное сырье (например, древесный уголь). Кроме того, на фоне стремительно ухудшающейся экологической обстановки в России готовится законопроект об обязательной переработке древесины [126], что делает этот ресурс привлекательным для использования в энергетике. Также стоит добавить, что биомасса обладает малой зольностью, и при ее сжигании практически не образуется оксидов серы [139, 145, 147-149], что также должно положительно влиять на окружающую среду.

Но, на основании результатов [119, 121, 122] можно сделать вполне обоснованный вывод, 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 цели были поставлены и решены 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 исследованных 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.

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. Опубликовано пять статей в международных научных журналах, индексируемых базами «Scopus» и «Web of Science»: «Energy», «Applied Thermal Engineering», «Combustion Science and Technology» «AIP Conference Proceedings». Опубликовано 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 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 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, выбору и подготовке компонентов топлива, методу оценки погрешностей результатов экспериментальных исследований.

В третьей главе представлены результаты проведенных экспериментальных исследований процессов зажигания и горения частиц био-водоугольных топлив. Определены основные этапы (инертный нагрев, испарение внутрипоровой и адсорбционно-связанной влаги, термическое разложение органической части угля и основных компонентов биомассы, воспламенение продуктов пиролиза) термической подготовки капель (в начальный период времени процесса термической подготовки), а затем (после высушивания приповерхностного слоя топлива) частиц Био-ВУТ.

Проведен анализ влияния лесного горючего материала на времена задержки зажигания суспензионных био-водоугольных топлив. Получено, что биомасса на основе ЛГМ является ускоряющей процесс зажигания добавкой. При этом установлено, что вид растительной компоненты не оказывает существенного влияния на значение времен задержки зажигания Био-ВУТ.

Приведены результаты анализа влияния степени метаморфизма угля на времена задержки зажигания.

Установлено, что сжигание водоугольного топлива совместно с древесной биомассой приводит к существенному уменьшению времен задержки зажигания ВУТ.

Четвертая глава посвящена интегральным характеристикам «химической» стадии воспламенения био-водоугольных топлив. Впервые определен период химической индукции капель суспензионных топлив по результатам

экспериментальных и теоретических исследований. 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.

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

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОУГОЛЬНЫХ ТОПЛИВ В ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

Технологиям водоугольных топлив посвящено очень много работ (более 10000 в международных и российских журналах) за последние 30 лет. Наиболее известны работы российских ученых Мурко В.И., Федяева В.И., Карпенка В.И., Мастхина В.П., Овчинникова Ю.В., Бойко Е.Е., Серанта Ф.А., Патракова Ю.Ф., Архипова В.А., Федорова Н.И., Баранова М.П., Кулагина В.А., Кулагиной Л.В., посвященные изучению способов приготовления и использования водоугольных топлив (например, [106, 112]). Кузнецов Г.В., Сыродой С.В., Стрижак П.А., Валлиулин Т.Р., Горлов Е.Г., Ходаков Г.С., Головин Г.С., Делягин Г. Н. проводили теоретические и экспериментальные исследования характеристик и условий зажигания водоугольных и органоводоугольных топлив (например, [109, 124]). Над детальным анализом экологических аспектов сжигания водоугольных и органоводоугольных (ОВУТ) топлив, работают такие ученые, как Глушков Д.О., Вершинина К.Ю., Няшина Г. С. (например, [120])

Длительный процесс зажигания капель топлива является существенной проблемой, сдерживающей масштабное использование ВУТ в энергетике. Одним из возможных способов уменьшения длительности этого периода является добавление в состав топливной композиции различного рода ускоряющих процесс зажигания добавок (например, [150-152]). В качестве последних исследовались [119, 150-152]: отработанные масла, нефтепродукты, спирты, мелко диспергированные отходы лесопиления и лесопереработки, твердые бытовые отходы и т.п.

1.1. Опыт практического применения водоугольных топлив в теплоэнергетике

Необходимо подчеркнуть, что еще в 1991 году в соответствии с программой министерства энергетики США «Чистые угольные технологии» разработан проект тепловой электрической станции на реке Уобаш с газификацией водоугольной суспензии и сжиганием синтез-газа в камерах сгорания газовой турбины, работающей в составе парогазовой установки [48, 153]. Силовой блок этой станции [48, 153] состоял из газотурбинной установки мощность $P=192$ МВт и паровой турбины $P=104$ МВт. Строительство было начато в июле 1993 году и закончено в ноябре 1995 г. Водоугольная суспензия, используемая в газификаторе ТЭС, состояла на 50% из угля и на 50% из воды. Станция успешно работает уже более 25 лет.

Авторами [154] проведены экспериментальные исследования процесса газификации Польского битуминозного и Немецкого суббитумного углей в виде водоугольного топлива в вертикальном трубчатом газификаторе. Содержание твердой горючей компоненты в суспензии составляло $\approx 50\%$. Установлено [154], что такие высокообводненные водоугольные суспензии являются хорошим, достаточно плотным топливом для газификации угля и получения синтез-газа.

Результаты экспериментальных исследований процесса приготовления водоугольной суспензии (с массовой долей угля 50 - 55 %) для совместного сжигания с сухим углем в циклонных топках приведены в [155]. В [156] приведены результаты анализа сжигания водоугольных суспензий в промышленном котельном агрегате ТП-35. Показана [156] перспективность использования в качестве топлива водоугольной суспензии на основе угля Кавак с массовой долей твердого горючего в топливе $\approx 50\%$ [156].

В [216] приведены результаты сжигания водоугольного топлива в вихревой камере сгорания котельного агрегата КЕ 10/14, установленного на Мошковской районной котельной (Новосибирская область, Россия). Водоугольное топливо [157] было приготовлено из углей марки Д (Длиннопламенный) и Г (газовый).

Влагосодержание водоугольных композиций составляло 46,9% [157]. Для сжигания ВУТ был сконструирован и изготовлен специальный вихревой предтопок (с горизонтальным вихрем) со стабилизирующим аэродинамическим цилиндром (для предотвращения смещения вихря). По результатам испытаний котельного агрегата установлено, что водоугольное топливо (массовая доля угля $\approx 53\%$) может достаточно эффективно сжигаться в энергетических котлах.

Также стоит сказать, что водоугольные суспензии с массовым соотношением угля $\approx 50\%$ используются и для проведения опытно- конструкторских работ по разработке новых топочных устройств для сжигания водоугольных суспензий. Так, в [158] приведены результаты численного моделирования сжигания ВУТ на основе осадка фильтр-КЕКа углеобогатительной фабрики из угля марки К (коксующий). Содержание воды в суспензии составляло 50,86%. При этом показано, что даже при таком высоком содержании воды водоугольная суспензия стабильно горит и сгорает с высокой эффективностью ($\approx 96\%$).

В связи с тем, что водоугольные суспензии содержат много влаги, времена задержки зажигания таких топлив весьма велики. В период испытания котла ТП-35 по использованию ВУТ (на основе кавакского угля с содержанием влаги 50 %) длина факела горения существенно увеличивалась (в 3-4 раза) [159], по сравнению с горением пылевидного угольного топлива. Продолжительный процесс воспламенения приводит к уменьшению температуры факела на 200-300 К, и ухудшению выгорания угольных частиц ВУТ (степень выгорания была ниже 83 % [159]), повышению температуры дымовых газов (на 2 - 5 % выше, чем при горении угля) и совокупному увеличению тепловых потерь [159]. Увеличение температуры горючих газов, в свою очередь, приводит к шлакованию поверхностей нагрева. Температура уходящих газов лимитируется температурой начала размягчения золы [160]. Кроме того, снижается коэффициент полезного действия котла, в основном, из-за увеличения тепловых потерь с уходящими дымовыми газами. В [159] предложены технологические решения для ускорения процессов прогрева и зажигания капель водоугольных суспензий, основанные на комбинированном факельном сжигании (ВУТ и угольного топлива). Схемы горелочных устройств

основаны на раздельном тангенциальном подводе реагирующих веществ (топлива и окислителя) в зону горения (рисунок 1.1).

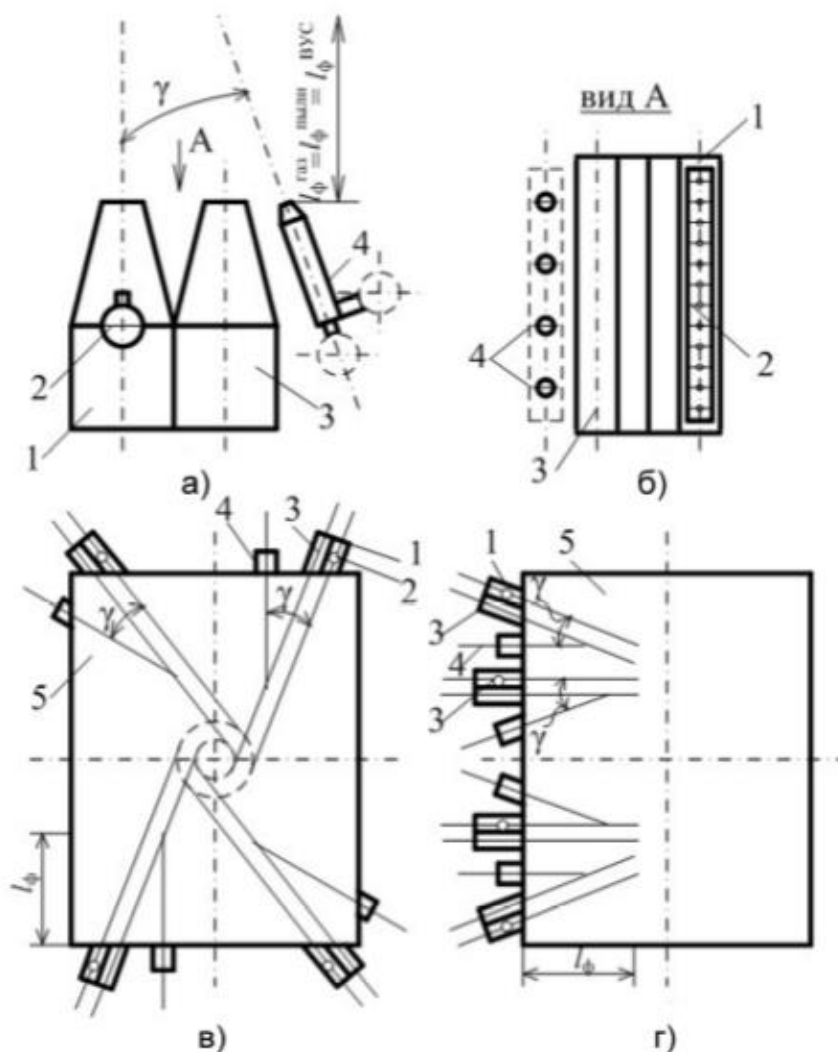


Рисунок 1.1 – схемы multifunctional горелочных устройств [159] и их компоновка в топках: а, б – схема горелки; в, г – тангенциальная и фронтальная схемы компоновки горелок; 1 – воздушное сопло, 2 – многосопловая газовая горелка, 3 – пылеугольное сопло, 4 – форсунка ВУТ, 5 – топка в плане

В [160] для уменьшения потерь от химического и механического недожога топлива предлагается увеличивать температуру в камере сгорания путем применения дополнительных секций воздухоподогревателей. Также авторами [160] выполнен расчет, показывающий, что работа котла ДКВр-10/13 возможна на водоугольном топливе без существенной модернизации. Но при этом производительность теплогенерирующей установки снижается на 50 %. Также

стоит отметить, что для осуществления процесса горения низкосортных углей необходима подсветка факела другим, более реакционным, топливом (например, природный газ или дизельное топливо) [159]. К недостатку данного метода можно отнести нестабильность горения инициируемого топлива, а также значительно более сложную систему управления котельным агрегатом.

Установлено [159], что интенсивный помол угля оказывает значимое влияние на процессы воспламенения водоугольных суспензий. Так, например, при уменьшении размеров частиц угля в составе ВУТ с 90 мкм до 40 мкм, уменьшался размер факела и увеличивалась степень выгорания топлива [161, 162].

В [163] предлагается изменить технологию сжигания угля. Заменить малоэффективные слоевые топki на котлы, позволяющие использовать отходы углепереработки коксующихся углей (КЕК) углеобогадательной фабрики «Северная», которые по своим характеристикам являлись готовым ВУТ. Для использования КЕКa (с относительно большим влагосодержанием (до 48 %) и присутствием инертных минеральных компонентов) в качестве топлива требовались специальные условия. Для организации устойчивого воспламенения и горения низкосортных фильтр-КЕКов в качестве «подсветки» для стабилизации процесса горения топлива дополнительно сжигали каменный уголь в слое. Соотношение ВУТ и каменного угля составляло 80 % к 20 %, соответственно. Для предотвращения загрязнения поверхностей нагрева был установлен муфель, который, в свою очередь, выступал и в качестве теплового аккумулятора (рисунок 1.2). В ходе работы показана возможность утилизации угольных отходов при совместном сжигании с каменным углем. Но испытания также показали, что данная технология нуждается в существенных доработках.

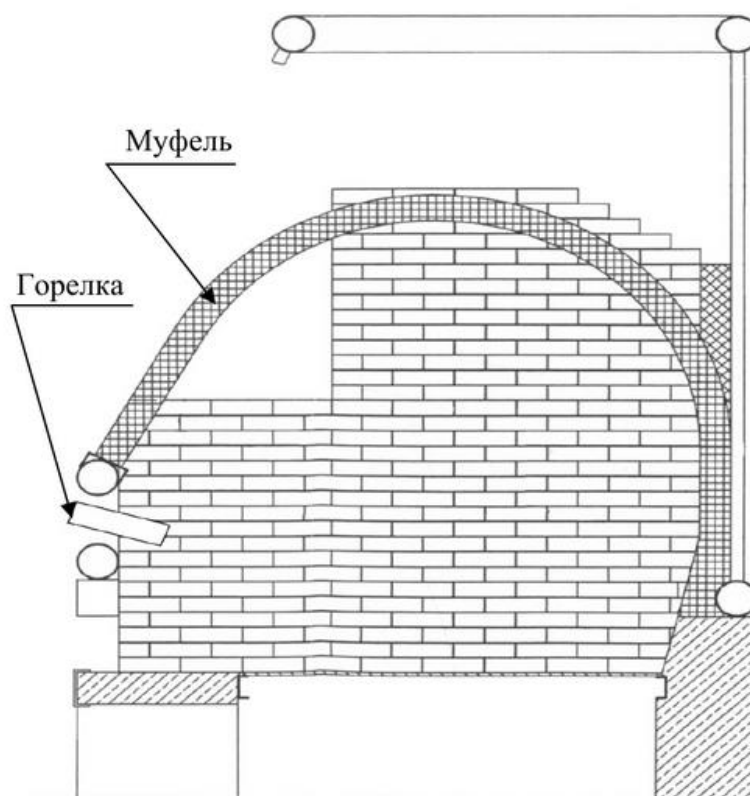


Рисунок 1.2 – схема устройства муфеля котла РН – 38

Особое внимание при организации горения водосодержащих топлив уделяется их распылению [160]. Мелкодисперсное распыление водоугольной суспензии в топочном объеме позволяет избежать агломерации частиц угля. Для увеличения стабилизации и интенсификации горения топлива необходима оптимизация распыления ВУТ, позволяющая избежать образования крупных капель.

Авторами [164] предлагается установить зажигательный пояс на тепловоспринимающих поверхностях котла из футеровки, создающей дополнительное тепловое сопротивление. В результате температура в топке будет возрастать, а, следовательно, и температура факела. По этой причине скорость горения и зажигания капель ВУТ будет увеличиваться. Но, применение такой технологии возможно только после детальной проработки конструкторских изменений котла. Подобная идея изложена в [165]. Предлагается разместить в топочном пространстве огнеупорную керамическую конструкцию, которая будет

выступать в роли теплового аккумулятора, тем самым, позволив сглаживать температурные колебания. При сжигании ВУТ создается восстановительная среда в топке, по этой причине межремонтный интервал керамических форсунок снижается. Кроме того, трудно оценить поведение подобного теплоаккумулятора в топочной среде и стоимость ремонта. Так, например, подобные изделия в доменных печах при температурах 1373-1573 К выдерживают менее года [165].

Другой способ, позволяющий эффективно использовать ВУТ [164], основан на модернизации старых котлов малой производительности. Применение предтопка позволит длительное время пребывать топливу в топочном пространстве, но его размеры сопоставимы с размерами самого котельного агрегата. Это, в свою очередь, приводит к существенным капиталовложениям на этапе модернизации.

Наиболее значимых результатов добились авторы [166]. Разработаны технические решения для перевода парового вертикально-водотрубного котла ДКВр-20-13, сжигающего каменный уголь, на водоугольное топливо. Для длительного пребывания капель ВУТ в топке котла было принято решение установить муфельный вихревой предтопок, тем самым, обеспечив продолжительную циркуляцию капель ВУТ. Такое конструкционное решение обеспечивает 60 % выгорание топлива в вихре с последующим догоранием в камере сгорания до 97 %. Кроме того, создание вихревого предтопка позволит в значительной мере уменьшить его размеры (в отличие от [164]). Воспламенение суспензии происходило за счет излучения горячих стенок муфеля, который выступал в качестве некоего теплового аккумулятора, по аналогии с [164]. Для розжига котла использовался растопочный мазут с поэтапным переходом на водоугольную суспензию. Опытно-промышленная эксплуатация котла ДКВр-20-13 на ВУТ, показала его устойчивую работу.

Коллективы НИ и ПКЦ «Бийскэнергомаш», ГУП НПЦ «Экотехника» совместно с Миннауки России и Спецгормолзаводом выполнили модернизацию парового мазутного вертикально-водотрубного котла ДКВР 6,5/13 [167]. Замена дорогостоящего мазутного топлива более дешевым водоугольным, позволяет

получить значительный экономический эффект, позволяющий компенсировать все финансовые затраты на реконструкцию и модернизацию котла. Опытно-промышленные испытания котла на ВУТ с применением низкотемпературного вихревого сжигания прошли успешно. Камера сгорания котла была разделена на две зоны: основная зона горения и зона догорания. Разогрев топki и выход на проектную мощность осуществлялся по обычному регламенту с использованием мазутного топлива с последующим плавным переходом на водоугольную суспензию. С учетом высокого эрозийного износа (вследствие воздействия твердой фазы ВУТ) топливные форсунки были выполнены из титанового сплава. Вихревой способ сжигания осуществлялся при относительной низкой температуре в топочной камере (от 1273 К до 1313 К) [167]. При переводе котла ДКВР 6,5/13 с мазутного топлива на ВУТ установлено, что в дымовых газах содержание диоксида серы уменьшилось более чем в два раза [165]. Также показано, что механический недожог топлива в пробах золы составлял не более 4,8 % (для котлов, сжигающих угольную пыль, данный показатель превышает 50 %) [167]. На основании технико-экономического анализа установлено, что перевод котла с мазута на водоугольное топливо приводит к существенному снижению стоимости отпускаемой тепловой энергии (более чем в три раза [167]).

Обеспечение длительной циркуляции капель ВУТ в малом топочном пространстве позволяют вихревые технологии. Одна из вихревых камер сгорания приведена в [168]. Отличительная особенность данной теплогенерирующей установки - близкая к цилиндрической форме камера горения с центральной огнеупорной вставкой (рисунок 1.3). Разогрев топki предполагался сжиганием жидкого топлива, например, дизельного. При выходе на температуру 400 – 500 °С осуществлялся плавный переход на водоугольную суспензию. Окислитель (воздух) подавался по касательной к стенке топki и увлекал за собой капли ВУТ (подача которого осуществлялась тангенциально), тем самым закручивая воздушно-капельную струю. Под действием центробежной силы, наиболее тяжелые капли топлива смещаются к стенкам, а капли мелкого размера находятся ближе к центру камеры сгорания. По мере выгорания больших капель ВУТ их масса снижается и

они перемещаются на орбиту движения меньшего размера. Такая технология позволяет циркулировать частицам топлива продолжительное время в топочной среде и обеспечивает высокое выгорание ВУТ.

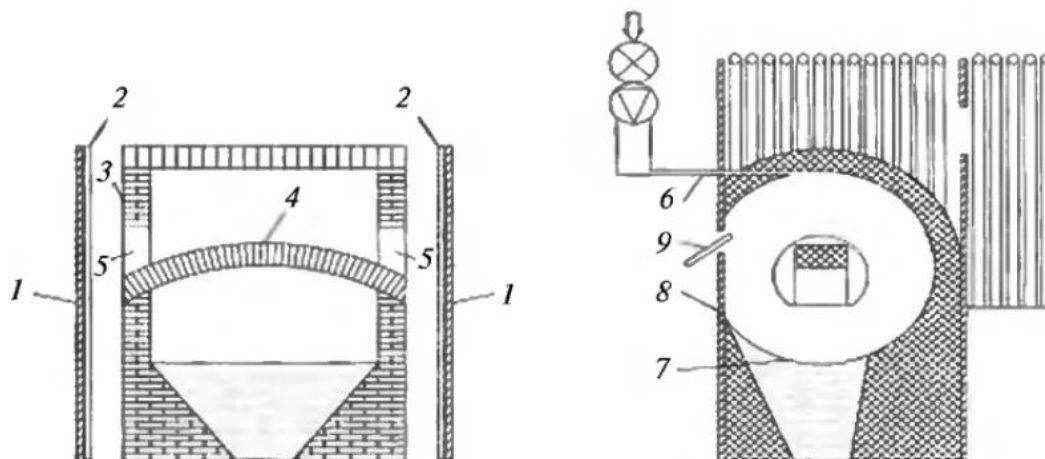


Рисунок 1.3 – принципиальная схема топочного устройств.

(1 – камера охлаждения, 2 – поверхности нагрева, 3 – камера сгорания, 4 – огнеупорная вставка, 5 – газоперепускные окна, 6 – дутьевые сопла, 7 – золоуловитель, 8 – фронтальная стенка, 9 – пневматические форсунки)

Одним из перспективных направлений зажигания композитных жидких топлив является применение плазменных технологий [164]. Использование последних позволяет существенно облегчить процесс регулирования котла, по сравнению с комбинированным способом сжигания ВУТ и другими топливами, используемыми для «подсветки».

В заключение, необходимо подчеркнуть, что относительно небольшое число котельных установок, при работе которых используются водоугольные топлива, обуславливается, скорее всего, тем, что технологии сжигания водоугольных суспензий в топках паровых и водогрейных котлов являются, по-настоящему, наукоемкими. Только в государствах с очень высоким уровнем развития науки и технологий (США, Китай, Россия, Япония) в настоящее время есть опытно-промышленные и действующие теплогенерирующие установки, использующие водоугольные суспензии.

1.2. Экспериментальные исследования процессов сжигания водоугольных топлив

Анализ результатов исследований [169, 170], посвященных изучению процессов воспламенения и горения водоугольных и органоводоугольных топлив, показал, что зажигание композитного жидкого топлива можно разделить на ряд последовательных стадий. В начальный (всегда достаточно длинный) период времени происходит инертный нагрев капли. Подводимое тепло интенсифицирует процессы испарения влаги и последующего (при более высоких температурах) термического разложения органической части топлива. Этот этап является весьма энергозатратным и может продолжаться до 90% общего времени «жизни» капли [171, 172]. Фильтрация водяных паров и горючих газов сквозь сухой углеродистый каркас приводит к обезвоживанию частицы топлива. На следующем этапе происходит воспламенение горючих газов, что приводит к интенсивному прогреву коксового остатка и его последующему зажиганию.

В [173] обоснована возможность использования жидких отходов промышленности в качестве заменителя чистой воды для приготовления водоугольных суспензий. Утилизация без дополнительных финансовых затрат, например, осадка сточных вод, сбросов не биоразлагаемых токсичных органических жидкостей и др. возможна на объектах промышленной теплоэнергетики. Водоугольные смеси с добавлением жидких отходов обладают низкой степенью вязкости по сравнению с ВУТ [174], и отсутствует необходимость использования химических добавок для сохранения однородности суспензии на протяжении длительного времени (вещества, являющиеся частью жидких отходов, выполняют роль поверхностно-активных компонентов и улучшают растворимость угля в смеси). Последнее приводит к снижению финансовых затрат на приготовление таких топлив. Авторами [174] показано, что жидкие отходы улучшают характеристики воспламенения водоугольной суспензии и положительно влияют на полноту сгорания топлива, которая в этом случае

находится на уровне 99,5 %. Также было зарегистрировано снижение выбросов антропогенных газов [174] при горении суспензий с добавлением сточных вод по сравнению с обычными ВУТ за счет взаимодействия ионов щелочноземельных металлов с оксидами азота и серы. Экспериментальная установка [174] максимально приближена к реальному топочному агрегату. Но проведение экспериментальных исследований (по методике [174]) осложняет большой объем подготовительных операций. В начальный период времени необходим разогрев экспериментальной установки путем сжигания дизельного топлива в печи. После достижения необходимой температуры, осуществлялся плавный переход на водоугольную суспензию (расход дизельного топлива уменьшался, а ВУТ увеличивался). После полного перевода установки на водоугольное топливо, еще один час был необходим для стабилизации процессов горения. Только после всех подготовительных стадий переходили к испытаниям. Проводился расчет эффективности выгорания топлива ($\eta_r = 100 - (q_3 + q_4)$, %, где q_3 , %- потери тепла от неполного сгорания горючего, q_4 , % – потери тепла от неполного сгорания горючих газов). Также установлено, что при сжигании водоугольного топлива на основе жидких отходов, существенно увеличивалось шлакование поверхностей нагрева. Это вызвано уменьшением температуры плавления золы из-за содержания ионов щелочноземельных металлов в водном осадке.

В экспериментах [119] установлено, что при сжигании водоугольной суспензии выход оксидов азота и серы снижается практически в 2 и 4 раза, соответственно. В качестве ускорителя зажигания ВУТ использовали отработанные моторные масла [150]. При этом установлено, что времена задержки зажигания таких топлив уменьшались на 30 %. Но, в тоже время, добавление 10 % нефтесодержащих компонентов приводило к увеличению выбросов оксидов серы на 80 % [119].

Органоводоугольные топлива могут использоваться для утилизации отработанных масел и отходов нефтепереработки, которые в настоящее время в промышленных масштабах не подвергаются переработке, а хранятся в специальных хранилищах. Установлено [175], что времена задержки зажигания

капель смеси на основе воды и нефтесодержащих продуктов меньше, по сравнению с каплей такого продукта. В первую очередь, это обусловлено диспергированием топлива. Дробление капли на более мелкие приводит к снижению времен задержки воспламенения до 32 % [176]. При добавлении в состав смеси (воды и отработанного моторного масла) 40 % КЕКа (флотационные отходы углеобогащения), времена задержки зажигания снижаются на 75 % по сравнению с одиночной каплей отработанного масла. Но, как уже было сказано, добавление в состав водоугольного топлива нефтепродуктов, приводит к увеличению выбросов антропогенных газов [121].

В [177] по результатам экспериментальных исследований условий и характеристик зажигания органоугольных топлив в потоке высокотемпературного окислителя, установлены температуры (650-820 К), достаточные для устойчивого зажигания таких топлив.

Обоснование эффективности совместного сжигания промышленных и бытовых отходов приведено в [151]. Твердые бытовые отходы (ТБО) предварительно подвергались сортировке (разделялись на древесину, резину, пластик и картон) [152]. В смесь (на основе фильтр-КЕКов и отработанного масла) добавляли ТБО. С ростом температуры окислителя времена задержки зажигания частиц топлив уменьшаются и при температуре $T_g = 1000$ °С составляют около 3 секунд (характерный размер 2 мм). Также был проведен анализ дымовых газов, образующихся при горении композитного жидкого топлива (КЖТ). Установлено, что добавление в состав КЖТ 10 % древесных отходов, приводит к снижению выбросов оксидов азота и серы на 50% и 40 %, соответственно, по сравнению с органоугольным топливом на основе отработанного масла и фильтр-КЕКа. При этом энергетическая ценность смесей была соизмерима.

Результаты исследований [178] показали, что начальная температура органоугольного топлива оказывает значительное влияние на времена задержки зажигания. Так, например, при повышении температуры капли ОВУТ (90% фильтр-КЕК, 10 % мазута) в диапазоне 0-20 °С индукционный период снижается на 11-35 %.

По результатам [179] определения минимальных температур воспламенения органоводоугольных топлив и водоугольных суспензий на основе различных углей, отходов угольной промышленности установлено, что смесь с добавлением нефтепродуктов имеет наименьшую температуру воспламенения.

В [178] приведены результаты экспериментального и теоретического определения времен задержки зажигания капель ВУТ на основе группы углей. Установлено, что степень метаморфизма существенно влияет на времена задержки зажигания. Но не было изучено влияние добавления в состав топливной композиции биомассы.

Стоит отметить экспериментальные исследования [180], в которых в качестве основного компонента органо-водоугольного топлива использованы отходы угольной промышленности с добавлением мелко диспергированных отходов лесопиления и лесопереработки. Установлено, что добавление в топливную композицию 5 % древесных опилок, позволяет уменьшить времена задержки зажигания ОВУТ на 30%. По этой причине становится актуальным использовать в качестве ускоряющей процесс зажигания добавки водоугольных суспензий компоненты растительного происхождения. Использование последних позволяет также существенно снизить выбросы антропогенных газов [180].

Из теории формирования оксидов азота [55] известно, что основным источником NO_x является атомарный азот, содержащийся в воздухе (окислителе). При относительно высоких температурах среды в зоне горения протекает ряд реакций (основные $\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{N} + 2\text{O} \rightarrow 2\text{NO}$) [88]. При сжигании водоугольных топлив большая доля тепла затрачивается на парообразование, поэтому температура в зоне горения существенно уменьшается по сравнению с горением пылевидного угля. В результате значительно снижается интенсивность образования NO_x . Кроме того, при взаимодействии водяного пара и углерода кокса ($\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$) образуются оксид углерода и водород, которые выступают в качестве восстановителя NO_x и SO_x при термохимическом взаимодействии ($\text{NO}_x + \text{H}_2/\text{CO} \rightarrow \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$; $\text{SO}_x + \text{H}_2/\text{CO} \rightarrow \text{S} + \text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$) [88].

Результаты экспериментального изучения влияния биомассы (древесной пыли, листьев березы, хвои, водорослей и коры дуба) на характеристики и условия зажигания капель органоводоугольных топлив приведены в [175]. Но так как ОВУТ состоит из двух жидких компонентов (вода и нефтепродукты), процессы зажигания ВУТ и ОВУТ существенно отличаются. Установлено [175], что нефтепродукты в составе топливной композиции приводят как к ускорению процесса зажигания, так и увеличению продолжительности индукционного периода суспензионных топлив. В качестве основного сырья в [175] рассматривались отходы угольной промышленности, а не энергетический уголь. Также можно отметить достаточно большие значения доверительных интервалов (погрешностей) результатов экспериментов по определению времен задержки воспламенения органоводоугольных топлив [175].

В [181, 182] показано влияние древесных и растительных добавок в ОВУТ на выход антропогенных газов. По мнению авторов [181, 182], снижение выбросов оксидов серы связано с присутствием в растительных компонентах щелочноземельных металлов, которые активно вступают в реакцию с окислами серы, образующимися в результате горения угля. Также стоит отметить, что содержание серы в биомассе незначительно, по этой причине серосодержание всей топливной композиции уменьшается. Добавление мелкодиспергированной древесной коры и подсолнечника в состав органоводоугольного топлива приводит к уменьшению концентрации оксидов серы в два раза, по сравнению с ОВУТ [175]. Концентрация оксидов азота в дымовых газах, образующихся при сжигании суспензии с 10 % древесных опилок или соломы, также уменьшилась в два раза. Это, скорее всего, обусловлено восстановительными реакциями оксидов азота с монооксидом углерода и образованием азота и углекислого газа.

Можно выделить результаты [183] исследования влияния процессов коагуляции и дробления капель топлива на их воспламенение. Установлено, что коагуляция капель ведет к увеличению времен задержки зажигания (до 35 %), и наоборот, диспергирование одиночной капли на более мелкие приводит к существенному снижению продолжительности индукционного периода. Также

уменьшение размера капель в результате дробления крупных приводит к снижению пороговой температуры воспламенения.

Результаты экспериментальных исследований (с использованием высокоскоростной видеосъемки) процессов горения водоугольного топлива в топочной камере котельного агрегата показали [184, 185], что при распылении водоугольной суспензии формируются капли топлива, размеры и форма (сфера, эллипсоид и др.) которых существенно отличаются друг от друга и составляют от 3 мм до 5 мм. Также стоит отметить, что уменьшение размеров капель при распылении ВУТ возможно только за счет уменьшения диаметра выходного сечения сопла форсунки. Но это, как показали результаты экспериментов [186], приводит к существенному эрозийному износу соплового аппарата.

Zhu Mingming, Zhang Zhezi, Zhang Yang и др. [187] провели экспериментальные исследования процессов зажигания смеси на основе древесного угля, полученного из сосновых опилок, глицерина и воды. Основным направлением исследования [187] было изучение характеристик стационарного горения топлив (скорость горения капель), а времена задержки зажигания топлива детально не исследовались.

На основании публикации [188] по проблеме водоугольных суспензий можно сказать, что использование органоводоугольных топлив направлено, в первую очередь, на утилизацию отходов нефтехимической и угольной промышленности, которые практически не перерабатываются и не используются. К тому же, вовлечение в энергетику низкосортных топлив позволит существенно снизить потребление ископаемых ресурсов. Но, характеристики процессов зажигания и горения жидких композитных топлив на основе энергетических углей могут отличаться от аналогичных характеристик композитных жидких топлив на основе фильтр-КЕКов и нефтепродуктов [179].

1.3. Теоретические исследования процессов горения водоугольных топлив

Анализ зарубежных и отечественных публикаций (например, [189]), посвящённых математическому моделированию процессов воспламенения и горения капель водоугольных топлив, показывает, что в настоящее время не так много научных трудов посвящено описанию воспламенения и горения многокомпонентных водосодержащих топлив. Модели, описывающие зажигание капель (затем частиц) водоугольных топлив, имеют ряд существенных допущений и направлены на прогнозирование характеристик процессов горения.

Так, в [189], при постановке задачи горения водоугольной суспензии вводятся следующие допущения. Топливо имеет однородную структуру. Капля ВУТ представляет собой сферу известного радиуса. Плотность суспензии постоянна и не зависит от температуры окружающей среды. Горение частицы описывается в рамках модели «сжимающегося ядра», согласно которой суспензия изолируется в центре растущего слоя зольного «скелета». Также стоит отметить, что в модели [190], как и [191], не учитывается термическое разложение угля с последующим выходом летучих веществ.

В [192] приведена модель, описывающая воспламенение частицы водоугольного топлива, представляющей собой смесь мелких частиц угля и воды. Предполагается, что при попадании в топочную камеру частица нагревается до температуры кипения жидкости на ее поверхности. Фронт испарения с течением времени продвигается вглубь частицы. Продукты термического разложения и водяные пары взаимодействуют с углеродом кокса частицы.

Процесс зажигания частиц водоугольного топлива в [193-196] рассматривался как совокупность последовательно протекающих процессов инертного нагрева топлива, испарения внутрипоровой влаги, термического разложения органической части топлива с последующим выходом летучих веществ и их воспламенения. Математическая модель [196] значительно упрощает процесс моделирования, сводя его к последовательному решению нескольких задач

теплопереноса, связанных между собой [197]. Но, такой подход применим лишь к малым (характерный размер менее 1 мм) топливным частицам. При моделировании процессов воспламенения более крупных частиц необходимо учитывать совместное протекание процессов нагрева топлива, влагоудаления, выхода летучих [198]. Это позволяет уменьшить погрешности при вычислении времен задержки зажигания.

Математические модели, представленные в [199, 200], учитывают одновременное протекание комплекса процессов термической подготовки (нагрева топливной частицы за счёт конвекции и излучения, испарения внутрипоровой влаги, термического разложения органической части топлива) и воспламенения летучих. При этом не рассматривалась диффузия газообразных продуктов в пограничном слое топливной частицы, и зажигание предполагалось в бесконечно малой её окрестности.

Стоит подчеркнуть, что при разработке математических моделей, описывающих процессы воспламенения био-водоугольных топливных частиц, необходимо учитывать процесс диффузии газообразных продуктов пиролиза в пограничном слое частицы (согласно [201], древесина имеет гораздо более высокое содержание горючих газов по сравнению с углем). Исходя из этого, можно сделать обоснованное предположение, согласно которому при зажигании частицы био-водоугольного топлива воспламенение произойдёт в газовой области. В этой связи использование моделей [199, 200] недостаточно обосновано для описания процесса воспламенения био-водоугольной частицы.

Математическая модель [202] описывает процесс воспламенения частицы в её малой окрестности с учётом диффузии продуктов пиролиза органической части топлива во внешней среде. При этом сделано упрощение, согласно которому температура во фронте испарения влаги оставалась постоянной.

Приведенная в [203] математическая модель горения частицы угля сформулирована при допущениях, которые приводят к значительным отличиям математической модели от реального процесса горения. Так предполагается, что радиус частицы при её горении уменьшается, что является серьёзным допущением,

так как не учитывалась зола, образующая пористую структуру, с диаметром, близким к начальному размеру частицы. Неоднородный золовой каркас препятствует диффузии кислорода к углероду топлива и затрудняет теплообмен излучением.

В [203] выдвигается предположение о равенстве концентраций кислорода в окружающем частицу газе и в воздухе, который подается в топочное пространство. Однако, с физической точки зрения, очевидно, что в процессе горения кислород расходуется, и, соответственно, его концентрация в окружающей частицу газовой смеси уменьшается. Б. Сполдинг показал [203], что необходимо проводить более точный анализ для учёта снижения концентрации кислорода по мере протекания процесса горения частицы.

В настоящее время достаточно полно описывают процесс воспламенения и горения частиц влажной древесины модели, представленные в статье [204]. Учитывается ряд основных процессов тепло- и массопереноса и интенсивные фазовые превращения.

Необходимо отметить известные подходы к описанию процессов зажигания капли топлива. Первый базируется на диффузионной модели горения. В основе второго подхода лежит модель, учитывающая и кинетику процессов химического реагирования [205]. Отличие вышеуказанных подходов заключается в том, что первый предполагает, что время выгорания капли и характеристики процесса горения зависят только от диффузионного переноса паров топлива и кислорода в зону химической реакции, второй же подход дополнительно учитывает кинетику процесса горения.

В [206] процесс воспламенения и выгорания отдельных частиц топлива рассматривался как связанный только с диффузией кислорода к поверхности частицы. При этом считалось, что реакция идет настолько быстро, что зависит только от скорости притока кислорода к поверхности частицы. Использовалась схема [206], предполагающая, что кислород не взаимодействует с углеродом топлива. Предполагалось, что с кислородом взаимодействует лишь углекислый газ,

который выделяется при горении окиси углерода. Сгорание же предполагалось мгновенным, что позволяло не учитывать скорость химических реакций.

Диффузионная модель [207, 208] описывает процессы тепломассопереноса между потоком газа и поверхностью капли топлива. В [207, 208] использовалось понятие «приведенной» пленки (концентрической шаровой), через которую в результате теплопроводности переносится столько же тепла, сколько в действительности передаётся к поверхности частицы в результате конвективного теплообмена. Применение такого метода упрощает расчёт. Но, при этом [207], необходимо также учитывать, во-первых, то тепло, которое идёт на перегрев пара до температуры поверхности капли, и, во-вторых, процесс массопереноса.

Можно отметить диффузионную модель, приведенную в [209], в которой также, как и в [207, 208] использована схема «приведенной» пленки. Но в [209], предполагалось, что длительность выгорания капли определяется скоростями диффузионного переноса кислорода и паров топлива в зону горения, а также передачей тепла на нагрев паров и испарение топлива.

Впервые скорость химических реакций при горении углерода была учтена в [210]. Учет роли летучих веществ в процессе горения частиц угольного топлива осложняет его описание. Необходимо учитывать, что процесс горения кокса протекает совместно с окислением летучих продуктов термического разложения топлива.

Изучению процесса выхода летучих при термической подготовке топлива посвящено достаточно много публикаций (например, [211]). В [211] показана непосредственная связь между скоростью прогрева частицы топлива и скоростью её термического разложения.

Отдельно целесообразно рассмотреть математические модели, посвященные горению древесины. Как известно, древесина является существенно неоднородным материалом, и поэтому условия тепломассопереноса в ее пористой структуре будут отличаться от тепломассопереноса в монолитных веществах (например, угле). Пока не так много опубликованных статей с описанием физических и математических

моделей, позволяющих с приемлемой точностью прогнозировать процессы горения частиц древесины.

Авторы [212] подчеркивают сложности, возникающие при моделировании процессов воспламенения частиц древесины. Основная сложность, по их мнению, заключается в недостаточной изученности и детализации процесса многостадийности пиролиза древесины. В первую очередь, это вызвано тем, что древесина имеет многокомпонентный состав, включающий целлюлозу, гемицеллюлозу, лигнин, пентозаны и другие вещества. Вследствие этого термическое разложение древесины проходит в несколько стадий.

Кинетика процессов воспламенения древесины также мало изучена. Большинство исследований посвящено экспериментальному изучению процессов горения [213]. Разработанные математические модели (например, [214]) основываются на существенных допущениях. В [214] описывается термическое разложение древесины и химическое реагирование продуктов пиролиза в газовой области, однако не учитывается неоднородность температурного поля. В математической модели [215] были учтены: пиролиз древесины, выход летучих, испарение влаги и воспламенение в газовой фазе газообразных продуктов термического разложения древесной частицы. Однако предполагалось, что процесс испарения воды идет во всей области решения, а не во фронте испарения, что неверно физически. Также в [215] не был учтен возможный вдув продуктов пиролиза и водяного пара в газовую область вблизи частицы, что, как известно, может привести к существенному охлаждению приповерхностного слоя топлива.

В [216] рассматривались пиролиз и окисление основных компонентов древесины (целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина) в рамках кинетической теории. При этом предполагалось, что влага в топливе присутствует только в связанном виде. Предполагалось, что наиболее значимыми параметрами, при моделировании процессов воспламенения древесины, являются кинетические параметры окисления полукокса, а также температуропроводность древесины и твердых продуктов пиролиза.

В ряде исследований, посвящённых лесным пожарам, также приводятся математические модели процессов воспламенения и горения древесины. В [217, 218] приведены результаты численного исследования процессов воспламенения и горения частицы древесины в форме параллелепипеда при конвективном и лучистом нагреве, а процесс пиролиза разделен на две последовательные стадии: термическое разложение компонентов древесины (с образованием твердых продуктов пиролиза) и образование золы. При этом температура перехода от одного режима к другому считалась заранее известной. При решении задачи древесина считалась двухтемпературной пористой недеформируемой средой. В связи с этим, учитывалась фильтрация водяных паров при испарении внутрипоровой влаги. Аналогичная задача решена в [218]. При этом авторы добавляли к двум основным режимам горения – кинетическому (скорость горения определяется скоростью гетерогенных химических реакций окисления продуктов термического разложения и древесины) и диффузионному (скорость горения определяется скоростью притока окислителя в зону горения) третий режим, при котором происходит сгорание частиц кокса в среде окислителя, куда они выбрасываются за счёт механической деформации (растрескивания) пиролизируемой древесины.

1.4. Выводы по первой главе

1. Публикационная активность по тематике водоугольных топлив говорит о том, что данное направление исследований является весьма актуальным.

2. Анализ результатов экспериментальных исследований, посвященных зажиганию водоугольных топлив показал, что основным достоинством ВУТ является то, что при их сжигании в окружающую среду выделяется значительно меньше антропогенных выбросов (оксидов серы и азота). Поэтому применение водосодержащих топлив позволит существенно улучшить экологическую обстановку и следовать современному вектору развития промышленной теплоэнергетики.

3. Анализ основных публикаций по теме диссертационной работы показал, что одной из ключевых проблем использования водоугольных суспензий является продолжительный этап термической подготовки. Предлагается уменьшить времена задержки зажигания ВУТ путем ввода в состав топливной композиции различного рода ускоряющих процесс зажигания добавок, например, отработанные масла, нефтепродукты, твердые бытовые отходы и др.

4. Ряд авторов предлагает использовать отходы (нефтехимической и угольной промышленности, твердые бытовые отходы) в целях улучшения экологической обстановки, путем их совместного сжигания в составе топливной композиции ВУС.

5. Опыт практического применения водоугольных топлив, показывает, что в настоящее время имеются предпосылки по переводу действующих котлов, сжигающих пылевидный уголь либо дорогостоящее мазутное топливо на ВУТ.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

2.1. Подготовка топлив

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

1. Подготовка биомассы. Листья и хвоя, высушивались в сушильном шкафу при температуре 373 К (выдержка составляла 120 минут). Затем ЛГМ измельчался в дисковой мельнице и просеивался через вибросито с размером ячейки 100 мкм.
2. Дробление угля. Крупнокусковой каменный и древесный уголь (размером 80÷100 мм) измельчались в щековой дробилке до фракции частиц $\delta \approx 30$ мм.
3. Помол угля. Размалывание в шаровой мельнице до мелкодисперсной фракции $\delta \leq 90$ мкм.
4. Смешение. Частицы каменного угля и биомассы смешивались с водой в соответствии с заданными массовыми соотношениями в гомогенизаторе, и суспензия доводилась в процессе перемешивания до однородного состояния.
5. Хранение. Для предотвращения расслоения ВУТ, суспензия подвергалась периодическому перемешиванию в гомогенизаторе (каждые 10 минут).

2.2. Основные компоненты био-водоугольных топлив

В качестве биомассы рассматривался лесной опад лиственных и хвойных пород древесины, твердые продукты пиролиза древесины (древесный уголь). За основу Био-ВУТ взяты угли различной степени метаморфизма, существенно отличающиеся друг от друга по своим свойствам (Таблица 2.1).

Бурые угли хороши тем, что при их термическом разложении выделяется большое количество горючих газов (по некоторым источникам [219] их доля может достигать 50 % на горючую массу). С увеличением степени углефикации этот показатель уменьшается. Так, например, у каменных углей выход летучих веществ не превышает 37 %, у антрацитов находится на уровне 3 – 7 % на горючую массу.

Помимо этого, при изменении степени метаморфизма от низших углей (бурых) до антрацитов наблюдается обогащение органической части топлива углеродом (у антрацитов содержание углерода может достигать 97 %). Также марка угля оказывает существенное влияние на теплофизические характеристики. С переходом из буроугольной стадии к каменным углям и антрацитам теплоемкость углей уменьшается, а теплопроводность возрастает (таблица 2.2).

Основным отличием водоугольных суспензий от твердых топлив, является существенно более низкое содержание углерода на единицу массы. В результате теплотворная способность ВУТ меньше по сравнению с углем. Одним из возможных вариантов увеличения энергетических характеристик водоугольных суспензий является использование углей высших степеней метаморфизма, таких, как антрацит, которые практически не применяются в качестве энергетического сырья в традиционной угольной энергетике.

Таблица 2.1. Состав исследовавшихся топливных композиций

Номер составов	Уголь		Биомасса		Вода
	Марка угля	Массовое содержание, %	Вид биомассы	Массовое содержание, %	%
№1	2Б	35	Листья дуба	5	60
№2	Д	35		5	60
№3	Т	35		5	60
№4	А	35		5	60
№5	2Б	35	Листья ивы	5	60
№6	Д	35		5	60
№7	Т	35		5	60
№8	А	35		5	60
№9	2Б	35	Листья березы	5	60
№10	Д	35		5	60

Продолжение таблицы 2.1

Номер составов	Уголь		Биомасса		Вода
	Марка угля	Массовое содержание, %	Вид биомассы	Массовое содержание, %	%
№11	Т	35		5	60
№12	А	35		5	60
№13	Д	40	Хвоя еловая	10	50
№14	Д	40	Хвоя сосновая	10	50
№15		40	Листья березы	10	50
№16					
№17		50	-	-	50
№18	Т	45	Хвоя сосновая	5	50
№19		40		10	50
№20		35		15	50
№21		50	-	-	50

Основные характеристики компонентов топлива представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Основные характеристики компонентов топлива [219 - 223]

Компонент	C_p , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	ρ , кг/м ³	V^{daf} , %	C^{daf} , %	Q_i^r , МДж/кг
Уголь						
Длиннопламенный (Д)	1110	0,116	1253	37,4-50,0	41,7-58,6	16,4-22,4
Тощий (Т)	855	0,134	1340	12,5-24,0	53,3-70,2	18,5-25,6

Продолжение таблицы 2.2

Компонент	C_p , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	ρ , кг/м ³	V^{daf} , %	C^{daf} , %	Q_i^r , МДж/кг
Бурый (2Б)	1150	0,109	1300	43,0-55,0	23,4-44,2	8,33-15,7
Антрацит (А)	830	0,149	1600	5-7,2	68,8-84,9	24,2-24,8
ЛГМ						
Листья березы	1250	0,15	796	66,8- 89,9	48,8-51,1	14,5-17,4
Листья дуба	1250	0,13	844	76,3-81,8	46,1-51,2	16,4-17,6
Листья ивы	1250	0,115	600	76,3-81,8	46,1-51,2	16,4-17,6
Сосновая хвоя	2300	0,115	600	72,3-79,4	48,2-48,4	16,8-20,2
Еловая хвоя	2300	0,11	290	72,4-79,4	48,2-48,4	16,8-20,2
Древесный уголь	950	0,058	290	22,6-27,6	70,4-83,1	-
Вода						
	4190	0,56	1000	-	-	-

Известно [224], что при отработке технологий сжигания ВУТ концентрация угольной компоненты определяется не только из проектных энергетических характеристик (теплота и полнота сгорания, температура горения и т.д.) топлива, но и после установления их реологических характеристик (концентрация угольной компоненты может варьироваться от 44% до 67%) [224]. Так, например, в [225] показано, что в водоугольной суспензии на основе бурого угля доля твердых горючих компонентов в топливе может составлять 49%, а на основе антрацита 50-60%. При этом, как установлено на практике [226], такие высокообводненные водоугольные суспензии могут эффективно сжигаться в стандартных паровых и водогрейных котельных агрегатах. В [226] описана работа демонстрационного предтопочного устройства, разработанного для розжига и последующего сгорания водоугольного топлива в котлах Е1-9 “Коммуэнерго” (Кемерово). По результатам испытания предтопка [226] установлена стабильность всех этапов термической

подготовки (прогрев топливных капель, испарение воды, термическое разложение органической части угля, горение летучих и углерода), зажигания и горения водоугольной суспензии существенно обводненных водоугольных топлив на основе Шиво-Овооского (Монголия) угля.

Также стоит отметить работу [227], в которой приведены результаты экспериментальных исследований технологий приготовления низкоконтрированной водоугольной суспензии. Авторами [227] проанализировано влияние стабилизирующего агента на вязкостные характеристики суспензии, которая была приготовлена из предварительно очищенного угля. Соотношение в системе уголь/вода варьировалось в диапазоне от 40/58,9 до 55/43,9 с добавлением присадок пластификаторов. Проведенные экспериментальные исследования [227] процессов горения показали возможность стабильного (и с высокой энергоэффективностью) сжигания такого высокообводненного топлива.

Более высокая по сравнению с традиционными водоугольными топливами [228] доля воды (60%) в составе исследовавшихся трех компонентных топлив (таблица 2.1) обусловлена тем, что лесной горючий материал в составе суспензии выступает в качестве адсорбента [229]. При меньшей концентрации жидкой компоненты в составе Био-ВУТ вязкость последней возрастает так существенно, что делает практически невозможным распыление таких суспензий через форсунки. Это существенно ограничивает возможности варьирования концентрации горючей компоненты в топливе. Также стоит сказать, что теплотворная способность лесного горючего материала ниже угля, поэтому нецелесообразно использовать био-водоугольные топлива с большой концентрацией ЛГМ. Биомассы должно быть столько, чтобы обеспечить заметное снижение времен задержки зажигания. Экспериментальные исследования показали, что лесной горючий материал может составлять 10 – 15 % от общей массы топлива [230].

2.3. Методика проведения экспериментов

Экспериментальные исследования процессов зажигания и горения одиночных капель Био-ВУТ проводились на стенде (рисунок 2.1), позволяющем установить влияние основных значимых факторов на характеристики и условия зажигания исследовавшихся топлив.

На рисунке 2.1 приведена схема экспериментальной установки [228, 231, 232], состоящей 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 [233]. 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: $t_{ign} = \frac{m2 - m1}{frame}$.

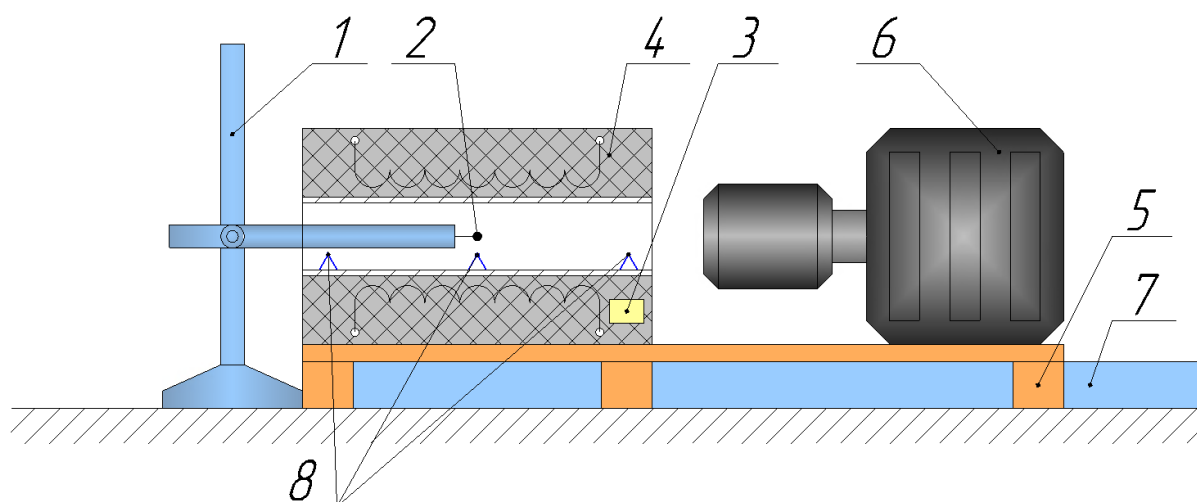


Рисунок 2.1 – Экспериментальный стенд

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

Важную роль при планировании эксперимента и обработке полученных результатов играет учет различного рода неопределённостей, помех и ошибок. Поэтому обработке результатов уделялось большое внимание.

С целью минимизации источников ошибок перед проведением экспериментов были проведены следующие мероприятия. Во-первых, выполнялся визуальный осмотр термопары, расположенной внутри печи с целью регистрации обрыва, коррозии, отсутствия оксидной пленки, налета, которые могут приводить к искажению показаний термопар. Во-вторых, с целью подтверждения достоверности показаний значений температуры окислителя внутри печи, проводилась серия экспериментов по определению температурного поля в полости керамического цилиндра с помощью контрольных термопреобразователей. Установлено, что отклонение от (T_g) значения в центральной части печи не превышало 2 % [234]. Поэтому можно сказать, что при проведении экспериментов температурное поле внутри печи было практически однородным. Кроме того, предварительно проводились тарировочные эксперименты в которых определялось время работы печи, необходимое для обеспечения однородности температуры

воздуха внутри нагревательной системы. Особое внимание уделялось держателю, который необходимо было отцентровать таким образом, чтобы при его вводе в нагревательную систему капля топлива находилась в центре трубчатой печи.

Другим важным элементом регистрационной аппаратуры является высокоскоростная видеокамера Photron FASTCAM CA4 с максимальной частотой видеосъемки 20000 кадров в секунду (систематическая погрешность не превышала $5 \cdot 10^{-5} \%$). Перед проведением экспериментов проводилась калибровка оборудования с помощью эталона и настройка фокусировки видеокамеры на центральную часть печи.

Основные погрешности использовавшихся средств регистрации приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Погрешности оборудования

Физическая величина	Средство измерения	Погрешность прибора
Температура окислителя (T_g)	Термический преобразователь (ТХА)	$\pm 0,004 \cdot T_g$
Радиус капли топлива	Photron FASTCAM CA4 5	$\leq 4 \%$
Время задержки зажигания	Photron FASTCAM CA4 5	$\leq 5 \cdot 10^{-5} \%$
Массовые концентрации топлива	Аналитические весы VIBRA HT 84RCE	0,0001 г

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

1. По результатам проведенных экспериментов определяли средние значения $t_{\text{ign}} \left(\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \right)$, где t_i – значение времени задержки зажигания 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.

2.4. Выводы по второй главе

Разработана методика проведения экспериментальных исследований по изучению времен задержки зажигания био-водоугольных топлив, выполненных на основе углей различной степени метаморфизма с добавлением биомассы.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ БИО-ВОДОУГОЛЬНЫХ ТОПЛИВ

3.1. Влияние степени метаморфизма на процесс зажигания био- водоугольных топлив

Можно отметить, что как следует из результатов [235], время удаления влаги из капли любых водоугольных топлив в индукционный период много больше периода термического разложения угля и непосредственного зажигания. Поэтому большую часть времени задержки зажигания Био-ВУТ находится в неоднородном (гетерогенном) состоянии (точнее, в состоянии суспензии). Известно, что при движении в газовой высокотемпературной среде капли всех жидкостей (в том числе и высоковязких) непрерывно трансформируются [205, 236] и интенсивно испаряются [235]. При этом они изменяют достаточно существенно свою форму, проходя последовательно стадии «сфера» → «эллипсоид» и ряд промежуточных конфигураций. В этой связи за характерный размер капли в проведенных экспериментах выбирался диаметр, соответствующий ее массе при сферической форме.

На рисунках 3.1 – 3.3 приведены типичные кадры видеogramм процесса воспламенения и горения различных смесей био-водоугольных топлив (температура внешней среды $T_g=1073K$), выполненных на основе углей различной степени метаморфизма (35 % - массовая концентрация угля) с добавлением измельченного опада (5 % - массовая концентрация ЛГМ) лиственных пород деревьев (рисунок 3.1 – листья дуба, рисунок 3.2 – листья ивы, 3.3 – листья березы).

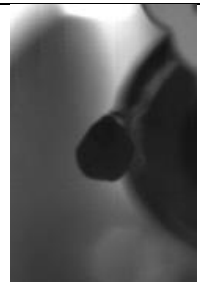
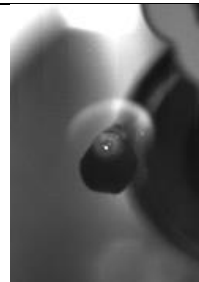
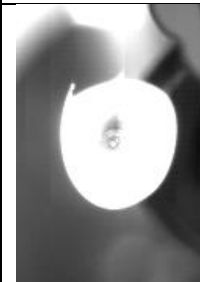
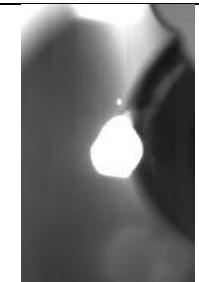
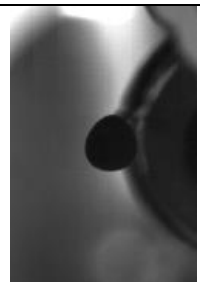
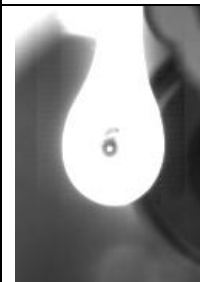
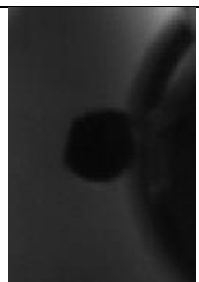
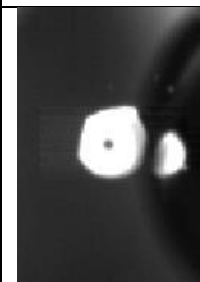
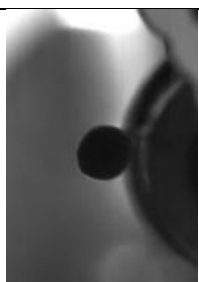
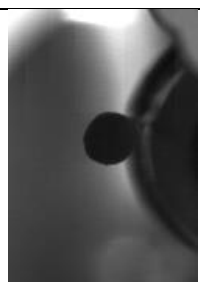
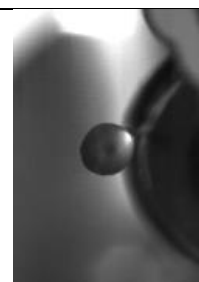
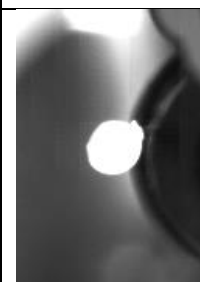
a	b	c	d	e	
					Уголь марки 2Б
t = 0 с.	t = 7,6 с.	t = 9,7 с.	t = 10,1 с.	t = 14,5 с.	
					Уголь марки Д
t = 0 с.	t = 7,9 с.	t = 10, 2 с.	t = 10,7 с.	t = 15,0 с.	
					Уголь марки Т
t = 0 с.	t = 8,71 с.	t = 11,27 с.	t = 11,83 с.	t = 16,22 с.	
					Уголь марки антрацит
t = 0 с.	t = 9,9 с.	t = 12,2 с.	t = 16,6 с.	t = 20,7 с.	

Рисунок 3.1 – Кадры процессов прогрева и последующего зажигания капель (начальный размер 2,5 мм) био-водоугольного топлива в высокотемпературной среде для суспензий с добавлением листьев дуба

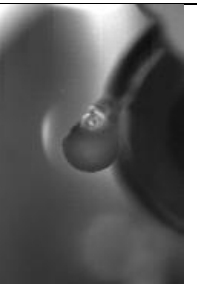
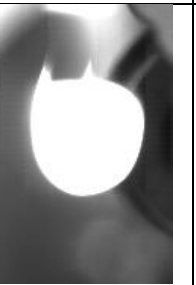
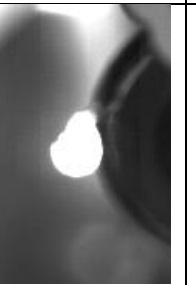
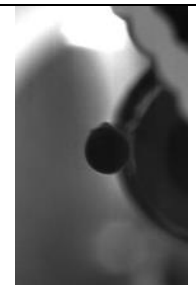
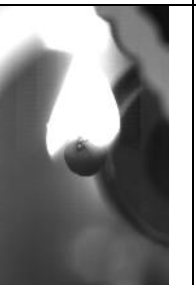
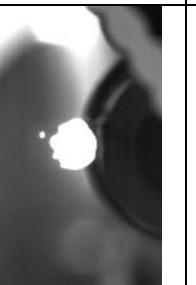
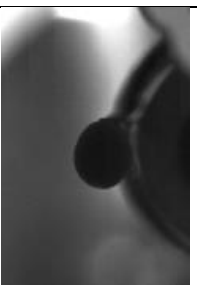
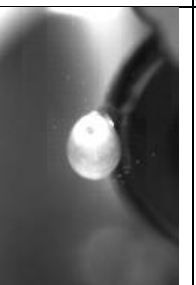
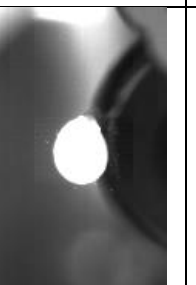
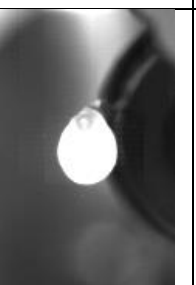
a	b	c	d	e	
					Уголь марки 2Б
t = 0 с.	t = 8,6 с.	t = 10,0 с.	t = 10,5 с.	t = 14,6 с.	
					Уголь марки Д
t = 0 с.	t = 8,9 с.	t = 10,3 с.	t = 11,6 с.	t = 17,2 с.	
					Уголь марки Т
t = 0 с.	t = 9,4 с.	t = 11,0 с.	t = 11,2 с.	t = 14,6 с.	
					Уголь марки антрацит
t = 0 с.	t = 10,5 с.	t = 12,1 с.	t = 13,0 с.	t = 16,3 с.	

Рисунок 3.2 – Кадры процессов прогрева и последующего зажигания капель (начальный размер 2,5 мм) био-водоугольного топлива в высокотемпературной среде для суспензий с добавлением листьев ивы

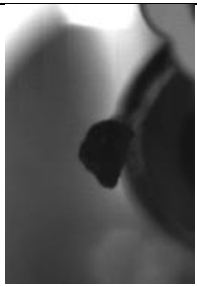
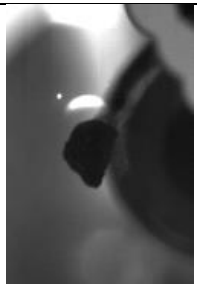
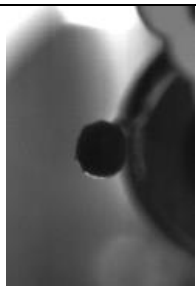
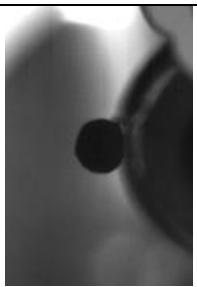
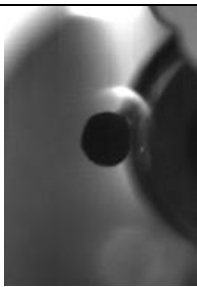
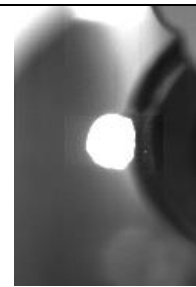
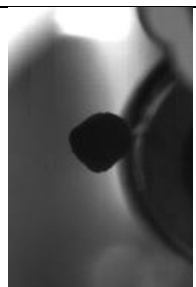
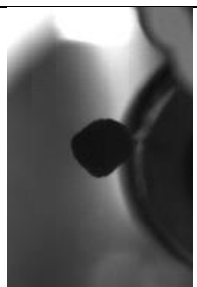
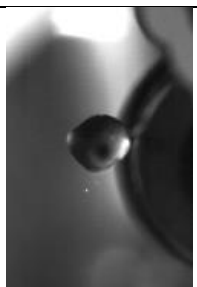
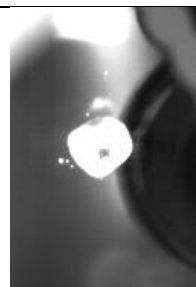
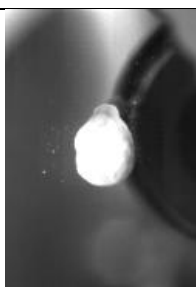
a	b	c	d	e	
					Уголь марки 2Б
t = 0 с.	t = 5,7 с.	t = 8,0 с.	t = 8,2 с.	t = 14,0 с.	
					Уголь марки Д
t = 0 с.	t = 6,3 с.	t = 8,9 с.	t = 9,8 с.	t = 14,2 с.	
					Уголь марки Т
t = 0 с.	t = 7,9 с.	t = 9,9 с.	t = 10,0 с.	t = 14,5 с.	
					Уголь марки антрацит
t = 0 с.	t = 9,4 с.	t = 11,9 с.	t = 12,2 с.	t = 15,3 с.	

Рисунок 3.3 – Кадры процессов прогрева и последующего зажигания капель (начальный размер 2,5 мм) био-водоугольного топлива в высокотемпературной среде для суспензий с добавлением листьев березы

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 [228]. 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).

На рисунках 3.4 – 3.6 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.

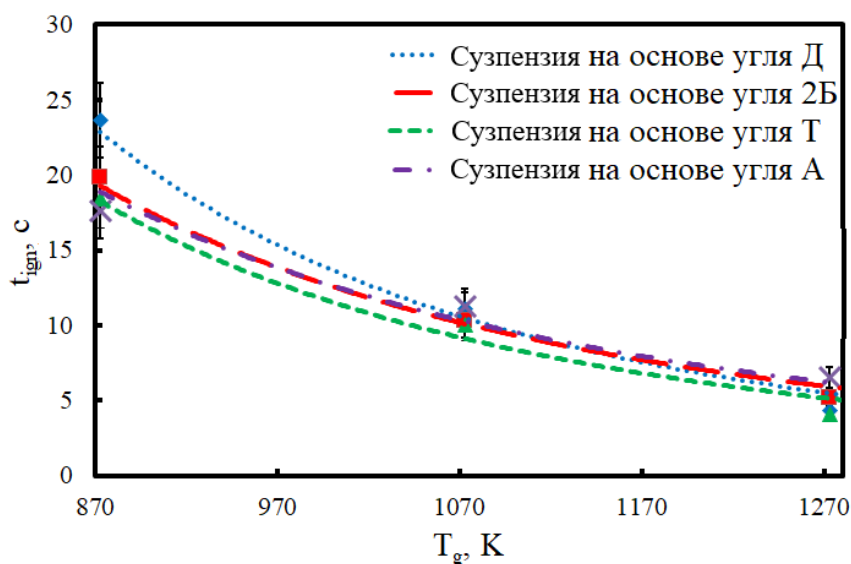


Рисунок 3.4 - Зависимости времён задержки зажигания капель био-водоугольных топлив, выполненных на основе углей различной степени метаморфизма с добавлением листьев дуба от температуры внешней среды

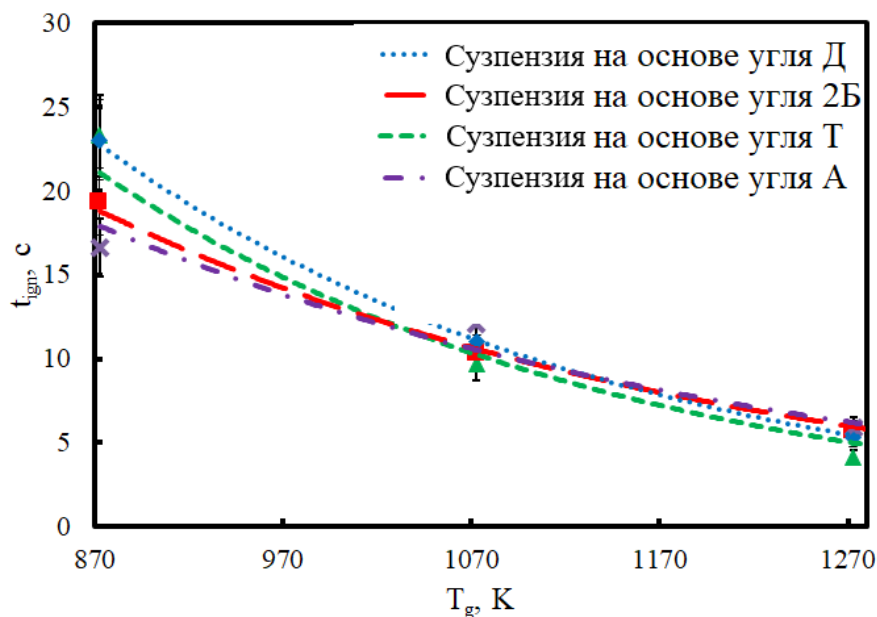


Рисунок 3.5 - Зависимости времён задержки зажигания каплей био-водоугольных топлив, выполненных на основе углей различной степени метаморфизма с добавлением листьев ивы от температуры внешней среды

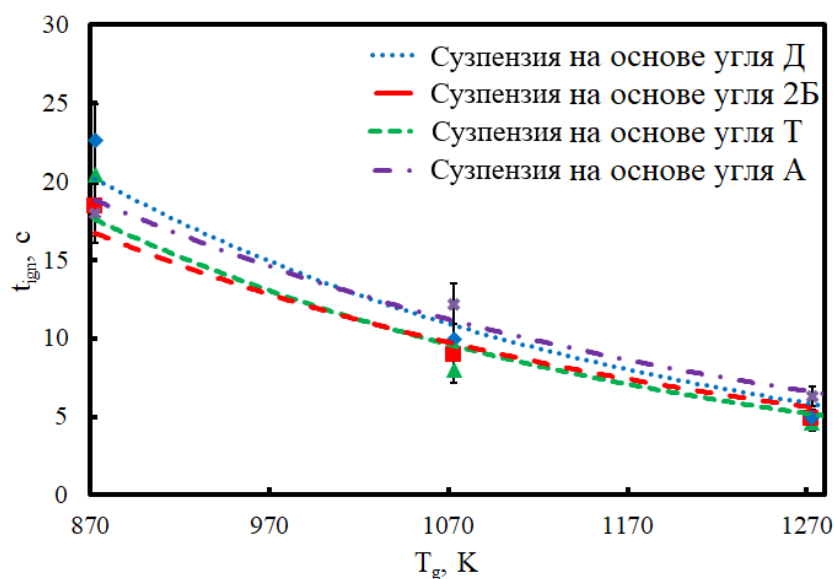


Рисунок 3.6 - Зависимости времён задержки зажигания каплей био-водоугольных топлив, выполненных на основе углей различной степени метаморфизма с добавлением листьев березы от температуры внешней среды

Анализ зависимостей (рисунки 3.4 - 3.6) в условиях относительно высоких температур внешней среды ($T_g \geq 1273\text{K}$) показывает, что значения t_{ign} топлив на

основе разных углей практически идентичны (не выходят за пределы доверительного интервала определения t_{ign}).

В условиях же относительно низких значений T_g (менее 1073 К) капли Био-ВУТ, выполненных на основе длиннопламенного угля, воспламеняются медленнее других био-водоугольных топлив (на основе бурого угля, антрацита и тощего угля). В тоже время известно [151, 152], что капли водоугольных топлив на базе антрацита воспламеняются медленнее капель ВУТ, приготовленных на основе бурого или длиннопламенного угля. Это, скорее всего, обусловлено тем, что в антраците мало (по сравнению с бурыми или каменными углями [152]) летучих. Соответственно, процесс инициирования горения у таких углей протекает медленнее, чем у длиннопламенного или бурого (которые богаты летучим). Этот результат, скорее всего, обуславливается двумя факторами. Во-первых, как известно из теории формирования углей [177], 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 по результатам исследований [179], 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, и 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.

Другими словами, лесной горючий материал в такой гетерогенной системе выступает в роли своеобразного «ускорителя» химической реакции воспламенения. 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 частицы увеличивается, поэтому зажигание

в газовой фазе происходит быстрее. Можно сделать обоснованный вывод, что биомасса является более реакционным топливом [237] и в составе водоугольной смеси выступает в качестве «разгонщика» реакции зажигания частиц Био-ВУТ.

3.2. Оценка эффективности использования лесного горючего материала в качестве добавки, ускоряющей процесс зажигания био-водоугольных топлив

Для оценки влияния вида листового опада на временные характеристики зажигания исследован листовой опад трех типичных сортов деревьев (береза, дуб, ива). Составы исследовавшихся топлив представлены в таблице 2.1.

Процесс термической подготовки и последующего зажигания капель Био-ВУТ подробно изложен в разделе 3.1.

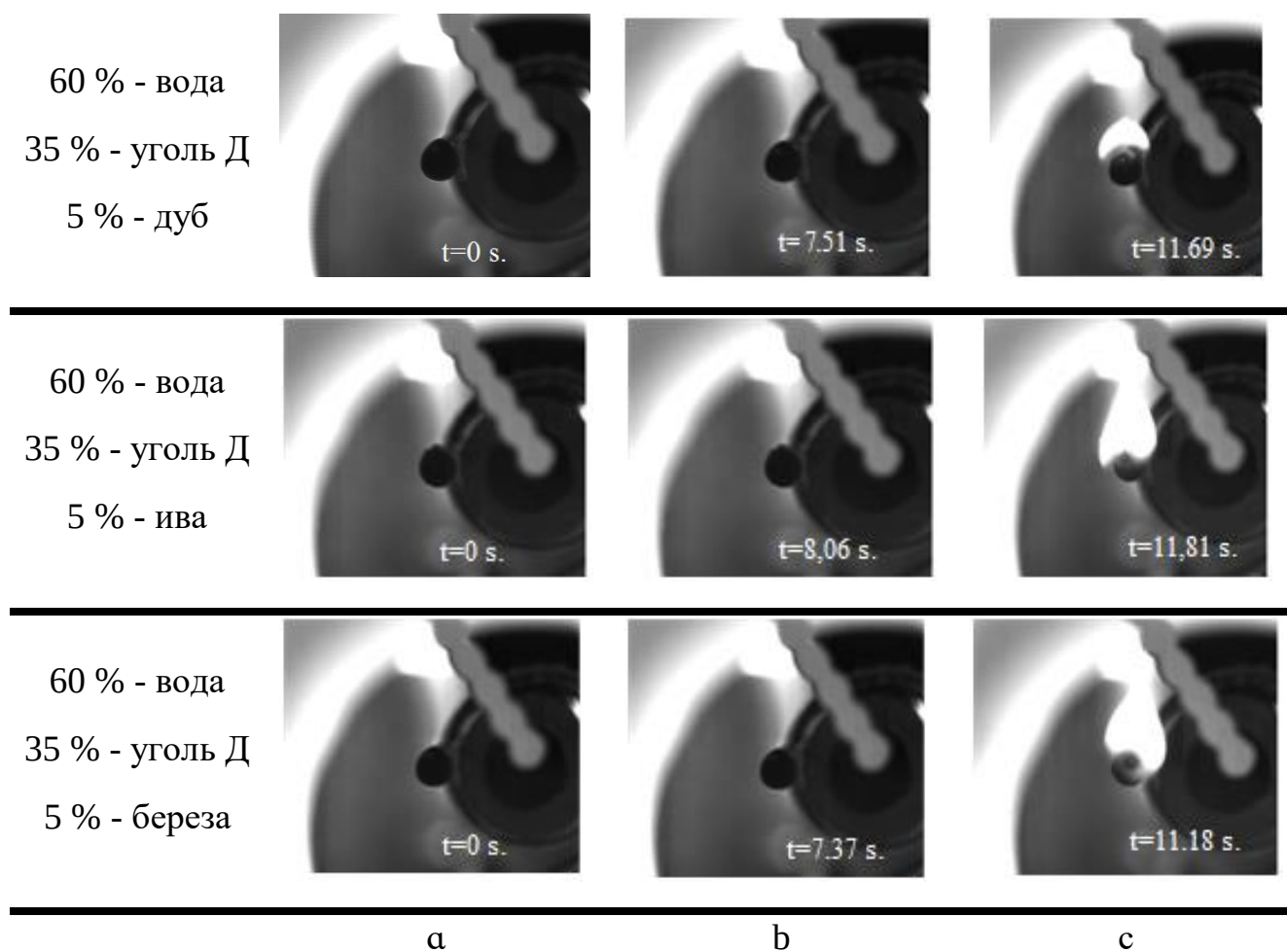
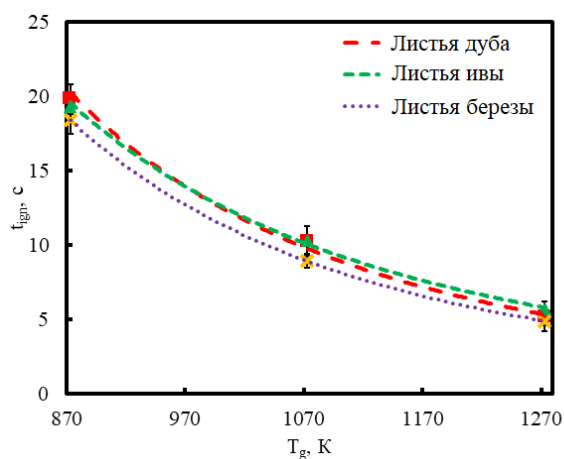


Рисунок 3.7 – Типичные кадры процесса воспламенения капель Био-ВУТ (на основе длиннопламенного угля с добавлением листьев различных пород

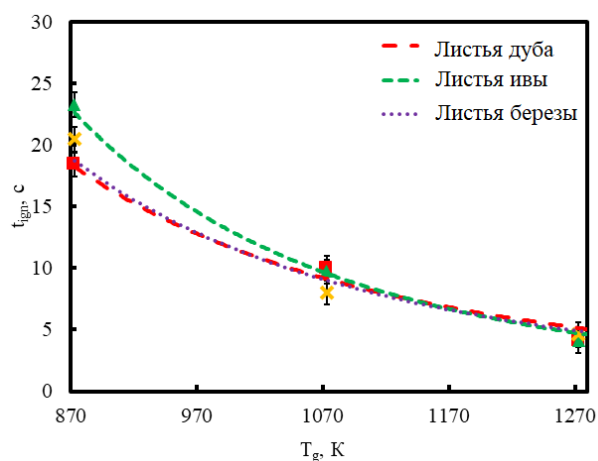
древесины) размером 2,5 мм при температуре окислителя $T=1073$ К (а - начало инертного нагрева капли Био-ВУТ, b – кадр характеризующий окончание процесса влагоудаления с поверхности частицы био-водоугольного топлива, с – зажигание частицы Био-ВУТ)

Анализ типичных кадров (рисунок 3.7) процесса воспламенения одиночных капель Био-ВУТ показывает, что зажигание исследовавшихся топлив происходит над частицей на некотором расстоянии от неё (рисунок 3.7). После воспламенения летучих формируется сфера пламени (кадры с), размер которой в несколько раз (в 2-3 раза) превышает диаметр частицы [238]. Выделившиеся в результате термического разложения летучие вдуваются в пограничный слой частицы, где формируют высокореакционную парогазовую смесь. Последняя воспламеняется при нагреве до критических (по условиям зажигания) значений температур (кадр с, $t=t_{\text{ign}}$).

На рисунке 3.8 приведены зависимости времен задержки зажигания исследовавшихся топливных композиций от температуры окислителя для капель с характерным размером 2,5 мм.



a



b

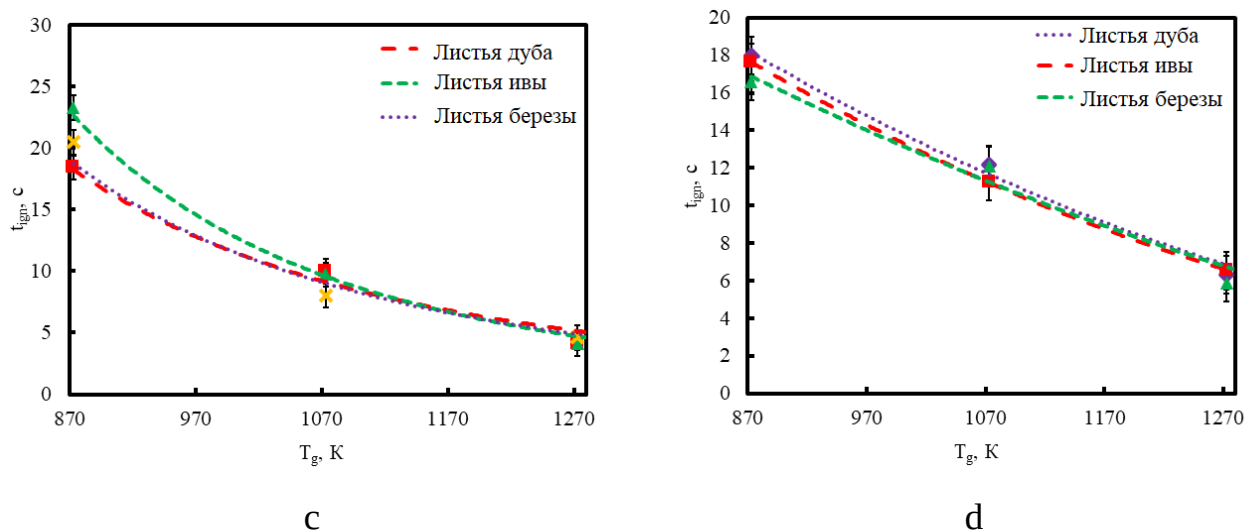


Рисунок 3.8 - Зависимости времён задержки зажигания капле био-водоугольного топлива от температуры внешней среды (a – тощий; b – бурый; c – длиннопламенный; d – антрацит)

Установленные в экспериментах зависимости $t_{ign}(T_g)$ показывают (рисунок 3.8), что вид опада лиственных пород древесины практически не оказывает заметного влияния на условия и характеристики зажигания Био-ВУТ.

По этой причине становится актуальной оценка влияния на времена задержки зажигания других древесных добавок (хвоя, древесный уголь), существенно отличных по своим свойствам от добавок лиственных пород деревьев в структуре Био-ВУТ [228].

На рисунке 3.9 приведены кадры процесса термической подготовки и последующего зажигания водоугольных смесей с массовой концентрацией воды 50 % на базе энергетического угля марки Д с добавлением 10 % биомассы (листья березы, хвоя сосны и ели, древесный уголь).

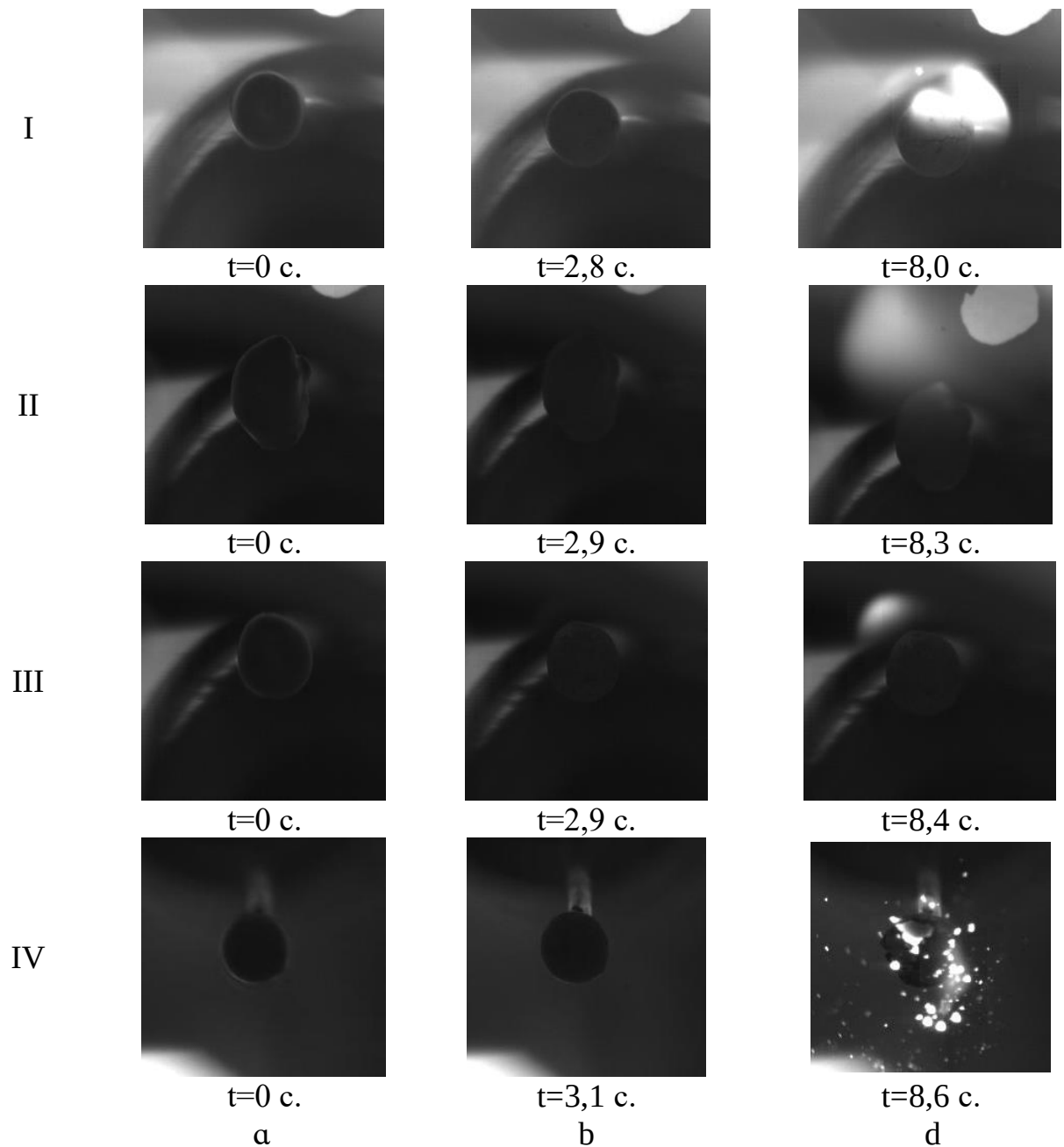


Рисунок 3.9 - Видеограмма процесса прогрева и последующего зажигания частиц в высокотемпературной среде ($T_g=1073K$) био-водоугольных топлив на основе угля марки Д с добавлением (I –листьев березы, II –хвои сосны, III –хвои ели, IV –древесного угля), с характерным начальным размером 3 мм (а - начало инертного нагрева капли Био-ВУТ, б – кадр характеризующий окончание процесса влагоудаления с поверхности частицы био-водоугольного топлива, с – зажигание частицы Био-ВУТ)

При более детальном анализе видеограмм (рисунок 3.9) процесса воспламенения топлив установлено, что в приповерхностном слое частицы Био-

ВУТ (с добавлением древесного угля) в период термической подготовки и зажигания может происходить диспергирование (рисунок 3.10). Последнее, скорее всего, обусловлено существенным влиянием фильтрационных напряжений, формирующихся в результате интенсивного испарения воды, а также притока горючей массы (летучих) вследствие пиролиза каменного и древесного углей [238]. При этом установлено, что при зажигании Био-ВУТ с добавлением измельченных хвои или листьев диспергирования не происходит.

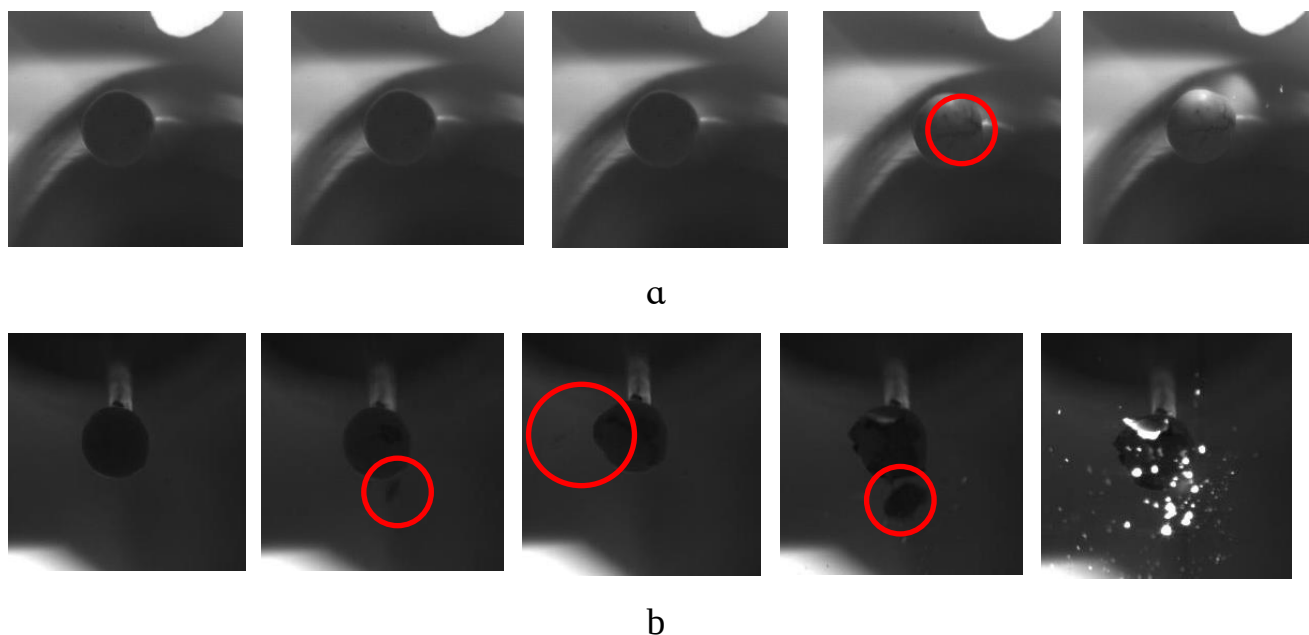


Рисунок 3.10 – изменение внешнего вида частицы био-водоугольного топлива в индукционный период при температуре 1073 К (а - смесь на основе угля марки Д с добавлением листьев березы, б – смесь на основе угля марки Д с добавлением древесного угля)

В проведенных экспериментах установлено, что топливные частицы с добавлением древесного угля (рисунок 3.10 б) разрушаются в результате микровзрывов, протекающих в приповерхностных слоях частицы Био-ВУТ. С увеличением температуры одиночной капли топлива происходит рост скорости испарения воды. При дальнейшем нагреве растет давление водяного пара и горючих газов в порах частицы топлива. Это приводит к прорыву парогазовой смеси в область низкого давления (окружающая среда) сквозь пористую структуру углеродистого каркаса и нарушению его целостности. Малые по размерам частицы

угля «вылетают» в пристенную область в результате микровзрывов и практически сразу начинают гореть. При этом существенно увеличивается скорость прогрева основной частицы топлива (по аналогии с [239]) и уменьшается время задержки зажигания. В условиях реальных топочных процессов диспергирование топлива приводит к положительному эффекту. Как известно из теории горения [205], длительность индукционного периода зависит и от характерного размера частиц топлива. Поэтому, дробление частиц Био-ВУТ на множество более мелких фрагментов существенно уменьшает времена задержки зажигания.

С целью проведения сравнительного анализа влияния вида биомассы на характеристики зажигания на рисунке 3.11 приведены экспериментальные значения t_{ign} частиц ВУТ на основе длиннопламенного угля от температуры окислителя (воздуха) [240]. 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 зажигаются 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). В условиях высокотемпературного нагрева ($T_g \geq 1273$ К) значения t_{ign} частиц Био-ВУТ и водоугольной суспензии практически идентичны (не выходят за пределы доверительного интервала определения t_{ign}).

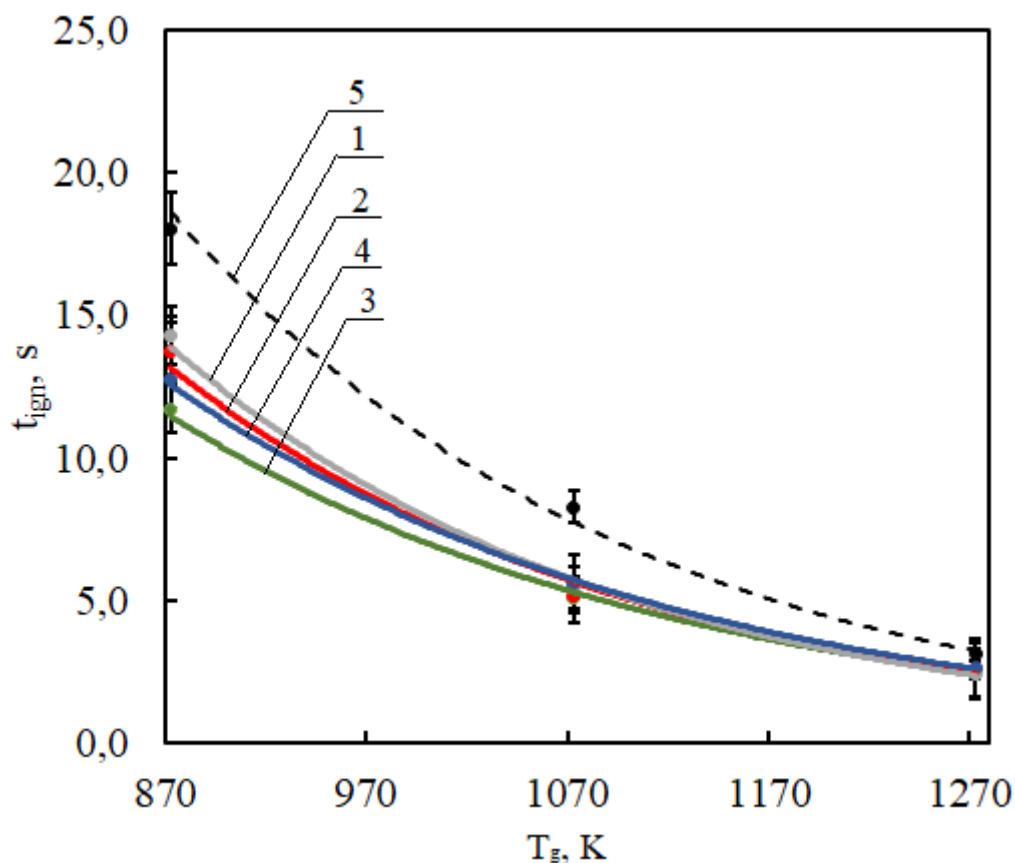


Рисунок 3.11 – Зависимости времён задержки зажигания био-водоугольных и водоугольных суспензий на основе длиннопламенного угля от температуры окислителя при начальном размере капель 2 мм (1 – с добавлением листьев березы, 2 – с добавлением хвой сосны, 3 – с добавлением хвой ели, 4 – с добавлением древесного угля, 5 – ВУТ без добавок [239])

Результаты выполненных экспериментальных исследований дают основания для вывода о целесообразности введения в состав водоугольных топлив добавок (до 10 % по массе) лесных горючих материалов (как хвойных, так и лиственных пород деревьев).

Необходимо иметь в виду, что горение ВУТ происходит, как правило, при температурах до 1100-1200 К, а в этом диапазоне эффект присутствия ЛГМ или древесного угля в составе водоугольной суспензии, как показали эксперименты, достаточно значим - время задержки зажигания снижается на 20-30%, что может стать объективной основой для оптимизации технологий сжигания водоугольных

суспензий в топках паровых и водогрейных котлов (например, существенного снижения размеров предтопка). Также в реальной практике Био-ВУТ можно применять в качестве растопочного топлива для вывода на производственную мощность теплогенерирующих установок промышленной теплоэнергетики.

3.3. Влияние температуры окислителя и начального размера капель на условия и характеристики зажигания био-водоугольных топлив

Эксперименты проведены с каплями исследовавшихся топлив, начальные размеры которых составляли от 2 мм до 4 мм. В реальной практике после выхода из форсунок и распыления капель водоугольного топлива большую долю составляют капли малых (от 0,5 до 1,0 мм) размеров. Поэтому установленные в экспериментах значения t_{ign} можно считать верхними оценками значений этой характеристики. В то же время в экспериментах [241] установлено, что при движении большой совокупности капель, в условиях, близких к топочной среде, происходят процессы коагуляции капель. Большие по размерам капли поглощают малые при движении в одном направлении. Также высока вероятность коагуляции и малых капель, вследствие турбулентных пульсаций в капельной струе, как в продольном, так и в поперечном направлениях. Дробление же капель, сталкивающихся при однонаправленном движении, не происходит [241], так как их скорости сближения (если вторая «догоняет» идущую первой) малы. Поэтому диапазон изменения реальных размеров капель в проведенных экспериментах был представительным.

Экспериментальные данные, иллюстрирующие зависимость времени задержки зажигания от начального характерного размера капель топлив при различных температурах, приведены на рисунке 3.12.

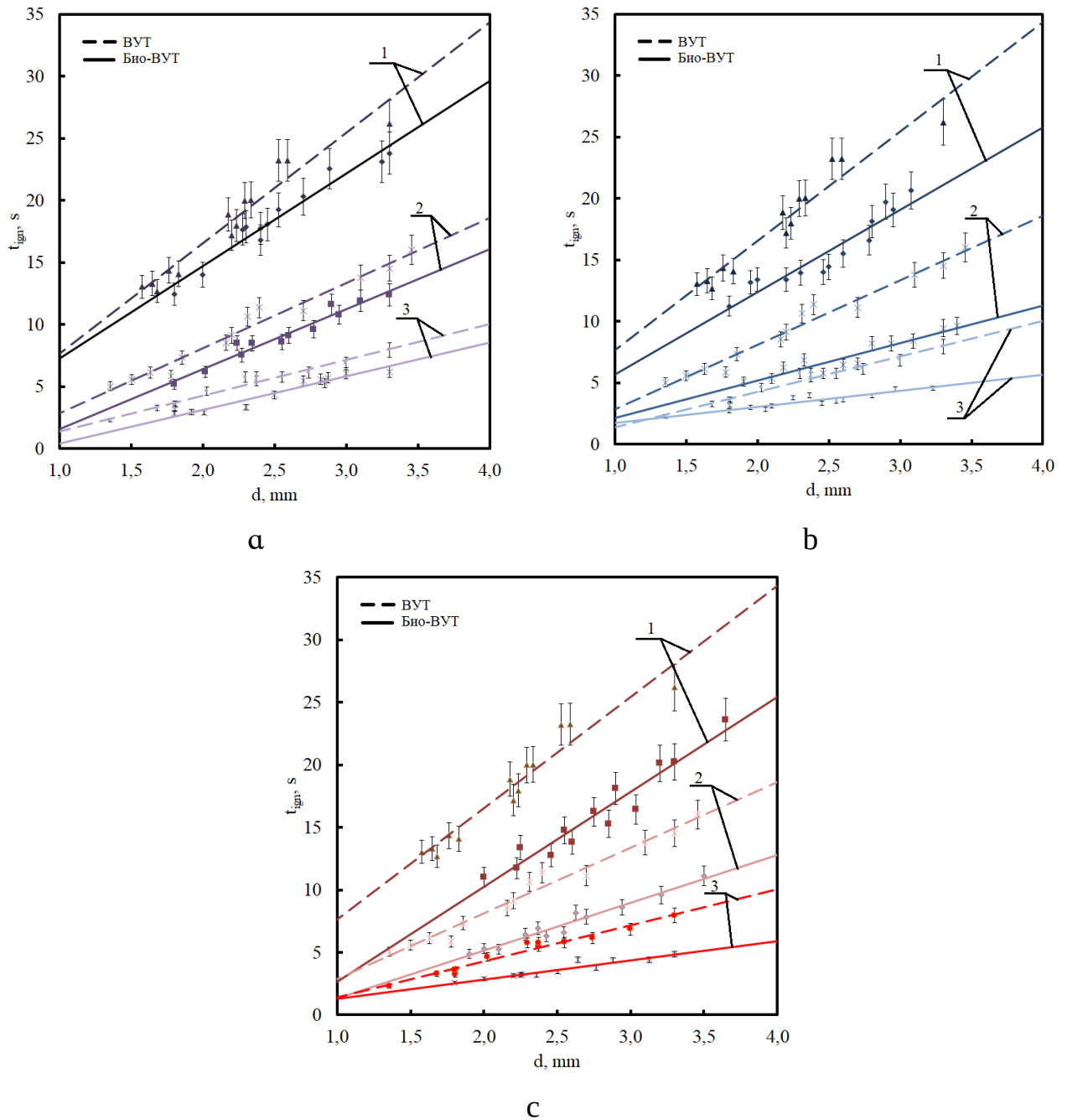


Рисунок 3.12 – Зависимости времени задержки зажигания каплей Био-ВУТ на основе угля марки Д (а – смесь с добавлением листьев дуба, б – смесь с добавлением листьев ивы, с – смесь с добавлением листьев березы) от размера при разных температурах (1 – $T = 873$ К, 2 – 1073 К, 3 – 1273 К)

Анализ приведенных на рисунке 3.12 зависимостей $t_{ign}(d)$ показывает, что, как и следует из общей теории зажигания каплей и частиц топлива [205], время задержки зажигания существенно зависит не только от температуры среды, в

которой находится капля или частица, а также от характерного размера последних [228, 242].

На рисунке 3.12 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 $t_{\text{ign}}(d)$. Установленные закономерности, скорее всего, обусловлены тем, что зажигание газообразных продуктов пиролиза органической части угля происходит после полного испарения всей влаги, содержащейся в топливе [228]. 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.

Результаты экспериментов, приведенные на рисунке 3.12, 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 сильные зависимости $f=t_{\text{ign}}(d)$ иллюстрируют масштабы основных проблем, возникающих при организации процессов горения капель композитных жидких топлив на основе угля, воды и биомассы. Поэтому можно сформулировать достаточно очевидный вывод об объективной необходимости минимизации размеров капель Био-ВУТ. Эффективного сжигания био-водоугольного топлива можно достичь путем тонкодисперсного распыла суспензии в топках котлов промышленной теплоэнергетики. При $d = 1$ мм времена задержки зажигания всех исследованных композиций находятся в интервал 3 – 7 секунд, что уже приемлемо для практического применения на объектах промышленной теплоэнергетики.

На основании анализа результатов выполненных экспериментов можно сделать вывод, что при значениях t_{ign} больше 20 секунд необходимо организовать в топочном пространстве вихревые зоны горения био-водоугольного топлива. Примером может служить цилиндрическая камера сгорания с тангенциальным подводом топлива и окислителя (по аналогии с [243]). При попадании в топочное пространство крупные капли под действием сил тяжести смещаются к периферии

камеры сгорания. В этой области происходит влагоудаление, пиролиз органической части и последующее воспламенение летучих. По мере выгорания и потери массы частицы топлива постепенно смещаются к центру (они становятся легче). Благодаря такой схеме можно добиться практически полного сжигания био-водугольной суспензии при приемлемых для практики временах задержки зажигания.

3.4. Зажигание био-водугольных топлив при варьировании концентрации древесной компоненты

На рисунке 3.13 представлен внешний вид исследовавшихся био-водугольных топлив на основе тощего угля с добавлением сосновой хвои перед экспериментами. Установлено, что с увеличением доли биомассы в топливе увеличивается и адсорбционная способность смесей. Так, например, при уменьшении массовой концентрации угля и соответствующем увеличении доли лесного горючего материала в составе топлива (выше 5 %) водугольная суспензия теряет свою однородность (рисунок 3.13). По этой причине распыл такого существенно неоднородного топлива может привести к забиванию форсунок или системы подачи топлива, а также абразивному износу горелок. Соответственно, для сжигания водугольной суспензии с высоким содержанием биомассы необходимы специальные технологии топливоподачи.

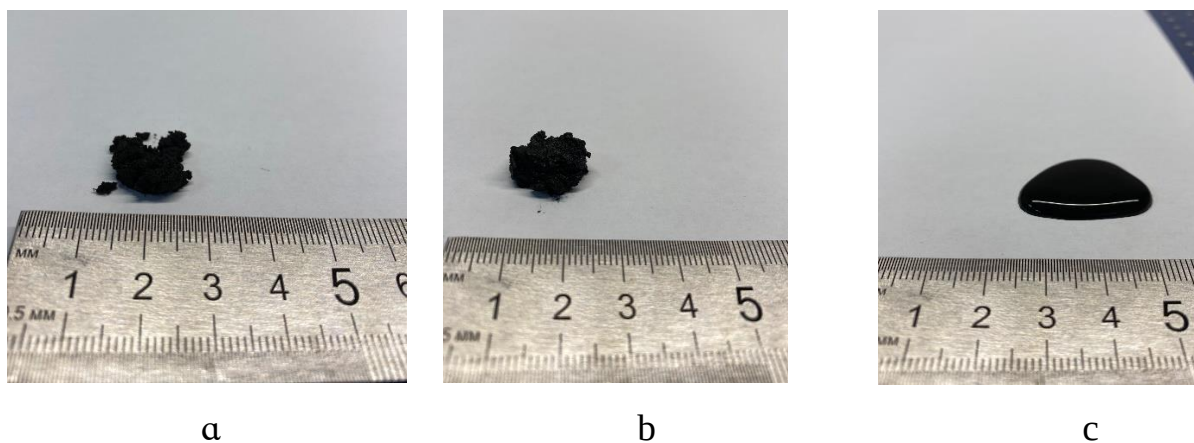
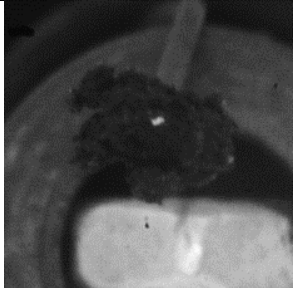
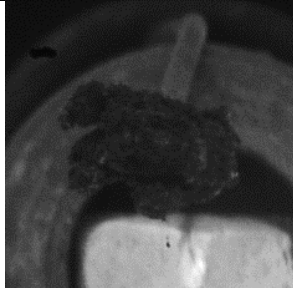
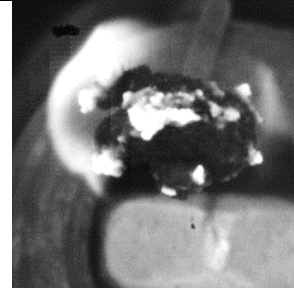
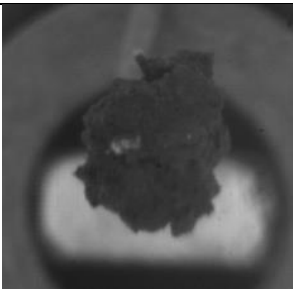
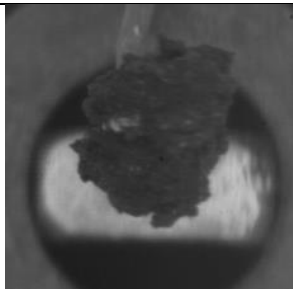
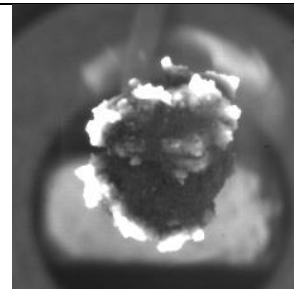


Рисунок 3.13 – внешний вид водоугольного топлива при различных концентрациях биомассы (а – 15 % лесного горючего материала, б – 10 % лесного горючего материала, с – 5 % лесного горючего материала)

На рисунке 3.14 представлены кадры типичной видеозаписи процесса нагрева капель и последующего воспламенения частиц Био-ВУТ.

Кадры			Содержание биомассы
			15 %
а t=0 с	б t=2,1 с	с t=2,6 с	
			10 %
а t=0 с	б t=2,8 с	с t=4,1 с	

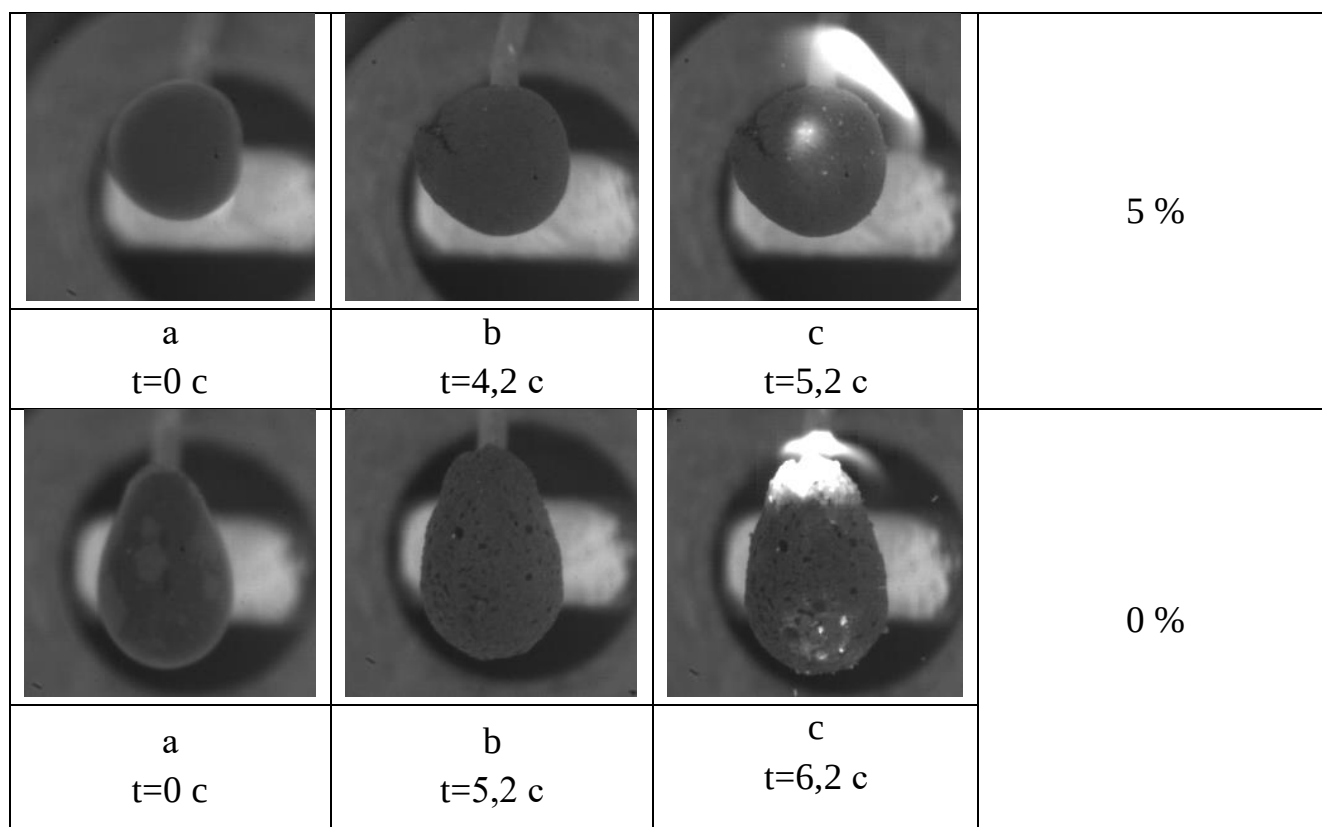


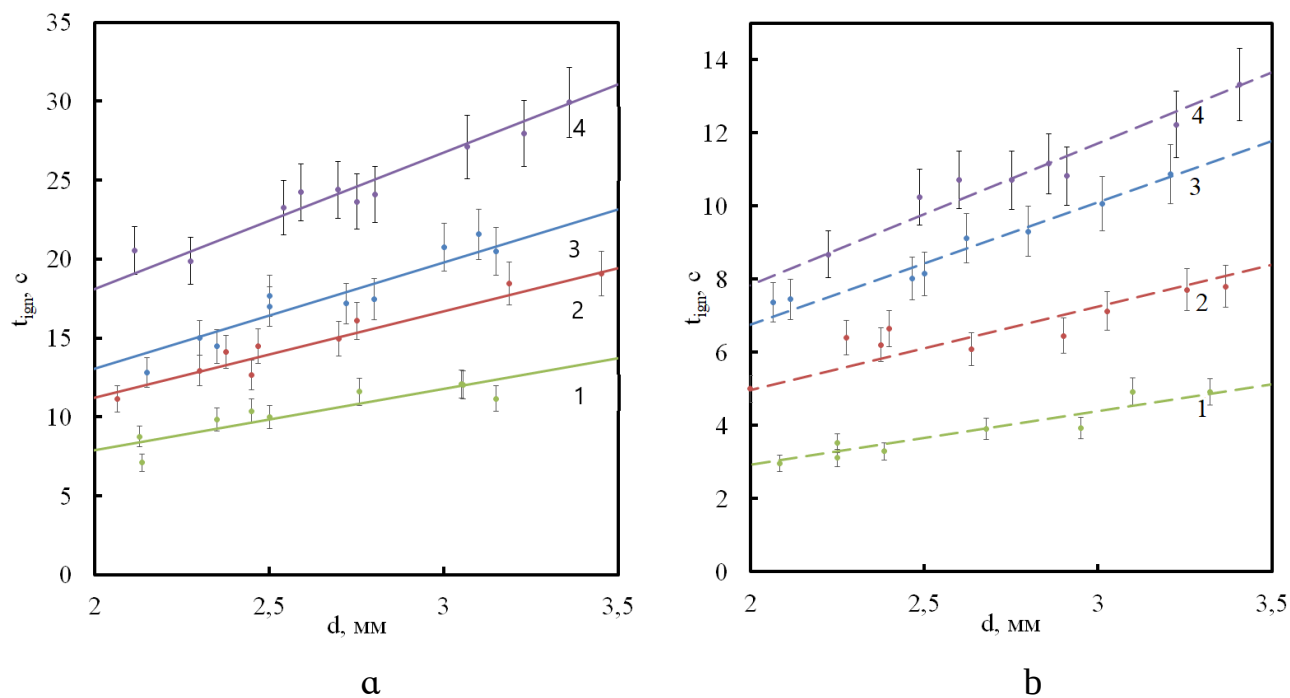
Рисунок 3.14 – Видеограмма процесса нагрева и последующего зажигания частиц ВУТ и Био-ВУТ, выполненных на основе тощего угля с характерным размером 3 мм в высокотемпературной среде ($T_g=1273$ K)

Стоит отметить, что механизм зажигания для всех исследовавшихся топливных композиций является общим, но длительность отдельных стадий существенно отличается и зависит от составов топлив.

Анализ видеограмм проведенных экспериментов дает основания для нескольких выводов. Во-первых, сравнение кадров третьего и четвертого рядов (рисунок 3.14) показывает, что ввод в водоугольную суспензию ЛГМ (при концентрации последнего 5 %) приводит к тому, что капля такого топлива в течение всего периода индукции (до зажигания) сохраняет форму сферы в отличие от ВУТ без добавок ЛГМ (четвертый ряд, рисунок 3.14). Во-вторых, при концентрациях биомассы свыше 5 % частица формируется в форме, как правило, неправильных многогранников с множеством выступов и углублений. Последние же являются концентраторами тепловых потоков и, соответственно, зажигание частиц Био-ВУТ начинается именно в этих точках.

Также кадры (рисунок 3.14 б) хорошо иллюстрируют газофазный механизм зажигания каплей всех вариантов состава ВУТ (по концентрации ЛГМ). Зоны горения газов хорошо видны на всех четырех кадрах. При этом на кадре (рисунок 3.14 б) для состава ВУТ с концентрацией ЛГМ 10 % хорошо видно, что зажигание летучих (продуктов пиролиза угля и ЛГМ) происходит над частицей, хотя по всей ее поверхности распределены участки, разогретые до высоких температур (скорее всего это фрагменты лесного горючего материала, расположенные вблизи поверхности частицы) [230].

На рисунке 3.15 приведены значения времен задержки зажигания одиночных капель био-водоугольного топлива (в начальный период времени, а затем частиц после испарения влаги из приповерхностного слоя).



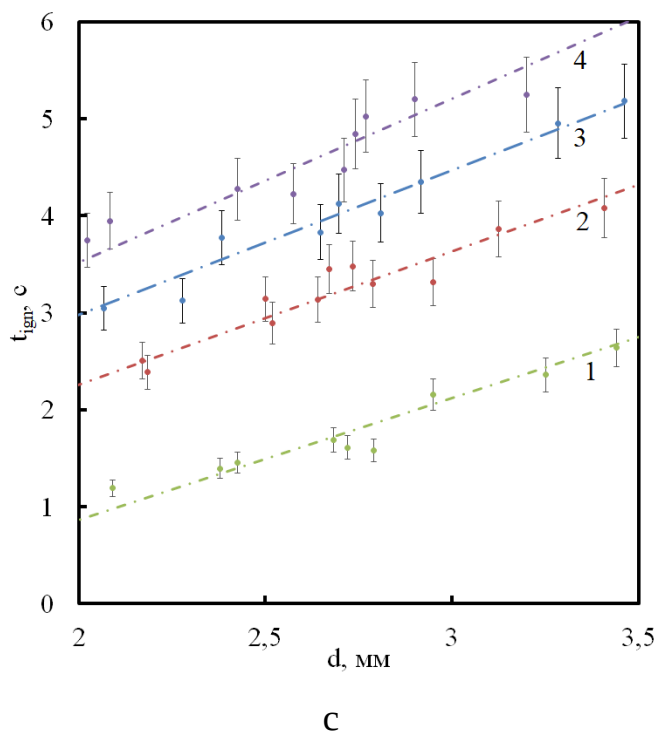


Рисунок 3.15 – Зависимости времен задержки зажигания капель водоугольных суспензий (массовая концентрация биомассы: 1 – 15 %, 2 – 10 %, 3 – 5 %, 4 – 0 %) от начального размера при различных температурах окислителя (а – 873 К, б – 1073 К, с – 1273 К)

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 3.15). 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 [237] и в составе водоугольной суспензии выступает в качестве «разгонщика» реакции зажигания частиц Био-ВУТ.

По результатам выполненных исследований можно сделать заключение о том, что введение лесных горючих материалов в состав ВУТ приводит к

существенному повышению ресурсоэффективности технологий сжигания ВУТ. При существенном снижении (в 2,5-3 раза) времен задержки зажигания капель водоугольных топлив с добавками ЛГМ снижается и общее время термической подготовки таких топлив. Соответственно, отпадает необходимость реконструкции топок паровых и водогрейных котлов при переходе с угольного топлива на водоугольные суспензии в качестве основного топлива ТЭС. Кроме того, добавление 10-15 % ЛГМ снижает потребление угля на теплоэлектроцентралях и в котельных. Также уменьшается и стоимость тепловой энергии, получаемой при сжигании био-водоугольных суспензий, так как цена ЛГМ определяется только затратами на сбор и транспортировку таких материалов. В результате использования лесных горючих материалов в качестве добавок к водоугольным топливам может существенно повыситься ресурсоэффективность угольной промышленной теплоэнергетики. При этом ВУТ с добавлением лесных горючих материалов во многих случаях будут иметь преимущества (технологические и экономические) даже по сравнению с топливами, которые представляют собой смесь сухих углей (основная компонента) и биомассы (вторая компонента) [244, 245]. Такие смеси в последние годы достаточно интенсивно исследуются во многих развитых государствах.

3.5. Совместное зажигание водоугольной суспензии и древесной биомассы

Возможны и другие способы улучшения динамики горения водоугольных суспензий - подсветка факела ВУТ другим (более реакционным) топливом (например, газ, мазут, дизельное топливо) [159] или плазмой [164]. Одним из таких возможных способов улучшения характеристик воспламенения и горения водоугольных 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. Стоит сказать, что в настоящее время в мировой научной периодике не приведено результатов экспериментальных исследований процессов совместного зажигания частиц древесной биомассы и водоугольного топлива.

В экспериментах 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).

Для каждого из вариантов расположения топливных частиц (рисунок 3.16) при идентичных условиях проводилась серия экспериментов не менее чем из 15 опытов.

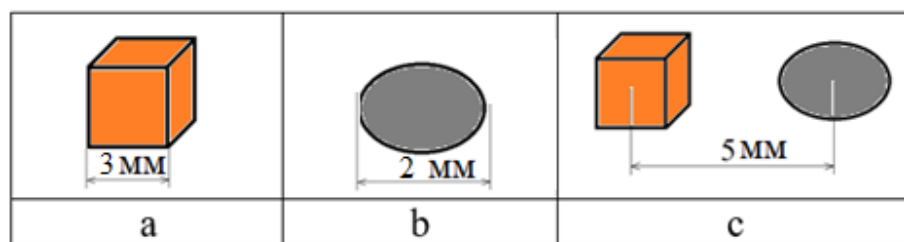


Рисунок 3.16 - Варианты расположения частиц (а – частица древесины, б – капля водоугольного топлива, с – совместное расположение композиции древесина+ВУТ)

На рисунках 3.17 – 3.19 представлены типичные кадры нагрева и последующего воспламенения частиц и капель этих топлив. Процессы зажигания частиц древесной биомассы и водоугольной суспензии существенно отличаются [246]. 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.

Стадии термической подготовки и последующего зажигания капле водугольного топлива (рисунок 3.17) аналогичны процессам воспламенения Био-ВУТ, описанным в разделе 3.1. В начальный период времени $t = 0$ с (рисунок 3.17, кадр а) происходит нагрев капли топлива, который интенсифицирует процесс испарения внутрипоровой влаги. Окончание процесса влагоудаления характеризуется изменением цвета частицы водугольного топлива (рисунок 3.17, кадр б). Дальнейший нагрев инициирует термическое разложение органической части угля. Затем происходит зажигание частицы ВУТ (рисунок 3.17, кадр с).

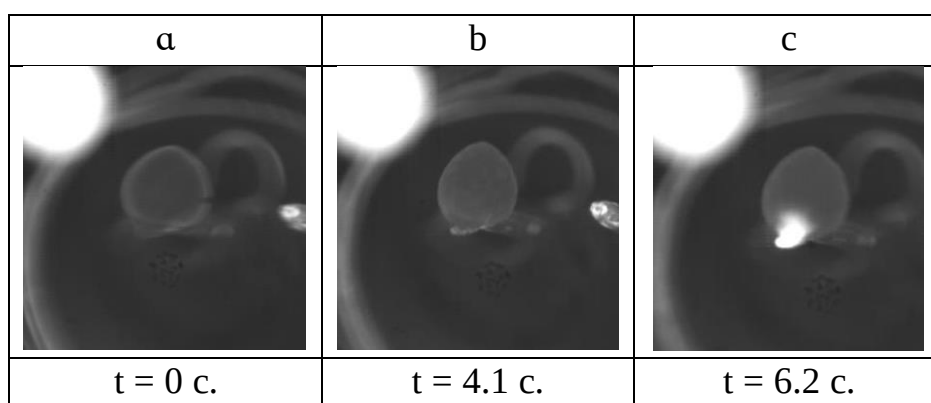


Рисунок 3.17 – Видеограмма процесса нагрева и последующего зажигания частицы ВУТ в высокотемпературной среде ($T_g=1273\text{K}$)

На рисунке 3.18 приведены кадры типичной видеограммы процесса зажигания древесной биомассы. В отличие от водугольного 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 [246].

Кадр а (рисунок 3.18) характеризует начало теплового воздействия на частицу древесной биомассы. Нагрев инициирует термическое разложение биомассы и образование твердых (кокса) и газообразных (летучие) продуктов пиролиза (кадр б рисунок 3.18). В момент времени $t=t_{\text{ign}}$ происходит газофазное зажигание частицы биомассы. При этом стоит отметить, что воспламенение

локализуется в районе ребер куба частицы. Это обусловлено тем, что такие угловые точки выступают в роли концентраторов тепловых потоков.

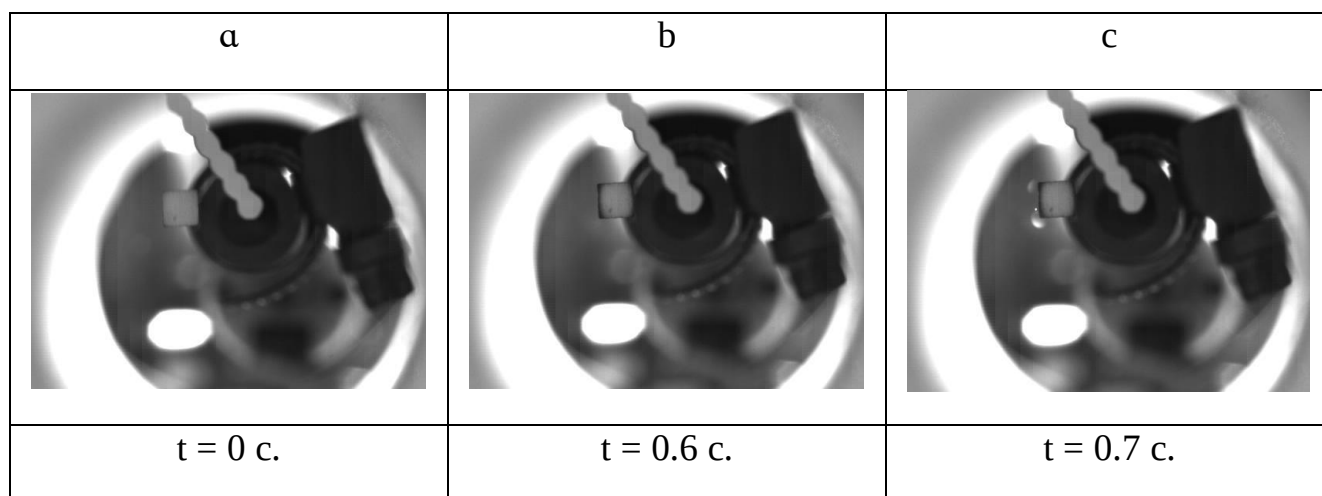


Рисунок 3.18 – Видеограмма процесса нагрева и последующего зажигания частицы древесины в высокотемпературной среде ($T_g=1273K$)

На рисунке 3.19 представлены типичные кадры термической подготовки и совместного зажигания частиц древесной биомассы и водоугольного топлива.

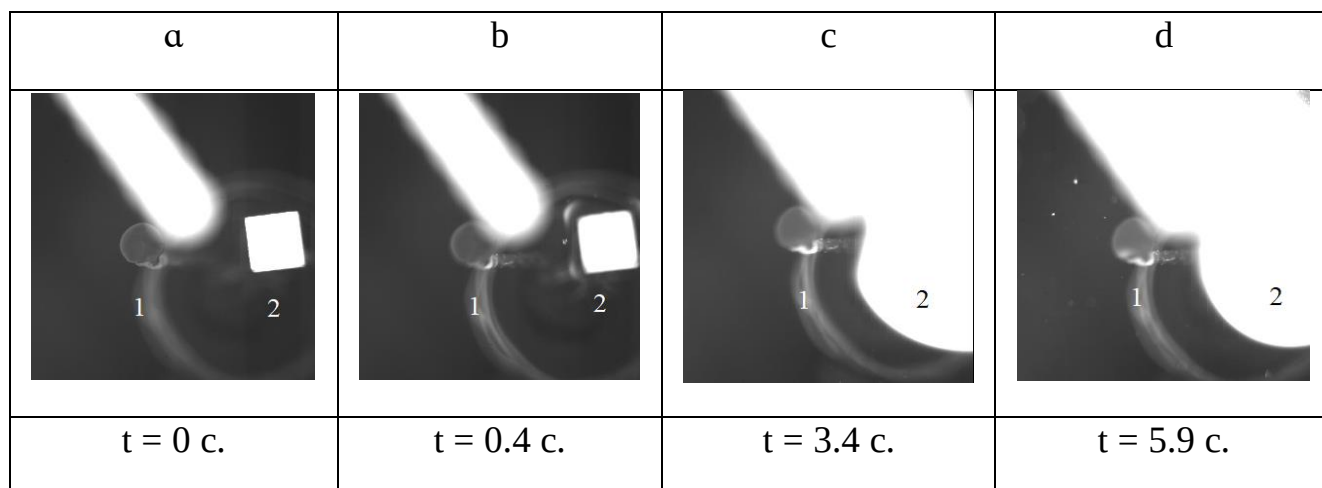


Рисунок 3.19 – Видеограмма процесса прогрева и последующего зажигания и водоугольного топлива (1) и частицы древесины (2) в высокотемпературной среде ($T_g=1273K$)

Анализ кадров (рисунки 3.18 и 3.19) показывает, что процессы термической подготовки и зажигания одиночной частицы древесины и частицы биомассы совместно с водоугольной суспензией идентичны. 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 3.19). 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 c, рисунок 3.19). 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 $t=t_{\text{ign}}$ происходит зажигание водоугольной суспензии (кадр d, рисунок 3.19). Сравнительный анализ кадров, приведенных на рисунках 3.17 и 3.19, показывает, что частица древесины существенно ускоряет процесс зажигания ВУТ (на 58 %).

На рисунке 3.20 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 зажигается 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.

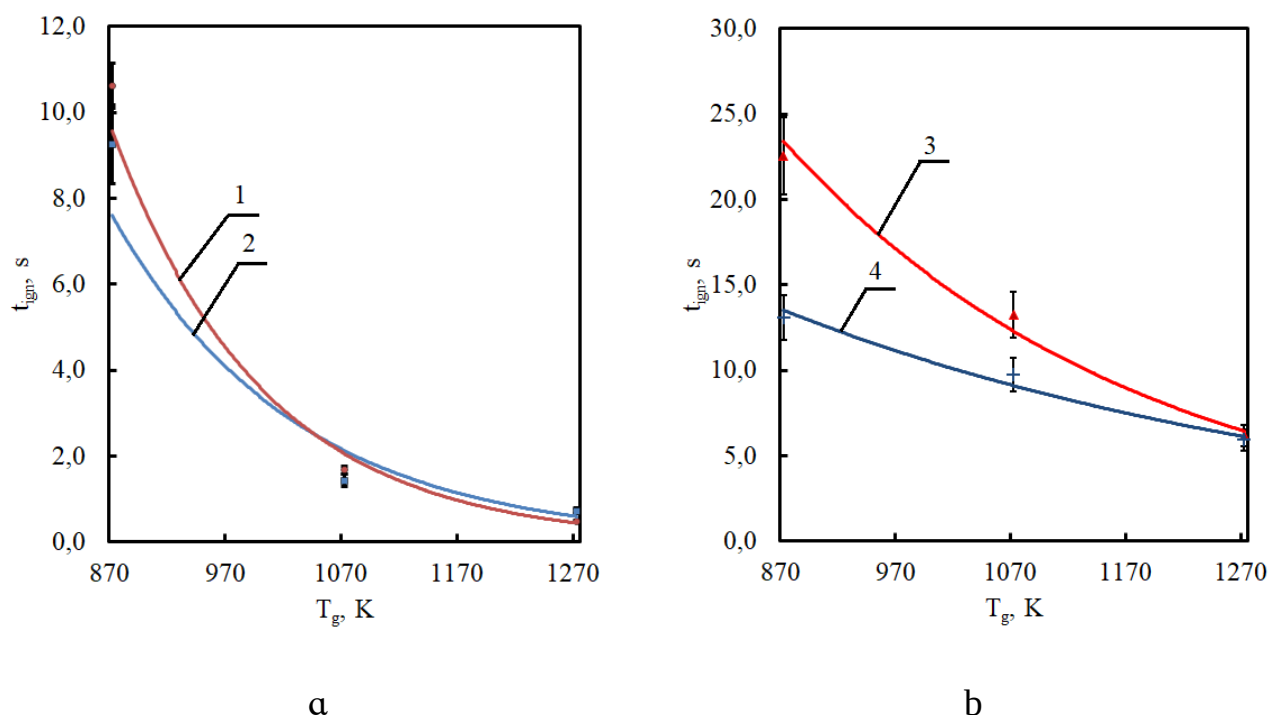


Рисунок 3.20 – Зависимости времен задержки зажигания от температуры окислителя: а - древесины (1 в составе топливной композиции, 2 – одиночной частицы); б - водоугольного топлива (3 – одиночной капли, 4 – в составе топливной композиции)

На рисунке 3.20 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. [246].

3.6. Выводы по третьей главе

1. Результаты экспериментальных исследований процессов воспламенения нового класса топлива (био-водоугольного топлива, приготовленного на основе угля, воды и лесного горючего материала) показали, что ЛГМ может быть использован в качестве компонента топливных смесей в промышленной теплоэнергетике.

2. Впервые установлена высокая эффективность (с точки зрения динамики воспламенения) использования в качестве добавки к топливу листового опада различных пород деревьев. В перспективе лесной горючий материал может стать одним из компонентов композитных топлив, используемых в промышленной теплоэнергетике. Последнее создает предпосылки для существенного расширения сырьевой базы перспективных теплоэлектроцентралей и котельных.

3. Установлены основные факторы, оказывающие влияние на времена задержки зажигания био-водоугольных топлив. К ним можно отнести: температуру окислителя, характерный размер капель, степень метаморфизма угля, вид биомассы, количество летучих веществ, содержащихся в горючих компонентах топлива.

4. Био-водоугольные топлива на основе углей марки Т и антрацита с добавлением лесного горючего материала зажигаются быстрее суспензий на основе длиннопламенного и бурого углей в условиях относительно низких температур.

5. Добавление древесного угля в топливную композицию ВУТ снижает время задержки зажигания частиц (размером 2 мм) на 18 % в условиях относительно низких температур ($T_g=873$ К), что дает возможность использования данного вида топлива в реальной практике.

6. По результатам экспериментальных исследований установлена перспективность использования в качестве ускоряющей процесс зажигания капель био-водоугольного топлива добавки лесного горючего материала. Показано, что добавление 15 % биомассы по массе в состав водоугольного топлива позволяет

уменьшить времена задержки зажигания более чем в три раза по сравнению с водоугольной суспензией без добавления биомассы. В тоже время вид ЛГМ не оказывает существенное влияние на временные характеристики зажигания био-водоугольного топлива.

7. По результатам экспериментальных исследований установлено, что водоугольное топливо можно эффективно сжигать совместно с древесной биомассой. Совместное сжигание позволяет снизить времена задержки зажигания ВУТ до 58 %, по сравнению с одиночной каплей, особенно в условиях низкотемпературного сжигания (873 К – 1073 К).

8. В области относительно низких температур (от 873 К до 1073), одиночная частица древесины зажигается быстрее, чем в составе топливной композиции. В условиях же высоких температур $T_g \geq 1073$ К значения t_{ign} одиночной частицы древесины и сжигаемой совместно с ВУТ идентичны.

ГЛАВА 4. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ «ХИМИЧЕСКОЙ» СТАДИИ ПРОЦЕССА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ

4.1. Анализ влияния термохимических характеристик био- водоугольных суспензий на продолжительность периода развития непосредственно химической реакции

Проведенные эксперименты показали, что суммарное время зажигания водоугольных топлив можно разделить на несколько стадий. Первой является время термической подготовки (прогрева топлива). Второй этап считается одним из важнейших процессов термической подготовки и зажигания. Это период времени от начала интенсивного термохимического взаимодействия горючего и окислителя до выхода этого процесса на квазистационарный режим, другими словами, период химической индукции (согласно терминологии, О. М. Тодеса [247]. Как указано Семеновым [248], этот процесс протекает не мгновенно, а занимает некоторый промежуток времени. Определение значения этого периода времени (t_{ind} – время химической индукции или время развития химической реакции) для частиц био-водоугольного топлива в зависимости от условий теплообмена, степени метаморфизма угля и вида биомассы является важной и нерешенной до настоящего времени нетривиальной задачей.

На рисунке 4.1 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.

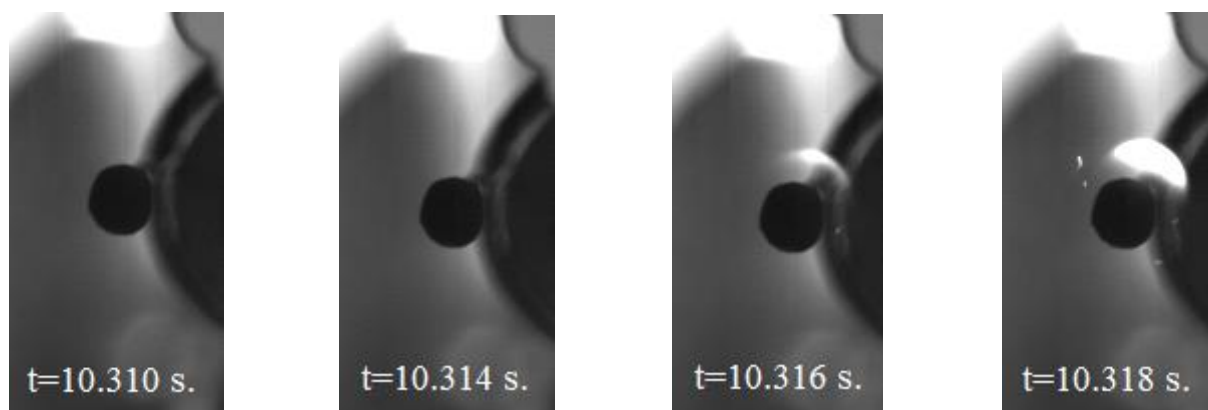


Рисунок 4.1 – Фрагмент видеогаммы процесса воспламенения водоугольной суспензии на основе угля марки Д с добавлением листьев березы в высокотемпературной среде ($T_g=1073\text{ K}$)

При более детальном анализе видеогаммы (рисунок 4.1) 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 $t_{\text{ign}}=10,314$ 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} :

$$t_{\text{ind}} = \left(1 + 2 \cdot \left(\frac{R \cdot T_c}{E} \right) \right) \cdot \frac{R \cdot T_c^2}{E} \cdot \frac{C_p}{Q \cdot k} \cdot \exp \left(\frac{E}{R \cdot T_c} \right), \quad (4.1)$$

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.

Можно считать на основании [249], что основными газообразными продуктами термического разложения угля и биомассы являются окись углерода

(CO), водород (H₂) и метан (CH₄), а содержание других выделяющихся горючих газов мало. Поэтому вклад других газов в зажигание топлива при расчете не учитывался. Значения кинетических констант основных реакций горения приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Термохимические характеристики основных реакций [250-252]

Реакция	Q, МДж/кг	E, кДж/моль	k, 1/с
Газофазное зажигание			
$H_2 + O_2 = 2H_2O$	119,83	129,8	$2,14 \cdot 10^{14}$
$2CO + O_2 = 2CO_2$	10,11	96,8	$7,05 \cdot 10^6$
$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$	50	103,8	$5,6 \cdot 10^{12}$
Гетерогенное окисление углерода кокса			
$C + O_2 = CO_2$	32,8	134,0	$4,78 \cdot 10^4$

Теплофизические характеристики горючих газов приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Теплофизические характеристики продуктов пиролиза угля и биомассы [253]

	C _p , Дж/(кг·К)	λ, кВт/(м·К)	ρ, кг/м ³
Газообразные продукты пиролиза			
CO	1247	0,081	0,241
H ₂	1552	0,57	0,0187
CH ₄	4153	0,144	0,224
Кокс			
C	1248	0,237	1,631

Используя формулу (4.1) рассчитали период химической индукции для каждого из газов при температурах, достигнутых в проведенных экспериментах. Полученные результаты приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 - Период «химической индукции» [247] основных горючих продуктов пиролиза ВУТ и древесины

t_{ind}, C				
Температура	CO	H ₂	CH ₄	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

Исследовавшиеся в диссертационной работе био-водоугольное топливо содержит 40 % горючей массы, из них 5 % биомасса (листья березы), 35 % - длиннопламенный уголь. Другими словами, растительная компонента составляет 12,5 % горючей массы, а уголь 87,5 % соответственно. Установлено, что для газообразных продуктов термического разложения наибольшее время химической индукции имеет угарный газ в связи с малыми значениями предэкспоненты реакции (k , s), значения которых для водорода и метана многократно больше. При термическом разложении угля и биомассы выделяется смесь газов (процентное содержание представлено в таблице 4.4).

Таблица 4.4 – Доля горючих газов, выделяющихся при термическом разложении угля и биомассы [254, 255]

Компонент	CO, %	H ₂ , %	CH ₄ , %
Листья березы	$\varphi_{\text{COб}} = 53,4$	$\varphi_{\text{H}_{2\text{б}}} = 23,2$	$\varphi_{\text{CH}_{4\text{б}}} = 23,4$
Длиннопламенный уголь	$\varphi_{\text{COy}} = 6,3$	$\varphi_{\text{H}_{2\text{y}}} = 20,6$	$\varphi_{\text{CH}_{4\text{y}}} = 73,1$

Для исследовавшихся топлив можно определить среднеэффективные (учитывающие вклад каждой компоненты в общие энергетические характеристики) термокинетические константы газовой смеси (таблица 4.5). Пересчет проводился по следующим формулам (4.2-4.5):

$$Q_c = \alpha_6 \cdot (\varphi_{\text{COб}} \cdot Q_{\text{CO}} + \varphi_{\text{H}_2\text{б}} \cdot Q_{\text{H}_2} + \varphi_{\text{CH}_4\text{б}} \cdot Q_{\text{CH}_4}) + \alpha_y \cdot (\varphi_{\text{COy}} \cdot Q_{\text{CO}} + \varphi_{\text{H}_2\text{y}} \cdot Q_{\text{H}_2} + \varphi_{\text{CH}_4\text{y}} \cdot Q_{\text{CH}_4}), \quad (4.2)$$

$$E_c = \alpha_6 \cdot (\varphi_{\text{COб}} \cdot E_{\text{CO}} + \varphi_{\text{H}_2\text{б}} \cdot E_{\text{H}_2} + \varphi_{\text{CH}_4\text{б}} \cdot E_{\text{CH}_4}) + \alpha_y \cdot (\varphi_{\text{COy}} \cdot E_{\text{CO}} + \varphi_{\text{H}_2\text{y}} \cdot E_{\text{H}_2} + \varphi_{\text{CH}_4\text{y}} \cdot E_{\text{CH}_4}), \quad (4.3)$$

$$k_c = \alpha_6 \cdot (\varphi_{\text{COб}} \cdot k_{\text{CO}} + \varphi_{\text{H}_2\text{б}} \cdot k_{\text{H}_2} + \varphi_{\text{CH}_4\text{б}} \cdot k_{\text{CH}_4}) + \alpha_y \cdot (\varphi_{\text{COy}} \cdot k_{\text{CO}} + \varphi_{\text{H}_2\text{y}} \cdot k_{\text{H}_2} + \varphi_{\text{CH}_4\text{y}} \cdot k_{\text{CH}_4}), \quad (4.4)$$

$$C_{pc} = \alpha_6 \cdot (\varphi_{\text{COб}} \cdot C_{\text{CO}} + \varphi_{\text{H}_2\text{б}} \cdot C_{\text{H}_2} + \varphi_{\text{CH}_4\text{б}} \cdot C_{\text{CH}_4}) + \alpha_y \cdot (\varphi_{\text{COy}} \cdot C_{\text{CO}} + \varphi_{\text{H}_2\text{y}} \cdot C_{\text{H}_2} + \varphi_{\text{CH}_4\text{y}} \cdot C_{\text{CH}_4}). \quad (4.5)$$

Таблица 4.5 – эффективные кинетические постоянные реакции горения для смеси газов

Q, МДж/кг	E, кДж/моль	k, 1/с	C _p , кДж/(кг·К)
59,756	108,33	$4,857 \cdot 10^{13}$	3,253

На основе средних значений кинетических констант определены времена «химической индукции» [247] газообразных продуктов термического разложения био-водоугольной суспензии (таблица 4.6).

Таблица 4.6 – Расчётные времена «химической индукции» [247] газовой смеси при различных температурах окислителя

T _g , K	t _{ind} , C
873	$2,255 \cdot 10^{-10}$
1073	$2,167 \cdot 10^{-11}$
1273	$4,645 \cdot 10^{-12}$

Как известно [252], при увеличении температуры среды скорости протекания всех химических реакций существенно растут. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению длительности протекания стадии «химической индукции» [247] Био-ВУТ. Установлено, что увеличение температуры окислителя с 873 К до 1073 К приводит к уменьшению периода «химической индукции» [247] горючих газов практически в 20 раз. Но, при дальнейшем нагреве с 1073 К до 1273 К t_{ind} снижается не так интенсивно.

При гетерогенном зажигании био-водоугольного топлива период химической индукции является весьма продолжительным (по сравнению с воспламенением газовой смеси) и может достигать нескольких секунд (более 4 секунд при температуре внешней среды 873 К). Для газов он составляет доли секунды. Поэтому для углей высшей степени метаморфизма, в которых выход летучих не так велик, t_{ind} будет более продолжительнее, по сравнению с битуминизированными углями (богатыми горючими газами). На длительность периода «химической индукции» [247] также оказывает влияние не только объем выделившихся газов, но и состав газообразных продуктов пиролиза угля и биомассы.

На основании результатов выполненных экспериментов можно сделать вывод, что при зажигании 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.

4.2. Факторы, влияющие на время полного охвата пламенем частиц био-водоугольных топлив

Проведенные эксперименты показали, что одним из важных условий зажигания является распространение пламени по всей поверхности частицы

топлива. Лишь только после полного охвата пламенем всей частицы можно считать, что процесс горения вышел на стационарный режим.

Экспериментальное определение условий и характеристик полного охвата пламенем частицы проводилось для суспензий из углей различной степени метаморфизма с добавлением сосновой хвои. Исследовавшиеся составы приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7. Составы исследовавшихся суспензий

Уголь		Сосновая хвоя	Вода
Марка	Содержание по массе, %	Содержание по массе, %	Содержание по массе, %
2Б	45	5	50
	40	10	50
	35	15	50
Д	45	5	50
	40	10	50
	35	15	50
Т	45	5	50
	40	10	50
	35	15	50
А	45	5	50
	40	10	50
	35	15	50

На рисунках 4.2 – 4.13 приведены типичные кадры видеogramм процессов зажигания капель био-водоугольных топлив, выполненных на основе углей различной степени метаморфизма с добавлением сосновой хвои. Кадр а соответствует началу интенсивного термохимического реагирования горючих газов с окислителем. Кадр b характеризует момент развитого горения частицы топлива.

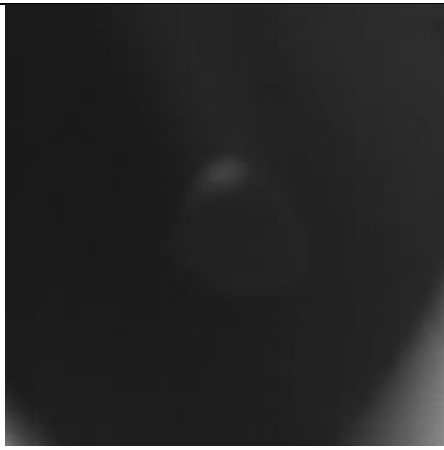
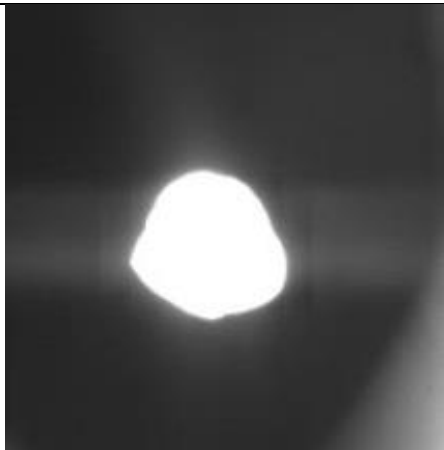
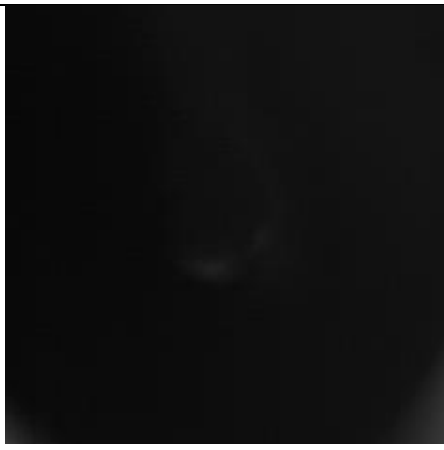
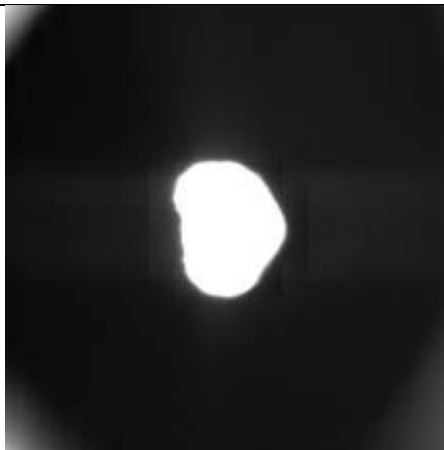
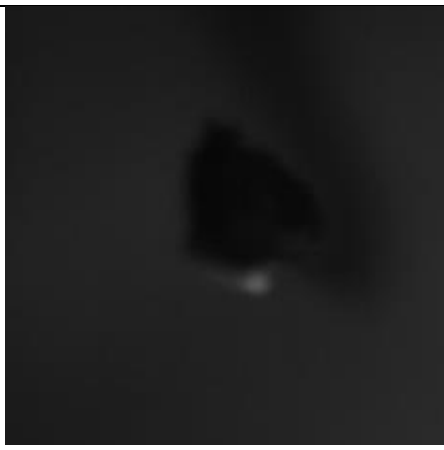
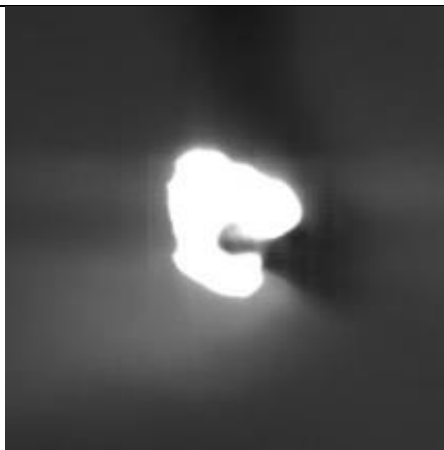
T = 873 K		
Смесь	a	b
Уголь 2Б (45 %) Сосновая хвоя (5 %) Вода (50 %)		
	t = 14,1 с.	t = 17,5 с.
Уголь 2Б (40 %) Сосновая хвоя (10 %) Вода (50 %)		
	t = 11,7 с.	t = 14,8 с.
Уголь 2Б (35 %) Сосновая хвоя (15 %) Вода (50 %)		
	t = 8,9 с.	t = 12,0 с.

Рисунок 4.2 – Видеограмма нагрева и последующего зажигания частицы био-водоугольного топлива на основе угля марки 2Б в высокотемпературной среде ($T_g=873K$)

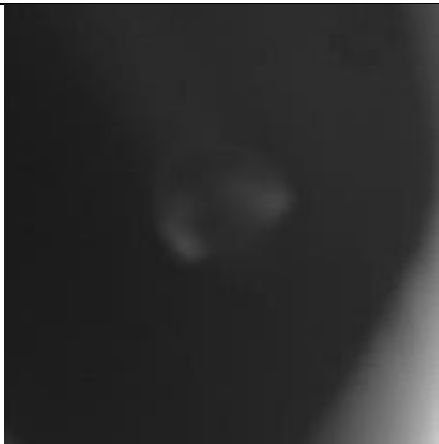
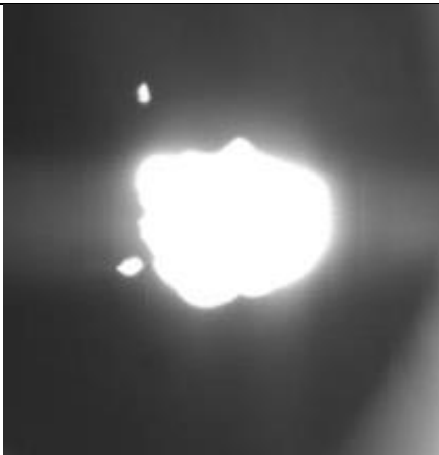
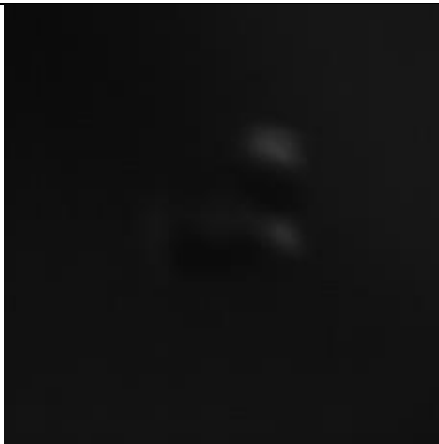
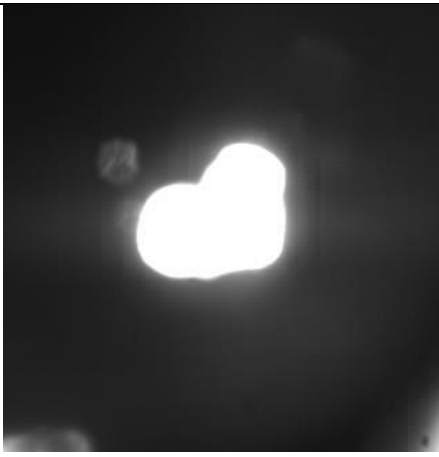
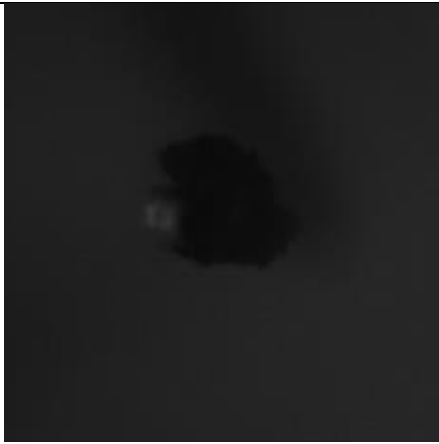
T = 873 K		
Смесь	a	b
Уголь Д (45 %) Сосновая хвоя (5 %) Вода (50 %)		
	t = 15,7 с.	t = 20,0 с.
Уголь Д (40 %) Сосновая хвоя (10 %) Вода (50 %)		
	t = 15,2 с.	t = 19,3 с.
Уголь Д (35 %) Сосновая хвоя (15 %) Вода (50 %)		
	t = 9,7с.	t = 13,0 с.

Рисунок 4.3 – Видеограмма нагрева и последующего зажигания частицы био-водоугольного топлива на основе угля марки Д в высокотемпературной среде ($T_g=873K$)

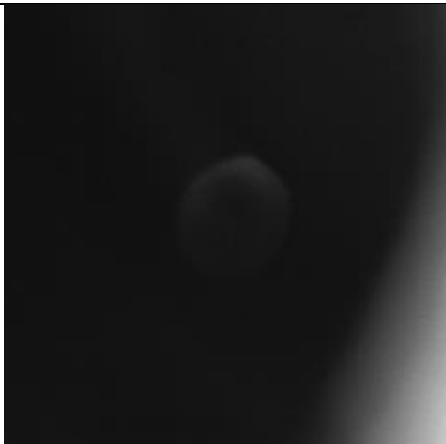
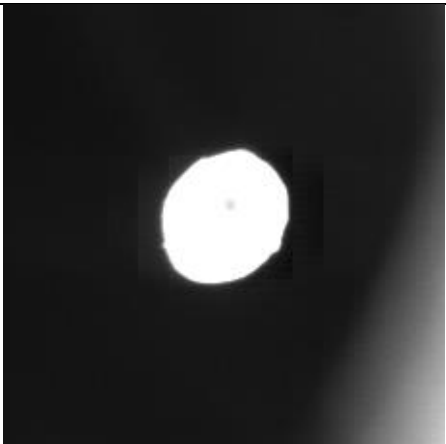
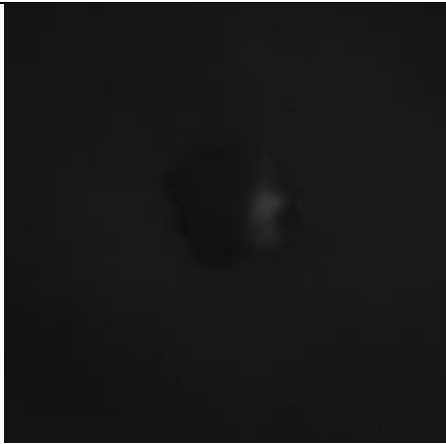
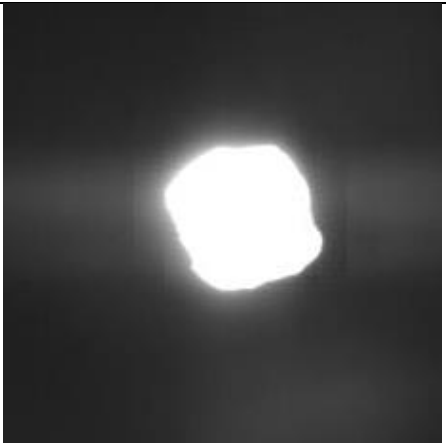
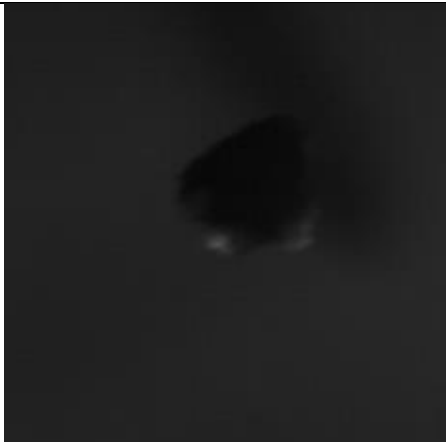
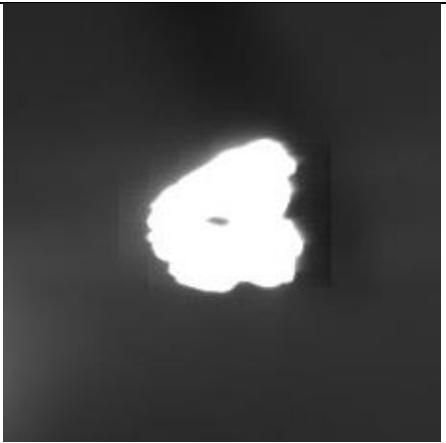
T = 873 K		
Смесь	a	b
Уголь Т (45 %) Сосновая хвоя (5 %) Вода (50 %)		
	t = 14,4 с.	t = 20,5 с.
Уголь Т (40 %) Сосновая хвоя (10 %) Вода (50 %)		
	t = 8,1 с.	t = 12,8 с.
Уголь Т (35 %) Сосновая хвоя (15 %) Вода (50 %)		
	t = 7,9 с.	t = 10,5 с.

Рисунок 4.4 – Видеограмма нагрева и последующего зажигания частицы био-водоугольного топлива на основе угля марки Т в высокотемпературной среде ($T_g=873K$)

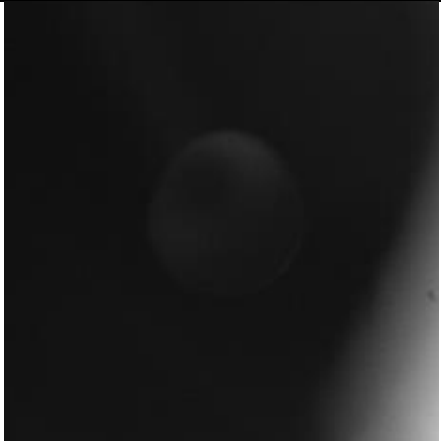
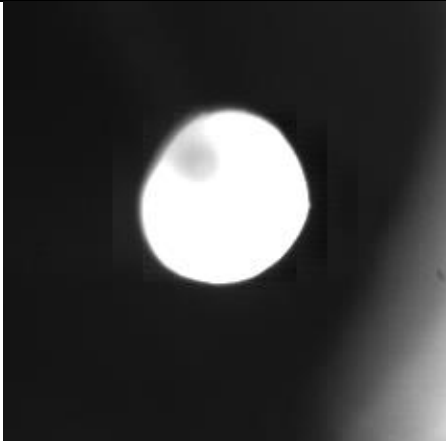
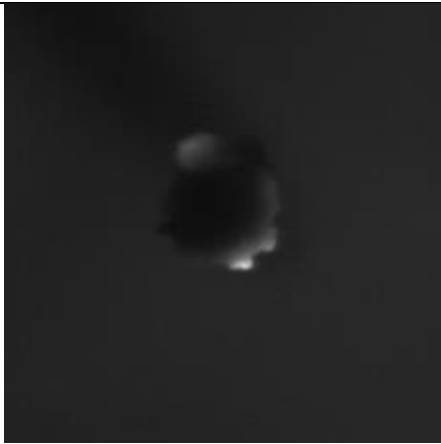
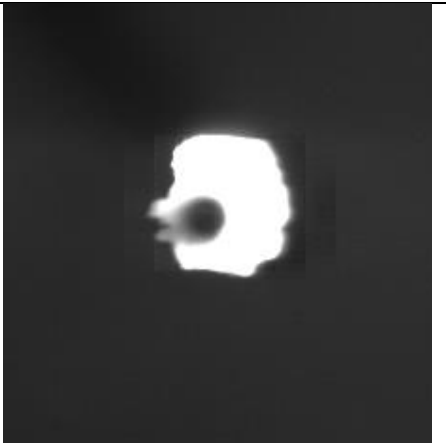
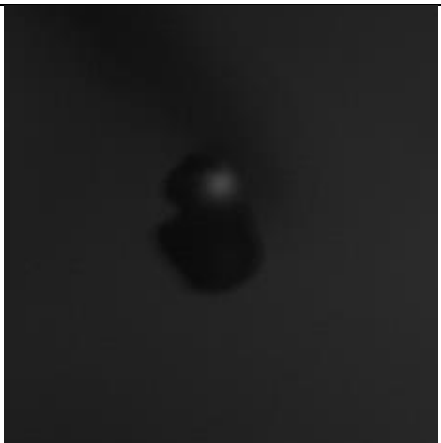
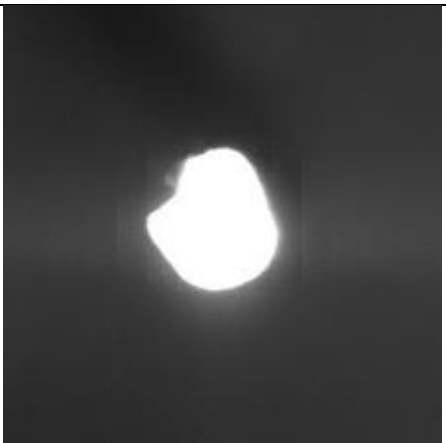
T = 873 K		
Смесь	a	b
Уголь антрацит (45 %) Сосновая хвоя (5 %) Вода (50 %)		
	t = 14,2 с.	t = 22,0 с.
Уголь антрацит (40 %) Сосновая хвоя (10 %) Вода (50 %)		
	t = 13,7 с.	t = 17,6 с.
Уголь антрацит (35 %) Сосновая хвоя (15 %) Вода (50 %)		
	t = 9,7 с.	t = 12,0 с.

Рисунок 4.5 – Видеограмма нагрева и последующего зажигания частицы био-водоугольного топлива на основе антрацитового угля в высокотемпературной среде ($T_g=873K$)

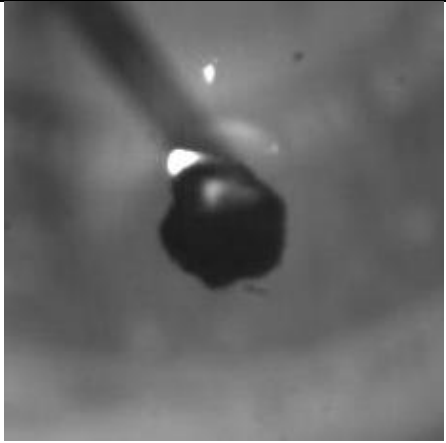
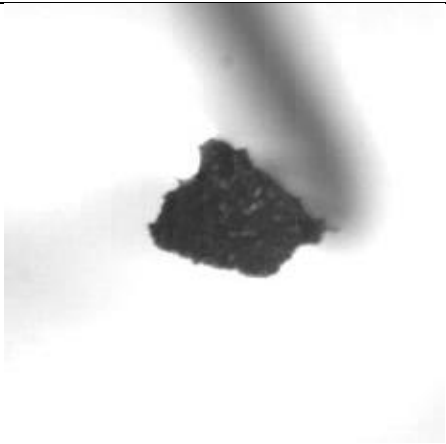
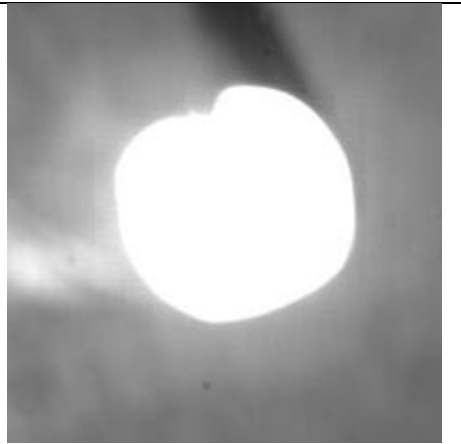
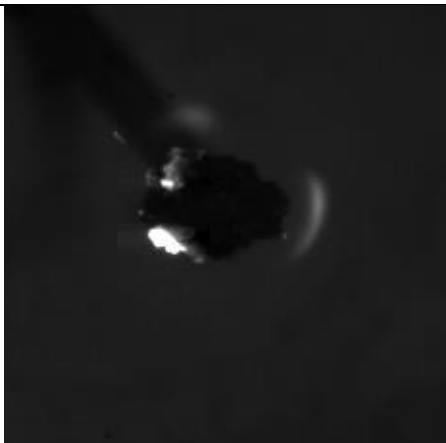
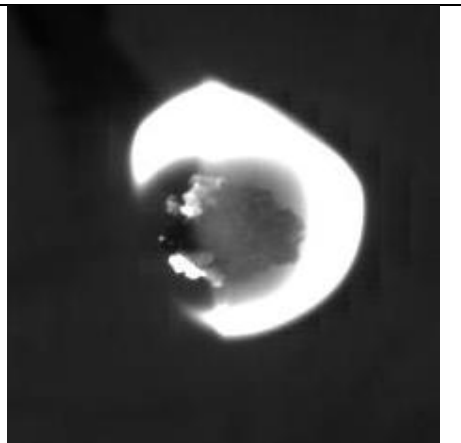
T = 1073 K		
Смесь	a	b
Уголь 2Б (45 %) Сосновая хвоя (5 %) Вода (50 %)		
	t = 7,6 с.	t = 8,3 с.
Уголь 2Б (40 %) Сосновая хвоя (10 %) Вода (50 %)		
	t = 5,4 с.	t = 5,9 с.
Уголь 2Б (35 %) Сосновая хвоя (15 %) Вода (50 %)		
	t = 4,0 с.	t = 4,1 с.

Рисунок 4.6 – Видеограмма нагрева и последующего зажигания частицы био-водоугольного топлива на основе угля марки 2Б в высокотемпературной среде ($T_g=1073K$)

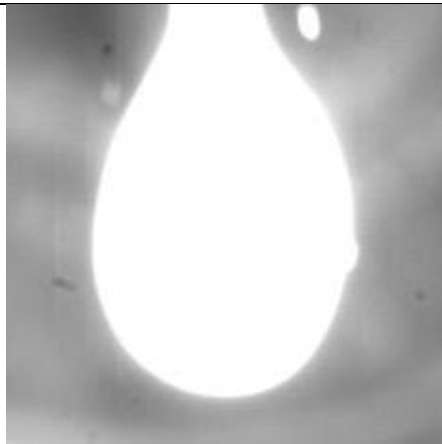
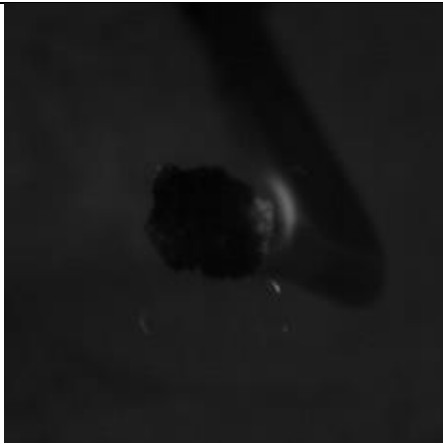
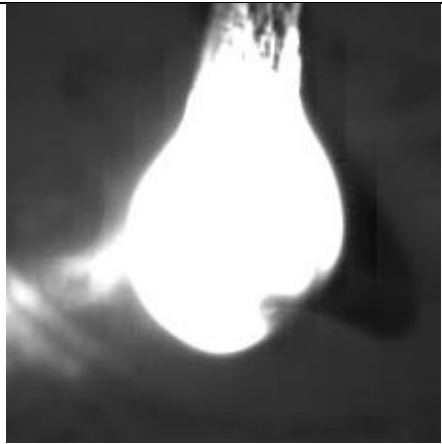
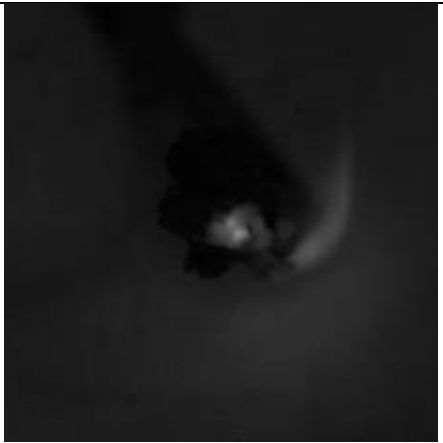
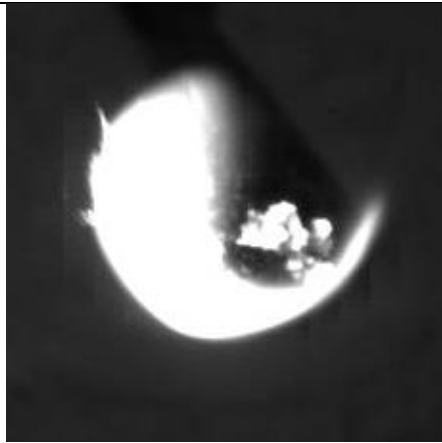
T = 1073 K		
Смесь	a	b
Уголь Д (45 %) Сосновая хвоя (5 %) Вода (50 %)		
	t = 6,6 с.	t = 7,0 с.
Уголь Д (40 %) Сосновая хвоя (10 %) Вода (50 %)		
	t = 5,6 с.	t = 5,8 с.
Уголь Д (35 %) Сосновая хвоя (15 %) Вода (50 %)		
	t = 4,1 с.	t = 4,2 с.

Рисунок 4.7 – Видеограмма нагрева и последующего зажигания частицы био-водоугольного топлива на основе угля марки Д в высокотемпературной среде ($T_g=1073K$)

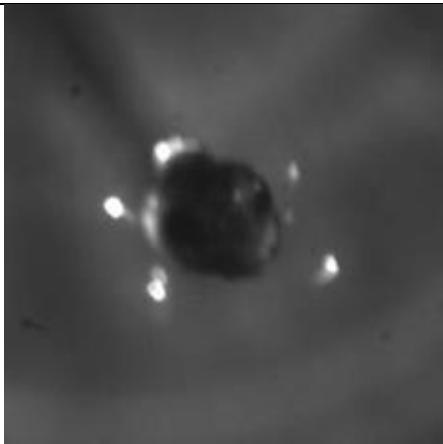
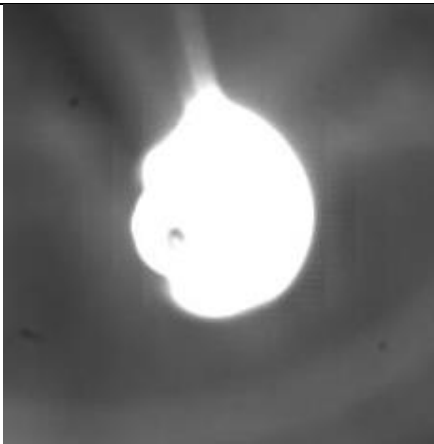
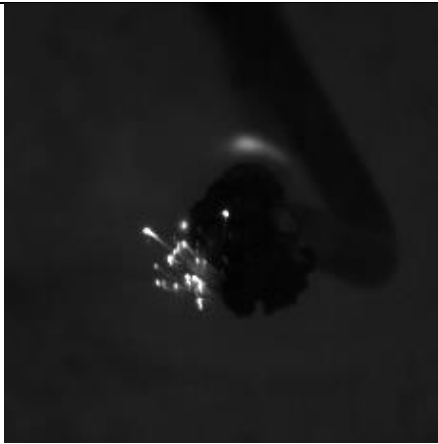
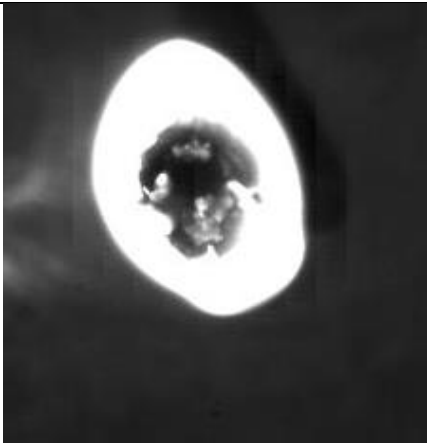
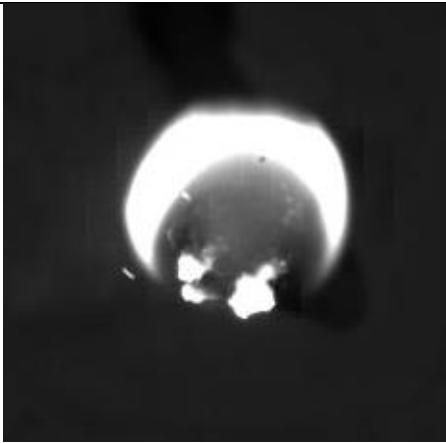
T = 1073 K		
Смесь	a	b
Уголь Т (45 %) Сосновая хвоя (5 %) Вода (50 %)		
	t = 5,5 с.	t = 7,1 с.
Уголь Т (40 %) Сосновая хвоя (10 %) Вода (50 %)		
	t = 3,2 с.	t = 4,3 с.
Уголь Т (35 %) Сосновая хвоя (15 %) Вода (50 %)		
	t = 2,6 с.	t = 3,2 с.

Рисунок 4.8 – Видеограмма нагрева и последующего зажигания частицы био-водоугольного топлива на основе угля марки Т в высокотемпературной среде ($T_g=1073K$)

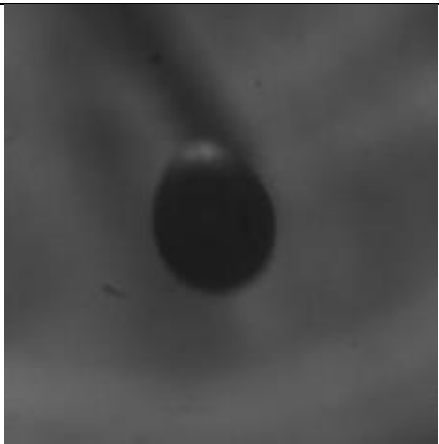
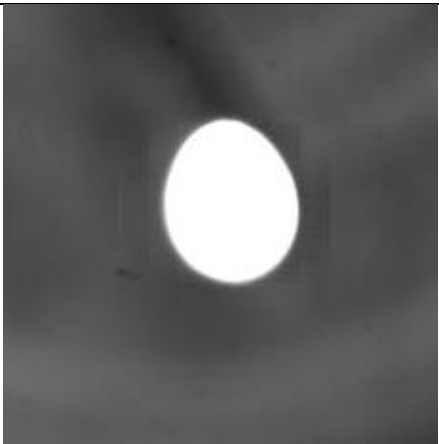
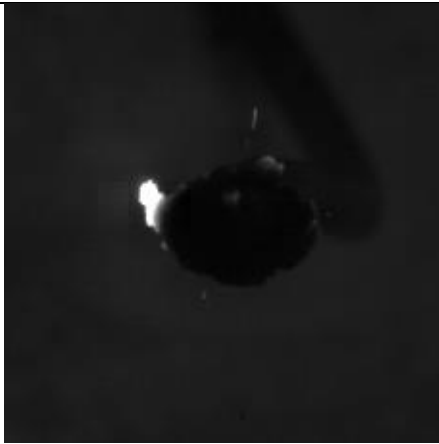
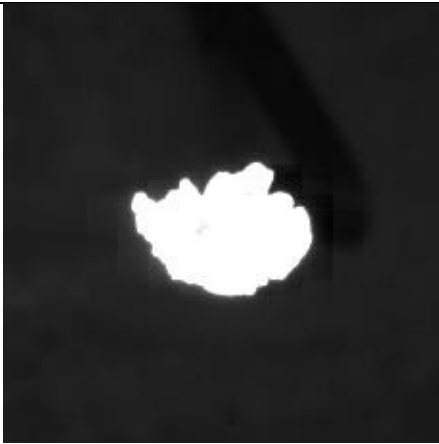
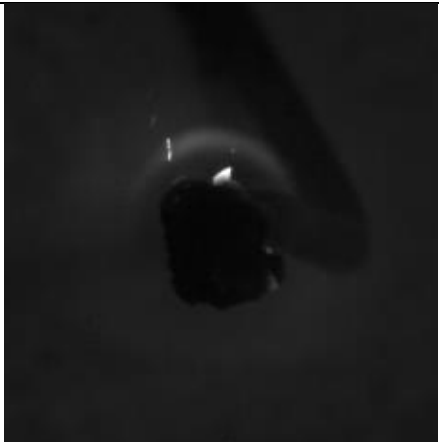
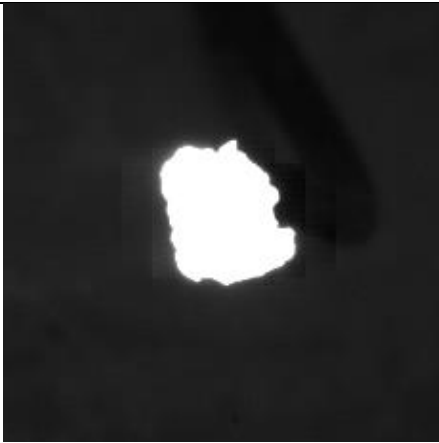
T = 1073 K		
Смесь	a	b
Уголь антрацит (45 %) Сосновая хвоя (5 %) Вода (50 %)		
	t = 5,0 с.	t = 6,7 с.
Уголь антрацит (40 %) Сосновая хвоя (10 %) Вода (50 %)		
	t = 3,9 с.	t = 5,5 с.
Уголь антрацит (35 %) Сосновая хвоя (15 %) Вода (50 %)		
	t = 3,6 с.	t = 4,8 с.

Рисунок 4.9 – Видеограмма нагрева и последующего зажигания частицы био-водоугольного топлива на основе для антрацитового угля в высокотемпературной среде ($T_g=1073K$)

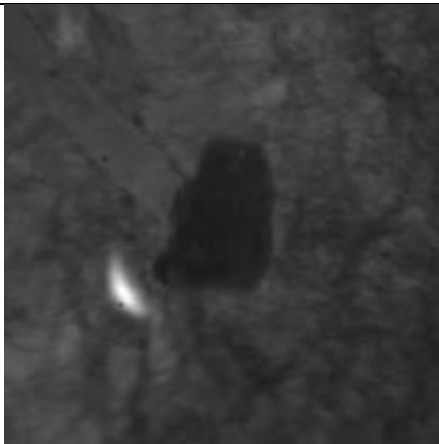
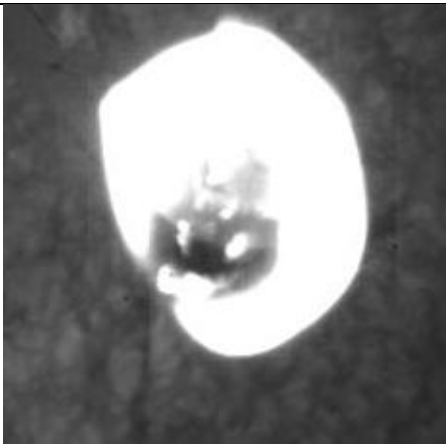
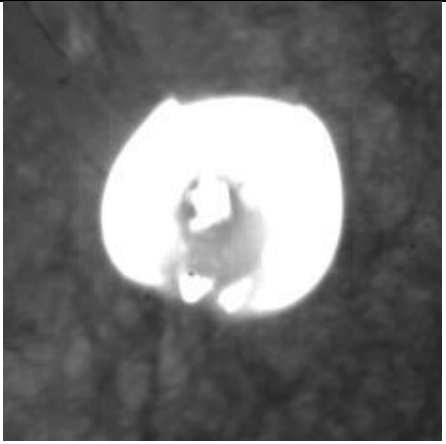
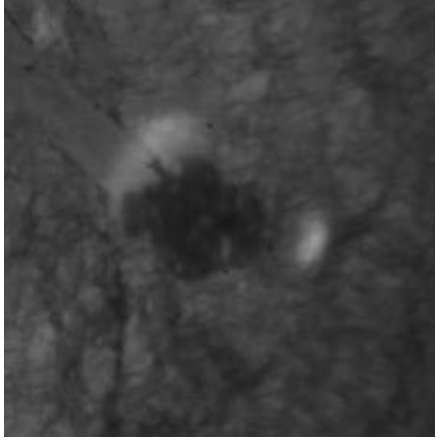
T = 1273 K		
Смесь	a	b
Уголь 2Б (45 %) Сосновая хвоя (5 %) Вода (50 %)		
	t = 2,7 с.	t = 3,8 с.
Уголь 2Б (40 %) Сосновая хвоя (10 %) Вода (50 %)		
	t = 2,8 с.	t = 3,5 с.
Уголь 2Б (35 %) Сосновая хвоя (15 %) Вода (50 %)		
	t = 1,7 с.	t = 2,0 с.

Рисунок 4.10 – Видеограмма нагрева и последующего зажигания частицы био-водоугольного топлива на основе угля марки 2Б в высокотемпературной среде ($T_g=1273K$)

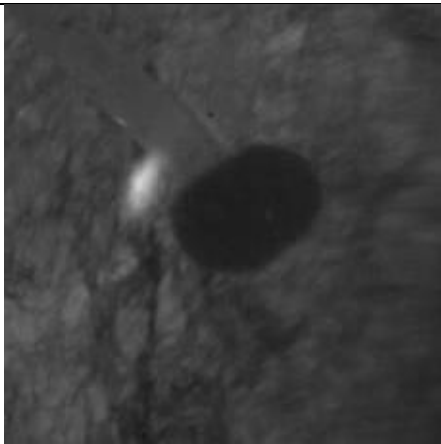
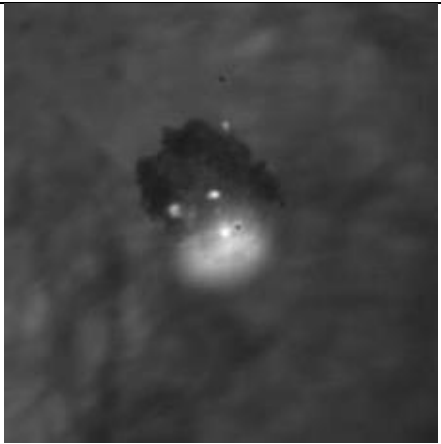
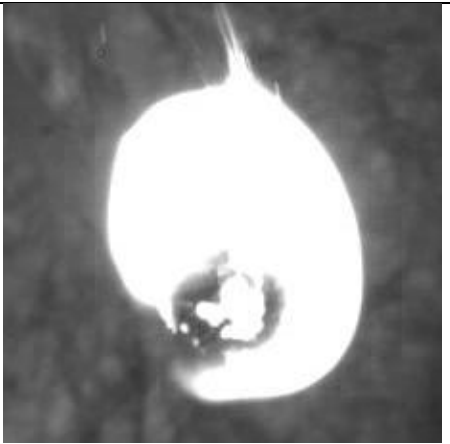
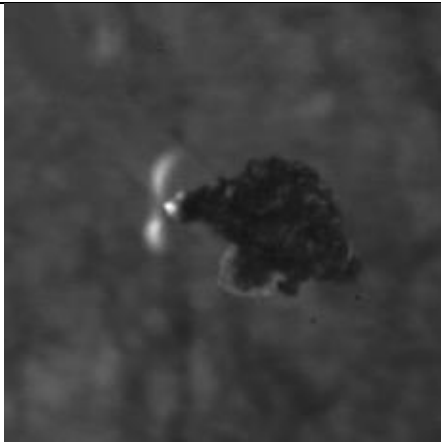
T = 1273 K		
Смесь	a	b
Уголь Д (45 %) Сосновая хвоя (5 %) Вода (50 %)		
	t = 3,3 с.	t = 5,1 с.
Уголь Д (40 %) Сосновая хвоя (10 %) Вода (50 %)		
	t = 2,9 с.	t = 4,5 с.
Уголь Д (35 %) Сосновая хвоя (15 %) Вода (50 %)		
	t = 2,8 с.	t = 4,4 с.

Рисунок 4.11 – Видеограмма нагрева и последующего зажигания частицы био-водоугольного топливана основе угля марки Д в высокотемпературной среде ($T_g=1273K$)

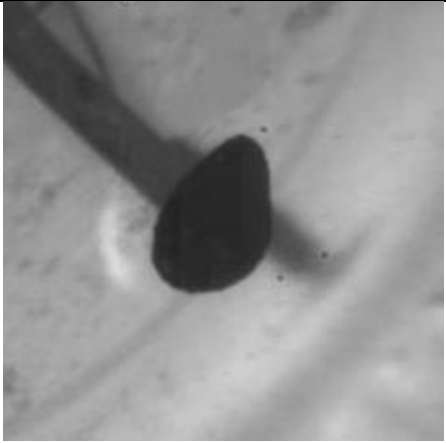
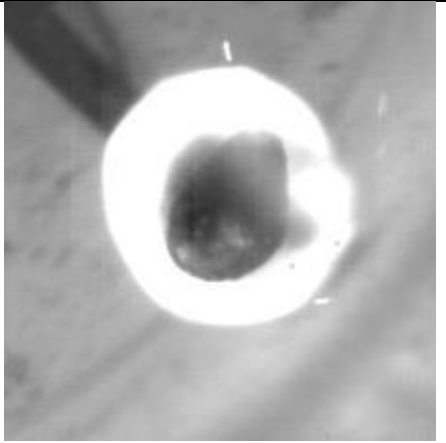
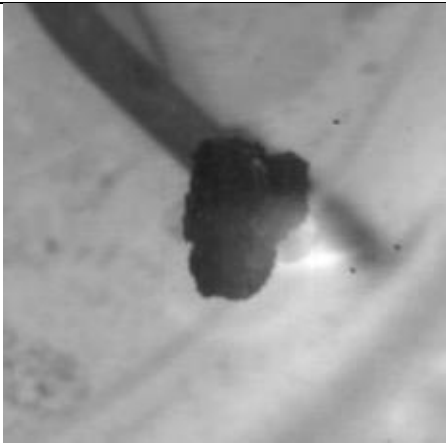
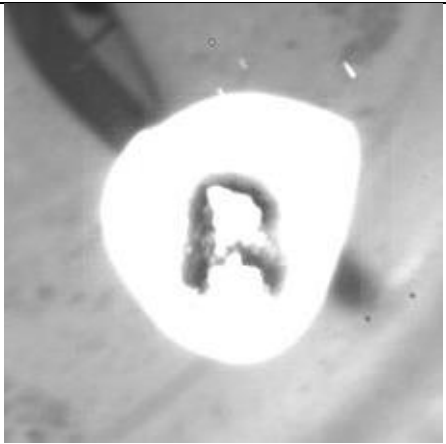
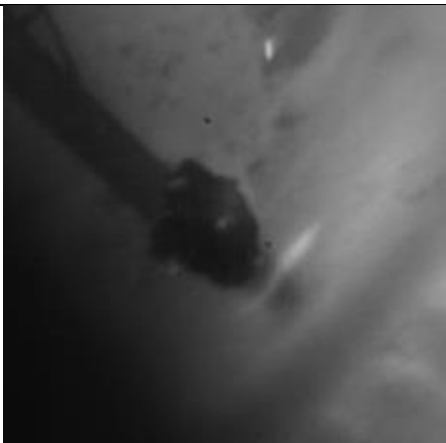
Т = 1273 К		
Смесь	а	б
Уголь Т (45 %) Сосновая хвоя (5 %) Вода (50 %)		
	t = 4,6 с.	t = 6,3 с.
Уголь Т (40 %) Сосновая хвоя (10 %) Вода (50 %)		
	t = 2,4 с.	t = 3,6 с.
Уголь Т (35 %) Сосновая хвоя (15 %) Вода (50 %)		
	t = 1,5 с.	t = 2,6 с.

Рисунок 4.12 – Видеограмма нагрева и последующего зажигания частицы био-водоугольного топлива на основе угля марки Т в высокотемпературной среде ($T_g=1273K$)

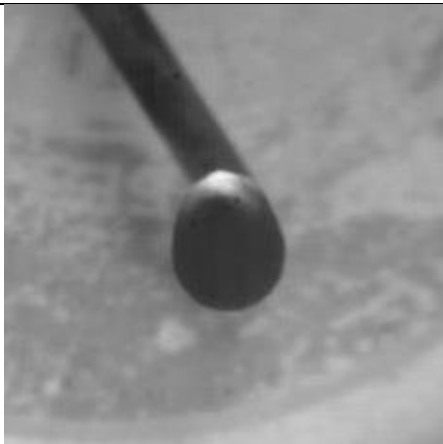
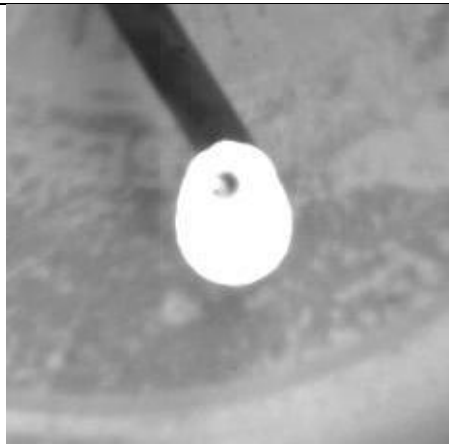
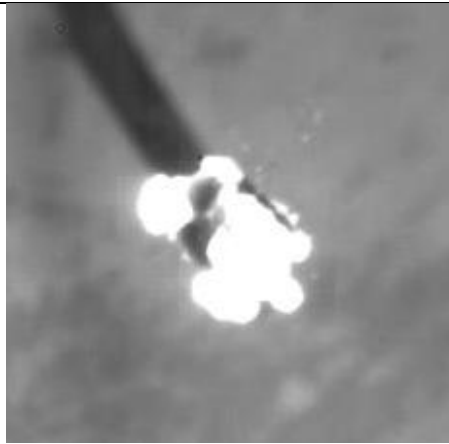
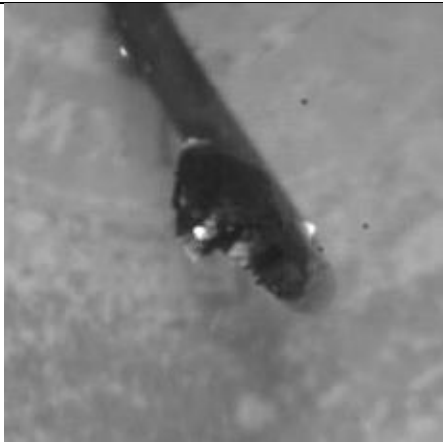
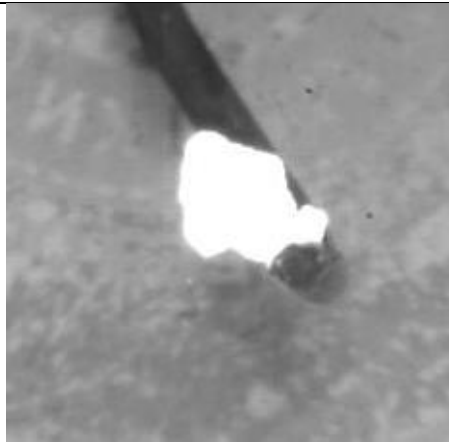
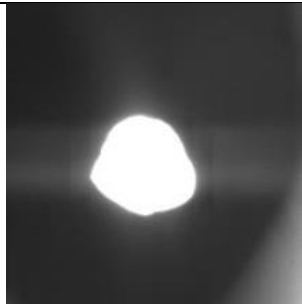
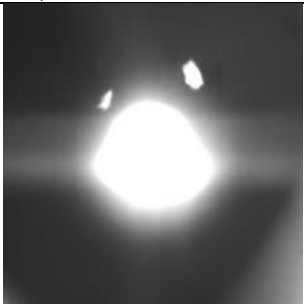
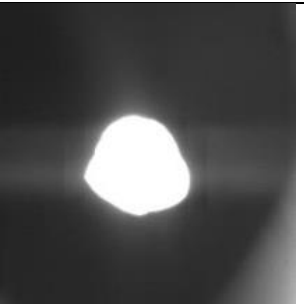
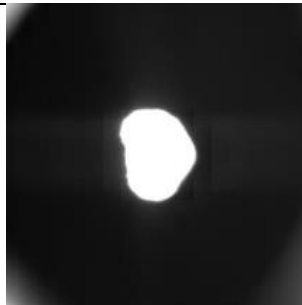
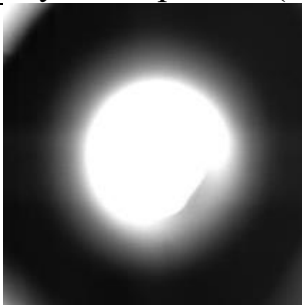
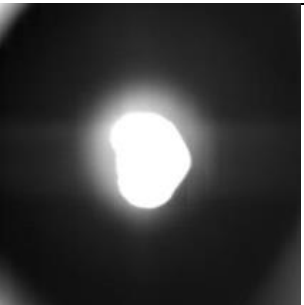
T = 1273 K		
Смесь	a	b
Уголь антрацит (45 %) Сосновая хвоя (5 %) Вода (50 %)		
	t = 3,9 с.	t = 8,9 с.
Уголь антрацит (40 %) Сосновая хвоя (10 %) Вода (50 %)		
	t = 2,1 с.	t = 6,3 с.
Уголь антрацит (35 %) Сосновая хвоя (15 %) Вода (50 %)		
	t = 2,0 с.	t = 6,6 с.

Рисунок 4.13 – Видеограмма нагрева и последующего зажигания частицы био-водоугольного топлива на основе антрацитового угля в высокотемпературной среде ($T_g=1273K$)

Анализ результатов экспериментов (рис. 4.2 – 4.13) показывает, что при температуре окислительной среды $T_g = 873$ К (рисунки 4.2 -4.5) имеет место гетерогенное зажигание топливных частиц. Это, скорее всего, 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. Но в тоже время, для топливных смесей на основе битуминизированных углей, богатых летучими (бурый и длиннопламенный угли), зарегистрированы «вспышки» (кратковременное реагирование газообразных продуктов пиролиза с окислителем) после того, как свечение распространилось по всей поверхности частицы (рисунок 4.14). Наиболее наглядно этот процесс проявляется для смесей на основе бурого угля. Продолжительность «вспышки» не превышала сотых долей секунды для всех топливных смесей.

Смесь на основе угля марки 2Б (45 %) с добавлением 5 % биомассы			
			
t = 19,056 с.	t = 19,064 с.	t = 19,072 с.	t = 19,080 с.
Смесь на основе угля марки 2Б (40 %) с добавлением 10 % биомассы			
			
t = 16,036 с.	t = 16,040 с.	t = 16,044 с.	t = 16,080 с.
Смесь на основе угля марки 2Б (35 %) с добавлением 15 % биомассы			

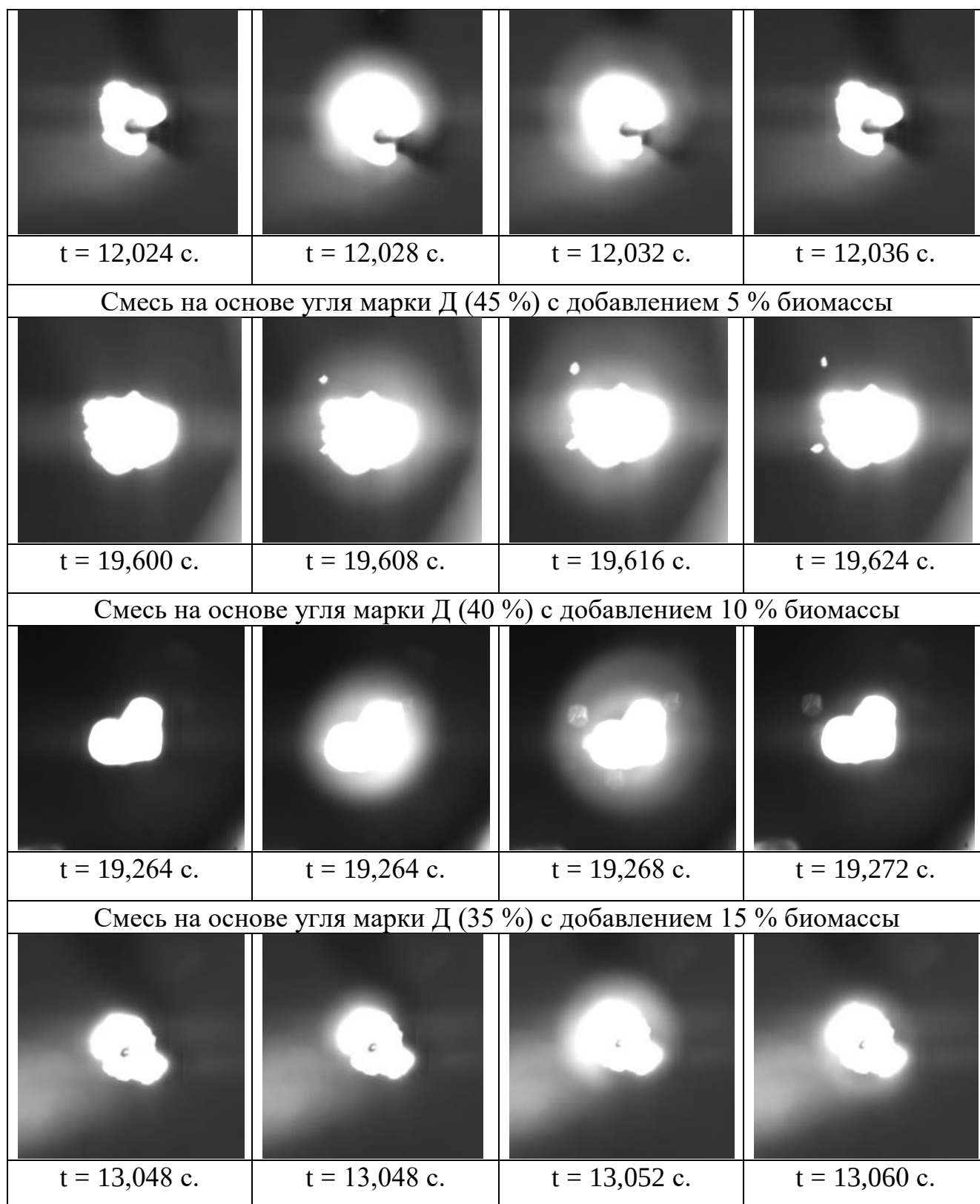


Рисунок 4.14 – видеогаммы процессов «вспышки» газообразных продуктов пиролиза био-водоугольных топлив на основе битуминизированных углей при температуре окислителя $T_g = 873$ К

В случае же относительно высоких температур ($T_g \geq 1073$ К) 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 горючее-окислитель) достигаются быстрее. Вследствие этого зажигание капель водоугольных топлив при ($T_g \geq 1073$ К) протекает, как правило, в газовой фазе. (рисунки 4.6 – 4.8, 4.10 – 4.12).

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 % (рисунки 4.5 и 4.9; 4.6 и 4.10; 4.7 и 4.11). 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 4.13 приведены кадры процесса зажигания био-водоугольной суспензии на основе антрацитового угля при температуре окислителя 1073 К. Несмотря на то, что в антраците содержание летучих веществ мало (менее 8 %), при концентрации 15 % лесного горючего материала в составе топлива зафиксировано зажигание в газовой фазе.

На рисунке 4.15 приведены зависимости периода распространения пламени по поверхности частиц (t_{sf} , с) био-водоугольных смесей с характерным размером 2,5 мм на основе углей различной степени метаморфизма от температуры окислителя.

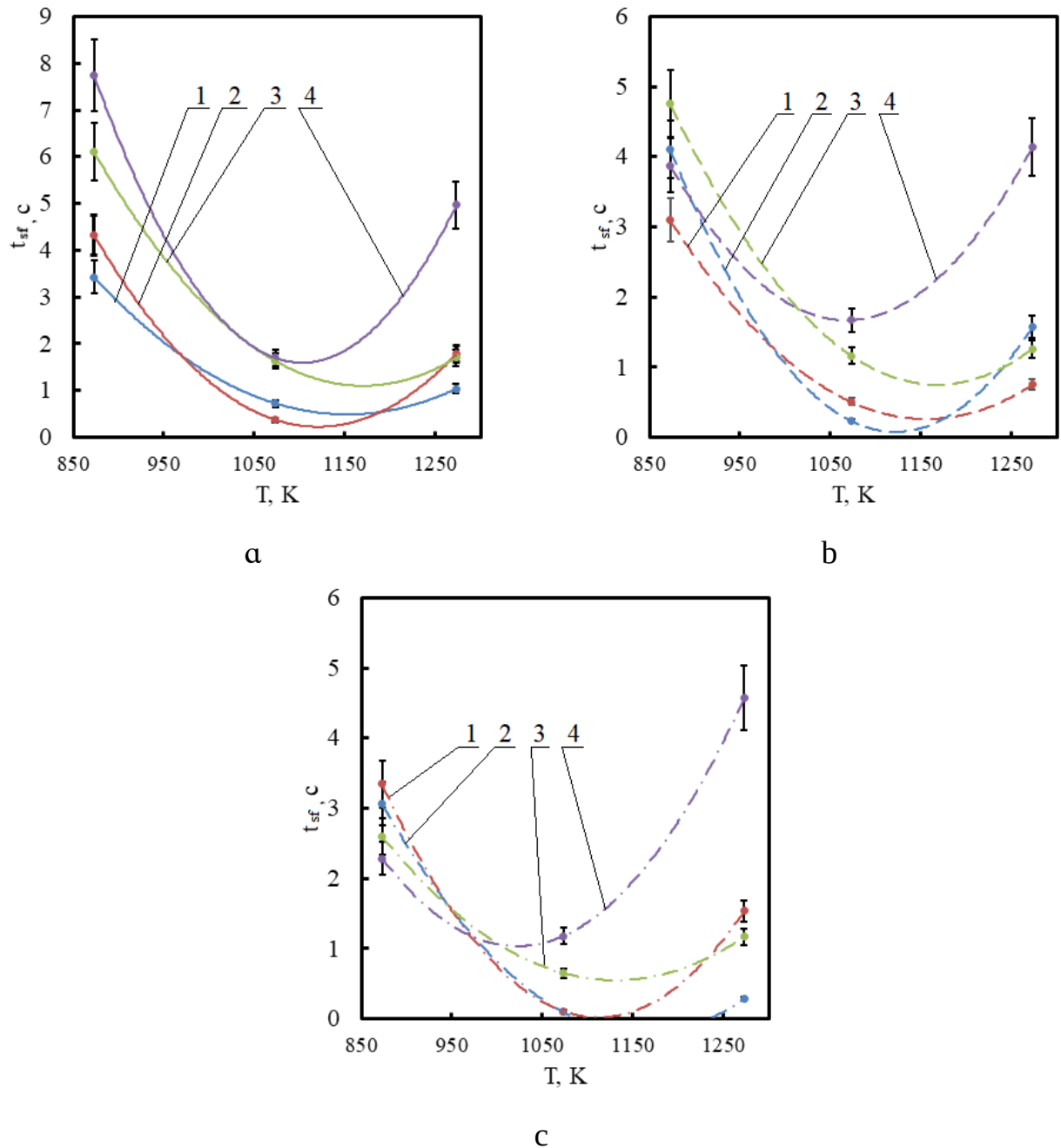


Рисунок 4.15 – Зависимость времени распространения пламени по поверхности частиц био-водоугольных суспензий с различными концентрациями биомассы (а - 5 %, б - 10 %, в - 15 %, на основе углей различной степени метаморфизма (1 – уголь марки 2Б, 2 – уголь марки Д, 3 – уголь марки Т, 4 – антрацит) от температуры 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. Во-первых, 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 $t_{sf}(T_g) = a \cdot T_g^2 + b \cdot T_g + c$. Для вычисления коэффициентов (a, b, c) использовали значения T_g и t_{sf} , полученные экспериментально. Система уравнений (6) для каждой концентрации (на примере суспензий, выполненных на основе антрацитового угля) имеет вид:

$$\begin{cases} t_{sf11} = a_1 \cdot (T_{g1})^2 + b_1 \cdot T_{g1} + c_1; \\ t_{sf21} = a_2 \cdot (T_{g1})^2 + b_2 \cdot T_{g1} + c_2; \\ t_{sf31} = a_3 \cdot (T_{g1})^2 + b_3 \cdot T_{g1} + c_3; \\ t_{sf12} = a_1 \cdot (T_{g2})^2 + b_1 \cdot T_{g2} + c_1; \\ t_{sf22} = a_2 \cdot (T_{g2})^2 + b_2 \cdot T_{g2} + c_2; \\ t_{sf32} = a_3 \cdot (T_{g2})^2 + b_3 \cdot T_{g2} + c_3; \\ t_{sf13} = a_1 \cdot (T_{g3})^2 + b_1 \cdot T_{g3} + c_1; \\ t_{sf23} = a_2 \cdot (T_{g3})^2 + b_2 \cdot T_{g3} + c_2; \\ t_{sf33} = a_3 \cdot (T_{g3})^2 + b_3 \cdot T_{g3} + c_3. \end{cases} \quad (4.6)$$

Значения температуры окислителя и времени распространения пламени по поверхности частиц топлива приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – 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 K	t_{sf11}	7,7	t_{sf21}	3,8	t_{sf31}	2,2
T_{g2}	1073 K	t_{sf12}	1,7	t_{sf22}	1,6	t_{sf32}	1,1
T_{g3}	1273 K	t_{sf13}	4,9	t_{sf23}	4,1	t_{sf33}	4,5

Решая систему уравнений 4.6 находим коэффициенты (a, b, c):

$$a_1 = \frac{t_{sf13} - \frac{T_{g3} \cdot (t_{sf12} - t_{sf11}) + T_{g2} \cdot t_{sf11} + T_{g1} \cdot t_{sf12}}{T_{g2} - T_{g1}}}{T_{g3} \cdot (T_{g3} - T_{g1} - T_{g2}) + T_{g1} \cdot T_{g2}};$$

$$b_1 = \frac{t_{sf12} - t_{sf11}}{T_{g2} - T_{g1}} - a_1 \cdot (T_{g1} + T_{g2});$$

$$c_1 = \frac{T_{g2} \cdot t_{sf12} - T_{g2} \cdot t_{sf11}}{T_{g2} - T_{g1}} - a_1 \cdot T_{g1} \cdot T_{g2};$$

$$a_2 = \frac{t_{ind23} - \frac{T_{g3} \cdot (t_{sf22} - t_{sf21}) + T_{g2} \cdot t_{sf21} + T_{g1} \cdot t_{sf22}}{T_{g2} - T_{g1}}}{T_{g3} \cdot (T_{g3} - T_{g1} - T_{g2}) + T_{g1} \cdot T_{g2}};$$

$$b_2 = \frac{t_{sf22} - t_{sf21}}{T_{g2} - T_{g1}} - a_2 \cdot (T_{g1} + T_{g2});$$

$$c_2 = \frac{T_{g2} \cdot t_{sf22} - T_{g2} \cdot t_{sf21}}{T_{g2} - T_{g1}} - a_2 \cdot T_{g1} \cdot T_{g2};$$

$$a_3 = \frac{t_{sf33} - \frac{T_{g3} \cdot (t_{sf32} - t_{sf31}) + T_{g2} \cdot t_{sf31} + T_{g1} \cdot t_{sf32}}{T_{g2} - T_{g1}}}{T_{g3} \cdot (T_{g3} - T_{g1} - T_{g2}) + T_{g1} \cdot T_{g2}};$$

$$b_3 = \frac{t_{sf32} - t_{sf31}}{T_{g2} - T_{g1}} - a_3 \cdot (T_{g1} + T_{g2});$$

$$c_3 = \frac{T_{g2} \cdot t_{sf32} - T_{g2} \cdot t_{sf31}}{T_{g2} - T_{g1}} - a_3 \cdot T_{g1} \cdot T_{g2};$$

Подставив значения T_g и t_{sf} , получили значения коэффициентов полинома второй степени (таблица 4.9).

Таблица 4.9 – значения коэффициентов функции $t_{sf} = f(T_g)$ для суспензий на основе антрацитового угля при различных концентрациях биомассы

Содержание лесного горючего материала 5 %					
a_1	$1,164 \cdot 10^{-4}$	b_1	-0,256	c_1	143,161
Содержание лесного горючего материала 10 %					
a_2	$5,855 \cdot 10^{-5}$	b_2	-0,125	c_2	68,372
Содержание лесного горючего материала 15 %					
a_3	$5,635 \cdot 10^{-5}$	b_3	-0,115	c_3	59,909

При определении экстремума полинома второй степени использована формула (4.7):

$$T_{min} = \frac{-b}{2 \cdot a} \quad (4.7)$$

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 4.10).

Таблица 4.10 – значение температурных точек экстремума зависимости $t_{sf} = f(T_g)$, био-водоугольного топлива на основе антрацита при различных концентрациях биомассы

Концентрация биомассы	Значение точки минимума
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 %.

Во-вторых, 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 (таблица 2.2). Поэтому время от появления первого пламени до развитого горения антрацита меньше, чем у каменных и бурых углей.

Вид зависимостей, представленных на рисунке 4.15, скорее всего, можно объяснить совместным влиянием следующих физико-химических процессов: естественная конвекция и термическое разложение органической части топлива. При относительно низких температурах окислителя скорость пиролиза угля и основных компонентов биомассы мала. Поэтому газообразные продукты пиролиза не успевают прогреться до температуры воспламенения и рассеиваются в результате естественной конвекции по всему объему внутри печи. По этой причине зажигание топлива происходит на поверхности частицы. С увеличением же температуры окислителя скорость прогрева топлива и, соответственно, процесса пиролиза возрастают. Вследствие этого увеличивается приток массы горючих газов в область вблизи частицы, где их концентрация растет.

В условиях же относительно высоких температур скорость термического разложения велика. Поэтому летучие продукты пиролиза быстро прогреваются до критической (по условиям воспламенения) температуры и начинают гореть. В результате парогазовая смесь не успевает накопиться в объемах, необходимых для полного распространения пламени по поверхности частиц топлива.

Другой возможной причиной вида зависимостей $t_{sf}(T_g)$, приведенных на рисунке 4.15, 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.

Также становится актуальным рассмотрение капель более меньшего диаметра, характерный размер которых наиболее приближен к каплям, образующимся при распыле топлива в реальных котельных агрегатах промышленной теплоэнергетики. Времена распространения пламени по всей поверхности частицы с характерным размером 1,3 мм приведены на рисунке 4.16.

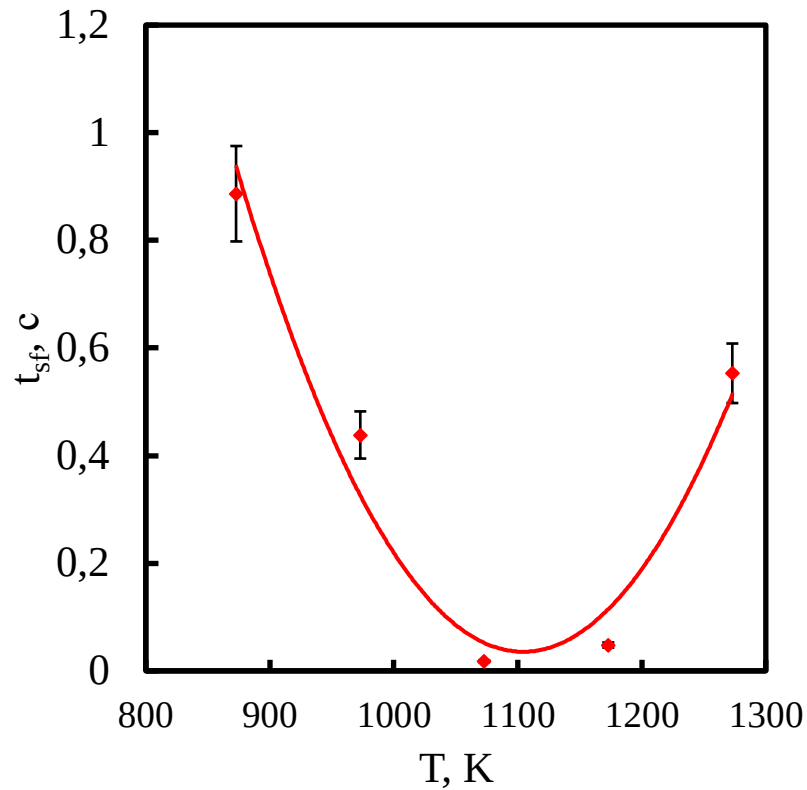


Рисунок 4.16 – Зависимость времени охвата пламенем частиц био-водоугольной суспензии с начальным размером капель 1,3 мм на основе угля марки Д с добавлением 5 % биомассы.

Установлено, что при малых размерах капель динамика распространения пламени является схожей, что и для капель большого размера 2,5 мм. С ростом температуры окислительной среды время распространения пламени по всей поверхности частицы сначала убывает, а затем достигнув определенного минимума, который находится в температурном диапазоне 1000 К – 1100 К начинает нелинейно возрастать.

На рисунке 4.17 приведены зависимости времени распространения пламени по всей поверхности частицы Био-ВУТ от концентраций лесного горючего материала в суспензиях, выполненных на основе группы типичных углей.

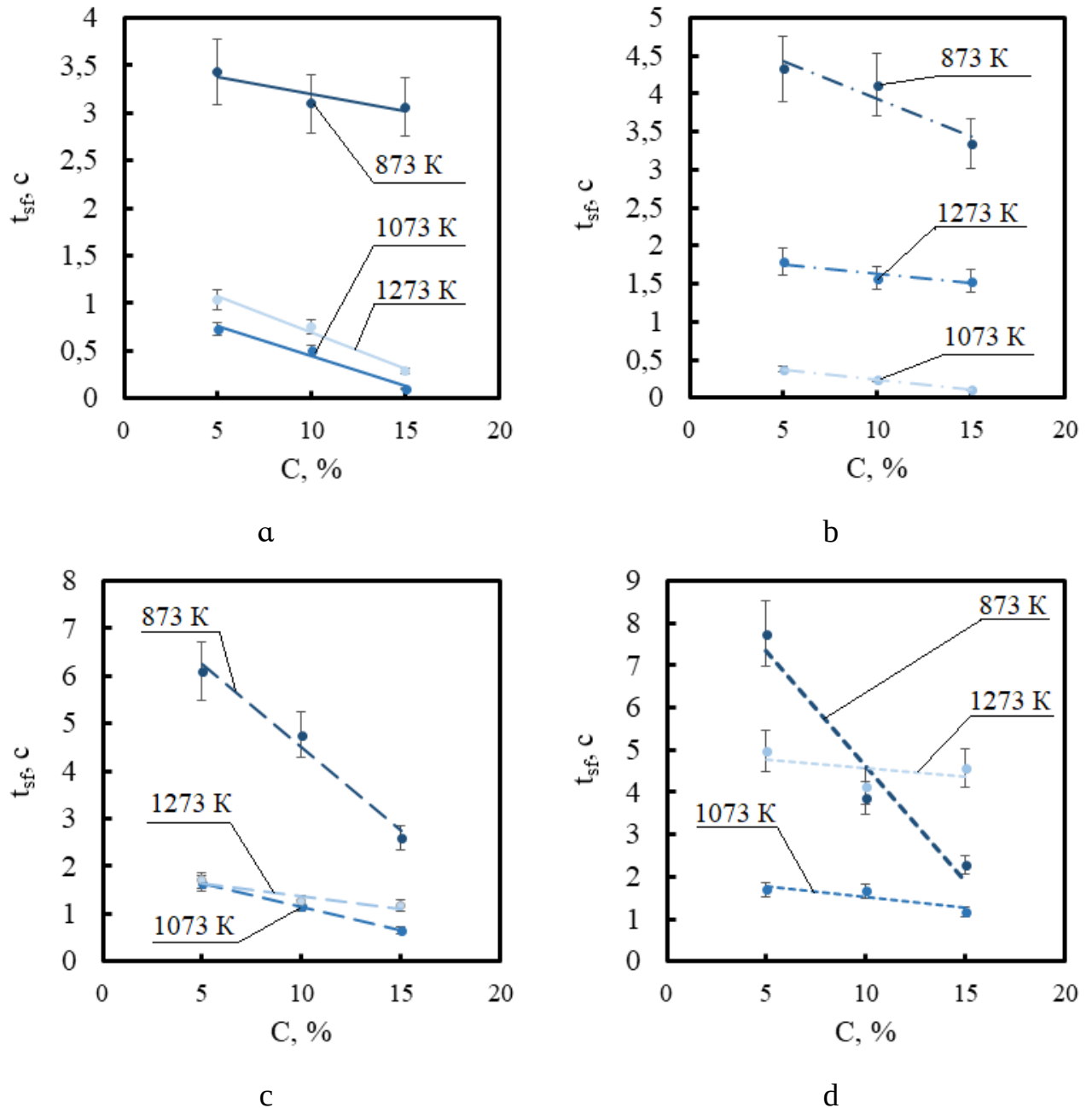


Рисунок 4.17 – Зависимость времени распространения пламени по всей поверхности частиц био-водоугольных суспензий на основе углей различных марок (а - бурый, b – длиннопламенный, c – тощий, d - антрацит) от концентрации лесного горючего материала

Из анализа рисунка 4.17 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.

4.3. Выводы по четвертой главе

1. Впервые применен подход Тодеса [247] для определения значений периода «химической индукции» био-водоугольного топлива в условиях, соответствующих камерам сгорания котельных установок промышленной теплоэнергетики.

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

3. Время распространения пламени по всей поверхности частицы био-водоугольного топлива имеет существенно нелинейную зависимость от температуры окислительной среды и составляет от 0,1 с до 7,7 с.

4. Определены основные факторы, влияющие на время распространения пламени по всей поверхности частицы: степень метаморфизма угля, массовое содержание биомассы и температура окислителя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные при выполнении диссертационного исследования результаты имеют важное технологическое, экономическое и социальное значения. Они создают объективные предпосылки для разработки совершенно нового класса высокоэффективных и экологоперспективных технологий сжигания угля в топках паровых и водогрейных котлов предприятий промышленной теплоэнергетики.

По результатам выполненных исследований можно сделать вывод о том, что введение лесных горючих материалов в состав ВУТ приводит к существенному повышению ресурсоэффективности технологий сжигания ВУТ. При существенном снижении (в 2,5-3 раза) времен задержки зажигания капель водоугольных топлив с добавками ЛГМ. Снижается и общее время термической подготовки таких топлив. Соответственно, отпадает необходимость реконструкции топок паровых и водогрейных котлов при переходе с угольного топлива на водоугольные суспензии в качестве основного топлива теплоэлектроцентралей и котельных. Кроме того, добавление 10-15 % ЛГМ снижает потребление угля (на теплоэлектроцентралях и котельных) и стоимость тепловой энергии, так как цена ЛГМ определяется только затратами на сбор и транспортировку таких материалов. В результате использования лесных горючих материалов в качестве добавок к водоугольным топливам может существенно повыситься ресурсоэффективность паровых и водогрейных котельных агрегатов промышленной теплоэнергетики. При этом ВУТ с добавлением лесных горючих материалов во многих случаях будут иметь преимущества (технологические и экономические) даже по сравнению с топливами, которые представляют собой смесь сухих угля (основная компонента) и биомассы (вторая компонента). Такие смеси в последние годы достаточно интенсивно исследуются во многих развитых государствах. Внедрение в энергетику древесного кокса в качестве топлива будет способствовать развитию лесоперерабатывающего комплекса регионов, богатых лесными угодьями. Это приведет к увеличению инвестиционного потока, позволит создать дополнительные рабочие места для людей с низкой и средней рабочей

квалификацией. Последнее будет способствовать снижению уровня безработицы, росту благосостояния населения в целом. Древесный уголь является достаточно «универсальным» энергоносителем. Это объясняется тем, что древесный кокс может быть получен при термической конверсии практически любого деревосодержащего материала. К последним можно отнести: отходы лесопиления (ветки, сучья, пни, горбыль и др.), лесной горючий материал (к примеру, сухостой).

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 задержки зажигания, с;

t_{ind} – время развития химической реакции, с;

t_{sf} – время распространения пламени по поверхности частицы, с;

T_g – температура окислителя, К;

R – универсальная газовая постоянная, кДж/мольК;

E – энергия активации, кДж/моль;

k – предэкспоненциальный множитель в законе Аррениуса, 1/с;

Q – тепловой эффект реакции, МДж/кг;

Frame – скорость видеосъемки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang Q. The effects of energy prices, urbanization and economic growth on energy consumption per capita in 186 countries / Q. Wang, M. Su, R. Li, P. Ponce // *Journal of Cleaner Production*. – 2019. – V. 225. – P. 1017-1032.
2. Nepal, R. Energy security, electricity, population and economic growth: The case of a developing South Asian resource-rich economy / R. Nepal, N. Paija // *Energy Policy*. – 2019. – V. 132. – P. 771-781.
3. Loures, L. Energy consumption as a condition for per capita carbon dioxide emission growth: The results of a qualitative comparative analysis in the European Union / L. Loures, P. Ferreira // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2019. – V. 110. – P. 220-225.
4. BP Statistical Review of World Energy. London: BP, 2018. 56 p. <http://www.bp.com>.
5. Статистический ежегодник энергетики [Электронный ресурс]. – <https://yearbook.enerdata.ru>.
6. Koskela, J. Using electrical energy storage in residential buildings – Sizing of battery and photovoltaic panels based on electricity cost optimization / J. Koskela, A. Rautiainen, P. Järventausta // *Applied Energy*. – 2019. – V. 239. – P. 1175-1189.
7. Shoaib, M. Assessment of wind energy potential using wind energy conversion system / M. Shoaib, I. Siddiqui, S. Rehman, S. Khan, L. M. Alhems // *Journal of Cleaner Production*. – 2019. – V. 216. – P. 346-360.
8. Singh, H. M. Bio-fixation of flue gas from thermal power plants with algal biomass: Overview and research perspectives / H. M. Singh, R. Kothari, R. Gupta, V. V. Tyagi // *Journal of Environmental Management*. – 2019. – V. 245. – P. 519-539.
9. Obrecht, M. Technology forecast of sustainable energy development prospects / M. Obrecht, M. Denac // *Futures*. – 2016. – V. 84. – P. 12-22.
10. Flavia C. S. M. P. Recycling of end of life photovoltaic panels: A chemical prospective on process development / C. S. M. P. Flavia, A. Pietro, P. Francesca // *Solar Energy*. – 2019. – V. 177. – P. 746-761.

11. Xu, Y. Global status of recycling waste solar panels: A review / Y. Xu, J. Li, Q. Tan, A. L. Peters, C. Yang // *Waste Management*. – 2018. – V. 75. – P. 450-458.
12. Corcelli, F. End-of-life treatment of crystalline silicon photovoltaic panels. An emergy-based case study / F. Corcelli, M. Ripa, S. Ulgiati // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – V. 161. – P. 1129-1142.
13. Nielsen, J. J. On risk-based operation and maintenance of offshore wind turbine components / J. J. Nielsen, J. D. Sørensen // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2011. – V. 96. – P. 218-229.
14. Stanek, W. Environmental assessment of wind turbine systems based on thermo-ecological cost / W. Stanek, B. Mendecka, L. Lombardi, T. Simla // *Energy*. – 2018. – V. 160. – P. 341-348.
15. Wishart, R. Class capacities and climate politics: Coal and conflict in the United States energy policy-planning network / R. Wishart // *Energy Research & Social Science*. – 2019. – V. 48. – P. 151-165.
16. Trenchera, G. Discursive resistance to phasing out coal-fired electricity: Narratives in Japan's coal regime / G. Trenchera, N. Healy, K. Hasegawa, J. Asukad // *Energy Policy*. – 2019. – V. 132. – P. 782-796.
17. Brown, B. Resisting coal: Hydrocarbon politics and assemblages of protest in the UK and Indonesia / B. Brown, S. J. Spiegel // *Geoforum*. – 2017. – V. 85. – P. 101-111.
18. Shaffer, B. Natural gas supply stability and foreign policy / B. Shaffer // *Energy Policy*. – 2013. – V. 56. – P. 114-125.
19. Breeze, P. *Coal-Fired Generation : Coal-Burning Technology* / P. Breeze. Elsevier, 2015. – 98 p.
20. Yuan-Hu, L. Use of latent heat recovery from liquefied natural gas combustion for increasing the efficiency of a combined-cycle gas turbine power plant / L. Yuan-Hu, J. Kim, S. Kim, H. Han // *Applied Thermal Engineering*. – 2019. – V. 161. – 114177.

21. Ульянин, Ю. А. Прогнозирование динамики истощения традиционных энергетических ресурсов / Ю. А. Ульянин, В. В. Харитонов, Д. Ю. Юршина // ОТРАСЛИ И МЕЖОТРАСЛЕВЫЕ КОМПЛЕКСЫ. – 2018. – №2. – С. 60-70.
22. Колпаков, А. Ю. Оценка пределов экспорта российского природного газа в Европу в перспективе до 2040 г / А. Ю. Колпаков // Научные труды ИМП РАН. М. – 2012. – № 10. – С.101-118.
23. Конторович, А. Э. Долгосрочные и среднесрочные факторы и сценарии развития глобальной энергетической системы в XXI веке / А. Э. Конторович, М. И. Эпов, Л. В. Эдер // Геология и геофизика. – 2014. – № 5-6. – С. 689-700.
24. Маршак, В. Д. Оценка эффективности замещения газа углем в топливно-энергетическом балансе / В. Д. Маршак, В. А. Крюков, А. В. Кузнецов // Экономика и социология. – 2011. – №4. – С. 176-186.
25. Kontorovich, A. E. Long-term and medium-term scenarios and factors in world energy perspectives for the 21st century / A. E. Kontorovich, M. I. Eпов, L. V. Eder // Russian Geology and Geophysics. – 2014. – Vol. 55, № 5-6. – P. 534–543.
26. Markewitz, P. The Future of Fossil Fired Power Plants in Germany—A Lifetime Analysis / P. Markewitz, M. Robinius, D. Stolten // ENERGIES. – 2018. – № 11. – P. 1-20.
27. Ajuntament de Calvia, 2000. Plan general de ordenacion urbana de 2000 de Calvia.
28. EEA (European Environment Agency), 2001. TERM 2001. Indicators tracking transport and environment integration in the European Union. EEA, Copenhagen.
29. IEEP, 2001a. The effectiveness of EU Council integration strategies and options for carrying forward the Cardiff proces. IEEP and Ecologic, London.
30. Израэль Ю. А. Кислотные дожди / Ю. А. Израэль, И. М. Назаров, А. Я. Прессман. Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 206 с.
31. Заиков Г. Е. Кислотные дожди и окружающая среда / Г. Е. Заиков, С. А. Маслов, В. Л. Рубайло. М.: Химия, 1991. – 140 с.

32. Бажин, Н. М. Кислотные дожди / Н. М. Бажин // СОРОСОВСКИЙ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЖУРНАЛ. – 2001. – №7. – С. 47-52.
33. Тарасова, Т.Ф. Оценка воздействия кислотных дождей на элементы экосистемы промышленного города / Т. Ф. Тарасова, О. В. Чаловская // ВЕСТНИК ОГУ. – 2005. – № 10. – С. 80-84.
34. Gaskin, S. Skin *permeation* of oxides of nitrogen and sulfur from short-term exposure scenarios relevant to hazardous material incidents / S. Gaskin, L. Heath, D. Pisaniello, M. Logan, C. Baxter // Science of The Total Environment. – 2019. – V. 665. – P. 937-943.
35. Barnes, P.J. Nitric oxide and airways / P. J. Barnes // European Respiratory Journal. – 1993. – V. 6, Issue 2, 1993, P. 163-165.
36. Munawer, M. E. Human health and environmental impacts of coal combustion and post-combustion wastes / M. E. Munawer // Journal of Sustainable Mining. – 2018. – V. 17. – P. 87-96.
37. Liu, R. H. Potential genotoxicity of chronically elevated nitric oxide: A review / R. H. Liu, J. H. Hotchkiss // Mutation Research/Reviews in Genetic Toxicology. – 1995. – V. 339, P. 73-89.
38. Булгаков, Ю. Ф. Пылевая опасность угольного производства / Ю. Ф. Булгаков, В. Л. Овчаренко; под общ. ред. Ю. Ф. Булгакова. – Донецк: ООО «Цифровая типография», 2017. – 234 с.
39. Oliveira, M. L. S. Pollution from uncontrolled coal fires: Continuous gaseous emissions and nanoparticles from coal mines / M. L. S. Oliveira, D. Pinto, B. F. Tutikian, K. Boit, B. K. Saikia, L. F. O. Silva // Journal of Cleaner Production. – 2019. – V. 215. – P. 1140-1148.
40. Masto, R. E. Multi element exposure risk from soil and dust in a coal industrial area / R. E. Masto, J. George, T. K. Rout, L. C. Ram // Journal of Geochemical Exploration. – 2017. – V. 176. – P. 100-107.
41. Caballero-Gallardo, K. Mice housed on coal dust-contaminated sand: A model to evaluate the impacts of coal mining on health / K. Caballero-Gallardo, J.

Olivero-Verbel // Toxicology and Applied Pharmacology. – 2016. – V. 294. – Pages 11-20.

42. Cristóbal, J. Optimization of global and local pollution control in electricity production from coal burning / J. Cristóbal, G. Guillén-Gosálbez, L. Jiménez, A. Irabien // Applied Energy. – 2012. – V. 92. – P. 369-378.

43. Oetari, P. S. Trace elements in fine and coarse particles emitted from coal-fired power plants with different air pollution control systems / P. S. Oetari, S. P. Hadi, H. S. Huboyo. // Journal of Environmental Management. – 2019. – V. 250. – 109497.

44. Fouskas, F. Cadmium isotope fractionation during coal combustion: Insights from two U.S. coal-fired power plants / F. Fouskas, L. Ma, M. A. Engle, L. Ruppert, N. J. Geboy, M. A. Costa. // Applied Geochemistry. – 2018. – V. 96. – Pages 100-112.

45. Zheng, X. A review of greenhouse gas emission profiles, dynamics, and climate change mitigation efforts across the key climate change players / X. Zheng, D. Streimikiene, T. Balezentis, A. Mardani, F. Cavallaro, H. Liao // Journal of Cleaner Production. – 2019. – V. 234. – P. 1113-1133.

46. Barbera, A. C. Greenhouse Gases Formation and Emission / Antonio C. Barbera, Jan Vymazal, Carmelo Maucieri. // Encyclopedia of Ecology (Second Edition). – 2019. – V. 2. – P. 329-333.

47. Hartmann, D. L. Anthropogenic Climate Change / D. L. Hartmann // Global Physical Climatology (Second Edition). – 2016. – P. 397-425.

48. Bruce G. M. Anatomy of a Coal-Fired Power Plant. Clean Coal Engineering Technology (Second Edition), 2017. – 856 p.

49. Durdán, M. Evaluation of synthetic gas harmful effects created at the underground coal gasification process realized in laboratory conditions / M. Durdán, M. Laciak, J. Kačur, P. Flegner, K. Kostúr // Measurement. – 2019. – V. 147. – 106866.

50. Lin, C. Integrated assessment of the environmental and economic effects of an ultra-clean flue gas treatment process in coal-fired power plant / C. Lin, L. Yue, T. Yuzhou, S. Yifei, W. Qingsong, Y. Xueliang, K. Jon. // Journal of Cleaner Production. – 2018. – V. 199. – P. 359-368.

51. Liu, D. Influence of coal properties on emissions of nitrous oxides and nitric oxides / D. Liu, B. Shen, B. Feng, Z. Lin, J. Lu // *Energy and Fuels*. – 1999. – V.13. – 1111-1113.
52. Усольцева, И. О. Обогащение углей: современное состояние технологий / И. О. Усольцева, Ю. В. Передерин, Р. И. Крайденко // *ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК*. – 2017. – № 3. – С. 131-136.
53. Пат. 2268787 Российская Федерация: МПК В 07 В 9/00. Способ сухого обогащения рядового угля [Текст] / Люленков В.И., Кузьмин А.В., Качуров К.В., Кардаков А.Л., Бойко Д.Ю.; заявитель и патентообладатель Люленков В.И., Кузьмин А.В., Качуров К.В., Кардаков А.Л., Бойко Д.Ю. – № 2005113613/03; заявл. 05.05.2005; опубл. 27.01.2006, Бюл. № 03. – 9 с.
54. Аслянян, Г.С. Экологически чистые угольные технологии: аналитический обзор / Г.С. Аслянян. – Москва, 2004. – 66 с.
55. 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 / X. Wu, W. Fan, P. Ren, J. Chen, Z. Liu, P. Shen // *Fuel*. – 2019. – V. 255. – 15856.
56. Кульчицкий, А. Р. Токсичность поршневых ДВС. Образование вредных веществ при горении топлив: учебное пособие / А. Р. Кульчицкий. – Владим. гос. ун-т. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2010. – 80 с.
57. Бабий, В. И. Механизм образования и способы подавления оксидов азота в пылеугольных котлах / В. И. Бабий, В. Р. Котлер, Э. Х. Вербовецкий // *Энергетик*. – 1996. – № 6. – С. 8-13.
58. Беликов, С. Е. Котлы тепловых электростанций и защита атмосферы / С. Е. Беликов, В. Р. Котлер. – Москва: Аква-Терм, 2008. – 212 с.
59. Жуйко, А. В. Снижение оксидов азота в топках котлов / А. В. Жуйко // *91 Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. – 2011. – № 6. – Р. 620-628.
60. Жуйков, А. В. Способ уменьшения выбросов оксидов азота от котла БКЗ-75-39ФБ, работающего на ирша-бородинских углях / А. В. Жуйков, В. А. Кулагин, А. Ю. Радзюк // *Промышленная энергетика*. – 2011. – №8. – С. 9-11.

61. Булгаков, С. В. Повышение экологической эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в котельных и на транспорте / С. В. Булгаков, В. Д. Катин / под ред. д-ра техн. наук, проф. В. Д. Катина. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. – 147 с.
62. Закиров, И. А. Исследование и внедрение способа нестехиометрического сжигания топлива в газомазутных котлах с целью снижения выбросов оксидов азота : автореф. дисс. канд. тех. наук : 05.04.01 / Закиров Ильгизар Алиахматович. – М., 1999, 20 с.
63. Ślefarski, R. Experimental study of the combustion process of gaseous fuels containing nitrogen compounds in new, low-emission zonal volumetric combustion technology / R. Ślefarski, D. Szewczyk, R. Jankowski, M. Gołębiewski // *Energy Procedia*. – 2017. – V. 120. – P. 697 – 704.
64. Хоменок, Л. А. Конструктивные технические решения по основному оборудованию для перспективных угольных энергоблоков / Л. А. Хоменок, Л. Н. Моисеева, В. И. Бреус, И. И. Пичугин // *Теплоэнергетика*. – 2012. – №6. – С. 3 – 6.
65. Рябов, Г.А. Котлы с циркулирующим кипящим слоем на сверхкритические параметры пара / Г. А. Рябов // *Электрические станции*. – 2013. – №9. – С. 14 – 22.
66. Галашов, Н. Н. Обзор и анализ перспективных технологий сжигания угля и снижения выбросов вредных веществ в атмосферу / Н. Н. Галашов, С. А. Цибульский // *Прогрессивные технологии и процессы*. – 2014. С. 243-247.
67. Pandey, R.A. Flue gas desulfurization: physicochemical and biotechnological approaches / R.A. Pandey, R. Biswas, T. Chakrabarti, S. Devotta // *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. – 2005. – V. 35, № 6. – P. 571–622.
68. Ma, J. On the synergism between $\text{La}_2\text{O}_3\text{S}$ and CoS_2 in the reduction of SO_2 to elemental sulfur by CO / J. Ma, M. Fang, N.T. Lau // *Journal of Catalysis*. – 1996. – V. 158. – P. 251–259.

69. Mulligan, D.J. Reduction of sulfur dioxide over alumina-supported molybdenum sulfide catalysts / D.J. Mulligan, D. Berk // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 1992. – V. 31. – P. 19–125.
70. Tschope, A. Redox activity of nonstoichiometric cerium oxide-based nanocrystalline catalysts / A. Tschope, W. Liu, M. Flytzaniste-Phanopoulos, J.Y. Ying // *Journal of Catalysis*. – 1995. – V. 157. – P. 42–50.
71. Zheng, Z.H. Catalytic reduction of NO over Mn-V-Ce-TiO₂ catalyst at low reaction temperature / Z.H. Zheng, H. Tong, Z.Q. Tong, Y. Huang, J. Luo // *Journal of Fuel Chemistry and Technology*. – 2010. – V. 38, № 3. – P. 343–351.
72. Thirupathi, B. Nickel-doped Mn/TiO₂ as a efficient catalyst for the low-temperature SCR of NO with NH₃: Catalytic evaluation and characterizations / B. Thirupathi, P.G. Smirniotis // *Journal of Catalysis*. – 2012. – V. 288. – P. 74–83.
73. Shimokawabe, M. SCR of NO by DME over Al₂O₃ based catalysts: Influence of noble metals and Ba additive on low-temperature activity / M. Shimokawabe, A. Kuwana, S. Oku, K. Yoshida, M. Arai // *Catalysis Today*. – 2011. – V. 164. – P. 480–483.
74. Parres-Esclapez, S. On the importance of the catalyst redox properties in the N₂O decomposition over alumina and ceria supported Ph, Pd and Pt / S. Parres-Esclapez, M.J. Illan-Gomez, C. Salinas-Martinez de Licea, A. Bueno-Lopez // *Applied Catalysis B: Environmental*. – 2010. – V. 96. – P. 370–378.
75. Rahmania, F. SO₂ removal from simulated flue gas using various aqueous solutions: Absorption equilibria and operational data in a packed column / F. Rahmania, D. Mowla, G. Karimi, A. Golkhar, B. Rahmatmand // *Separation and Purification Technology*. – 2015. – V. 153. – P. 162–169.
76. Choi, W.-J. Characteristics of absorption/regeneration of CO₂–SO₂ binary systems into aqueous AMP + ammonia solutions / W.-J. Choi, B.-M. Min, B.-H. Shon, J.-B. Seo, K.-J. Oh // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. – 2009. – V. 15, № 5. – P. 635–640.
77. Sun, W. Simultaneous absorption of SO₂ and NO_x with pyrolusite slurry combined with gas-phase oxidation of NO using ozone: Effect of molar ratio of O₂/(SO₂

+ 0.5NO_x) in flue gas / W. Sun, Q. Wang, S. Ding, S. Su // Chemical Engineering Journal. – 2013. – V. 228. – P. 700–707.

78. Mathieu, Y. Adsorption of SO_x by oxide materials: A review / Y. Mathieu, L. Tzanis, M. Souldarda, J. Patarin, M. Vierling, M. Molière // Fuel Processing Technology. – 2013. – V. 114. – P. 81–100.

79. Mattyniuk, H. The effect of coal rank and carbonization temperature on SO₂ adsorption properties of coal chars / H. Mattyniuk, J. Wieckowska // Fuel. – 1997. – V. 76. – P. 563–567.

80. Lisovskii, A. Adsorption of sulfur dioxide by active carbon treated by nitric acid: I. Effect of the treatment on adsorption of SO₂ and extractability of the acid formed / A. Lisovskii, R. Semiat, C. Aharoni // Carbon. – 1997. – V. 35. – P. 1639–1643.

81. Deng, S.G. Sulfur dioxide sorption properties and thermal stability of hydrophobic zeolites / S.G. Deng, Y.S. Lin // Industrial and Engineering Chemistry Research. – 1994. – V. 34. – P. 4063–4070.;

82. Marcu, I.-C. Study of sulfur dioxide adsorption on Y zeolite / I.-C. Marcu, I. Săndulescu // Journal of the Serbian Chemical Society. – 2004. – V. 69. – P. 563–569.

83. Suksankraisorn, K. Co-combustion of municipal solid waste and Thai lignite in a fluidized bed / K. Suksankraisorn, S. Patumsawad, P. Vallikul, B. Fungtammasan, A. Accary. // Energy Conversion and management. – 2004. – № 45. – P. 947–962.

84. Penner, S. S. Developing coal-combustion technologies / S. S. Penner, S. B. Alpert, J. M. Belr, C. R. Bozzuto, Glassman, R. B. Ksust, W. Markert, JR. A. K. Oppenheim, L. D. Smoot, R. E. Sommerlad, C. L. Wagoner, I. Wender, W. Wolowodiuk, K. E. Yeager // Energy. – 1984. – № 9. – P. 361–418.

85. Gil, M. V. Mechanical durability and combustion characteristics of pellets from biomass blends / M. V. Gil, P. Oulego, M. D. Casal, C. Pevida, J. J. Pis, F. Rubiera // Bioresource Technology. – 2010. – № 101. – P. 8859–8867.

86. Silvennoinen, J. Co-firing of agricultural fuels in a full-scale fluidized bed boiler / J. Silvennoinen, M. Hedman // Fuel Processing Technology. – 2013. – № 105. – P. 11–19.

87. Sami, M. Co-firing of coal and biomass fuel blends / M. Sami, K. Annamalai, M. Wooldridge // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2001. – № 27. – P. 171–214.
88. Долинский, А. А. Водугольное топливо: перспективы использования в теплоэнергетике и жилищно-коммунальном секторе / А. А. Долинский, А. А. Халатов // *Промышленная теплотехника*. – 2007. – № 5. – С. 70-79.
89. Agnieszka Plis. Furniture wood waste as a potential renewable energy source / Agnieszka Plis, Michalina Kotyczka-Morańska, Marcin Kopczyński, Grzegorz Łabojko // *Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2016. V. 125. – P. 1357 – 1371.
90. Van der Stelt MJC. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: a review / Van der Stelt MJC, Gerhauser H, Kiel JHA // *Biomass Bioenergy*. – 2011. V. 35. – P. 3748 – 3762.
91. Nunes LJR. A review on torrefied biomass pellets as a sustainable alternative to coal in power generation / Nunes LJR, Matias JCO, Catalo JPS // *Renew Sustain Energy Rev*. – 2014. V. 40. – P. 153 – 160.;
92. Robinson A.L. Pilot-scale investigation of the influence of coal-biomass cofiring on ash deposition / Robinson AL, Junker H, Baxter LL // *Energy Fuels*. – 2002. V. 16. – P. 343 – 355.
93. Annamalai K. Co-firing of coal and cattle feedlot biomass (FB) Fuels, Part III: fouling results from a 500,000 BTU/h pilot plant scale boiler burner / Annamalai K, Sweeten J, Freeman M, Mathur M, O'Dowd W, Walbert G, et al. // *Fuel*. – 2003. V. 82. – P. 1195 – 1200.
94. Turn S.Q. Test results from sugar cane bagasse and high fiber cane co-fired with fossil fuels / Turn SQ, Jenkins BM, Jakeway LA, Blevins LG, Williams RB, Rubenstein G, et al. // *Biomass Bioenergy*. – 2006. V. 30. – P. 565 – 574.
95. Cumming J. W. The thermogravimetric behavior of coal / J. W. Cumming, Mc Laughlin J. // *Thermochim Acta*. – 1982. – V. 58. – P. 253 – 272.
96. Bioenergy Project Development & Biomass Supply [Электронный ресурс]. – 2007. – Режим доступа: <http://www.iea.org>.

97. Pedersen, L. S. Full-scale cofiring of straw and coal / L. S. Pedersen, H. P. Nielsen, W. Kiil, L. A. Hansen, K. Dam-Johansen, F. Kildsig, J. Christensen, P. Jespersen // *Fuel*. – 1996. – V. 75. – P. 1584 – 1590.
98. Yanik, J. NO and SO₂ emissions from combustion of raw and torrefied biomasses and their blends with lignite / J. Yanik, G. Duman, O. Karlström, A. Brink // *Journal of Environmental Management*. – 2018. – V. 227. – P. 155–161.
99. Vicente, E. D. An overview of particulate emissions from residential biomass combustion / E. D. Vicente, C. A. Alves // *Atmospheric Research*. – 2018. – V. 199. – P. 159–185.
100. Wei, X. Detailed Modeling of NO_x and SO_x Formation in Co-combustion of Coal and Biomass with Reduced Kinetics / X. Wei, X. Guo, S. Li, X. Han, U. Schnell, G. Scheffknecht, B. Risio // *Energy & Fuels*. – 2012. – V. 26. – P. 3117–3124.
101. Кундас, С. П. Использование древесной биомассы в энергетических целях: научный обзор / С. П. Кундас, С. С. Позняк, О. И. Родькин, В. В. Саникович, Э. Ленгфельдер. – Минск : МГЭУ им А. Д. Сахарова, 2008. – 85 с.
102. Ермашкевич, В. Н. Возобновляемые источники энергии в Республике Беларусь: Прогноз, механизмы реализации / под. общ. ред. В. Н. Ермашкевича. – Минск: Право и экономика, 1993. – 229 с.
103. Делягин, Г. Н. Сжигание твердого топлива в виде водоугольных суспензий / Г. Н. Делягин, И. В. Давыдова И. В. -. Москва: ЦНИЭИ Уголь, 1969. – 49 с.
104. Lee, S. Handbook of alternative fuel technologies / S. Lee, J. G. Speight, S. K. Loyalka. - New York: CRC Press, 2007. - 525 p.
105. Зайденварг, В. Е. Производство и использование водоугольного топлива / В. Е. Зайденварг, К. Н. Трубецкой, В. И. Мурко, И. Х. Нехороший. - Москва: Изд-во Академии горных наук, 2001. - 176 с.
106. Матузов С. В. Сжигание кавитационного водоугольного топлива в низкотемпературном кипящем слое [Текст]. / С. В. Матузов // VIII Всероссийская конференция с международным участием «Горение твердого топлива» Институт

теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН: сб. статей. - Новосибирск, 2012. – С. 61.1 – 61. 5.

107. Панишев, Н. В. Перспективы утилизации хвостов углеобогащения и твердых отходов тепловых электростанций / Н. В. Панишев, В. А. Бигеев, Е. С. Галиулина // Теория и технология металлургического производства. – 2015. – № 10. – С. 69-77.

108. Глушков, Д. О. Органоводоугольное топливо: проблемы и достижения (обзор) / Д. О. Глушков, П. А. Стрижак, М. Ю. Чернецкий // Теплоэнергетика. – 2016. – № 10. – С. 31–41.;

109. Ходаков, Г. С. Водугольные суспензии в энергетике / Г. С. Ходаков // Теплоэнергетика. – 2007. – № 1. – С. 35–45.;

110. Вершинина, К. Ю. Низкотемпературное зажигание отходов переработки угля в виде органоводоугольных топливных композиций: дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.17 / Вершинина Ксения Юрьевна. Томск, - 2016. – 191 с.

111. Серант, Ф.А. Приготовление водугольного топлива и технологии его сжигания / Ф. А. Серант, А. И. Цепенюк, Ю. В. Овчинников, С. В. Луценко, Е. Г. Карпов // СБОРНИК НАУЧНЫХ СТАТЕЙ СОВРЕМЕННАЯ НАУКА. – 2011. – № 1 (6) . – С. 95-101.

112. Круть, А.А. Совершенствование технологий приготовления водугольных суспензий (ВУС) / А.А. Круть // Прикладная гидромеханика. – 2014. – Т. 16, № 2. – С. 36–47.

113. Ходаков, Г.С. Производство и трубопроводное транспортирование суспензионного водугольного топлива / Г.С. Ходаков, Е.Г. Горлов, Г.С. Головин // Химия твердого топлива. – 2006. – №4. – С. 22–39.

114. Пугач, Л. И. Качество энергетических углей. Влияние качества на экономику и технологию использования на ТЭС: учебное пособие / Л. И. Пугач. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1998. – 104 с.

115. Мяки, А. Э. Истинные причины проблем отопления в северных регионах / А. Э. Мяки // Топливноэнергетический комплекс. – 2003. – № 2. – С. 95-98.

116. Рассказов, Е.А. Мировой рынок алмазов / Рассказов, Е.А // НАУКА, ОБРАЗОВАНИЕ, ОБЩЕСТВО: ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ. - Москва: АР-Консалт, 2017. - С. 103-108.

117. Емешев, В.Г. Без привозной энергетики / В. Г. Емешев, М. С. Паровинчак // Нефтегазовая вертикаль. – 2005. – № 17. – С. 63-65.

118. 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 // Applied Energy. – 2014. – V. 115. – P. 309–319.

119. Vershinina, K. Yu. Impact of environmentally attractive additives on the ignition delay times of slurry fuels: Experimental study / K. Yu. Vershinina, N. E. Shlegel, P. A. Strizhak // Fuel. – 2019. – V. 238. – Pages 275-288.

120. Zhao, X. Emission characteristics of PCDD/Fs, PAHs and PCBs during the combustion of sludge-coal water slurry / X. Zhao, W. Zhu, J. Huang, M. Li, M. Gong // Journal of the Energy Institute. – 2015. – V. 88, № 2. – P. 105–111.

121. Няшина, Г. С. Исследование способов снижения влияния тепловых электрических станций на окружающую среду при сжигании суспензионных топлив из отходов углеобогащения и биомассы: дис. канд. тех. наук: 05.14.14 / Няшина Галина Сергеевна. - Томск, - 2018. – 201 с.

122. 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. – 2017. – V. 180. – P. 196-206.

123. Syrodoy, S. V. Characteristics and conditions for ignition of bio-coal mixtures based on coal and forest combustible material / S. V. Syrodoy, G. V. Kuznetsov, N. Y. Gutareva, Zh. A. Kostoreva, A. A. Kostoreva, N. A. Nigay // Journal of the Energy Institute. – 2020. – V. 93. – P. 1978-1992.

124. ГЛОБАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЛЕСНЫХ РЕСУРСОВ 2015 : Настольный справочник. – Рим : ПРОДОВОЛЬСТВЕННАЯ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ, 2016. – 256 с.

125. Доклад о повышении эффективности лесного комплекса 2013. ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СОВЕТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ. 2013. С. 138.

126. СТРАТЕГИЯ развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 год [Текст]: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 20 сентября 2018 г. № 1989-р // Собрание законодательства. - 2018.- С. 102.

127. Кузнецов, Г. В. Прогноз Возникновения лесных пожаров и их экологических последствий / Г. В. Кузнецов, Н. В. Барановский. – Томск : Изд-во СО РАН, 2009. – 301 с.

128. Кузнецов, В. И. Математическое моделирование эволюции леса для целей управления лесным хозяйством / В. И. Кузнецов, Н. И. Козлов, П. М. Хомяков. Москва: ЛЕНАНД, 2005. - 232 с.

129. ФАО. 2018. Состояние лесов мира 2018 - Пути к достижению устойчивого развития с учетом значения лесов. – Рим : ПРОДОВОЛЬСТВЕННАЯ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ, 2018. – 139 с.

130. Федюхин, А. В. РАЗРАБОТКА СИСТЕМ КОМБИНИРОВАННОЙ ВЫРАБОТКИ ТЕПЛОВОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПИРОЛИЗА И ГАЗИФИКАЦИИ БИОМАССЫ: дис. канд. тех. наук: 05.14.04 / Федюхин Александр Валерьевич. – М., 2014. – 157 с.

131. Михайлов, Г. М. ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВТОРИЧНОГО ДРЕВЕСНОГО СЫРЬЯ / Г. М. Михайлов, Н. А. Серов. – Москва: Лесная промышленность, 1988. – 224 с.

132. Алексин, М. И. Экономия энергоресурсов в лесной и деревообрабатывающей промышленности / М. И. Алексин, Н. С. Синев, П. А. Пижурин и др. — М.: Лесная промышленность, 1982.— 210 с.

133. Михайлов, Г. М. Пути повышения эффективности использования отходов окорки. Обзорная информация / Г. М. Михайлов, А. Ф. Лещинская, К. М. Кузин, Б. П. Малютин.— М.: ЦНИИТЭИМС, 1981.— 40 с.

134. Исламова, С.И. Исследование эффективности преобразования энергии при термической утилизации древесной биомассы / С. И. Исламова, Е. К. Вачагина

// Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2015. – № 9-10. – С. 3-11.

135. Heinzl, T. Investigation of slagging in pulverized fuel co-combustion of biomass and coal at a pilot-scale test facility / Heinzl T., Siegle V., Spliethoff H., KRG Hein // Fuel Process Technology – 1998. – V. 54. – P. 109 – 125.

136. Olovsson, C. Oil prices in a general equilibrium model with precautionary demand for oil / C. Olovsson // Review of Economic Dynamics. – 2019. – V. 32. – Pages 1-17.

137. Новые энергетические прогнозы. Энергетический бюллетень. Выпуск № 66. – Москва : Аналитический центр при правительстве Российской , 2018. – 28 с.

138. Васильев, П. В. Экономика использования и воспроизводства лесных ресурсов / П. В. Васильев.— М.: АН СССР, 1963.— 484 с.

139. M. Yilgin. Volatiles and char combustion rates of demineralized lignite and wood blends / M. Yilgin, D.D. Pehlivan // Applied Energy. – 2009. V. 86. – P. 1179.

140. Franco, A. The future challenges for “clean coal technologies”: Joining efficiency increase and pollutant emission control / A. Franco, A. R. Diaz. // Energy. – V. 34. – P. 348 – 354.

141. Abreu, P. Ash deposition during the co-firing of bituminous coal with pine sawdust and olive stones in a laboratory furnace / P. Abreu, C. Casaca, M. Costa // Fuel. – 2010. V. 89. – P. 4040 – 4048.

142. Kwong Philip CW. Co-combustion performance of coal with rice husks and bamboo / Kwong Philip CW, Chao YH Christopher, Wang JH, Cheung CW, Kendall Gail. // Atmos Environ. – 2007. V. 41. – P. 7462 – 7472.

143. Philip CW Co-firing coal with rice husk and bamboo and he impact on particulate matters and associated polycyclic aromatic hydrocarbon emissions / Chao YH Christopher, Kwong Philip CW, Wang JH, Cheung CW, Kendall Gail. // Bioresource Technology. – 2008. V. 99. – P. 83 – 93.

144. Haykiri-Acma H. Effect of co-combustion on the burn out of lignite/ biomass blends: a Turkish case study / Haykiri-Acma H, Yaman S. // Waste Manag. – 2008. V. 28. – P. 2077 – 2084.

145. Haykiri-Acma, H. Combinations of synergistic interactions and additive behavior during the co-oxidation of chars from lignite and biomass / H. Haykiri-Acma, S. Yaman // *Fuel Processing Technology*. – 2008. V. 89. – P. 176 – 182.
146. Ulloa C. A. Thermogravimetric study of interactions in the pyrolysis of blends of coal with radiate pine sawdust / Ulloa C. A, Gordon A. L, Garcia X. A. // *Fuel Process Technology*. – 2009. V. 90. – P. 583 – 590.
147. Shen, D. K. Kinetic study on thermal decomposition of woods in oxidative environment / D. K. Shen, S. Gu, K. H. Luo, A. V. Bridgwater, M. X. Fang// *Fuel*. – 2009. – V. 88. – 1024.
148. Demirbas, A. Effects of temperature and particle size on bio-char yield from pyrolysis of agricultural residues / A. Demirbas // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2004. – V. 72. – P. 243.
149. Vamvuka, D. Pyrolysis characteristics and kinetics of biomass residuals mixtures with lignite / D. Vamvuka, E. Kakaras, E. Kastanaki, P. Grammelis // *Fuel*. – 2003. – V. 82. – P. 1949.
150. Glushkov, D. O. Influence of organic coal-water fuel composition on the characteristics of sustainable droplet ignition / D. O. Glushkov, D. P. Shabardin, P. A. Strizhak, K. Yu. Vershinina // *Fuel Processing Technology*. – 2016. – V. 143. – P. 60-68.
151. Glushkov, D. Municipal solid waste recycling by burning it as part of composite fuel with energy generation / D. Glushkov, K. Paushkina, D. Shabardin, P. Strizhak, N. Gutareva // *Journal of Environmental Management*. – 2019. – V. 231. – P. 896-904.
152. Glushkov, D. O. Co-combustion of coal processing waste, oil-refining waste and municipal solid waste: Mechanism, characteristics, emissions / D. O. Glushkov, K. K. Paushkina, D. P. Shabardin // *Chemosphere*. – 2020. – V. 240. – 124892.
153. Ratafia-Brown, J. Major Environmental Aspects of Gasification-Based Power Generation Technologies / J. Ratafia-Brown, L. Manfredo, J. Hoffman, M. Ramezan. US: Office of Fossil Energy. National Energy Technology Laboratory, 2002. – 270 p.

154. 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. Jeremiáš, P. Kameníková, M. Hartman, S. Skoblja, M. Šyc // *Fuel Processing Technology*. – 2012. – V. 95. – P. 16–26.
155. Morrison, J. L. Comparative overview of coal-water slurry fuels produced from waste coal fines for utility-scale co-firing applications / J. L. Morrison, B. G. Miller, A. W. Scaroni, W. R. Carson // *Fuel and Energy Abstracts*. – 1997. – V. 38. – P. 309.
156. Osintsev, K. V. Studying Flame Combustion of Coal–Water Slurries in the Furnaces of Power Generating Boilers / K. V. Osintsev // *Thermal Engineering*. – 2012. – V. 59. – P. 881.
157. Maltsev, L. I. Combustion of Black Coal in the Form of Coal–Water Slurry in Low Capacity Boilers / L. I. Maltsev, I. V. Kravchenko, S. I. Lazarev, D. A. Lapin // *Thermal Engineering*. – 2014. – V. 61. – P. 486–490.
158. Alekseenko, S. V. Analysis of Combustion of Coal-Water Fuel in Low-Power Hot-Water Boiler via Numerical Modeling and Experiments / S. V. Alekseenko, V. A. Kuznetsov, L. I. Maltsev, A. A. Dekterev, M. Yu. Chernetskii // *Journal of Engineering Thermophysics*. – 2019. – V. 28. – P. 177–189.
159. Осинцев, К.В. Разработка системы сжигания водоугольной суспензии / К.В. Осинцев // *Теплоэнергетика*. – 2014. – № 1. – С. 5-11.
160. Шарабура Т.А. Особенности перевода котлов средней и малой мощности на водоугольное топливо / Т.А. Шарабура, В.А. Пинчук, Г.Л. Шевченко, А.В. Кузьмин // *Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии*. – Днепропетровск: НПК "Триакон". – 2012. – № 1(9). – С. 97 - 105.
161. Осинцев, В.В. Анализ тепловой устойчивости факельного сжигания углей Киргизии / В.В. Осинцев, А.К. Джундубаев, А.М. Хидиятов // *Известия Академии наук Киргизской ССР. Физикотехнические и математические науки*. – 1989. – № 1. – С. 56–65.
162. Управление тепловой структурой факела в топках котлов БКЗ-210-140Ф с однородной фронтальной компоновкой горелок при сжигании

разнородного топлива / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев, М.П. Сухарев, Е.В. Торопов // Теплоэнергетика. – 2005. – № 9. – С. 14–23.

163. Мальцев, Л. И. Сжигание каменного угля в виде водоугольного топлива с целью повышения эффективности работы котлов [Текст] / Л. И. Мальцев, И. В. Кравченко, С. И. Лазарев, Д. А. Лапин // Институт теплофизики СО РАН: сб. статей. Новосибирск, 2012. – С. 60.1- 60.7.

164. Овчинников, Ю.В. Проблемы сжигания водоугольных топлив и предложения по разработке технологии сжигания / Ю. В. Овчинников, Е. Е. Бойко, Ф. А. Серант // ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ. – 2015. – № 1(26). – С. 85- 93.

165. Алексеенко, С.В. Исследования и разработки Сибирского отделения Российской академии наук в области энергоэффективных технологий / отв. ред. С.В. Алексеенко; Российская академия наук, Сибирское отделение, Институт теплофизики. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. – 405 с.

166. Цепенюк, А. И. Численные исследования сжигания композитного водоугольного топлива в котле типа ДКВР-20-13 / А. И. Цепенюк, Ю. В. Овчинников, С. В. Луценко, А. Р. Квирившвили, А. А. Лавриненко, Е. А. Межов // «Горение твердого топлива» Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 13–16 ноября 2012. Новосибирск, 2012. – С. 102.1-102.9.

167. Пузырев, Е. М. Результаты опытно-промышленных испытаний работы мазутного котла ДКВР 6,5/13 на водоугольном топливе / Е. М. Пузырев, В. И. Мурко, В. Н. Звягин, В. И. Федяев, С. А. Бровченко, Д. А. Дзюба, И. Х. Нехороший, В. Н. Аглиулин // Теплоэнергетика. – 2001. – № 2. – С. 69-71.

168. Мальцев, Л.И. Прикладные аспекты технологии приготовления и сжигания водоугольного топлива / Мальцев Л. И., Кравченко И. В., Кравченко А. И., Самборский В. Е. // Современная наука. – 2011. – № 1(6). – С. 25-30.

169. Law, C.K. Combustion characteristics of droplets of coal/oil and coal/oil/water mixtures / C.K. Law, H.K. Law, C.H. Lee // Enegy. – 1979. - V. 4. – P. 329–339.

170. Murdoch, P.L. The mechanism of combustion of coal-water slurries / P.L. Murdoch, M. Pourkashanian, A. Williams // 20th International Symposium on Combustion. – 1985. – V. 20, № 1. – P. 1409–1418.

171. Рукин, Э.И. Исследование свойств водоугольных суспензий из каменных углей в присутствии поверхностно-активных веществ / Рукин Э.И., Горская Т.П., Делягин Г.Н., Исаев В.В. // Химия и переработка топлив. – 1975. – Т.30, вып.2. – С. 19–26.

172. Yao, S.C. Burning of suspended coal-water slurry droplet with oil as combustion additive / S.C. Yao, P. Manwani // Combustion and Flame. – 1986. – V. 66, № 1. – P. 87–89.

173. 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 // Applied Energy. – 2014. – V. 115. – P. 309–319.

174. Li, D. Study on coal water slurries prepared from coal chemical wastewater and their industrial application / D. Li, J. Liu, S. Wang, J. Cheng. // Applied Energy. – 2020. – V. 268. – 114976.

175. Kuznetsov, G. V. Differences in ignition and combustion characteristics of waste-derived oil-water emulsions and coal-water slurries containing petrochemicals / G. V. Kuznetsov, K. Yu. Vershinina, T. R. Valiullin, P. A. Strizhak // Fuel Processing Technology. – 2018. – V. 179. – P. 407-421.

176. Glushkov, D. O. Ignition of composite liquid fuel droplets based on coal and oil processing waste by heated air flow / D. O. Glushkov, P. A. Strizhak // Journal of Cleaner Production. – 2017. – V. 165. – P. 1445-1461.

177. Salomatov, V. V. Influence of the degree of coal metamorphism on characteristics and conditions of ignition of coal-water fuel drops / V. V. Salomatov, G. V. Kuznetsov, S. V. Syrodoy. // Thermophysics and Aeromechanics. – September 2018. – V. 25. – P. 773–788.

178. Vershinina, K. Yu. Comparing the ignition parameters of promising coal fuels / K. Yu. Vershinina, V. V. Dorokhov, D. S. Romanov, P. A. Strizhak. // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2020. – V. 139. – Pages 273-282.

179. Vershinina, K. Yu. Sawdust as ignition intensifier of coal water slurries containing petrochemicals / K. Yu. Vershinina, G. V. Kuznetsov, P. A. Strizhak // *Energy*. – 2017. – V. 140. – Pages 69-77.

180. Nyashina, G. S. Energy efficiency and environmental aspects of the combustion of coal-water slurries with and without petrochemicals / G. S. Nyashina, G. V. Kuznetsov, P. A. Strizhak // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – V. 172. – P. 1730-1738.

181. Няшина Г. С. Оценка экологических индикаторов сжигание суспензионных угольных топлив с примесью перспективных древесных компонентов [Текст] / Г. С. Няшина, Н. Е. Шлегель, П. А. Стрижак // *Интеллектуальные энергосистемы : труды V Международного молодёжного форума: сб. статей. Томск, 2017. — С. 102-106.*

182. Няшина Г. С. Оценка экологических индикаторов сжигания суспензионных угольных топлив с примесью перспективных растительных компонентов [Текст] / Г. С. Няшина ; науч. рук. П. А. Стрижак // *Проблемы геологии и освоения недр : труды XXII Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 155-летию со дня рождения академика В.А. Обручева, 135-летию со дня рождения академика М.А. Усова, основателей Сибирской горно-геологической школы, и 110-летию первого выпуска горных инженеров в Сибири: сб. статей. Томск, 2018. — С. 286-287.*

183. Kuznetsov, G.V. Coagulation and splitting of droplets of coal-water slurry containing petrochemicals and their effect on ignition characteristics / G. V. Kuznetsov, P. A. Strizhak. // *Applied Thermal Engineering*. – 2017. – V. 116. – P. 266-277.

184. Xue, Z. In-situ atomization and flame characteristics of coal water slurry in an impinging entrained-flow gasifier / Z. Xue, Q. Guo, Y. Gong, Y. Wang, G. Yu. // *Chemical Engineering Science*. – 2018. – V. 190. – P. 248-259.

185. Xue, Z. Visualization study on breakup modes of coal water slurry in an impinging entrained-flow gasifier / Z. Xue, Y. Gona, Q. Guo, F. Wang, G. Yu. // *Fuel*. – V. 244. – P. 40-47.

186. Gong, Y. Refractory failure in entrained-flow gasifier: Investigation of partitioned erosion characteristics in an industrial opposed multi-burner gasifier / Y. Gong, Q. Guo, H. Zhu, G. Yu. // *Chemical Engineering Science*. – 2019. – V. 210. – 115227.

187. Mingming, Z. An experimental study of the ignition and combustion characteristics of single droplets of biochar-glycerol-water slurry fuels / Z. Mingming, Z. Zhezi, Z. Yang, H. Setyawan, L. Pengfei, Z. Dongke. // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2017. – V. 36. – P. 2475-2482.

188. Galina S. N. 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. – 108559.

189. Abdullah, H. Bioslurry as a Fuel. 4. Preparation of Bioslurry Fuels from Biochar and the Bio-oil-Rich Fractions after Bio-oil/Biodiesel Extraction / H. Abdullah and H. Wu // *Energy & Fuels*. – 2011. – V. 25. – P. 1759-1771.

190. Kijo-Kleczkowska, A. Combustion of coal–water suspensions / A. Kijo–Kleczkowska, // *Fuel*. – 2011. – V. 90. – P. 865-877.

191. Kijo-Kleczkowska, A. Analysis of cyclic combustion of solid fuels / W. Gajewski, A. Kijo-Kleczkowska, J. Leszczyński, // *Fuel*. – 2009. – V. 88. – P. 221-234.

192. Делягин, Г.Н. Вопросы теории горения водоугольной суспензии в потоке воздуха / Г.Н. Делягин // *Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий*. – Москва: Наука. – 1967. С. 45-55.

193. Саломатов, В. В. Теоретическое исследование горения капли водоугольного топлива Ч. I / В. В. Саломатов, И. В. Кравченко // *Горение и плазмохимия*. — 2007. — Вып. 3. — С. 178–188.

194. Саломатов, В. В. Теоретическое исследование горения капли водоугольного топлива. Ч. II: Стадия испарения / В. В. Саломатов, И. В. Кравченко // *Горение и плазмохимия*. — 2007. — Т. 5, вып. 3. — С. 189–197.

195. Саломатов, В. В. Теоретическое исследование горения капли водоугольного топлива. Ч. III / В. В. Саломатов, И. В. Кравченко // Горение и плазмохимия. — 2008. — Т. 6, вып. 1. — С. 56–59.
196. Саломатов, В. В. Теоретическое исследование горения капли водоугольного топлива Ч. IV / В. В. Саломатов, И. В. Кравченко // Горение и плазмохимия. — 2008. — Т. 6, вып. 4. — С. 178–187.
197. Кузнецов, Г. В. Численное моделирование зажигания частиц водоугольного топлива / Г.В. Кузнецов, В.В. Саломатов, С.В. Сыродой. // Физика горения и взрыва. — 2015. — Т.51, №4, с. 12-19.
198. Сыродой, С. В. Численное моделирование зажигания водоугольной частицы с учетом испарения влаги и эндотермического разложения твердой горючей компоненты / С. В. Сыродой, В. В. Саломатов, Г. В. Кузнецов. // Ползуновский вестник. — 2013. — №4/3. — С. 28-32.
199. Кузнецов, Г.В. Влияние условий теплообмена на характеристики зажигания частиц водоугольного топлива / Г. В. Кузнецов, В. В. Саломатов, С. В. Сыродой //Теплоэнергетика. — 2015. — №10. — с. 19.
200. Сыродой, С. В. Влияние формы частицы на характеристики воспламенения водоугольного топлива / С. В. Сыродой, Г. В. Кузнецов, В. В. Саломатов // ХИМИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА. — 2015. — № 6. — с. 28.
201. Франк-Каменецкий, Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д. А. Франк-Каменецкий. — Москва: Изд-во АН СССР, 1947. — 502 с.
202. Сполдинг, Д. Б. Основы теории горения / Д. Б. Сполдинг. — Москва: Государственное энергетическое издательство, 1959. — 320 с.
203. Сполдинг, Д. Б. Горение и массообмен / Пер. с англ. под ред. В. Е. Дорошенко. — Москва: Машиностроение, 1985. — 240 с.
204. Moreno, A. I. Pyrolysis of furniture wood waste: Decomposition and gases evolved / A. I. Moreno, R. Font. // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. — 2015. — № 113. — P. 464–473.
205. Зельдович, Я. Б. Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович. — Москва: Наука, 1980. — 380 с.

206. Burke, S. P. Kinetics of a type of heterogeneous reactions. The mechanism of the combustion of pulverized coal / S. P. Burke, T. Shumann // *Industrial and Engineering Chemistry*. – 1931. – V. 23. – P. 404-419.
207. Кнорре, Г. Ф. Теория топочных процессов / Г. Ф. Кнорре, К. М. Арефьев, А. Г. Блох и др. Москва-Ленинград: Энергия, 1966. – 492 с.
208. Франк-Каменецкий, Д.А. Диффузионная теплопередачи в химической кинетике / Д.А. Франк-Каменецкий. – Москва: Наука, 1997. – 492 с.
209. Варшавский, Г. А. Горение капли жидкого топлива (диффузионная теория) / Г.А. Варшавский // Бюро новой техники НКАП. Москва: Гостехиздат. – 1945. – № 6. – С. 87–106.
210. Tu, C. M. Combustion rate of carbon / C. M. Tu, H. Davis, H. C. Hottel // *Industrial and Engineering Chemistry*. – 1934. – V. 26. – P. 749-757.
211. Чуханов, З.Ф. Вопросы теории термической переработки топлив/ З. Ф. Чуханов // Известия АН СССР. Отд. техн. наук. - 1954. - № 8. - С. 7-22.
212. Сыродой, С.В. Влияние кинетической модели описания процессов термического разложения на результаты математического моделирования зажигания частиц древесной биомассы [Текст] / С. В. Сыродой, Г. В. Кузнецов, В. В. Саломатов // Горение топлива: теория, эксперимент, приложения: ТРУДЫ СЕДЬМОЙ РОССИЙСКОЙ НАЦИОНАЛЬНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ПО: сб. статей. Новосибирск, 2018. — С. 457-460.
213. Jiang, S. Effects of thermal pretreatment and ex-situ grinding on the pyrolysis of mallee wood cylinders / S. Jiang, X. Hu, X. Shao, Y. Song, D. Xia, C. Li, // *Fuel Processing Technology*. – 2017. – V. 159. – P. 211-221.
214. Blijderveen, M.V. Modelling spontaneous ignition of wood, char and RDF in a lab-scale packed bed / M. V. Blijderveen, E. A. Bramer, G. Brem // *Fuel*. – 2013. – V.108 – p. 190–196.
215. Гришин А.М. Исследование зажигания слоя лесных горючих материалов / А.М. Гришин, А.А. Долгов, В.П. Зима, Д.А. Крючков, В.В. Рейно, А.Н. Субботин, Р.Ш. Цвык // ФГВ. - 1998. - № 5(34). - С. 14-22.

216. Richter, F. A multiscale model of wood pyrolysis in fire to study the roles of chemistry and heat transfer at the mesoscale / F. Richter, G. Rein, // *Combustion and Flame*. – 2020. – Volume 216. – P. 316-325.

217. Гришин А. М. Математическое моделирование процесса зажигания древесины / А.М. Гришин, А.С. Якимов // *Теплофизика и аэромеханика*. - 2013. -Т. 20. - № 4. - С. 473-486.

218. Гришин, А.М. Общая физико-математическая модель зажигания и горения древесины / А.М. Гришин. // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. – 2010. - №4. – С. 65-78.

219. Larionov, K. Effect of $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ and $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ Activating Additives on Combustion Characteristics of Anthracite and Its Semi-Coke / K. Larionov, K. Slyusarskiy, S. Tsibulskiy, A. Tolokolnikov, I. Mishakov, Y. Bauman, A. Vedyagin, A. Gromov // *Energies*. – 2020. – V. 13. – 5926. doi:10.3390/en13225926.

220. Тепловой расчет котлов: нормативный метод. – СПб.: 1998. – 256 с.: ил.

221. 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.

222. Агроскин, А.А. Теплофизика твердого топлива / А. А. Агроскин, В. Б. Глейбман. - Москва: Недра, 1980. - 256 с.

223. Bhuiyan, A. A. A review on thermo-chemical characteristics of coal/biomass co-firing in industrial furnace / A. A. Bhuiyan, A. S. Blicblau, A. K. M. Sadrul Islam, J. Nasera // *Journal of the Energy Institute*. – 2018. – V. 91. – P. 1-18.

224. Mukherjee, A. Effect of additives on interfacial interactions for viscosity reduction of carbonaceous solid–water slurries / A. Mukherjee, S. V. Pisupati. // *Fuel*. – 2016. – V. 180. – P. 50–58.

225. Baranova, M. P. Utilization Slurry Coal-Water Fuel / M. P. Baranova, Q. Li, Z. Zheng, F. Li, V. A. Kulagin, D. S. Likhachev. // *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. – 2014. – V. 4. – P. 474-479.

226. Zasyarkin, I. M. System of Ignition and Combustion Stabilization for water-coal fuel / I. M. Zasyarkin, V. I. Murko, V. I. Fedyaev, M. P. Baranova // THERMAL SCIENCE. – 2012. – V. 16. – P. 1229 – 1238.

227. Khanpit, V. Experimental studies on coal-water slurry fuel prepared from pretreated low-grade coal / V. Khanpit, S. P. Tajane, A. Sachin // International Journal of Coal Preparation and Utilization. – 2019. – P. 15.

228. 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. – 2020. – V. 201. – 117701.

229. Tian, W. Biomass-derived functional porous carbons for adsorption and catalytic degradation of binary micropollutants in water / W. Tian, H. Sun, X. Duan, H. Zhang, Y. Ren, S. Wang. // Journal of Hazardous Materials. – 11 December 2019. – V. 289. – 121881.

230. Малышев Д.Ю. Обоснование ресурсоэффективности технологий сжигания водоугольных топлив с добавками биомассы / Д. Ю. Малышев, С.В. Сыродой // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. - №6. – С. 77-85.

231. Malyshev, D. Yu. Theoretical justification of utilization of forest waste by incineration in a composition of bio-water-coal suspensions. Ignition stage / D. Yu. Malyshev, G.V.Kuznetsov, S.V.Syrodoy, N.Yu.Gutareva, N.A.Nigay. // Applied Thermal Engineering. – 2020. – V. 170. – 115034.

232. 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.

233. Хзмаян, Д. М. Теория горения и топочные устройства / Д. М. Хзмаян, Я. А. Коган. — М. : Энергия, 1976. — 488 с.

234. Naumkin, A. S. Temperature Analysis in the Heated Region of the Chamber Electric Furnace of Resistance / A. S. Naumkin, B. V. Borisov, S. V. Syrodoy, D. Yu. Malishev. // AIP Conference Proceedings. – 2020. – V. 2212. – 020042.

235. Syrodoy, S. V. Numerical simulation of ignition of particles of a coal–water fuel / G. V. Kuznetsov, V. V. Salomatov, S. V. Syrodoy. // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – July 2015. – V. 51. – P. 409–415.

236. Kook, Y.A. Investigation of a Coal-Water Slurry Droplet Exposed to Hot Gas Stream / Y.A. Kook, W.B. Seung, E.C. Chang // *Combustion Science and Technology*. – 2007. – V.97. №4. – P. 429.

237. Gil, M. V. Thermal behaviour and kinetics of coal/biomass blends during co-combustion / M. V. Gil, D. Casal, C. Pevida, J. J. Pis, F. Rubiera // *Bioresource Technology*. – 2010. – V. 101. – P. 5601-5608.

238. 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.

239. 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.

240. 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.

241. Volkov, R. S. Evaporation of two liquid droplets moving sequentially through high-temperature combustion products / R. S. Volkov, G. V. Kuznetsov, P. A. Strizhak // *Thermophysics and Aeromechanics*. – 2014. – V. 21(2). – P. 255-258.

242. Cong, K. Influence of particle sizes on combustion characteristics of coal particles in oxygen-deficient atmosphere / K. Cong, Y. Zhang, F. Han, Q. Li // *Energy*. – 2019. – V. 170. – P. 840-848.

243. Леонтьев, А. И. Вихревые технологии для энергетики / А. И. Леонтьев, С. В. Алексеенко, Э. П. Волчков и др.; под общ. Ред. академика А. И. Леонтьева. – М. : Издательский дом МЭИ, 2017. – 350 с.

244. Kuznetsov, G. V. Conditions and Characteristics in Ignition of Composite Fuels Based on Coal with the Addition of Wood / G. V. Kuznetsov, S. A. Yankovskii // *Thermal Engineering*. – 2019. – V. – 66(2), P. 133-137.
245. Kuznetsov, G. V. Ignition of the wood biomass particles under conditions of near-surface fragmentation of the fuel layer / G. V. Kuznetsov, S. V. Syrodoy, N. Y. Gutareva, A. A. Kostoreva, Zh. A. Kostoreva // *Fuel*. – 2019. – V. 252. – P. 19-36.
246. 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.
247. Todes, O. M. *Acta Physicochim. URSS*. – 1936.
248. Зельдович, Я. Б. Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович, Г. М. Махвиладзе. – М. : Наука, 1980. – 487 с.
249. Грязнов, Н. С. Пиролиз углей в процессе коксования / Н. С. Грязнов. – М. : Metallurgy, 1983. – 184 с.
250. Басевич, В. Я. Детальные кинетические механизмы горения гомогенных газовых смесей с участием кислородсодержащих окислителей / В. Я. Басевич // *Успехи химии*. – 1987. -№ 56. – С. 705–731.
251. Ripley, D. L. Shock-Tube Study of the Hydrogen—Oxygen Reaction. II. Role of Exchange Initiation / D. L. Ripley, W. C. Gardiner // *Journal Chem. Phys.*. – 1966. – V. 44. – P. 2285 - 2296.
252. Померанцев, В. В. Основы практической теории горения: Учебное пособие О-75 для вузов / В. В. Померанцев, К. М. Арефьев, Д. Б. Ахмедов и др.; под ред. В. В. Померанцева. 2-е изд., перераб. И доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние, 1986. – 312 с.
253. Reid, R. C. Prausnitz J. M., Poling B. E. The properties of gases and liquids / R. C. Reid, J. M. Prausnitz, B. E. Poling – New York: McGraw-Hill, c 1977. – 688 p.
254. Грязнов Н. С. Пиролиз углей в процессе коксования / Н. С. Грязнов. - М. : Metallurgy, 1983. - 184 с.

255. Yao, B. H₂-rich gas production from leaves / B. Yao, T. Xiao, X. Jie, S. Gonzalez-Cortes, P.P. Edwards // *Catalysis Today*. – 2018. – V. 317. – P. 43-49.