

На правах рукописи



Вершинина Ксения Юрьевна

**НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ЗАЖИГАНИЕ ОТХОДОВ
ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЯ В ВИДЕ ОРГАНОВОДОУГОЛЬНЫХ
ТОПЛИВНЫХ КОМПОЗИЦИЙ**

**01.04.17 – Химическая физика, горение и взрыв,
физика экстремальных состояний вещества**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» на кафедре автоматизации теплоэнергетических процессов

Научный руководитель:

Стрижак Павел Александрович, доктор физико-математических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Лапшин Олег Валентинович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное учреждение науки Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук (г. Томск), отдел структурной макрокинетики, старший научный сотрудник

Салганский Евгений Александрович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химической физики Российской академии наук (г. Черноголовка, Московская область), лаборатория горения в высокоскоростных потоках, ведущий научный сотрудник

Ведущая организация:

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук (г. Кемерово)

Защита состоится 27 декабря 2016 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.13 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, д. 7, уч. корпус 8, ауд. 217.

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

Автореферат разослан 27 октября 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Матвеев Александр
Сергеевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В настоящее время для многих государств (особенно Китая, Индии, США, России) задачи рационального использования природных ресурсов, утилизации отходов различных производств, создания и поддержания экологически чистой окружающей среды являются особенно актуальными. Решение данных задач для регионов с развитыми угольной, нефтеперерабатывающей, энергетической, химической, транспортной отраслями промышленности осложняется образованием большого количества отходов. В частности, ежегодно в мире образуются миллионы тонн отходов углеобогащения, отработанных автомобильных и промышленных масел, нефтешламов, отходов нефтепереработки и др. Одним из способов масштабной, безопасной и ресурсоэффективной утилизации подобных отходов, а также вовлечения низкокачественных горючих полезных ископаемых (например, бурых углей) в энергетику является их сжигание в составе водоугольных (ВУТ) и органоводоугольных (ОВУТ) топлив.

ВУТ является композиционным жидким топливом, состоящим из воды и измельченного угля или горючего отхода его переработки. В состав ОВУТ, помимо воды и твердого горючего компонента, входит также жидкий горючий компонент, в качестве которого используются отработанные масла и отходы нефтяного происхождения. Такие добавки могут эффективно применяться не только для интенсификации процессов зажигания и горения композиционного жидкого топлива, но также для улучшения его реологических характеристик (в частности, для замедления процесса расслоения топливной композиции на твердую и жидкую фазы при довольно длительном хранении без перемешивания).

Технологии ВУТ и ОВУТ представляют значительный интерес не только в целях решения задач утилизации широкого класса промышленных отходов, но и для теплоэнергетической отрасли в целом. Во-первых, за счет разнообразной номенклатуры и ежегодно пополняющегося объема компонентов, используемых для приготовления ОВУТ и ВУТ, возможно значительно расширить топливную базу энергетических предприятий. Во-вторых, перевод теплоэнергетических объектов, использующих традиционное пылеугольное топливо, на сжигание суспензий ВУТ

и ОБУТ повысит пожаровзрывобезопасность технологического процесса производства энергии за счет минимизации риска возникновения нерегламентированных возгораний на этапах транспортировки, подготовки, сушки, хранения и подачи топлива в камеры сгорания. В-третьих, масштабное внедрение ОБУТ и ВУТ в промышленную энергетику с последующим сокращением доли пылеугольных котельных установок позволит снизить экологическую нагрузку на окружающую среду за счет уменьшения образования в процессе горения оксидов азота и серы по сравнению со сжиганием традиционного пылеугольного топлива.

Зажигание суспензий ОБУТ в низкотемпературном режиме (температура окислителя на стадии инициирования горения не более 1000 К) является перспективным направлением развития технологий топливосжигания. Такой подход позволит снизить образование токсичных газов при горении топлива, а также уменьшить шлакование поверхностей нагрева энергетического оборудования.

За последние 25–30 лет разработаны научные основы приготовления и сжигания ВУТ в топках энергетических котлоагрегатов. Можно выделить работы следующих исследователей: Делягин Г.Н., Ходаков Г.С., Горлов Е.Г., Мурко В.И., Бурдуков А.П., Патраков Ю.Ф., Попов В.И., Дектерев А.А., Чернецкий М.Ю., Ведрученко В.Р., Баранова М.П., Алексеенко С.В., Саломатов В.В., Богомоллов А.Р., Кузнецов Г.В., Сыродой С.В., Цепенюк А.И., Овчинников Ю.В., Осинцев В.В., Федорова Н.И., Gajewski W., Kijo-Kleczkowska A., Wang H., Svoboda K., Liu H., Lee C.H., Liu J., Sakai T., Manwani P., Kim S.H., Mohapatra S.K., Pisupati S.V., Hu B. Разработаны экспериментальные методики, физические и математические модели, алгоритмы численного моделирования. Получены зависимости интегральных характеристик зажигания и горения ВУТ от основных параметров процесса. Результаты выполненных до настоящего времени исследований определяют современные представления о процессах горения капель ВУТ.

Важно отметить, что в отличие от ВУТ, данные теоретических и экспериментальных исследований зажигания ОБУТ весьма ограничены. Условия протекания этого процесса могут существенно отличаться для ВУТ и ОБУТ вследствие наличия в составе последнего жидкого горючего компонента. Исследованием

композиционных жидких топлив, имеющих в составе (помимо угля) жидкие горючие компоненты (мазут, керосин, индустриальные масла, нефтешламы, водонефтяные эмульсии), занимались такие исследователи как Архипов В.А., Бурдуков А.П., Горлов Е.Г., Лиштван И.И., Патраков Ю.Ф., Федорова Н.И., Ефремов А.И., Овчинников Ю.В., Цепенко А.И., Шихотинов А.В., Татарникова Е.В., Дектерев А.А., Чернецкий М.Ю., Lee C.H., Liu J., Sakai T., Manwani P., Svoboda K., Kim S.H., Mohapatra S.K. В большинстве публикаций по тематике ОБУТ основной акцент делается на определение влияния добавок в составе композиционного жидкого топлива на его реологические свойства. Немногочисленные результаты исследований процессов зажигания и горения ОБУТ выполнены в достаточно узком диапазоне высоких температур окислителя (существенно более 1000 К). Компонентная база исследованных составов ОБУТ достаточно ограничена и представлена, в основном, бурыми и каменными углями, мазутом, керосином и водонефтяными эмульсиями. Многие аспекты использования в энергетике органоугольных топливных композиций не исследованы. На сегодняшний день не определены условия и характеристики зажигания в перспективном низкотемпературном (температура окислителя менее 1000 К) режиме составов ОБУТ, компонентами которых являются разнообразные отходы угле- и нефтепереработки.

Целью настоящей работы является экспериментальное определение условий и характеристик низкотемпературного зажигания отходов переработки угля в виде органоугольных топливных композиций.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработка экспериментальной методики, создание стенда, планирование и проведение экспериментальных исследований условий и характеристик низкотемпературного зажигания отходов переработки угля в виде органоугольных топливных композиций.
2. Выбор компонентов и методик для приготовления органоугольных топливных композиций, изучение свойств компонентов ОБУТ.
3. Изучение механизма и стадий зажигания капли ОБУТ в потоке разогретого окислителя.

4. Регистрация и вычисление интегральных характеристик процесса зажигания органоводоугольных топливных композиций (времена задержки зажигания и полного сгорания, минимальные температуры инициирования горения, тренды температуры в центре капли топлива в процессе нагревания).
5. Установление диапазонов влияния основных параметров (температура, скорость потока окислителя, вид и концентрации компонентов топлива) на характеристики (времена задержки зажигания, минимальные температуры инициирования горения, тренды температуры топлива в процессе реагирования) и условия зажигания капель ОБУТ.
6. Определение влияния компонентного состава, способа и длительности процесса приготовления ОБУТ на характеристики зажигания.
7. Разработка рекомендаций по использованию полученных результатов при зажигании органоводоугольных топливных композиций в промышленных теплоэнергетических установках.

Научная новизна работы. Разработана экспериментальная методика исследования комплекса взаимосвязанных процессов тепломассопереноса, фазовых превращений и химического реагирования при зажигании капель ОБУТ в потоке разогретого воздуха, отличающаяся от известных использованием средств высокоскоростной (до 10^5 кадров в секунду) видеорегистрации, автоматизированных систем с держателями (обеспечивается возможность варьирования материала, из которого изготовлены держатели) капель топлив, панорамных оптических методов визуализации и цветовой модели RGB для регистрации времен задержки зажигания и полного сгорания одиночной капли ОБУТ. Установлены характеристики (минимальные или пороговые температуры, времена задержки зажигания и др.) и необходимые условия низкотемпературного зажигания ОБУТ. Определен механизм и выделены характерные стадии инициирования горения капли ОБУТ при взаимодействии с потоком разогретого окислителя. Установлены зависимости интегральных характеристик тепломассопереноса, фазовых превращений и химического реагирования (времена задержки зажигания, полного сгорания, температуры в центре капли) для разных компонентных составов ОБУТ от темпера-

туры, скорости движения окислителя, размеров и формы частиц (капель); концентрации компонентов. Проведен анализ свойств (вязкость, стабильность, плотность, зольность, влажность, теплота сгорания) суспензий ОБУТ, приготовленных на основе отходов обогащения угля (фильтр-кеков) и типичных отработанных нефтепродуктов. Определено влияние способа приготовления ОБУТ на характеристики его зажигания и горения. Отмечены отличия значений характеристик зажигания ОБУТ на основе исходных и отработанных промышленных масел.

Практическая значимость. Для широкой группы суспензий ОБУТ, компонентами которых являются типичные отходы углеобогащения, угли разных марок, а также горючие жидкости различного происхождения определены условия и характеристики устойчивого (характеризуется переходом к горению) зажигания. Установлены диапазоны изменения основных параметров инициирования горения в низкотемпературном режиме. Разработаны рекомендации для приготовления ОБУТ (включающие описание способов подготовки компонентов, методов и длительностей их смешивания) с целью обеспечения требуемых характеристик зажигания топлива и его стабильности. Результаты исследования могут использоваться в энергетике для расширения сырьевой базы, обеспечения пожаровзрывобезопасности производства энергии, улучшения экологической обстановки вблизи энергетических объектов.

Степень достоверности результатов экспериментальных исследований. Достоверность полученных в ходе экспериментальных исследований результатов подтверждается оценками систематических и случайных погрешностей результатов измерений, удовлетворительной повторяемостью опытов при идентичных начальных условиях, использованием современных высокоточных оптических методов и программно-аппаратных комплексов, а также сравнением с теоретическими заключениями других авторов.

Связь работы с научными программами и грантами. Диссертационные исследования низкотемпературного зажигания суспензий ОБУТ выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 15–19–10003).

Тематика исследований соответствует приоритетным направлениям развития науки в Российской Федерации (Указ Президента Российской Федерации от 07.07.2011 № 899): «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика», «Безопасность и противодействие терроризму», а также находится в сфере критических технологий федерального уровня, получивших высокий рейтинг по перспективам развития («Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе», «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии», «Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера»).

Научные положения, результаты и выводы, выносимые на защиту:

1. Устойчивое зажигание капель суспензий ОБУТ на основе углей разных марок, отходов углеобогащения и нефтепереработки возможно в диапазоне температур окислителя 650–900 К, что существенно ниже традиционно принимаемых (не менее 1000 К) для зажигания пылеугольного топлива.
2. Снижение или рост времени задержки зажигания, минимальной температуры зажигания, максимальной температуры горения ОБУТ при увеличении концентрации жидкого горючего компонента зависят от его температуры кипения и воспламенения, а также теплоты парообразования.
3. Отличия времен задержки зажигания композиционных топлив на основе воды разного качества (водопроводная, техническая, дистиллированная) незначительны (при температурах окислителя выше 900 К эти отличия не превышают 3 %). Аналогичные выводы сделаны при сравнении характеристик зажигания ОБУТ на основе исходных и отработанных промышленных масел.
4. Определены характерные отличия механизма и стадий зажигания капли ОБУТ от ВУТ в условиях её взаимодействия с потоком разогретого окислителя. Выделены отличия этих стадий для ОБУТ на основе разных компонентов.
5. Добавление в суспензию ОБУТ даже 10–15 % масс. углей с меньшей степенью метаморфизма приводит к снижению пороговой температуры зажигания на 40–70 К, а времена задержки зажигания могут уменьшиться на 25–35 %.

6. Установлена степень влияния группы факторов (температура, скорость движения потока окислителя, размеры капли ОВУТ, компонентный состав ОВУТ, время и способ приготовления, материал держателя капли топлива) на основные характеристики процессов, протекающих при низкотемпературном зажигании капель ОВУТ.

Личный вклад автора состоит в постановке и планировании экспериментальных исследований, проведении экспериментов, обработке результатов, оценке систематических и случайных погрешностей, анализе и обобщении полученных результатов, разработке рекомендаций практического использования последних, их апробации на конференциях и семинарах, формулировке защищаемых положений и выводов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на XX Международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии» (Томск, 2014), XI Международной конференции «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, 2014), Национальном конгрессе по энергетике (Казань, 2014), XII Международной конференции «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, 2015), Международной научной конференции «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» (Томск, 2015), XX Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках» (Звенигород, 2015), III Международном форуме «Интеллектуальные энергосистемы» (Томск, 2015), XXI Международной научной конференции «Современные техника и технологии» (Томск, 2015), Всероссийской научной конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск, 2015), IX Всероссийской конференции с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (Новосибирск, 2015), XX Юбилейном Международном научном симпозиуме им. академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2016), Международной научной конференции «Тепломассоперенос

в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» (Томск, 2016), XV Минском международном форуме по тепломассообмену (Минск, 2016), The 3rd International Congress on Water, Waste and Energy Management (Рим, 2016).

Публикации. Основные положения и результаты диссертационных исследований опубликованы в 28 печатных работах, в том числе 4 – в рецензируемых журналах из списка, рекомендованного ВАК РФ: «Химия твердого топлива», «Кокс и химия», «Химическое и нефтегазовое машиностроение», «Пожаровзрывобезопасность». Опубликовано 9 работ в международных рецензируемых журналах, индексируемых базами данных «Scopus» и «Web of Science»: «Fuel Processing Technology» (ИФ=3,847), «Applied Thermal Engineering» (ИФ=3,043), «Energy&Fuels» (ИФ=2,835), «Advances and Applications in Fluid Mechanics», «JP Journal of Heat and Mass Transfer», «Matec Web of Conferences», «Procedia - Social and Behavioral Sciences». Получены 6 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. Список основных публикаций приведён в конце автореферата.

Структура и содержание работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы, включающего 158 наименований, содержит 70 рисунков, 25 таблиц, 191 страницу.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, отражена практическая значимость и научная новизна полученных результатов.

В первой главе проанализировано современное состояние теоретических и экспериментальных исследований условий и характеристик зажигания и горения органоводоугольных, а также водоугольных топливных суспензий, определены основные достижения, нерешенные задачи в данной области, а также проблемы, сдерживающие развитие технологий ОБУТ (особенно при низкотемпературном режиме инициирования горения).

Во второй главе приведено описание экспериментального стенда и разра-

ботанных методик проведения исследований процесса инициирования горения одиночных капель ОБУТ различных компонентных составов, а также оценки погрешностей результатов измерений.

Компонентная база для приготовления суспензий ОБУТ включала угли разных марок и степеней метаморфизма (бурые, каменные, антрацит), фильтр-кеки (отходы обогащения) каменных углей марок К, Д, Т, СС, Г, углеродный остаток пиролиза автомобильных шин. В качестве жидкого горючего компонента использовались отработанные автомобильное, трансформаторное, турбинное, компрессорное масла, мазут, тяжелая нефть, водонефтяная эмульсия.

На рис. 1 приведена схема разработанного стенда. Внутри полого цилиндра 1 (внутренний диаметр 0,1 м, длина 1 м), выполненного из жаропрочного кварцевого стекла, при помощи нагнетателя 2 и нагревателя 3 формировался поток воздуха. Скорость движения (V_g) и температура (T_g) окислителя в цилиндре 1 варьировались в диапазонах 0,5–5 м/с и 600–1200 К, соответственно. Скорость движения потока окислителя определялась при помощи панорамного оптического метода Particle Image Velocimetry с применением программного обеспечения Actual Flow. Объемная концентрация кислорода в воздухе (после прохождения нагревателя) вычислялась газоанализатором Testo 340 и составляла около 20,5 % в широких диапазонах варьирования значений T_g и V_g .

Цилиндр 1 (рис. 1) имел три технологических отверстия (диаметр $9 \cdot 10^{-3}$ м), расположенных на боковой стенке вдоль оси симметрии. Расстояние между этими отверстиями составляло 0,3 м. Первое и третье отверстия по направлению движения воздуха применялись для установки термоэлектрических преобразователей 4 (номинальная статическая характеристика – хромель-алюмель, диапазон измеряемых температур 273–1373 К, систематическая погрешность ± 3 К, инерционность не более 10 с). Через второе отверстие в полость цилиндра 1 координатным механизмом 6 со скоростью 0,5 м/с (значение выбрано для обеспечения сохранения целостности капли топлива и ее удержания на спале) вводился термоэлектрический преобразователь специального исполнения (номинальная статическая характеристика – платинородий-платина, диапазон измеряемых температур 273–1873 К, си-

стематическая погрешность ± 1 К, инерционность не более 0,1 с, диаметр спая 0,1 мм). Сигналы с термопар 4 и 5 поступали на регистратор 10 и использовались для контроля значений температуры воздуха в соответствующих сечениях цилиндра 1, а также измерения температуры (T_d) в центре капли ОБУТ. Генерация капель на спай термоэлектрического преобразователя 5 выполнялась электронными дозаторами Finnpiquette Novus. Во всех экспериментах контролировался процесс обволакивания спая пленкой ОБУТ. Считалось, что центр капли совпадал со спаем термоэлектрического преобразователя 5 вследствие существенно меньшего размера последнего.

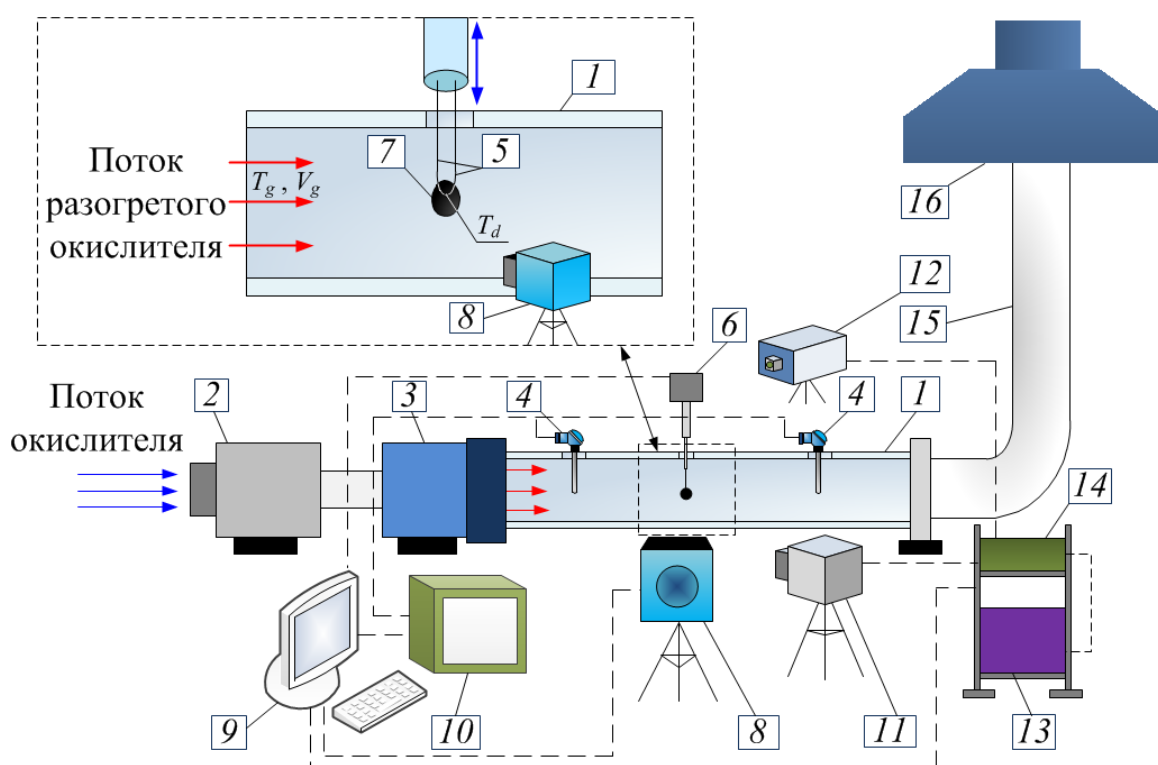


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – цилиндрический канал из кварцевого стекла; 2 – нагнетатель; 3 – воздухонагреватель; 4 – термоэлектрический преобразователь; 5 – малоинерционная термопара; 6 – координатный механизм; 7 – капля ОБУТ; 8 – высокоскоростная видеокамера; 9 – персональный компьютер; 10 – регистратор температуры; 11 – кросскорреляционная видеокамера; 12 – лазер; 13 – генератор лазерного излучения; 14 – синхронизатор лазера и видеокамеры; 15 – воздуховод; 16 – вытяжная вентиляция

Процессы, протекающие в течение индукционного периода, регистрировались высокоскоростной видеокамерой Phantom Miro M310. В результате синхронизации данных регистратора 10 и видеозаписей камеры установлены особенности изменения температуры T_d при реализации последовательных стадий зажигания капель ОБУТ. Специализированное программное обеспечение Tema

Automotive с алгоритмом непрерывного слежения применялось для определения характерных размеров капель и особенностей их зажигания. Алгоритм обработки изображений состоял в измерении не менее шести диаметров капли в различных сечениях и вычислении среднего значения радиуса (R_d). Систематическая погрешность определения R_d не превышала 4 %. Вычислялись значения времен задержки зажигания (τ_d) и полного сгорания (τ_c) капель топливных композиций. Параметр τ_d представлял время с момента ввода капли 7 в канал 1 до выполнения критерия зажигания, заключающегося в одновременном удовлетворении условий: $T_d \geq T_g$ и $dT_d/d\tau \geq 10$ К/с. Параметр τ_c – время от момента ввода капли 7 в канал 1 (рис. 1) до полного выгорания образца, которое характеризовалось отклонением T_d относительно установившегося значения (при $\tau \rightarrow \infty$) не более чем на $0,05 T_d^{\max}$ ($T_d^{\max}$ – максимальная температура капли в течение процесса горения).

Разработан новый подход для определения критерия зажигания капель ОБУТ на разных держателях без контроля температуры T_d . Этот подход основан на анализе свечения образца топлива в цветовой модели RGB (рис. 2). За счет сопоставления результатов экспериментов с измерениями температуры в центре капель ОБУТ и свечения последних на разных стадиях зажигания определены нижний и верхний пределы RGB для определения условий инициирования зажигания и полного выгорания топлива. Такой подход позволил установить влияние материала держателя капли ОБУТ на условия и характеристики зажигания. Его можно применять для анализа процессов зажигания не только неподвижных, но и перемещающихся в камерах сгорания капель.

Для установления особенностей обтекания потоком окислителя капли ОБУТ и вычисления V_g применялись кросскорреляционная видеокамера 11 и импульсный лазер 12, а также программное обеспечение Actual Flow с методом Particle Image Velocimetry (PIV). Для этого к входному каналу нагнетателя 2 подключался баллон с трассирующими частицами диоксида титана размерами 80–100 нм. Трассеры вдувались в нагнетатель и с потоком воздуха двигались в канале 1. В процессе движения по каналу 1 трассеры вместе с потоком воздуха обтекали каплю ОБУТ 7, подвешенную на термопаре 5. Напротив обтекаемой по-

током капли перпендикулярно друг другу устанавливались кросскорреляционная камера 11 и твердотельный лазер 12. Измерение мгновенного поля скорости потока окислителя в окрестности капли ОБУТ основано на регистрации перемещения трассирующих частиц за фиксированный интервал времени. Рассчитывались смещения частиц за время между вспышками лазера. После получения полей скорости движения трассеров вокруг капли и определения V_g проводились основные эксперименты с зажиганием капель ОБУТ (без трассеров в потоке окислителя).

В третьей главе приведены основные результаты выполненных экспериментальных исследований. Установлено, что для капель ОБУТ в условиях нагрева

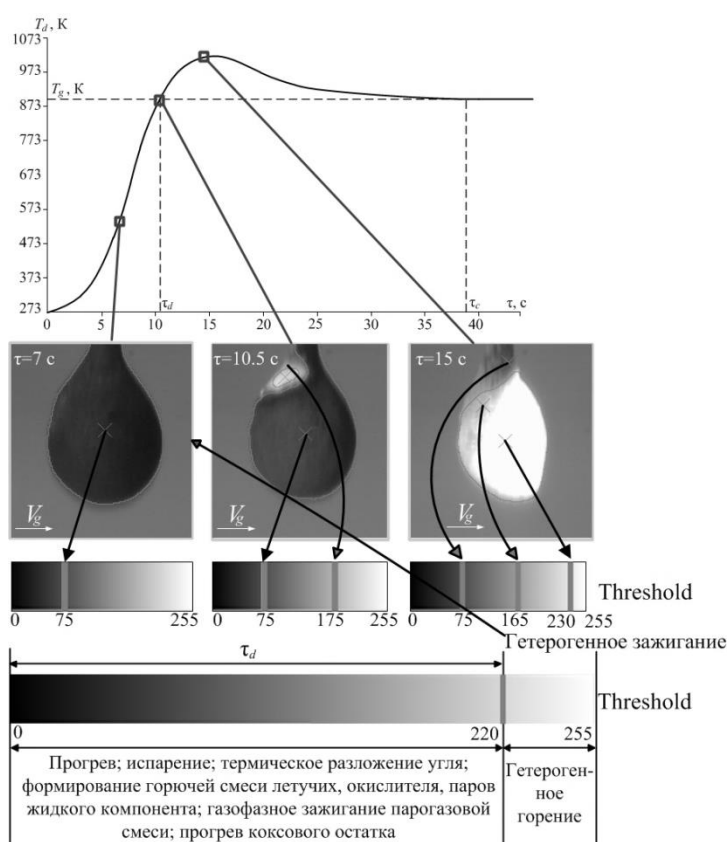


Рис. 2. Изменение температуры в капле ОБУТ (50 % бурый уголь марки Б2, 39 % вода, 10 % автомобильное масло отработанное, 1 % пластификатор) при взаимодействии с потоком разогретого воздуха

потоком окислителя характерны следующие стадии: инертный прогрев; испарение воды и жидкого горючего компонента; термическое разложение органической части угля (выход летучих); формирование парогазовой смеси и ее воспламенение; прогрев коксового остатка и его гетерогенное зажигание. На рис. 2 приведены тренд температуры (T_d) капли ОБУТ и кадры высокоскоростной видеосъемки, соответствующие основным стадиям исследуемого процесса.

Последовательность выделенных

стадий аналогична для всех проведенных экспериментов. Длительности отдельных стадий отличались в зависимости от компонентного состава ОБУТ, условий нагрева, размера капель и других менее значимых параметров. В частности, выявлено, что повышение концентрации жидкого горючего компонента ведет к увеличению длительности стадии инертного прогрева капли и испарения влаги. Это

обусловлено тем, что при росте концентрации жидкого горючего компонента снижаются вязкость и теплопроводность ОВУТ. Как следствие, возрастает длительность прогрева капли. Однако за счет повышения концентрации жидкого горючего компонента снижается доля воды. Так как тепловой эффект испарения воды существенно выше по сравнению с аналогичными характеристиками горючих жидкостей, то концентрация их паров в приповерхностном слое капли ОВУТ растет быстрее. Скорость газофазного зажигания возрастет с увеличением концентрации продуктов испарения жидкого горючего компонента. Как следствие, интенсивность последующих стадий возрастает для ОВУТ с большей концентрацией жидкого горючего компонента. При концентрации жидкого горючего компонента более 15 % на стадии зажигания газовой смеси регулярно формировалось пламя в окрестности капли ОВУТ, интенсифицировался прогрев коксового остатка и его гетерогенное зажигание. Этот процесс начинался с появления локального очага горения, формирующегося со стороны набегающего потока окислителя, и развивался при распространении фронта горения по поверхности капли в направлении, соответствующем направлению движения потока разогретого воздуха. Такая особенность реализации гетерогенного зажигания обусловлена максимальной температурой и концентрацией окислителя со стороны набегающего потока.

После локального инициирования гетерогенного горения кокса выделяется дополнительная энергия. Это ведет к распространению фронта горения как по поверхности, так и вглубь капли. Вследствие интенсивного теплообмена на границе «капля – окислитель» экзотермический процесс в окрестности приповерхностного слоя капли заканчивается раньше полного выгорания кокса в глубинных слоях.

Установлено, что из основных параметров потока воздуха доминирующее влияние на времена τ_d и τ_c оказывает температура. Выполненные оценки показали, что определяющая роль T_g обусловлена существенным превышением радиационного теплового потока по отношению к конвективному и кондуктивному на границе «капля – окислитель».

В табл. 1 приведены значения предельных (минимальных) температур окислителя, необходимых для устойчивого зажигания ОВУТ. Уменьшение размера

капли приводило к росту минимальных температур окислителя $T_g^{\min}$ (табл. 1). При увеличении R_d возрастает концентрация вдуваемых с поверхности капли в окружающую среду продуктов термического разложения и испарения жидких горючих компонентов. В результате, скорость реакции окисления парогазовой смеси возрастает относительно аналогичных значений для капель меньшего размера.

Табл. 1. Минимальные температуры окислителя, достаточные для устойчивого зажигания капель ОВУТ (состав: 47 % фильтр-кек (сухой) или угольная пыль, 47 % вода, 5 % жидкий горючий компонент, 1 % пластификатор) при $V_g \approx 5$ м/с

Жидкий горючий компонент	КЕК / уголь							R_d , мм
	КЕК каменного угля марки К	КЕК каменного угля марки СС	КЕК каменного угля марки Т	Бурый уголь марки Б1	Бурый уголь марки Б2	Бурый уголь марки Б3	Каменный уголь марки Д	
Отсутствует	–	≈870 К	≈850 К	≈660 К	≈680 К	≈680 К	≈770 К	0,5
	≈860 К	≈860 К	≈840 К	≈640 К	≈670 К	≈670 К	≈760 К	1
	≈840 К	≈860 К	≈820 К	≈630 К	≈650 К	≈660 К	≈750 К	1,5
Трансформаторное масло отработанное	≈870 К	≈870 К	≈850 К	≈680 К	≈680 К	≈700 К	≈780 К	0,5
	≈850 К	≈860 К	≈830 К	≈670 К	≈680 К	≈690 К	≈760 К	1
	≈820 К	≈850 К	≈730 К	≈630 К	≈660 К	≈670 К	≈750 К	1,5
Турбинное масло отработанное	≈870 К	≈870 К	≈810 К	≈660 К	≈680 К	≈690 К	≈770 К	0,5
	≈850 К	≈860 К	≈770 К	≈650 К	≈670 К	≈680 К	≈760 К	1
	≈800 К	≈850 К	≈720 К	≈620 К	≈650 К	≈660 К	≈740 К	1,5
Автомобильное масло отработанное	≈870 К	≈870 К	≈850 К	≈680 К	≈680 К	≈690 К	≈770 К	0,5
	≈850 К	≈850 К	≈820 К	≈660 К	≈670 К	≈680 К	≈760 К	1
	≈810 К	≈830 К	≈770 К	≈620 К	≈650 К	≈670 К	≈750 К	1,5

Как видно из табл. 1, меньшие температуры зажигания характерны для составов ОВУТ на основе бурых углей. Большие температуры зажигания – для составов ОВУТ на основе каменного угля и фильтр-кеков. Добавление жидкого горючего компонента в суспензию приводило к снижению минимальных температур зажигания на 20–60 К, но только для составов на основе фильтр-кеков. Для большинства составов на основе бурых и каменных углей добавление жидкого горючего компонента приводило к увеличению минимальных температур зажигания на 10–30 К. Важно отметить, что во всех экспериментах увеличение концентрации жидкого горючего компонента приводило к заметному росту длительности полного сгорания органической части топлива. При этом характерные темпе-

ратуры в центре капель топливных композиций (ВУТ и ОВУТ) различались не более чем на 15–25 К. Это обусловлено ростом концентрации горючей среды в суспензии. В рамках диссертационных исследований разработаны математические модели для прогноза газофазного зажигания угольных частиц. Результаты математического моделирования показали, что минимальные температуры зажигания частиц угля существенно ниже, чем значения аналогичного параметра для одиночных капель ВУТ и ОВУТ (более 600 К).

Увеличение массовой доли воды в составе ОВУТ на 5–15 % относительно её исходной концентрации приводило к снижению минимальных температур зажигания на 20–50 К (табл. 2). Причиной данного эффекта могут являться как увеличение пористости структуры капли ОВУТ в процессе интенсивного испарения влаги, и, как следствие, возрастание площади поверхности реагирования, так и активизация реакции горения при более низких температурах окислителя вызванная взаимодействием паров воды

и углерода. Для определения минимальных температур зажигания при идентичных условиях нагрева проводилось 20–30 опытов. Данные табл. 2 представляют средние значения измеренных минимальных температур зажигания различных составов ОВУТ. Допустимый разброс значений относительно этих средних значений не превысил 5 К. «Влагонасыщение» топливной суспензии существенно увеличивает инерционность зажигания (рис. 3) вследствие увеличения затрат на парообразование воды.

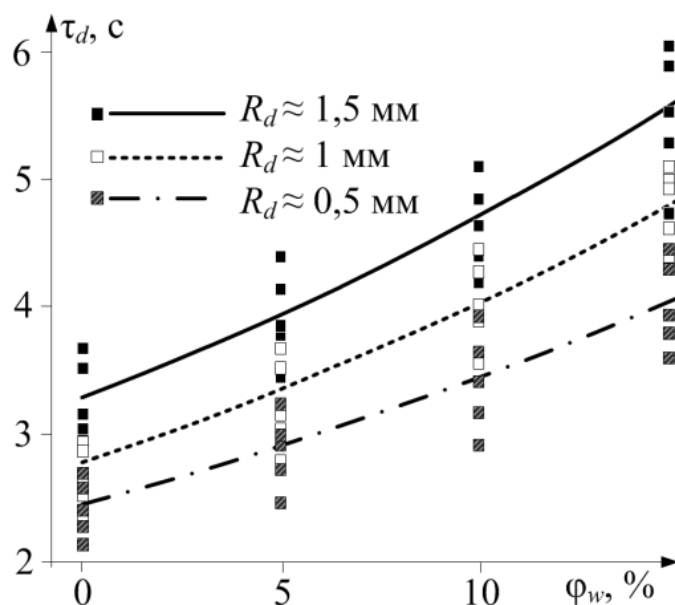


Рис. 3. Времена задержки зажигания капли в зависимости от массовой доли воды в составе ОВУТ ((79–94) % КЕК (влажный) каменного угля марки К, (0–15) % вода, 5 % трансформаторное масло отработанное, 1 % пластификатор) при $T_g \approx 850$ К и $V_g \approx 5$ м/с

Выполненные эксперименты показали, что увеличение массовой доли обогащенного угля в ОБУТ приводит к снижению инерционности процессов его зажигания (рис. 4).

Табл. 2. Влияние концентрации дополнительной (к исходному составу) воды на минимальные температуры зажигания капель ($R_d \approx 1$ мм) ОБУТ

№	Исходные компонентные составы ОБУТ	Массовая доля дополнительной воды, %			
		0	5	10	15
		Минимальная температура зажигания, К			
1	89 % КЕК Т, 10 % отработанное автомобильное масло, 1 % пластификатор	875	851	838	820
2	89 % КЕК Т, 10 % отработанное трансформаторное масло, 1 % пластификатор	876	854	845	838
3	89 % КЕК К, 10 % отработанное турбинное масло, 1 % пластификатор	763	751	747	740
4	89 % КЕК К, 10 % отработанное трансформаторное масло, 1 % пластификатор	775	759	754	751
7	48 % вода, 41 % уголь марки Б2, 10 % отработанное турбинное масло, 1 % пластификатор	628	615	602	596
8	48 % вода, 41 % уголь марки Б2, 10 % отработанное автомобильное масло, 1 % пластификатор	620	615	600	580

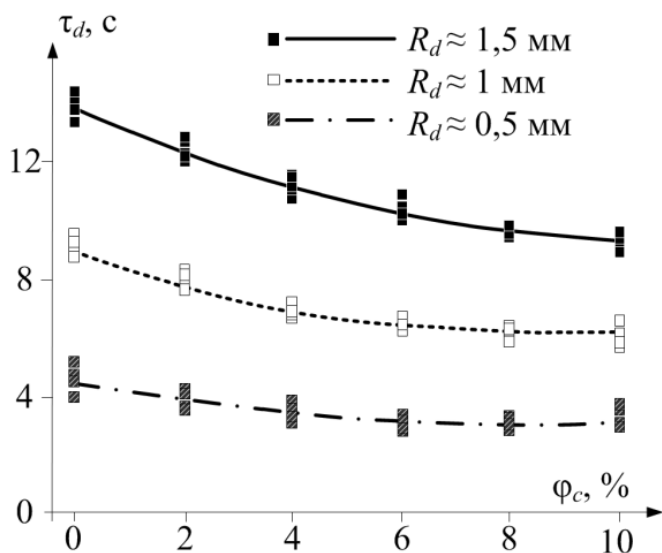


Рис. 4. Времена задержки зажигания капли в зависимости от массовой доли обогащенного угля в составе ОБУТ ((79–89) % КЕК угля марки К, (0–10) % каменный уголь марки К, 10 % автомобильное масло отработанное, 1 % пластификатор) при $T_g \approx 850$ К и $V_g \approx 5$ м/с

Установленные зависимости (рис. 4)

можно объяснить влиянием соотношения тепловых эффектов фазовых переходов и реакций окисления при изменении концентрации компонентов ОБУТ. Теплота испарения воды более чем в десять раз превышает аналогичный параметр для термического разложения органической части угля. Как следствие, с ростом концентрации обогащенного угля расходуется меньше энергии, аккумулированной каплей ОБУТ в течение инертного нагрева, на иници-

рование процесса горения. Наряду с этим возрастает концентрация летучих в

окрестности капли ОВУТ, что ведет к ускорению зажигания газовой смеси. Дополнительный эффект на уменьшение τ_d оказывает изменение оптических характеристик капли ОВУТ при добавлении угольной пыли. В этом случае увеличивается коэффициент поглощения внешнего излучения. Радиационный теплообмен на границе «капля – окислитель» интенсифицируется. Совокупность этих факторов ведет к уменьшению времен задержки зажигания на 20–30 % при $0 \leq \varphi_c \leq 10\%$ и $0,5 \leq R_d \leq 1,5$ мм (рис. 4). Кроме того, при увеличении концентрации обогащенного угля в составе ОВУТ регистрировалось снижение пороговых (минимальных) температур зажигания (рис. 5).

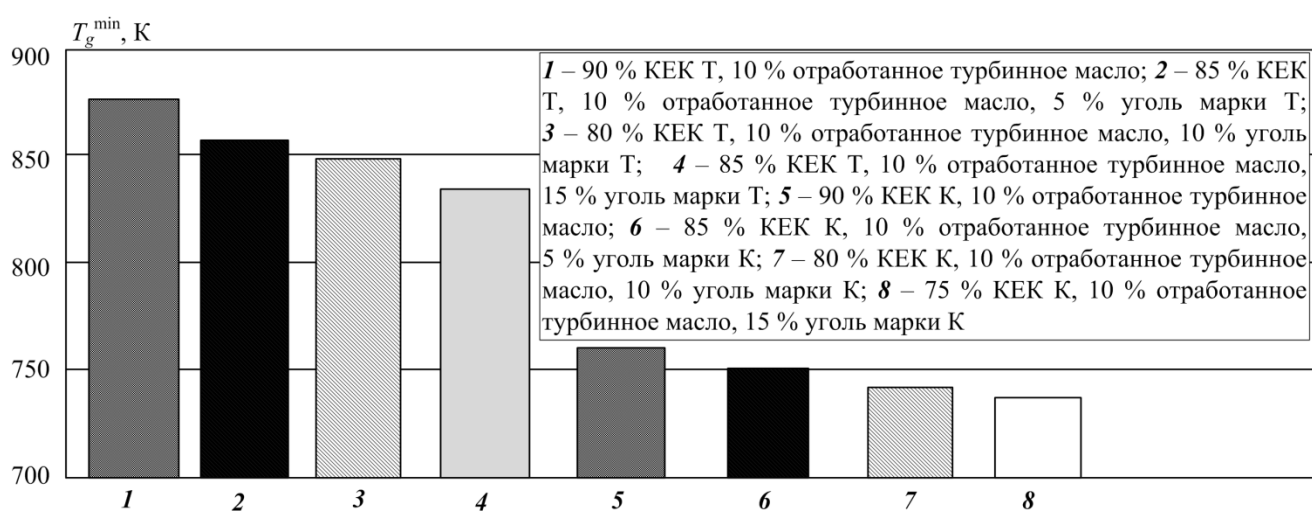


Рис. 5. Минимальные (пороговые) температуры зажигания ОВУТ при варьировании массовой концентрации обогащенного угля

Повышение концентрации жидкого горючего компонента в ОВУТ может приводить как к снижению (для составов на основе КЕКов), так и к росту (для составов на основе угольной пыли) времен задержки зажигания. Влияние этого эффекта возрастает при увеличении размеров капель (рис. 6). В экспериментах с водонепфтяными эмульсиями, характеризующимися высокими значениями теплоты парообразования по сравнению с отработанными маслами, установлены меньшие температуры T_d и более длительная продолжительность инициирования горения.

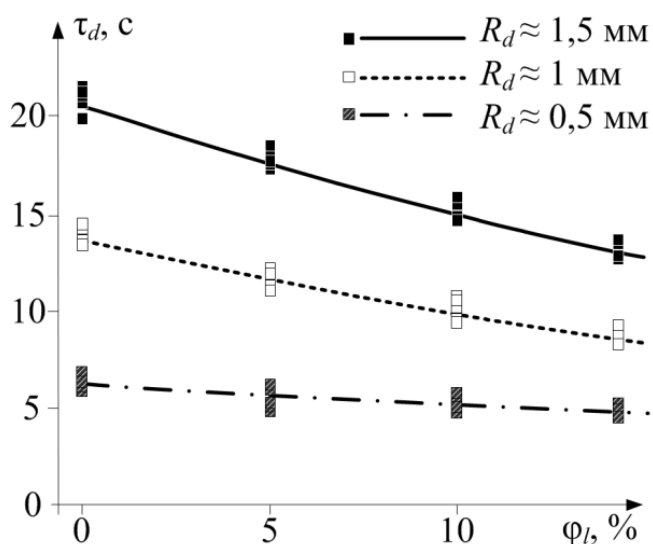


Рис. 6. Времена задержки зажигания капли в зависимости от массовой доли жидкого горючего компонента в составе ОВУТ ((84–99) % КЕК (влажный) угля марки К, (0–15) % турбинное масло отработанное, 1 % пластификатор) при $T_g \approx 850$ К, $V_g \approx 5$ м/с

В частности, установлено, что времена τ_d таких составов возрастали на 15–25 % по сравнению с составами ОВУТ на основе отработанных масел при идентичных условиях нагрева. Установлено, что в качестве компонента, интенсифицирующего зажигание ОВУТ при более низких температурах внешней газовой среды, целесообразно использовать низкосортные угли с высоким содержанием летучих веществ. Добавка бурого угля (с массовой концентрацией 5 %) в ОВУТ на основе каменно-

го угля приводила к снижению минимальной температуры зажигания на 7–10 %. На рис. 7 представлены минимальные температуры зажигания и времена задержки зажигания ОВУТ на основе углей различных степеней метаморфизма (табл. 3).

Табл. 3. Компонентные составы ОВУТ на основе углей разных степеней метаморфизма

Номер состава	Состав ОВУТ с массовыми концентрациями компонентов
1	47 % вода, 43 % бурый уголь марки Б2, 10 % отработанное автомобильное масло
2	47 % вода, 43 % каменный уголь марки Д, 10 % отработанное автомобильное масло
3	45 % вода, 45 % антрацит, 10 % отработанное автомобильное масло
4	45 % вода, 5 % бурый уголь марки Б2, 40 % каменный уголь марки Д, 10 % отработанное автомобильное масло
5	46 % вода, 17 % бурый уголь марки Б2, 17 % каменный уголь марки Д, 10 % антрацит, 10 % отработанное автомобильное масло
6	55 % вода, 35 % углеродный остаток низкотемпературного пиролиза автомобильных шин, 10 % отработанное автомобильное масло
7	48 % вода, 13 % бурый уголь марки Б2, 13 % каменный уголь марки Д, 8 % углеродный остаток низкотемпературного пиролиза автомобильных шин, 8 % антрацит, 10 % отработанное автомобильное масло

На рис. 8 приведена зависимость времени задержки зажигания от температуры окислителя для разных длительностей процессов приготовления ОВУТ с помощью кавитатора и гомогенизатора. Результаты ис-

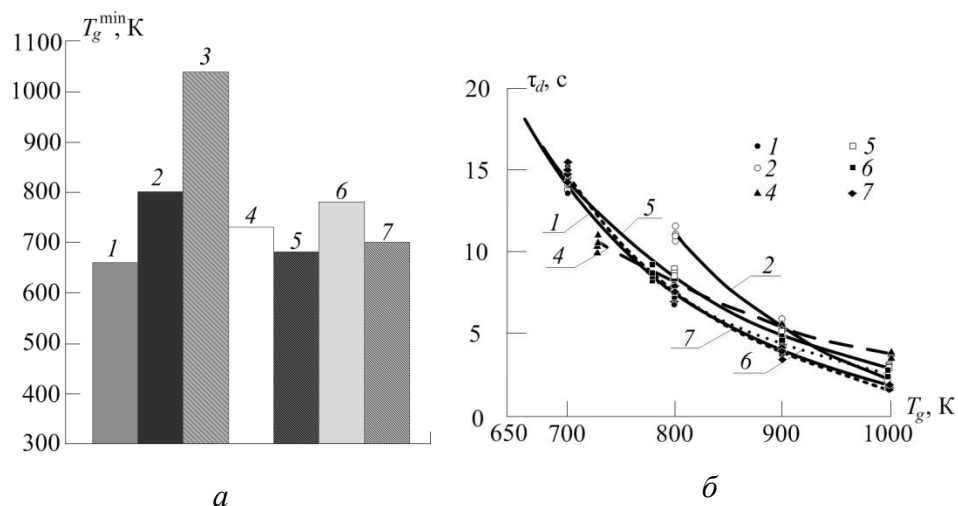


Рис. 7. Минимальные температуры зажигания (а) и зависимости времен задержки зажигания ОВУТ от температуры окислителя (б) (номера кривых и столбцов диаграммы соответствуют составам, приведенным в табл. 3)

следований показали, что изменение длительности процесса приготовления топлива даже на несколько минут может существенно влиять на инерционность процессов горения ОВУТ. Установлено, что для каждого из способов приготовления имеется оптимальная длительность процесса гомогенизации. При превышении этого времени характеристики зажигания меняются незначительно (рис. 8). Для гомогенизатора таким временем выступали 3 минуты, а кавитатора – 1 час.

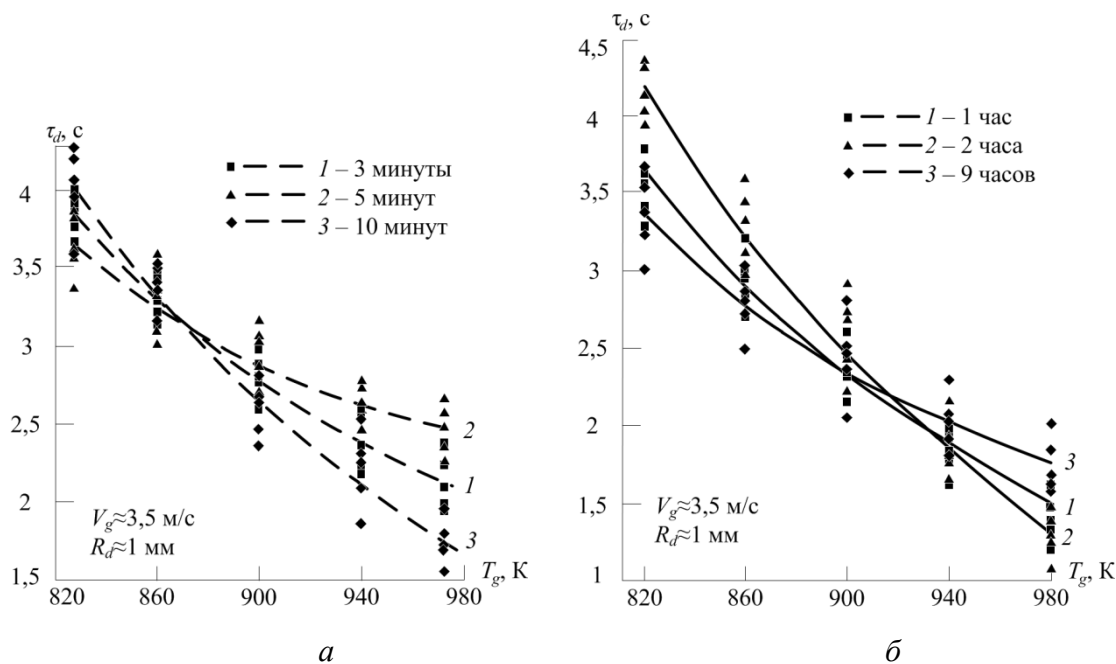


Рис. 8. Зависимости времен задержки зажигания капель ОВУТ (89,5 % КЕК (влажный) каменного угля марки К, 10 % отработанное автомобильное масло, 0,5 % пластификатор) от температуры окислителя при разных длительностях и способах приготовления (а – с применением гомогенизатора; б – с применением шаровой барабанной мельницы)

Выполненные исследования создают предпосылки для разработки унифицированных технологий приготовления и сжигания ОВУТ на основе большой группы компонентов. Также в диссертации приведены результаты исследований влияния на характеристики зажигания капель ОВУТ материалов широко используемых мировым научным сообществом держателей (керамический стержень, металлическая проволочка, спай термопары). Показано, что минимальные времена задержки зажигания соответствуют опытам с использованием в качестве держателей спаев миниатюрных термопар.

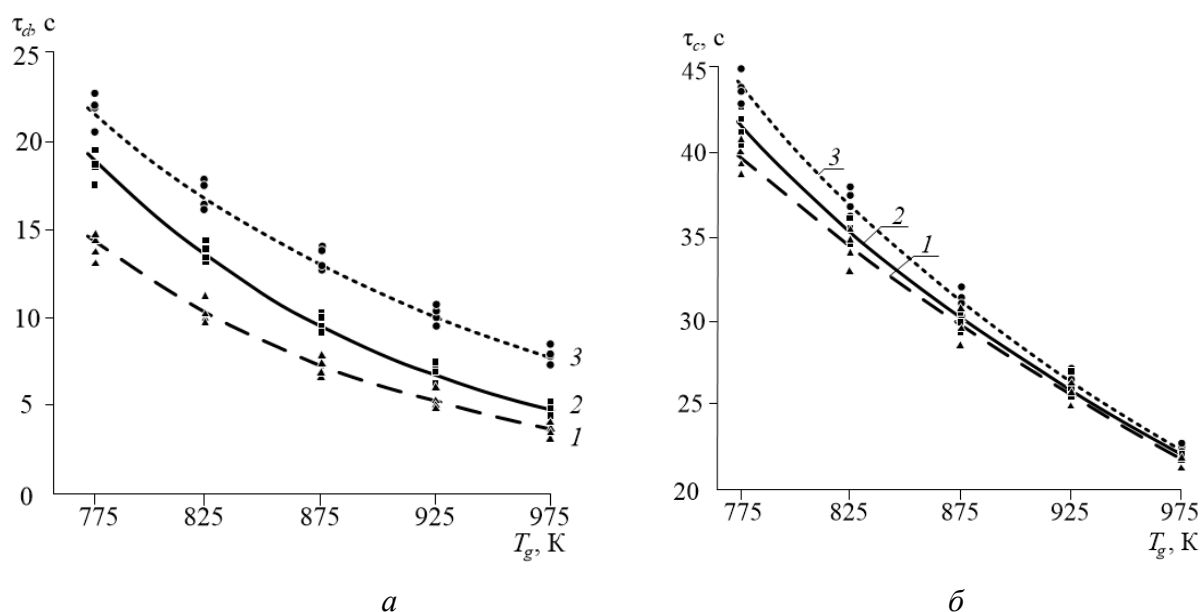


Рис. 9. Зависимости времен задержки зажигания (а) и полного сгорания (б) капель ОВУТ (94,5 % КЕК К (влажный), 5 % отработанное турбинное масло, 0,5 % пластификатор) от температуры окислителя при применении разных держателей: 1 – спай термопары; 2 – металлическая (сталь) проволочка; 3 – керамический стержень ($R_d \approx 1$ мм, $V_g \approx 3$ м/с)

Для расширения компонентной базы выполнен анализ возможности использования воды разного качества при приготовлении органоводоугольных топлив. Установлено, что характеристики зажигания ОВУТ, приготовленных на основе водопроводной, сточных или технологических вод, отличаются незначительно (на уровне погрешностей соответствующих измерений). Как следствие, сделан вывод о правомерности применения воды разного качества в суспензиях ОВУТ.

В заключении подведены основные итоги диссертационных исследований, а также сформулированы соответствующие выводы.

Основные результаты и выводы

1. Определены характерные механизмы и стадии зажигания ОВУТ: инертный прогрев капли, испарение влаги с ее приповерхностного слоя, интенсивное испарение жидкого горючего компонента и термическое разложение органической части угля, газофазная реакция окисления летучих и паров жидкого горючего компонента в разогретом воздухе, прогрев и гетерогенное зажигание коксового остатка. Выделены типичные отличия стадий зажигания ВУТ и ОВУТ. Определены особенности этих стадий при низкотемпературном нагреве.

2. В капле ОВУТ, в отличие от ВУТ, процессы испарения воды и выхода летучих сопровождаются испарением жидкой горючей компоненты. Это приводит к интенсификации процесса зажигания летучих, их более равномерному сгоранию в малой окрестности приповерхностного слоя капли и к выгоранию коксового остатка (практически без явно выраженного локального очага горения).

3. Добавление жидкой горючей компоненты приводит к увеличению длительности полного сгорания органической части топлива. При этом характерные температуры в центре капель топливных композиций (ВУТ и ОВУТ) различаются не более чем на 15–25 К.

4. Необходимые и достаточные для устойчивого зажигания ОВУТ и ВУТ температуры (650–900 К) окислителя (воздуха) существенно ниже традиционно принимаемых (более 1000 К) в энергетических технологиях топливосжигания. Этот результат позволяет сделать вывод о возможной оптимизации расходования энергоресурсов в большой энергетике за счет использования твердых и жидких отходов переработки углей и отработанных нефтепродуктов различных энергоустановок и механизмов.

5. Увеличение концентрации воды в ОВУТ на 5–15 % приводит не только к росту инерционности процесса инициирования горения на 30–40 %, но и уменьшению пороговых (минимальных) температур горения на 20–50 К.

6. Из основных параметров источника нагрева – потока разогретого воздуха доминирующее влияние на времена τ_d и τ_c оказывает температура. Выполненные оценки показали, что определяющая роль T_g обусловлена существенным превы-

шением радиационного теплового потока по отношению к конвективному и кондуктивному на границе «капля – окислитель».

7. Приготовление ОБУТ при помощи гомогенизатора позволяет понизить инерционность процесса зажигания практически в 2 раза в сравнении с использованием шаровой барабанной мельницы. Установлено, что независимо от используемых методик подготовки ОБУТ, существует некоторое оптимальное время приготовления, при превышении которого инерционность зажигания суспензий ОБУТ практически не отличается.

8. В качестве компонента, интенсифицирующего зажигание ОБУТ при более низких температурах внешней газовой среды, целесообразно использовать низкосортные угли с высоким содержанием летучих веществ. Согласно полученным экспериментальным данным, добавка бурого угля (с массовой концентрацией 5 %) в ОБУТ на основе каменного угля приводит к снижению минимальной температуры зажигания на 7–10 %.

9. Выделенные отличия характеристик зажигания и горения для разных компонентных составов ОБУТ минимизируются с ростом температуры окислителя и уменьшением размера капли. Эти экспериментальные результаты иллюстрируют возможность разработки унифицированной технологии сжигания капель ОБУТ разных компонентных составов даже при относительно низких температурах окислителя (менее 1000 K).

Основные публикации по теме диссертации

1. **Vershinina K.Yu.** Minimum temperatures for sustainable ignition of coal water slurry containing petrochemicals / D.O. Glushkov, P.A. Strizhak, K.Yu. Vershinina // **Applied Thermal Engineering**. – 2016. – V. 96. – P. 534–546.
2. **Vershinina K.Yu.** 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.
3. **Vershinina K.Yu.** The ignition parameters of the coal-water slurry droplets at the different methods of injection into the hot oxidant flow / K.Yu. Vershinina,

- R.I. Egorov, P.A. Strizhak // **Applied Thermal Engineering**. – 2016. – V. 107. – P. 10–20.
4. **Vershinina K.Yu.** Ignition Characteristics of Coal–Water Slurry Containing Petrochemicals Based on Coal of Varying Degrees of Metamorphism / K.Yu. Vershinina, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // **Energy & Fuels**. – 2016. – V. 30, № 8. – P. 6808–6816.
 5. **Вершинина К.Ю.** Отличия характеристик зажигания водоугольных суспензий и композиционного жидкого топлива / К.Ю. Вершинина, Д.О. Глушков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // **Химия твердого топлива**. – 2016. – № 2. – С. 21–33.
 6. **Вершинина К.Ю.** Влияние технологии приготовления органоугольных топлив на характеристики их зажигания / К.Ю. Вершинина, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // **Кокс и химия**. – 2016. – № 4. – С. 8–17.
 7. **Вершинина К.Ю.** Прогностическое моделирование газофазного зажигания продуктов термического разложения угля / К.Ю. Вершинина, Д.О. Глушков, П.А. Стрижак // **Химическое и нефтегазовое машиностроение**. – 2015. – № 8. – С. 36–39.
 8. **Вершинина К.Ю.** Характеристики зажигания частиц угля и капель суспензионного топлива при кондуктивном нагреве / К.Ю. Вершинина, Д.О. Глушков, П.А. Стрижак // **Пожаровзрывобезопасность**. – 2015. – Т. 24, № 10. – С. 21–29.
 9. **Vershinina K.Yu.** The influence of organic waste content on characteristics of inert heating and ignition of composite liquid fuel droplets / D.O. Glushkov, A.G. Kosintsev, P.A. Strizhak, K.Yu. Vershinina // **JP Journal of Heat and Mass Transfer**. – 2016. – V. 13, № 1. – P. 81–92.
 10. **Vershinina K.Yu.** Integral Characteristics of Stability of Coal-Water Slurries and Coal-Water Slurries Containing Petrochemicals By Evaluation of Separation Into Layers / M.A. Dmitrienko, G.S. Nyashina, K.Yu. Vershinina, S.Yu. Lyrschikov. – 2016. – **Matec Web of Conferences**. – V. 72. – № 01123. – P. 1–7.