



Валиуллин Тимур Радисович

**Повышение эффективности сжигания композиционного
жидкого топлива на тепловых электрических станциях по
условиям его зажигания**

05.14.14 – Тепловые электрические станции,
их энергетические системы и агрегаты

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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:

Прибатурин Николай Алексеевич, доктор технических наук, профессор
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук» (г. Новосибирск), лаборатория проблем теплопереноса, главный научный сотрудник.

Елистратов Сергей Львович, доктор технических наук, профессор
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (г. Новосибирск), кафедра тепловых электрических станций, профессор.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» (г. Кемерово).

Защита состоится «21» декабря 2017 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 «20» октября 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 212.269.13
кандидат технических наук, доцент



Матвеев Александр
Сергеевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Технологии сжигания композиционных жидких топлив (КЖТ), приготовленных на основе отходов угле- и нефтепереработки, являются перспективными по экологическим, энергетическим и технико-экономическим индикаторам, если их сравнивать с традиционными технологиями пылевидного сжигания углей разного сорта на тепловых электрических станциях (ТЭС). К таким заключениям можно прийти при анализе результатов исследований, полученных за последние 10–15 лет мировым научным сообществом в области сжигания водоугольных (ВУТ) и органоводоугольных (ОВУТ) топлив. В данном направлении значимые научные результаты получили Делягин Г.Н., Бурдуков А.П., Горлов Е.Г., Головин Г.С., Мурко В.И., Сенчурова Ю.А., Елистратов С.Л., Овчинников Ю.В., Бойко Е.Е., Цепенюк А.И., Шихотинов А.В., Татарникова Е.В., Лиштван И.И., Патраков Ю.Ф., Федорова Н.И., Ефремов А.И., Сурков В.Г., Архипов В.А., Алексеенко С.В., Саломатов В.В., Богомолов А.Р., Баранова М.П., Дектерев А.А., Чернецкий М.Ю., Кузнецов Г.В., Сыродой С.В., Вершинина К.Ю., Стрижак П.А., Lee C.H., Liu J., Sakai T., Manwani P., Svoboda K., Kim S.H., Mohapatra S.K., Kijo-Kleczkowska A., Gajewski W., Bartonova L., Zhang H., Han X., Banach M., Zhao X.X., Johnson R. и др.

В обзорных публикациях последних лет, например, [Thermal Engineering. 2016. V. 63. P. 707–717; Fuel. 2017. Vol. 196. P. 69–101; Science of the Total Environment. 2018. Vol. 613–614. P. 1117–1129], посвященных проблемам зажигания жидких и суспензионных топлив, подчеркивается, что создание адекватной теории инициирования горения композиционных топлив затруднено малым объемом достоверных экспериментальных данных. Многие процессы остаются неизученными в полной мере. Как следствие, процесс внедрения таких топлив на современных ТЭС проходит очень медленно. В России, Японии, Индии, Австралии и США имеются лишь испытательные мини-ТЭС и котельные, а в Китае уже несколько десятков котельных и ТЭС переведены на ВУТ. Основная проблема заключается в необходимости определения эффективных условий и соответствующих характеристик зажигания (предельные пороговые температуры зажигания, минимальные времена прогрева, времена выгорания капель топливного аэрозоля, требуемый расход и др.) суспензий ВУТ и ОВУТ для применения последних в качестве основного (вместо угля, мазута

или газа) и/или дополнительного (на этапе розжига) топлива в котельных агрегатах. Переход с угля на суспензионные водосодержащие топлива (особенно с применением типичных отходов углеобогащения) позволит существенно повысить не только экологические индикаторы работы котельных и ТЭС, но и пожаровзрывобезопасность (за счет исключения этапов измельчения и сушки угля).

Наиболее широко распространенным является экспериментальный подход к изучению условий и характеристик зажигания суспензионных топлив, основанный на закреплении одиночной капли (которая после обезвоживания приповерхностного слоя представляет собой скорее частицу, чем каплю) топливной композиции на спае малоинерционной термопары, тонкой металлической проволочке (нити) или керамическом стержне. Основным преимуществом такого подхода является обеспечение возможности контроля температуры, границ и структуры поверхности частицы топлива. Однако при сравнении теоретических и экспериментальных значений интегральных характеристик зажигания ВУТ и ОВУТ (например, времен задержки зажигания, длительностей стадий исследуемых процессов, температур топлива и др.) нередко формулируются выводы о том, что использование керамических нитей, металлических проволочек или спаев термопар (даже очень тонких) может приводить к изменению условий теплопереноса в подвешенных на них каплях топливных композиций. Целесообразно разработать экспериментальную методику, в которой условия теплообмена максимально приближены к топочным камерам котлоагрегатов ТЭС, т.е. обеспечивается витание частицы топливной композиции в высокотемпературном газовом потоке. Такие условия хорошо соответствуют топочным процессам в котельных агрегатах. Известные методики экспериментальных исследований, основанные на распылении КЖТ в топочной камере, не позволяют установить интегральные характеристики зажигания одиночной капли, малой группы капель и потока топлива. Это обусловлено трудностями достоверной видеорегистрации таких процессов (в условиях высоких температур они характеризуются большими скоростями). В диссертационном исследовании предпринята попытка решения сформулированной проблемы за счет создания модельной камеры сгорания из жаропрочного кварцевого стекла и разработки специализированной экспериментальной методики генерации и сброса капель перспективных суспензий ОВУТ и ВУТ.

Цель диссертационной работы – экспериментальное определение условий и характеристик зажигания (с регистрацией соответствующих механизмов и режимов) перспективных для ТЭС суспензий КЖТ (на основе типичных отходов угле- и нефтепереработки в качестве горючих топливных компонентов) при витании в модельной камере сгорания.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработка экспериментальной методики исследования характеристик процесса зажигания одиночных частиц перспективных КЖТ, их малой совокупности и капельного аэрозоля при витании в потоке разогретого воздуха.
2. Создание экспериментального стенда со специализированной модельной камерой сгорания, устройствами подачи частиц топлива, системой бесконтактного контроля скорости и других параметров потока воздуха в камере сгорания, высокоскоростной системой видеорегистрации основных характеристик исследуемых процессов зажигания в условиях, близких к реализуемым в топках котельных агрегатов ТЭС.
3. Приготовление перспективных суспензий КЖТ из отходов угле- и нефтепереработки. Анализ сырьевой базы для развития технологий КЖТ с учетом энергетических, экологических и экономических эффектов в масштабах ТЭС.
4. Определение параметров работы стенда, соответствующих условиям устойчивого зажигания частиц перспективных суспензий КЖТ.
5. Изучение возможных режимов зажигания КЖТ, а также необходимых параметров для их реализации.
6. Определение влияния группы основных факторов (температура и скорость потока нагретого газа, размеры частиц, их форма, концентрация компонентов суспензий КЖТ, взаимодействие частиц между собой) на характеристики (время задержки зажигания и пороговая температура) зажигания КЖТ. Получение соответствующих зависимостей и аппроксимационных выражений. Прогнозирование по результатам экспериментов эффективных условий зажигания КЖТ на ТЭС.
7. Выделение перспективных добавок в КЖТ для варьирования характеристик их зажигания и горения.

8. Установление отличий характеристик зажигания витающей частицы КЖТ от аналогичных характеристик для частицы, расположенной на держателе (спая термопары, проволочке или стержне) в потоке воздуха.
9. Изучение процессов газофазного и гетерогенного зажигания капель КЖТ в контролируемых условиях.
10. Изучение характеристик зажигания малой совокупности витающих частиц КЖТ, а также аэрозоля.
11. Разработка рекомендаций по использованию полученных результатов исследований для развития систем подготовки и сжигания топлив в котельных агрегатах ТЭС.

Научная новизна работы. Предложен новый подход к экспериментальному изучению процессов зажигания частиц КЖТ, отличающийся от известных обеспечением условий витания последних при нагреве и зажигании в среде разогретого воздуха. Установлены условия и характеристики зажигания перспективных суспензий КЖТ в модельной камере сгорания, конструкция которой обеспечивает максимальное (по сравнению с известными экспериментальными подходами) приближение к топочным процессам ТЭС. С использованием разработанной экспериментальной методики проведены нижние оценки времен задержки зажигания КЖТ. Установлены четыре режима зажигания витающих частиц КЖТ, а также влияние группы наиболее значимых факторов на диапазоны изменения параметров, соответствующих этим режимам.

Практическая значимость. Полученные экспериментальные результаты являются основой для развития современных представлений о процессах зажигания и горения капель (частиц) перспективных композиционных жидких топлив в камерах сгорания котельных установок ТЭС. За счет высокоскоростной видеорегистрации особенностей витания капли топлива появляется возможность уточнения и развития современных моделей горения таких топлив. Установленные пороговые значения параметров, достаточные для зажигания витающих частиц КЖТ, необходимые для разработки устройств впрыска аэрозоля в камеры сгорания. С использованием полученных в настоящей работе экспериментальных данных о характеристиках зажигания (предельные температуры, минимальные времена прогрева, времена выгорания

капель топливного аэрозоля, требуемый расход, максимальные температуры горения) перспективных КЖТ можно прогнозировать условия их эффективного применения в качестве основного (вместо угля, мазута или газа) или дополнительного (при розжиге) топлива ТЭС. Получены три акта об использовании результатов исследований предприятиями топливно-энергетического комплекса России. Экспериментальные данные применяются для вовлечения многочисленных отходов углеобогащения и нефтепереработки в топливный цикл с учетом прогнозируемых отличий лабораторных экспериментов от реальных топочных процессов.

Степень достоверности результатов экспериментальных исследований.

Достоверность результатов диссертационных исследований подтверждается выполненными оценками систематических и случайных погрешностей результатов измерений, удовлетворительной повторяемостью опытов при идентичных начальных условиях, использованием современных высокоточных оптических методов и программно-аппаратных комплексов. Проведены дополнительные эксперименты для сравнения характеристик зажигания витающих частиц и расположенных на спае малоинерционной термопары.

Связь работы с научными программами и грантами. Диссертационные исследования зажигания витающих частиц КЖТ выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 15–19–10003). Изучение влияния дополнительных примесей в КЖТ на характеристики процессов их прогрева и зажигания проведено в рамках грантов Президента РФ № МК–6491.2016.8 и НШ–7538.2016.8.

Тематика исследований соответствует приоритетному направлению развития науки, техники и технологий в Российской Федерации (указ Президента РФ № 899 от 7 июня 2011 г.) «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика», а также находится в сфере критических технологий федерального уровня, получивших высокий рейтинг по показателям состояния и перспективам развития («Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе», «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии»), так как применение КЖТ вместо угля позволяет существенно (кратно) снизить концентрации наиболее опасных антропогенных выбросов, полезно утилизировать многочисленные промышленные отходы

(фильтр-кеки, шламы, фусы, смолы, водонефтяные эмульсии и др.), повысить технико-экономические индикаторы сжигания низкосортных угольных топлив, а также пожаровзрывобезопасность за счет исключения самовозгорания последних.

Научные положения, результаты и выводы, выносимые на защиту:

1. Новый подход к экспериментальному изучению условий и характеристик зажигания витающих частиц КЖТ, отличающийся от известных исключением влияния держателя капли (частицы) топлива на ее прогрев и зажигание. Данный подход позволяет приблизить условия эксперимента к топочным процессам ТЭС по витанию частиц топлива в камерах сгорания.
2. При витании частиц суспензий КЖТ в потоке разогретого воздуха возможны четыре режима зажигания, отличающиеся траекториями их движения в камере сгорания, а также длительностями стадий инициирования горения.
3. Времена задержки зажигания витающих частиц КЖТ существенно ниже, чем при их зажигании в потоке на держателе (даже при использовании материала последнего с низкой теплопроводностью). Минимальные (пороговые) температуры зажигания витающих частиц КЖТ выше, чем при их нагреве на держателях.
4. Времена задержки зажигания одиночной частицы КЖТ являются верхними оценками аналогичных параметров для частиц полидисперсного потока топлива, впрыскиваемого в камеру сгорания котлоагрегата ТЭС.
5. За счет использования установленных в проведенных экспериментах характеристик зажигания суспензий КЖТ определены эффективные (по энергетическим, экологическим и экономическим критериям) условия инициирования горения перспективных композиций из числа отходов угле- и нефтепереработки для их сжигания на ТЭС.

Личный вклад автора состоит в формулировании диссертационных задач, планировании экспериментальных исследований, разработке экспериментальной методики, создании стенда с модельной камерой сгорания, разработке основных элементов систем подачи (сброса и впрыска) частиц (одиночных, группы, аэрозоля) топлива и разогретого потока воздуха, проведении опытов, обработке их результатов, апробации последних, оценке систематических и случайных погрешностей, анализе и обобщении экспериментальных данных, разработке рекомендаций прак-

тического использования результатов исследований, формулировке защищаемых положений и выводов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на Всероссийской научной конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск, 2016, 2017), Международной научной конференции «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» (Томск, 2016, 2017), Международном научном симпозиуме «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2016, 2017), Международном форуме «Интеллектуальные энергосистемы» (Томск, 2016, 2017), XXXIII Сибирском теплофизическом семинаре (Новосибирск, 2017), X Всероссийской научной молодежной конференции «Арктика и ее освоение» (Томск, 2017), IX международном семинаре по структуре пламен (Новосибирск, 2017), Международной научной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (Москва, 2017).

Публикации. Основные положения, результаты и выводы диссертационных исследований опубликованы в 19 печатных работах, в том числе 3 – в рецензируемых журналах из списка, рекомендованного ВАК РФ: «Теплоэнергетика», «Кокс и химия». Опубликовано 10 статей в международных рецензируемых журналах, индексируемых базами данных «Web of Science» и «Scopus»: «Energy» (ИФ=4,15), «Energy&Fuels» (ИФ=2,83), «Applied Thermal Engineering» (ИФ=3,04), «Combustion and Flame» (ИФ=4,17), «Thermal Science» (ИФ=1,12), «Matec Web of Conferences». Список основных публикаций приведён в конце автореферата.

Структура и содержание работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы, включающего 160 наименований, содержит 55 рисунков, 16 таблиц, 170 страниц.

Краткое содержание работы

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

В первой главе проанализировано современное состояние теоретических и экспериментальных исследований условий и характеристик зажигания и горения

жидких композиционных топливных суспензий, определены основные достижения в области применения последних в качестве основного и дополнительного топлива ТЭС, нерешенные задачи в данной области, а также проблемы, сдерживающие развитие технологий КЖТ в теплоэнергетике. В результате выполненного анализа отмечены недостатки современных экспериментальных методик исследований процессов зажигания КЖТ и перспективные задачи диссертационных исследований.

Во второй главе описаны разработанные автором диссертации методики проведения исследований, элементы экспериментального стенда, модельной камеры сгорания (для приближения условий инициирования горения к топкам котлоагрегатов ТЭС) и устройств ввода капель КЖТ в последнюю, а также методы оценки погрешностей результатов измерений.

На рис. 1 приведена схема разработанного стенда. Экспериментальная методика основана на вдуве (впрыске, сбросе) одиночной, малой группы (до 3) или большой совокупности (полидисперсный поток) капель КЖТ в камеру сгорания. Капли топлива свободно перемещались (витали) в полости камеры, которая изготовлена из жаростойкого оптически про-

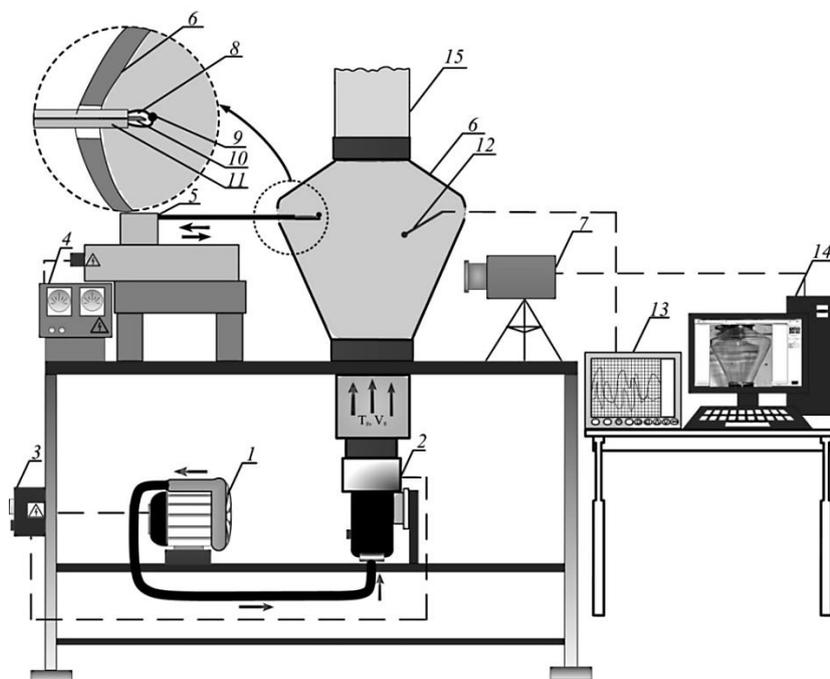


Рис. 1. Схема стенда: 1 – нагнетатель, 2 – воздухонагреватель, 3 – пульт управления, 4 – блок питания и управления координатного механизма, 5 – координатный механизм, 6 – конусообразная камера сгорания из кварцевого стекла, 7 – высокоскоростная видеокамера, 8 – нихромовая проволока, 9 – капля топливной композиции, 10 – режущий элемент, 11 – металлические полые стержни, 12 – термопара, 13 – регистратор температуры, 14 – компьютер, 15 – вытяжной зонт для удаления продуктов сгорания

зрачного кварцевого стекла. Процессы, протекающие в модельной камере сгорания, регистрировались с помощью высокоскоростной (до 10^5 кадров в секунду) системы видеорегистрации (видеокамеры, оптические элементы, кросскорреляционный программно-аппаратный комплекс, программное обеспечение слежения).

Разработана модельная камера сгорания с конусообразными входными и выходными каналами (рис. 1). Такая конструкция камеры позволила за счет изменения давления потока воздуха удерживать каплю (затем и частицу) в заданном диапазоне высот и увеличивать время пребывания частиц КЖТ в камере сгорания. В верхней и нижней частях камеры для выравнивания профиля скорости потока установлены распределительные металлические решетки (размер ячеек 0,5 мм). В связи с необходимостью контроля температуры и сохранения длительного периода времени пребывания витающих частиц топлива (одиночных, совокупности, полидисперсного потока) дополнительно в верхней части конусообразного канала камеры сгорания установлен ограничитель потока воздуха.

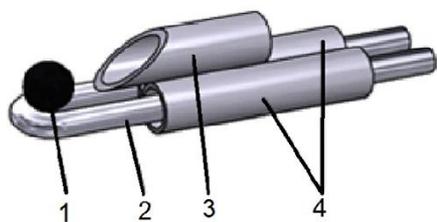


Рис. 2. Устройство подачи в камеру сгорания одиночной капли КЖТ: 1 – капля КЖТ; 2 – нихромовая проволочка; 3 – режущий элемент; 4 – металлические полые стержни



Рис. 3. Устройство подачи в камеру сгорания трех капель КЖТ

Ввод и сброс как одиночной, так и группы из трех капель осуществлялся с применением автоматизированного координатного механизма, с помощью которого перемещался (со скоростью 0,2 м/с) специализированный элемент подачи капли КЖТ (рис. 2). Конструкция устройства подачи капли включала полые металлические стержни (с нихромовой проволочкой и режущей кромкой 3 диаметром $D=0,25$ мм, используемой в качестве толкателя и сброса в камеру сгорания). Капля 1 помещалась на нихромовую проволочку 2, проходящую внутри полых металлических стержней 4. Затем с помощью автоматизированного координатного механизма капля перемещалась через технологическое отверстие модельной камеры сгорания. При достижении капель оси симметрии модельной камеры сгорания нихромовая проволочка 2 (один конец которой жестко закреплен, а второй подвижен) натягивалась и перемещала каплю 1 навстречу режущему элементу 3. Капля отрывалась от держателя и подхватывалась потоком воздуха. Ввод и синхронный сброс группы из трех капель в камеру сгорания осуществлялись с помощью специализированного элемента, который представляет три устройства подачи одиночной капли КЖТ (рис. 2), соединенные между собой (рис. 3). Для сброса группы капель топлива эти металлические элементы были

спаяны под разным углом и с небольшим сдвигом в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Режущий элемент сбрасывал капли с держателей по достижении центра камеры сгорания (во всех опытах контролировалась координата сброса).

На рис. 4 приведена схема камеры сгорания с системой впрыска полидисперсного потока топливной суспензии. Для вдува топливной суспензии использовался Т-образный смеситель 4, в один из каналов которого подавался сжатый воздух 3, а во второй – суспензия КЖТ 5 (рис. 4). Давление воздуха составляло около 150 кПа, используемый объем топлива – около 1,5 мл. Система позволяла генерировать капли топлива различных размеров. Средний начальный радиус капель впрыскиваемого КЖТ изменялся в диапазоне 0,1–1,5 мм. Длительность времени впрыска топлива составляла около 3-6 с. Начальная скорость движения капель топлива на выходе из распылительного отверстия (сопла) поддерживалась около 3 м/с.

В камере сгорания 6 с использованием нагнетателя 1 и нагревателя 2 формировался поток воздуха с заданной температурой T_g и скоростью V_g . Выполненные термопарные измерения показали, что температурное поле в камере сгорания неравномерно. Максимальные значения температуры воздуха фиксировались в окрестностях нижнего

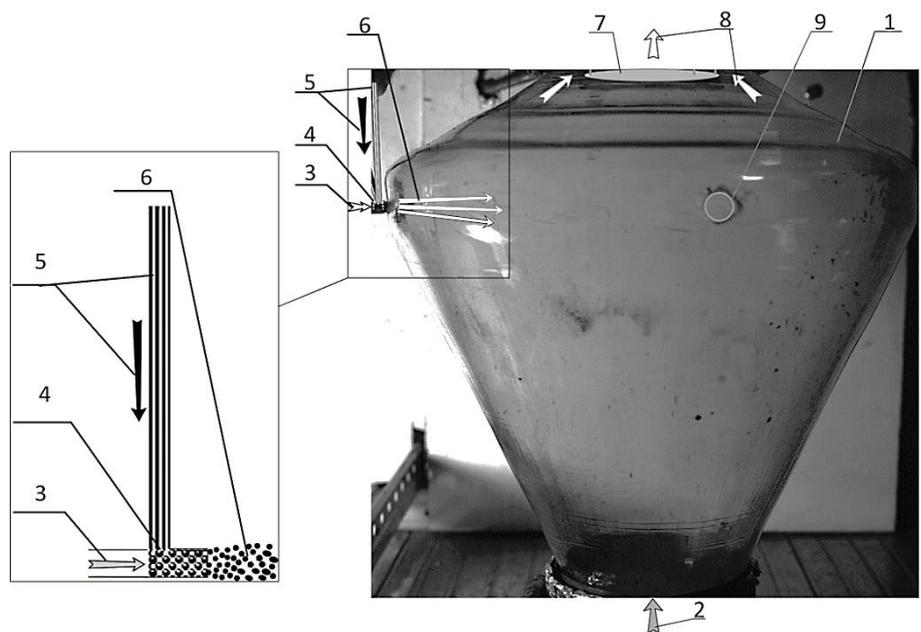


Рис. 4. Камера сгорания с системой впрыска топливной суспензии: 1 – стенка камеры из термостойкого оптически прозрачного кварцевого стекла, 2 – поток разогретого воздуха, 3 – канал подвода сжатого воздуха, 4 – Т-образный смеситель, 5 – канал подвода КЖТ, 6 – поток КЖТ, 7 – ограничитель потока воздуха на выходе, 8 – поток газов на выходе из камеры, 9 – технологическое отверстие для измерения температуры

основания и оси симметрии камеры сгорания, минимальные – вблизи отверстия для ввода капли. Максимальное отличие температур нагретого воздуха в этих областях составило около 4 % относительно значения T_g на входе. Температура в камере сгорания контролировалась хромель-алюмелевой термопарой (диапазон измеряемых

температур 273–1373 К, систематическая погрешность ± 3 К, инерционность не более 3 с), размещенной в технологическом отверстии (диаметр около 0,012 м). Значения температуры воздуха варьировались в диапазоне $T_g \approx 800\text{--}900$ К при скорости движения $V_g \approx 4$ м/с. Эти значения соответствовали температуре и скорости потока воздуха около входного канала (в нижней части) модельной камеры сгорания. Выбор параметров обусловлен необходимостью обеспечения зажигания капель КЖТ в процессе витания.

Для контроля распределения скорости движения потока воздуха в камере сгорания проводились несколько серий экспериментов с применением панорамного метода Particle Image Velocimetry (PIV). При использовании высокоскоростной видеокамеры Phantom Fastcam SA1 (разрешение 1024x1024 пикселей, скорость съемки до 10^5 кадр/с) вычислялся начальный размер капли (для совокупности одиночных, группы из трех частиц, а также полидисперсного потока), регистрировался процесс ее отрыва и траектории движения в камере сгорания. Для контроля времени задержки зажигания применялся специализированный алгоритм программного обеспечения Tema Automotive, позволяющий при непрерывном слежении за объектом контроля определять характерную цветопередачу (по цветовой модели RGB) – интенсивность свечения образца топлива (в процессе зажигания и горения). Равенство градиента цветопередачи RGB Threshold=255 соответствовал белому цвету, 0 – черному. Принималось, что горению образца соответствовал диапазон модели RGB Threshold=220÷255. Время задержки зажигания определялось как интервал от момента помещения капли в камеру до достижения Threshold (в области, соответствующей зажиганию) значения 220 (на любом участке поверхности капли топлива). Таким образом, удалось разработать методику исследований зажигания витающих капель КЖТ, по которой можно прогнозировать отличия характеристик зажигания удерживаемых на держателях капель топливных суспензий, публикуемых исследователями из Китая, Индии, Японии, США и России, от топочных процессов ТЭС.

Во второй главе также приведены результаты технического и элементного анализа основных использованных горючих компонентов КЖТ из числа фильтреков, низкосортных углей, отработанных моторного, турбинного, трансформаторного и компрессорного масел, а также различных добавок и примесей.

В третьей главе представлены основные результаты выполненных экспериментальных исследований. При зажигании капли КЖТ во взвешенном состоянии в потоке воздуха, как правило, регистрировались достаточно сложные траектории их движения. После отрыва капли КЖТ от нихромовой проволоочки происходило ее перемещение под действием силы тяжести вдоль оси симметрии камеры к нижней распределительной решетке. В это время реализовывалось интенсивное испарение жидких негорючего (вода) и горючего (масло, мазут, смола и др.) компонентов, а также происходило термическое разложение органической части угля в приповерхностном слое капли КЖТ. Последнюю в этом состоянии целесообразно считать частицей. Выделенные процессы способствуют быстрому снижению массы и некоторому уменьшению ее размеров. При достижении минимальной массы частицы, соответствующей условиям перехода во взвешенное состояние, начиналось ее витание в потоке воздуха с интенсивным разогревом угля и выделением из него летучих. Частица поднималась в верхнюю часть камеры, как правило, по криволинейной траектории. В большинстве случаев происходило перемещение частицы топлива к периферийным областям камеры и движение вдоль стенок нижнего усеченного конуса. Зажигался коксовый остаток. Затем реализовывалось его интенсивное гетерогенное горение (сопровождалось отчетливо видимым свечением, фиксация которого позволяла вычислять времена задержки зажигания, например, на рис. 5). В сериях проведенных экспериментов иногда наблюдалось разделение твердой частицы КЖТ на фрагменты (эффект диспергирования), которые интенсивно сгорали и образовывались локальные источники горения в различных зонах камеры. В этом случае было достаточно

наблюдалось разделение твердой частицы КЖТ на фрагменты (эффект диспергирования), которые интенсивно сгорали и образовывались локальные источники горения в различных зонах камеры. В этом случае было достаточно

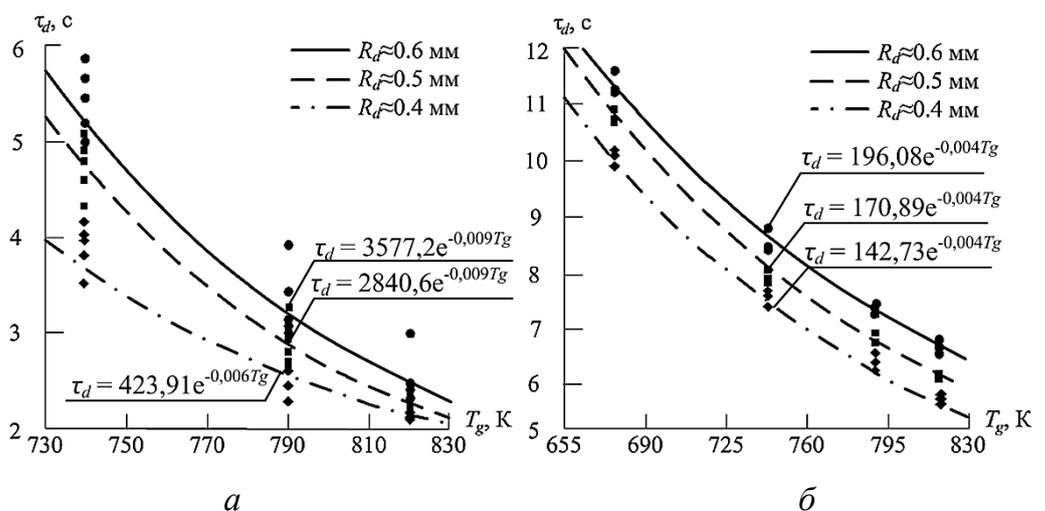


Рис. 5. Зависимости времени задержки зажигания капли КЖТ (50 % бурый уголь, 39 % вода, 10 % отработанное моторное масло, 1 % пластификатор) от температуры воздуха при витании (а) и помещении на спай малоинерционной термопары (б) (при $V_g \approx 4$ м/с)

было достаточно

сложно определить времена задержки зажигания с помощью ПО Tema Automotive, что повлияло на число экспериментов в серии. Указанные физические процессы хорошо соответствуют топочным процессам ТЭС при впрыске топлива. Вследствие температурных ограничений экспериментального стенда в лабораторных опытах не достигались температуры воздуха в камере сгорания, как в реальных условиях на ТЭС (1500–2000 К). Однако именно относительно невысокие температуры (до 1000 К) в камере сгорания позволили зарегистрировать и проанализировать отличия характеристик зажигания при витании капель КЖТ и размещении на держателях.

Установлено, что времена задержки зажигания для режима витания одиночной капли в камере сгорания существенно меньше, чем в условиях расположения на спае термопары (рис. 5). Так, например, при идентичном радиусе капли и температуре около 790 К расхождение во временах задержки зажигания составляет около 2 с (в целом для всех исследованных топлив отличия достигали 30–40 %). Разница между временами τ_d для рассмотренных режимов с уменьшением температуры воздуха существенно увеличивается. Этот эффект можно объяснить тем, что при расположении капли топлива на спае термопары ее прогрев и зарождение локального очага горения во всех экспериментах более интенсивно происходили на участке поверхности со стороны набегающего потока воздуха. Концентрация последнего, его температура и скорость движения максимальны именно в этой области (по сравнению с боковой поверхностью капли и ее следом). В случае витания капли происходило ее вращение, и она прогревалась более равномерно по всей поверхности. Быстрее реализовывались процессы испарения и термического разложения.

Из рис. 5 также видно, что при увеличении размера капли времена задержки зажигания возрастают как в стационарном положении, так и в режиме витания. Чем больше начальный размер капли КЖТ, тем существеннее отличаются интегральные характеристики зажигания. Если сравнить времена задержки для частицы радиусом $R_d \approx 0,6$ мм на рис. 5, то при температурах около 790 К значения τ_d могут отличаться более чем в 2 раза. Такие большие отличия были только в опытах с высокорекреакционными топливами. Полученные результаты (рис. 5) соответствуют современным представлениям о возможных подходах к интенсификации процессов тепломассообмена при гетерогенном горении и газификации в случае перехода, например, от

слоевого сжигания топлива в котельных агрегатах к факельному или от газификации в плотном слое к кипящему. За счет более интенсивного теплообмена при обтекании капли топлива воздухом происходит ее быстрое подсушивание (превращение в частицу), разогрев с выделением летучих веществ и гетерогенное горение частицы. В условиях же витания частицы топлива отсутствуют стоки тепла к термопаре или керамической нити при условиях стационарного расположения капли. Поэтому предельные температуры зажигания витающих частиц выше на 20–90 К.

Видеограммы проведенных экспериментов показали, что форма частицы КЖТ существенно влияет на траекторию ее перемещения в камере сгорания (рис. 6). Для сферических частиц характерны относительно небольшие (по продольным и поперечным размерам) области перемещения в камере сгорания. Частицам в форме эллипсоида и многогранника характерны существенно большие по размерам (в несколько раз) области перемещения. Видеограммы проведенных экспериментов показали, что для таких

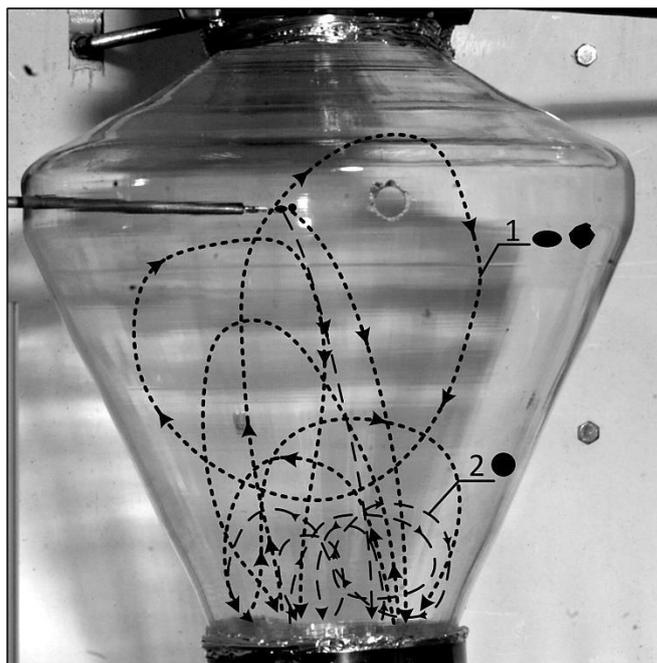


Рис. 6. Типичные треки перемещения частиц КЖТ разной формы (1 – эллипсоид и многогранник, 2 – сфера) при зажигании в модельной камере сгорания

частиц свойственно закручивание потоком. Как следствие, частица получает дополнительный импульс и ускоряется. Поэтому треки для частиц таких форм имеют большие протяженности по сравнению с треками сфер. Очевидно, что сферы также могут вращаться относительно своего центра масс при движении в камере сгорания (рис. 6). За счет меньшего аэродинамического сопротивления скорость вращения в несколько раз ниже, чем для эллипсоида и многогранника.

Выделенный эффект вращательного (относительно собственного центра масс) движения частиц в форме эллипсоида и многогранника, скорее всего, является одной из основных причин их более интенсивного зажигания по сравнению со сферическими частицами (возрастают относительные скорости движения частицы и потока воздуха). В частности, приведенные на рис. 7 времена задержки зажигания пока-

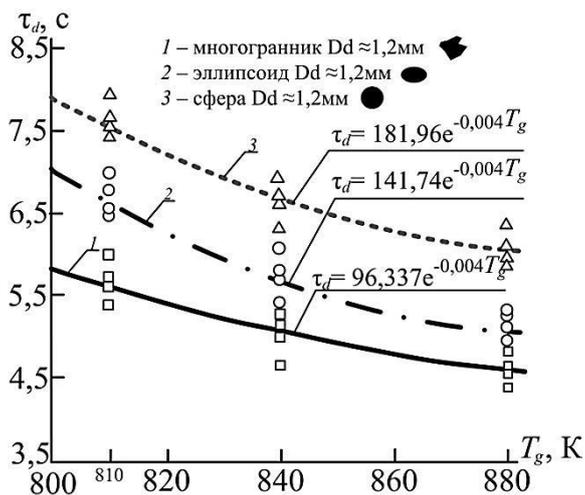


Рис. 7. Времена задержки зажигания КЖТ (90% влажный фильтр-кек К, 10% отработанное моторное масло) от температуры воздуха при варьировании формы частицы

зывают, что значения τ_d могут отличаться для исследованных форм частиц на 25–35 %. В соответствии с современными представлениями о теплообмене газовых сред и тел с различной конфигурацией поверхности можно заключить, что для многогранников характерны максимальные аэродинамические коэффициенты сопротивления по сравнению со сферой. Эллипсоиду свойственны средние значения этого коэффициента относительно сфер и многогранников. С ростом силы аэродинамического сопротивления увеличиваются силы инерции и трения. Интенсифицируется теплообмен с потоком воздуха, уменьшаются длительности выделенных выше стадий зажигания и времена τ_d в целом.

Полидисперсный поток КЖТ представляет многофазную дисперсную среду, состоящую из смеси паров воды, горючей жидкости, летучих и твердых угольных частиц. Особенностью зажигания и горения частиц полидисперсного потока КЖТ, витающих в потоке воздуха, является существенное отличие скоростей и температур в камере, которое связано с неравномерным распределением размеров и различных конфигураций частиц КЖТ. Для полидисперсного потока, впрыскиваемого в камеру сгорания КЖТ, характерно формирование агломератов разных форм, что приводит к довольно значительным колебаниям значений измеряемого параметра – времени задержки зажигания.

Наряду с этим в экспериментах методом PIV зарегистрированы дополнительные вихревые течения газовой среды в результате совместного вдува воздуха вместе с потоком КЖТ, что также способствовало незначительному уменьшению температуры воздуха (на 20 К). Разброс экспериментальных значений времен задержки зажигания отдельных капель (частиц) КЖТ в группе (из трех) составляет около 1,5 с, что обусловлено, скорее всего, их соударением со стенками камеры сгорания. Выделенные на рис. 8 области и положения кривых для одиночной капли в пределах этих областей иллюстрируют слабое влияние соседних капель в группе на характеристики зажигания. Столкновение капель друг с другом в малой совокупности не оказы-

вало существенного влияния на параметры зажигания в связи с низкой вероятностью их соударений. В реальных топочных камерах, где применяются полидисперсные капельные потоки, этот эффект целесообразно учитывать.

Рис. 9 иллюстрирует времена задержки зажигания витающей капли, группы из трех капель и малых (в результате разрушения группы из трех капель) частиц в зависимости от их начальных размеров ($R_d=0,5-0,75$ мм) при $T_g \approx 840$ К и $V_g \approx 4$ м/с. Отклонение размеров капель топлива на 10–15 % относительно $R_d \approx 0,6$ мм приводит к изменению τ_d на 0,5–1 с. Это сопоставимо с изменениями τ_d , обусловленными варьированием температуры воздуха (рис. 8).

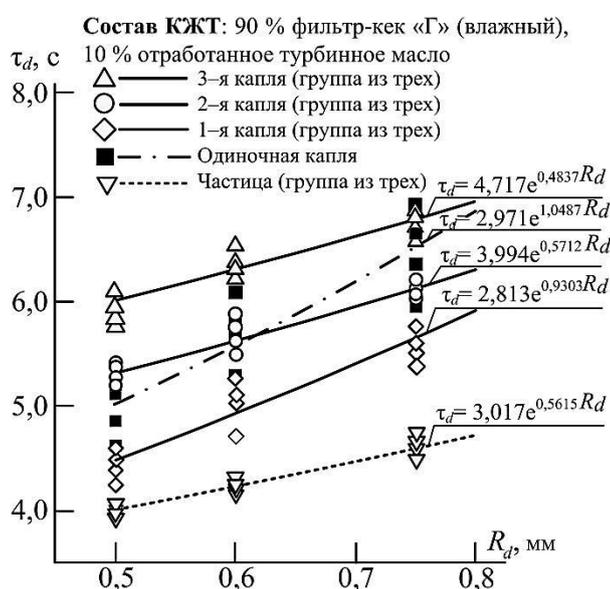


Рис. 9. Зависимости времен задержки зажигания одиночной капли, группы из трех капель, малых частиц (в результате разрушения группы капель) КЖТ от их размеров при $T_g \approx 840$ К и $V_g \approx 4$ м/с

составов КЖТ 1 и 2 отличия τ_d при $T_g \approx 810$ К составили до 10 %, а при $T_g \approx 870$ К достигали 20 %. Это обусловлено более длительным прогревом коксового остатка.

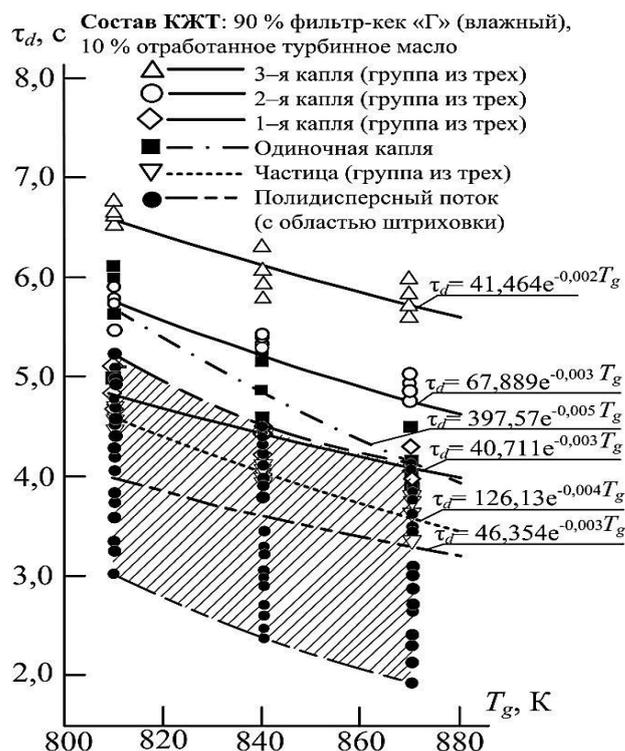


Рис. 8. Зависимости времен задержки зажигания одиночной капли, группы из трех капель, малых частиц (в результате разрушения группы капель) и полидисперсного потока КЖТ от температуры воздуха при $R_d \approx 0,5$ мм и $V_g \approx 4$ м/с

Кривые на рис. 10 иллюстрируют влияние компонентного состава КЖТ на интегральные характеристики процесса зажигания одиночных витающих капель в модельной камере сгорания в зависимости от температуры воздуха (810–900 К).

Установленные отличия τ_d связаны с использованием разных компонентов КЖТ: углей (каменного марки «Д» и бурого марки «Б2»), фильтр-кека К, различных горючих жидкостей (отработанного турбинного, автомобильного, компрессорного масел). Для

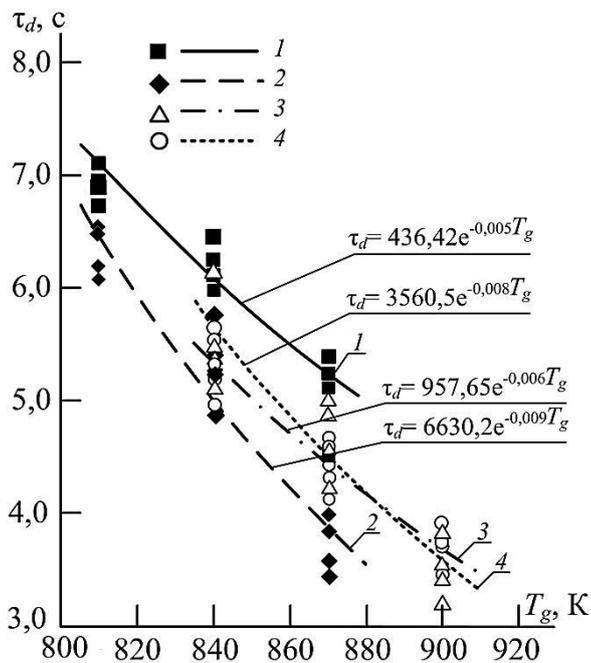


Рис. 10. Зависимости времен задержки зажигания одиночных капель КЖТ различных составов от температуры воздуха в камере сгорания (1 – 10% уголь Б2, 30% уголь Д, 10% отработанное компрессорное масло, 50% вода; 2 – 40% уголь Б2, 10% отработанное турбинное масло, 50% вода; 3 – 90% влажный кек К, 10% отработанное автомобильное масло; 4 – 90% влажный кек К, 10% турбинное масло)

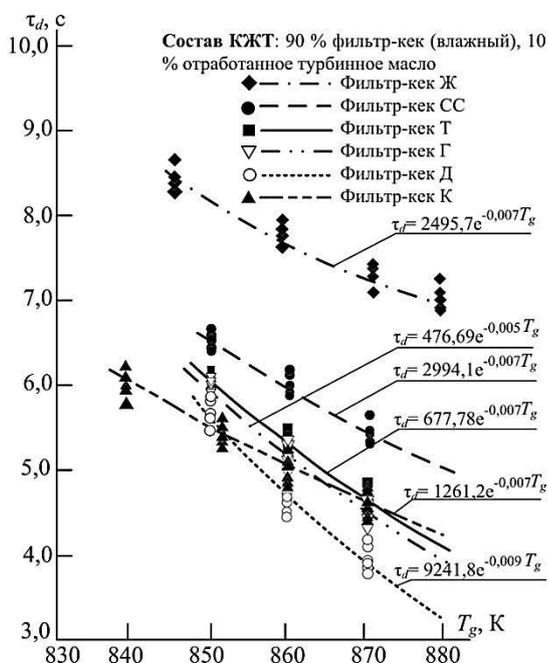


Рис. 11. Времена задержки зажигания капель ($R_d \approx 0,75$ мм) КЖТ на основе фильтр-кеков разных марок в зависимости от температуры воздуха ($V_g \approx 4$ м/с)

Снижение инерционности зажигания КЖТ возможно при добавлении в суспензии высокорреакционных каменного и бурого углей. Бурые угли характеризуются минимальными температурами термического разложения и зажигания (по сравнению с каменными), высоким содержанием летучих веществ, сгорание которых способствует ускоренному прогреву и зажиганию коксового остатка.

Времена задержки зажигания составов КЖТ на основе фильтр-кека К с добавлением турбинного и автомобильного отработанных масел имеют достаточно близкие значения (рис. 10). Несмотря на это, установленные отличия, скорее всего, обусловлены различиями свойств использованных жидких нефтепродуктов (в частности, температур зажигания). Проведенные эксперименты также иллюстрируют целесообразность добавления в суспензии отработанных масел разного происхождения для улучшения характеристик зажигания и повышения теплоты сгорания топлива. Для капель суспензий КЖТ, приготовленных на основе отходов обогащения углей разных марок, получены зависимости времени задержки зажигания от температуры воздуха в камере сгорания. С ростом температуры интенсифицируется протекание физико-химических превращений на поверхности и в глубинных слоях капли топлива (испарение влаги и жидкого нефтепродукта, выход летучих, окисление продуктов термического

разложения угля и паров масла в газовой фазе, прогрев и гетерогенное зажигание углерода). Поэтому рост температуры в камере сгорания в диапазоне 840–880 К приводил к уменьшению длительности инициирования горения коксового остатка на 15–25 % (рис. 11). Как показали выполненные эксперименты, для капель КЖТ, приготовленных на основе разных фильтр-кеков, характерна существенно отличающаяся инерционность зажигания. Это связано с отличиями свойств данных компонентов. Максимальные времена задержки зажигания зарегистрированы для составов на основе фильтр-кеков «СС» и «Ж» (рис. 11). Они, несмотря на достаточно низкую влажность, характеризуются высокой (более 50 %) зольностью. Поэтому доля способного к реагированию вещества у данных компонентов сравнительно мала по сравнению с другими фильтр-кеками, что приводит к увеличению времени задержки зажигания КЖТ на основе фильтр-кеков «СС» и «Ж» (особенно при температурах, близких к пороговым – минимальным). Кривые на рис. 11 иллюстрируют также достаточно близкие времена задержки зажигания составов КЖТ, полученных на основе отходов обогащения каменных углей марок «К», «Д», «Г», «Т».

Фильтр-кеки марок «Г» и «Д», несмотря на большую долю воды в составе, характеризуются относительно низкой зольностью и имеют высокую долю летучих, горение которых интенсифицирует прогрев и зажигание коксового остатка. Для фильтр-кеков «К» и «Т», несмотря на небольшое количество летучих, характерны низкая зольность и влажность органической массы, что также способствует ускоренному прогреву и зажиганию.

Изменение концентрации отдельных компонентов в составе КЖТ оказывает значительное влияние на инерционность зажигания полученной суспензии. Рис. 12 иллюстрирует существенное снижение времен задержки зажигания КЖТ на основе бурого угля при увеличении в составе суспензии

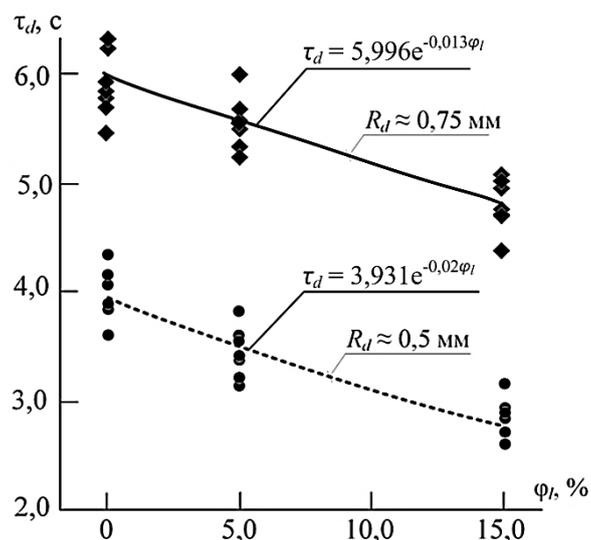


Рис. 12. Времена задержки зажигания капель КЖТ (45 % бурый уголь, 55...50...40 % вода, 0...5...15 % отработанное турбинное масло) в зависимости от массовой концентрации жидкого горючего компонента ($T_g \approx 850$ К, $V_g \approx 4$ м/с)

концентрации отработанного турбинного масла. Горение паров масла интенсифицирует прогрев коксового остатка, снижая тем самым длительность инициирования его гетерогенного зажигания. Кроме того, интенсивное парообразование жидкого горючего компонента способствует диспергированию твердых частиц и эффекту «микровзрывов» – быстрого выхода паров нефтепродукта и летучих компонентов через поры частицы КЖТ, что приводит к увеличению площади реакционной поверхности и более ускоренному прогреву коксового остатка.

Проведенные исследования показали, что отработанное турбинное масло по сравнению с другими рассмотренными жидкими нефтепродуктами (отработанными автомобильным, компрессорным, трансформаторным маслами, мазутом, водонефтяной эмульсией), оказывает заметное влияние на зажигание топливных суспензий (снижает инерционность). Это, скорее всего, обусловлено невысокими значениями теплоты парообразования, температуры вспышки и зажигания данного компонента. Следует отметить, что при использовании других (с повышенными значениями указанных параметров) жидких горючих нефте-

продуктов в составе КЖТ на основе высокорекреационного бурого угля возможно и увеличение инерционности зажигания. Снижение времени задержки зажигания витающей капли КЖТ зарегистрировано также при увеличении концентрации угольной пыли в составе суспензии (рис. 13). Дополнительное введение 5 % бурого угля в состав суспензии приводило к снижению инерционности зажигания полученного топлива на 15–25 % (рис. 13). Такое существенное снижение времени задержки зажигания при сравнительно небольшом изменении компонентного состава топлива обусловлено двумя взаимосвязанными факторами. Во-первых, с увеличением доли угля возрастает общая горючая масса (в том числе концентрация реакционных летучих компонентов). Во-вторых, снижается

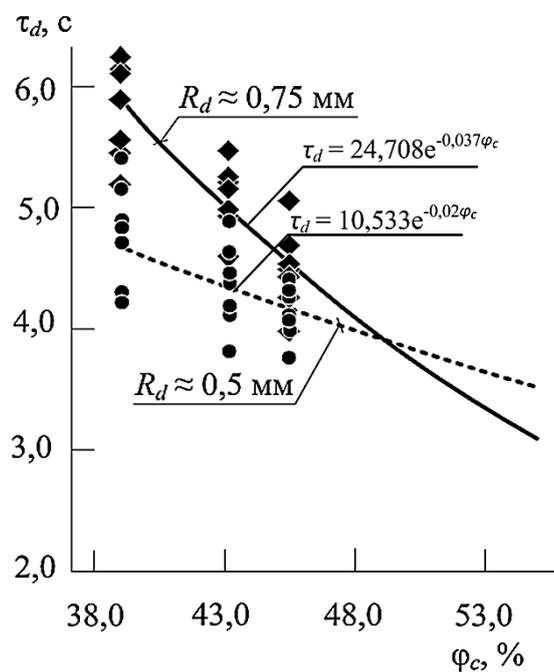


Рис. 13. Времена задержки зажигания капель КЖТ (39...43...45 % бурый уголь, 51...47...45 % вода, 10 % отработанное турбинное масло) в зависимости от массовой концентрации твердого горючего ($T_g \approx 825$ К, $V_g \approx 4$ м/с)

доля воды в составе суспензии, испарение которой является наиболее энергоемким (теплота парообразования около 2 МДж/кг) процессом в рассматриваемой системе. Поэтому при увеличении доли воды в составе суспензии наблюдалось значительное увеличение времени задержки зажигания каплей КЖТ в камере сгорания. Для состава на основе бурого угля с ростом концентрации воды от 40 % до 50 % длительность инициирования горения возрастала на 30–35 %. Пары воды в малой по толщине окрестности капли и в порах приповерхностного слоя препятствуют испарению жидкого нефтепродукта и термическому разложению органической массы угля и замедляют прогрев топлива. Однако при росте температуры в камере сгорания (особенно в диапазоне свыше 850 К) увеличение концентрации воды оказывает менее значительное влияние на процесс зажигания.

Установленные зависимости

$\tau_d(T_g)$ (рис. 14) иллюстрируют снижение инерционности зажигания при уменьшении размеров частиц твердого горючего компонента КЖТ. При изменении тонины помола бурого угля от 200 мкм до 40 мкм инерционность зажигания топлива снижалась на 15–25 % в диапазоне температур греющей среды 810–870 К, поскольку с уменьшением размера угольных частиц процессы их нагрева, термического раз-

ложения и зажигания протекают быстрее. Однако значительное уменьшение тонины помола угля в целях снижения инерционности зажигательной композиции, скорее всего, будет нецелесообразно при сжигании КЖТ в энергетических котельных агрегатах, что обусловлено, в первую очередь, увеличением затрат на приготовление топлива. Поэтому варьирование тонины помола следует выполнять с учетом комплексной целесообразности изменения инерционности процессов зажигания.

Аналогичные заключения можно сделать по результатам, полученным в экспериментах с варьированием компонентного состава КЖТ, в том числе с добавлени-

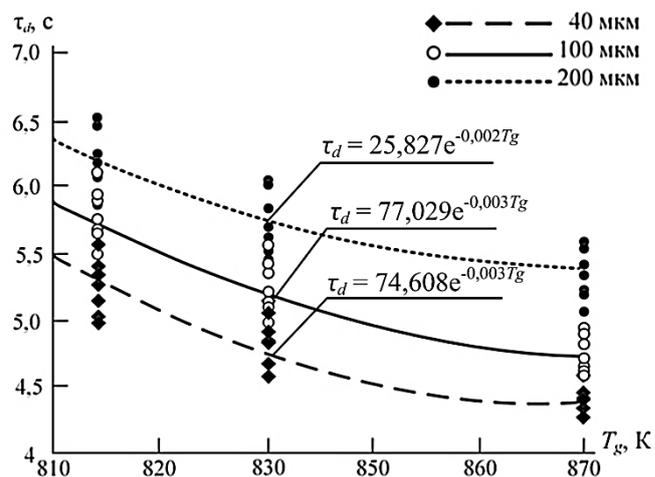


Рис. 14. Времена задержки зажигания каплей КЖТ (40 % бурый уголь, 50 % вода, 10 % отработанное турбинное масло) в зависимости от температуры воздуха при разной тонины помола твердого компонента ($R_d \approx 0,75$ мм и $V_g \approx 4$ м/с)

ем растительных примесей (в частности, рапсового масла). Вклад этих факторов можно усилить или минимизировать при варьировании условий сжигания КЖТ. В настоящей диссертационной работе были получены результаты, иллюстрирующие большие перспективы применения в теплоэнергетике низкотемпературного (менее 1000 К) режима сжигания. Последний представляет значительный интерес, так как позволяет минимизировать антропогенную нагрузку угольных тепловых электрических станций и котельных на окружающую среду.

При изучении вопроса возможного использования КЖТ в качестве основного и дополнительного (на этапе розжига) топлива ТЭС определены необходимые (пороговые) условия витания с последующим зажиганием частиц КЖТ (температура выше 640 К, скорость потока воздуха более 4 м/с), два режима витания в центральной и пристеночной области камеры, четыре режима зажигания частиц КЖТ, отличающиеся в 2-3 раза временами инициирования горения. Показано, что пороговые температуры и времена задержки зажигания полидисперсного потока КЖТ меньше на 20-30 % относительно аналогичных характеристик для одиночных капель (для высокорекреационных топлив отличия могут быть более чем в два раза). Процессы столкновений частиц между собой и со стенками камер сгорания приводят к существенной интенсификации прогрева и зажигания КЖТ (времена задержки зажигания могут снижаться на 60-70%). Полученные в диссертационной работе характеристики зажигания одиночных частиц КЖТ являются верхними оценками реальных характеристик этих процессов при применении полидисперсных потоков топливных суспензий в теплоэнергетических установках (в зависимости от свойств топливных суспензий завышение характеристик может достигать 30-40 %). По результатам анализа установленных времен задержки зажигания можно рекомендовать оптимальные условия впрыска КЖТ в камеру сгорания котельных агрегатов ТЭС.

В заключении выделены ключевые результаты выполненных экспериментов, определены перспективные направления дальнейших исследований, а также сформулированы выводы по проделанным опытам, оценкам и вычислениям.

Основные результаты и выводы

1. Разработана методика проведения экспериментов, отличающаяся от известных существенно более адекватным воспроизведением процессов зажигания капель композиционных жидких топлив в топках котельных установок ТЭС.

2. Создан экспериментальный стенд и несколько узлов сброса одиночных частиц, их малой совокупности, а также впрыска топливного аэрозоля в камеру сгорания.
3. Определены необходимые условия витания частиц КЖТ, приготовленных на основе перспективных для ТЭС компонентов из числа отходов угле- и нефтепереработки.
4. Установлены два режима витания частицы КЖТ, отличающиеся траекториями перемещения в камере сгорания (для максимального приближения к условиям, соответствующим топкам ТЭС), а также основными характеристиками прогрева и инициирования горения.
5. Выделены четыре режима зажигания частиц перспективных КЖТ, отличающиеся временами инициирования горения, закономерностями прогрева, изменением структуры поверхности частиц топливных суспензий.
6. Определены численные значения основных характеристик зажигания перспективных КЖТ (на основе отходов угле- и нефтепереработки) в условиях, соответствующих топочным процессам ТЭС: времена задержки зажигания, пороговые температуры.
7. Установлено влияние группы факторов (температуры, размеров капель, тонины помола, концентрации и свойств компонентов и т.д.) на характеристики зажигания большой группы композиционных жидких топлив.
8. Определены отличия характеристик зажигания в условиях витания капель КЖТ от экспериментов с их закреплением на держателе.
9. Проведено сравнение характеристик зажигания одиночной частицы КЖТ, их малой совокупности и аэрозоля топлива. Пороговые температуры и времена задержки зажигания полидисперсного потока КЖТ иллюстрируют минимальные значения этих параметров в условиях, соответствующих топочным процессам. Показано, что процессы столкновений частиц между собой и со стенками камер сгорания приводят к существенной интенсификации прогрева и зажигания потока КЖТ. Полученные в диссертационной работе характеристики зажигания одиночных частиц КЖТ являются верхними оценками реальных характеристик этих процессов при применении полидисперсных потоков топливных суспензий в котельных установках ТЭС.
10. Разработаны рекомендации по использованию результатов исследований для повышения энергетических, экологических и технико-экономических индикаторов работы ТЭС при производстве тепловой и электрической энергии, а также рекомендации по дальнейшему развитию сформулированного в диссертации подхода.

Основные публикации (статьи) по теме диссертации

1. **Valiullin, T. R.** Effect of small amount of aluminum on the combustion of the waste derived coal-water slurry / T. R. Valiullin, R. I. Egorov, P. A. Strizhak // *Energy&Fuels*. – 2016. – Vol. 31, No.1. – P. 1044–1046.
2. **Valiullin, T. R.** Ignition of the soaring droplet sets of waste-derived coal-water slurry with petrochemicals / T. R. Valiullin, M. A. Dmitrienko, S. A. Shevyrev, R. I. Egorov // *Matec Web of Conferences*. – 2016. – Vol. 72, No. 01121. – P. 1–5.
3. **Valiullin, T. R.** Combustion of the coal-water slurry doped by combustible and non-combustible micro-particles / R. I. Egorov, T. R. Valiullin, P. A. Strizhak // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – Vol. 113. – P. 1021–2023.
4. **Valiullin, T. R.** New approach to study the ignition processes of organic coal-water fuels in an oxidizer flow / T. R. Valiullin, M. A. Dmitrienko, P. A. Strizhak // *EPJ Web of Conferences*. – 2016. – Vol. 110, No. 01055. – P. 1–7.
5. **Валиуллин, Т. Р.** Зажигание капли органоводоугольного топлива при витании в потоке разогретого воздуха / Т. Р. Валиуллин, П. А. Стрижак, С. А. Шевырев, А. Р. Богомолов // *Теплоэнергетика*. – 2017. – №1. – С. 71.
6. **Valiullin, T. R.** Low temperature combustion of organic coal-water fuel droplets containing petrochemicals while soaring in a combustion chamber model / T. R. Valiullin, P. A. Strizhak, S. A. Shevyrev // *Thermal Science*. – 2017. – Vol. 21, No. 2. – P. 1057–1066.
7. **Валиуллин, Т. Р.** Особенности зажигания витающих капель органоводоугольных топлив, приготовленных из типичных отходов угле- и нефтепереработки / Т. Р. Валиуллин, К. Ю. Вершинина, Д. О. Глушков, С. А. Шевырев // *Кокс и химия*. – 2017. – № 5. – С. 40–48.
8. **Valiullin, T. R.** Effect of macroscopic porosity onto the ignition of the waste-derived fuel droplets / D. V. Antonov, T. R. Valiullin, R. I. Egorov, P. A. Strizhak // *Energy*. – 2017. – Vol. 119. – P. 1152 – 1158.
9. **Valiullin, T. R.** Combustion of the waste-derived fuel compositions metallized by aluminum powder / T. R. Valiullin, R. I. Egorov, P. A. Strizhak // *Combustion and Flame*. – 2017. – Vol. 182. – P. 14–19.
10. **Валиуллин, Т. Р.** Предельные условия зажигания органоводоугольных топлив, приготовленных на основе фильтр-кеков / Т. Р. Валиуллин, К. Ю. Вершинина, С. Ю. Лырщиков, С. А. Шевырев // *Кокс и химия*. – 2017. – № 3. – С. 43–49.
11. **Valiullin, T. R.** Influence of the shape of soaring particle based on coal-water slurry containing petrochemicals on ignition characteristics / T. R. Valiullin, P. A. Strizhak // *Thermal Science*. – 2017. – Vol. 21, No. 3. – P. 1399–1408.
12. **Valiullin, T. R.** Perspectives of usage of the rapeseed oil for doping of the waste-based industrial fuel / T. R. Valiullin, R. I. Egorov, P. A. Strizhak // *Energy&Fuels*. – 2017. – Vol. 31, No. 9. – P. 10116–10120.