

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

На правах рукописи

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук, доцент
Стрижак П.А.

Томск – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

	С.
ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ПРОЦЕССАХ ЗАЖИГАНИЯ И ГОРЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ЖИДКИХ ТОПЛИВ НА ТЭС.....	
1.1. Развитие представлений об использовании суспензионных угольных топливных композиций на ТЭС.....	19
1.2. Перспективные для ТЭС технологии приготовления водоугольных и органоводоугольных топлив, их основные компоненты.....	22
1.3. Теоретические и экспериментальные исследования зажигания и горения капель композиционных жидких топлив.....	25
Выводы по первой главе.....	42
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	
2.1. Перспективные для ТЭС компоненты суспензионных топлив и их свойства.....	43
2.2. Методика приготовления топливных композиций.....	47
2.3. Экспериментальный стенд и методика исследования процессов зажигания и горения витающих частиц композиционного жидкого топлива.....	48
2.4. Ввод и сброс капель жидкого композиционного топлива в модельную камеру сгорания.....	60
Выводы по второй главе.....	64
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ЗАЖИГАНИЯ ВИТАЮЩИХ КАПЕЛЬ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ДЛЯ ТЭС ЖИДКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ТОПЛИВ.....	
3.1. Условия и характеристики, соответствующие различным режимам	66

вигания, зажигания и горения капель перспективных композиционных жидких топлив	66
3.2. Отличия характеристик зажигания композиционного жидкого топлива при вигании капли и ее удерживании на стержне, проволочке, спале термопары.....	79
3.3. Влияние формы витающей частицы композиционного жидкого топлива на интегральные характеристики зажигания.....	88
3.4. Влияние компонентного состава на характеристики зажигания жидкого композиционного топлива	97
3.4.1. Роль основных компонентов (твердого горючего, жидкого горючего и негорючего).....	97
3.4.2. Закономерности зажигания композиционного топлива при добавлении порошка алюминия	105
3.4.3. Применение растительных добавок в составе композиционных жидких топлив.....	112
3.4.4. Предельные условия и основные характеристики газофазного и гетерогенного зажигания перспективных композиционных топлив.....	117
3.5. Зажигание малой совокупности капель и топливного аэрозоля композиционного жидкого топлива	127
3.6. Анализ последствий столкновений витающих капель композиционного жидкого топлива.....	135
3.7. Рекомендации по развитию сформулированного в диссертации подхода и использованию результатов исследований для повышения эффективности сжигания КЖТ на ТЭС.....	141
Выводы по третьей главе.....	145
ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	150
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	151
ЛИТЕРАТУРА.....	153

ВВЕДЕНИЕ

Мировой топливный энергетический комплекс в последние годы характеризуется нестабильными этапами развития. Это связано с колебанием цен на нефтяном рынке [1], а также сложным международным регулированием в области объемов ее добычи (табл. 1) и переработки [2]. Этот фактор влияет на баланс потребления других энергоресурсов (газ и уголь), а также возобновляемых источников энергии, что определяет сложно прогнозируемую мировую тенденцию развития сырьевой продукции.

Таблица 1. Мировое производство сырой нефти по странам [2]

Страна	Добыча сырой нефти (1000 бар/день)	
	2014	2015
Саудовская Аравия	9712,7	10192,6
Россия	10087,5	10111,7
США	8707,6	9430,8
КНР	4208,3	4273,7
Иран	3117,1	3151,6
ОАЭ	2794,0	2988,9
Ирак	3110,5	3504,1
В мире	73330,7	75079,8

Комментарий: по данным OPEC Annual Statistical Bulletin, 2016. 28 p.

Основной причиной такой непростой ситуации в данной сфере стал мировой финансовый кризис в 2008 г., а также валютный кризис 2014–2015 гг., которые ухудшили международную экономическую ситуацию. В ближайшей перспективе по оценкам экспертов [3–6] прогнозируется увеличение добычи угля (табл. 2), что связано с внушительными запасами крупных угольных бассейнов и месторождений. К 2020 г. объемы использования угля могут вырасти до рекордных 10 500 млн. т. (табл. 2). При этом значительная часть добытого угля

перерабатывается (обогащается). В результате такой обработки образуются миллионы тонн высокозольных отходов, фильтр-кеков и шламов (табл. 3).

Таблица 2. Мировой объем добычи каменного и бурого углей

Страна	Статистические данные, млн. т. [3–6]			Прогноз, млн. т. [7]		
	2009	2011	2013	2020	2032	2044
Китай	1 486,5	1 758,0	1 840	–	–	–
США	540,8	556,1	500,5	–	–	–
Индия	210,8	215,7	228,8	–	–	–
Индонезия	157,6	217,3	258,9	–	–	–
Австралия	232,9	232,5	269,1	–	–	–
Россия	142,1	158,5	165,1	–	–	–
В мире	–	–	–	10 500	11 500	12 000

Таблица 3. Мировые запасы отходов обогащения каменных углей

Страна	Статистические данные, млн. т. [3–6]		Прогноз, млн. т. [7]		
	2011	2013	2020	2032	2044
Китай	154,7	161,9	–	–	–
США	48,9	44	–	–	–
Индия	18,9	20,1	–	–	–
Индонезия	19,1	22,8	–	–	–
Австралия	25,6	29,6	–	–	–
Россия	13,9	14,5	–	–	–
В мире	–	–	924	1 012	1 056

Данные приведены с учетом объемов добычи угля (табл. 2)

Одновременное увеличение объемов потребления нефтепродуктов в транспортной и энергетической системах, а также активное развитие группы отраслей промышленности (особенно нефтехимической и нефтеперерабатывающей) приводит к накоплению многочисленных отходов в виде отработанных масел, нефтешламов и других нефтесодержащих жидкостей [5, 8–11]. Темпы образования подобных веществ достаточно велики. Например, только отработанные моторные масла ежегодно аккумулируются в объемах 30–40 млн. метрических тонн (табл. 4).

Таблица 4. Объемы производства отработанных нефтепродуктов

Моторные масла	Энергетические масла	Нефтешламы
ежегодно образуется 30–40 млн. метрических тонн [8, 9]	ежегодно образуется 32– 35 млн. метрических тонн [5, 10]	ежегодно образуется 60 млн. метрических тонн, уже накоплено в мире более 1 млрд. метрических тонн [11]

Комментарий: значения приведены на основе усреднения данных [5, 8–11]

Накопление и складирование подобных нефтяных отходов не всегда является надежным способом хранения с целью последующей утилизации или регенерации. Попадая в различные стоки и водоемы, нефтяные компоненты могут нанести большой ущерб окружающей среде [12–14]. В этой связи актуальными становятся проблемы снижения воздействия данных отходов на окружающую среду, а также создание научных подходов для развития энергоэффективных технологий утилизации отходов. Перечисленные выше промышленные отходы угольного и нефтяного происхождения являются горючими компонентами, что является основанием для потенциальной возможности применения их в качестве топлива при сжигании с целью получения тепловой и электрической энергии. Освоение технологий эффективной утилизации этих промышленных отходов становится актуальной задачей для энергетической отрасли, так как возможно

обеспечить существенное снижение влияния работы тепловых электрических станций (ТЭС) на окружающую среду. Известно, что это влияние не ограничивается загрязнением атмосферы оксидами серы и азота или летучей золой. Большое значение имеют эффекты глобального потепления и глобального затемнения.

Сжигание отходов угледобычи и нефтепереработки на ТЭС в исходном состоянии довольно затруднительно, так как требует изменения топочных камер, модификации систем топливоприготовления, транспортировки и хранения. Поэтому вызывает интерес создание композиционных жидких топлив (КЖТ) для сжигания в режимах, поддерживаемых ТЭС, а также котельными и другими энергетическими установками без значительных конструктивных изменений [15–17]. На протяжении последних лет отмечаются перспективы применения КЖТ на основе отходов углеобогащения и нефтяного происхождения [18–32]. Ключевыми преимуществами использования жидких топливных композиций на ТЭС является положительное изменение экологических, энергетических и технико-экономических показателей по сравнению с традиционными технологиями пылевидного сжигания углей разного сорта. Такие заключения можно сделать из анализа результатов исследований, полученных за последние 15–20 лет мировым научным сообществом [18–32].

В качестве основных ведущих специалистов в данном научно-технологическом направлении можно выделить таких исследователей, как Делягин Г.Н., Бурдуков А.П., Горлов Е.Г., Головин Г.С., Овчинников Ю.В., 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., Кузнецов Г.В., Сыродой С.В., Вершинина К.Ю., Стрижак П.А., Богомоллов А.Р., Баранова М.П., Дектерев А.А., Чернецкий М.Ю., Мурко В.И., Lee C.H., Liu J., Sakai T., Manwani P., Svoboda K., Kim S.H., Mohapatra S.K., Kijoleczkowska A., Gajewski W., Bartonova L., Zhang K., Zhou J., Han X., Vanach M., Zhao X.X., Johnson R., Mao Z., Leventis Y.A. и др.

КЖТ представляют суспензии на основе твердого и жидкого горючих компонентов, а также воды. Их можно разделить на две основные группы:

- 1) водоугольные топлива (ВУТ) [19, 33–44] на основе измельченного угля (например, низкосортного бурого или каменного) и воды, а также различных отходов углеобогащения (фильтр-кеков);
- 2) органоводоугольные топлива (ОВУТ) [18, 21–27], где в качестве добавки к основной смеси угля и воды используются жидкие горючие компоненты. Данными компонентами могут служить различные отходы нефтяного происхождения (например, отработанные масла или нефтяные шламы) и другие жидкие органические отходы.

Если учитывать имеющиеся объемы отходов углеобогащения, например, в России, Китае, Японии, США, то вопросы утилизации таких отходов становятся ключевыми уже сейчас. Для многих регионов Сибири эти вопросы являются первоочередными, если учитывать что в данном регионе большая часть ТЭС работает на угле. По оценкам экспертов многие регионы России, Китая и Японии могут снабжаться на протяжении нескольких лет тепловой и электрической энергией только за счет сжигания ВУТ или ОВУТ на основе отходов переработки угля и нефти. В настоящее время для Китая и Японии промышленное сжигание ВУТ в энергетике дает достаточно высокую долю не только тепловой, но и электрической энергии. В России есть опыт применения трубопроводного транспорта водоугольного топлива из г. Белово Кемеровской области и последующего его сжигания в котлах Новосибирской ТЭЦ-5 [18]. Протяженность построенного трубопровода составила 262 км, а расчетная пропускная способность 3 млн. тонн ВУТ в год. Однако в 1997 г. данный проект был приостановлен. Основные причины [18]: замерзание ВУТ и закупоривание трубопроводов при транспортировке суспензии.

Широкое (в промышленных масштабах) использование выделенных выше отходов угле- и нефтепереработки в составе КЖТ на ТЭС сдерживают ограниченные данные о процессах их горения. Низкосортные угли и отходы их переработки требуют больших расходов энергии при иницировании горения.

Сжигание таких топлив может сопровождаться большим механическим и химическим недожогом, а продуктам сгорания характерно высокое содержание оксидов серы и азота. Минимизировать эти недостатки можно за счет смешения низкосортных углей и отходов их переработки с водой (т.е. получения ВУТ или ОВУТ) [35, 36]. В частности, использование жидкого горючего компонента (отработанных масел и др.) в составе КЖТ позволяет интенсифицировать зажигание топливных суспензий (т.е. снизить времена задержки зажигания), а также улучшить реологические характеристики [23]. В то же время жидкие компоненты могут повысить полноту сгорания частиц КЖТ, соответственно, снизить накопление золошлаковых отходов ТЭС.

Использование композиционных жидких топлив на ТЭС позволит вовлечь в теплоэнергетику большие объемы отработанных нефтепродуктов различных энергоустановок, двигателей внутреннего сгорания и механизмов. Это, во-первых, будет способствовать утилизации многочисленных отходов угле- и нефтепереработки [23], во-вторых, снижению антропогенных выбросов ТЭС в атмосферу (SO_x и NO_x) [28–30], в-третьих, обеспечению высокой пожаровзрывобезопасности основного оборудования, агрегатов, систем и ТЭС в целом при топливоподготовке, транспортировке, разгрузке и хранении, а также очистке и транспортировке дымовых газов. Исследование процессов зажигания и горения КЖТ позволит создать фундаментальные и практические научные основы для развития энергоэффективных технологий преобразования энергии на ТЭС.

Процесс внедрения КЖТ на современных тепловых электрических станциях проходит очень медленно. Только в Китае уже несколько десятков ТЭС переведены на ВУТ и ОВУТ. В России, Японии, Индии, Австралии и США имеются лишь испытательные мини-ТЭС и котельные. Основная проблема заключается в необходимости определения эффективных условий зажигания (предельные температуры, минимальное время прогрева, время выгорания капель топливного аэрозоля, требуемый расход, максимальная температура горения) суспензий ВУТ и ОВУТ и применения последних в качестве основного (вместо

угля, мазута или газа) или дополнительного топлива в котлоагрегатах ТЭС. При этом известно [28–30], что переход с угля на суспензионные водосодержащие топлива позволит существенно повысить не только экологические, но и ряд технико-экономических и даже энергетических индикаторов работы ТЭС. В частности, меньшие температуры в камерах сгорания при использовании содержащих воду суспензий КЖТ (по сравнению со сжиганием угля) могут способствовать повышению надежности и рабочего ресурса агрегатов, систем и ТЭС в целом (меньшие тепловые напряжения, малая зашлакованность поверхностей теплообменного оборудования).

В обзорных публикациях, посвященных проблемам зажигания жидких и суспензионных топлив, нередко подчеркивается (например, [18]), что создание адекватной теории устойчивого инициирования горения композиционных жидких топлив затруднено малым объемом достоверных экспериментальных данных. Разработана довольно ограниченная группа методик по экспериментальному изучению инициирования горения капель КЖТ [21, 31, 41]. Как следствие, многие процессы и эффекты остаются не изученными в полной мере.

Наиболее широко применяемым принято считать экспериментальный подход, основанный на подвешивании капли (после обезвоживания приповерхностного слоя представляет частицу) топливной композиции на спае малоинерционной термопары и других держателях (например, тонкой металлической проволочке (нити) или керамическом стержне) [31]. Также известны методики зажигания и горения КЖТ на горячей поверхности (подложке) [32] и в муфельной печи [45]. Такие исследования проводились для одиночной, малой группы капель топлив, а также небольших объемов топливных образцов.

Следует отметить, что преимуществом использования малоинерционной термопары является обеспечение возможности контроля температуры капли топлива. Другим преимуществом использования держателя является возможность непрерывной регистрации процессов зажигания и горения топливной композиции с выделением ее отдельных стадий (от испарения жидких компонентов, зажигания летучих до горения углерода с образованием зольного остатка).

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 обоснованные заключения о том, что керамические стержни, металлические проволоочки или спай термопары могут приводить к изменениям условий теплопереноса в подвешенной на них капле топливной композиции [31]. Они заключаются в стоке теплоты к держателю от поверхности капли (при прогреве последней) и дополнительному притоку энергии через держатель к частице топлива (после прогрева держателя). В случае исследований процессов зажигания и горения одиночных свободно падающих капель топлива [46, 47] (т.е. без применения держателей) накладываются ограничения, связанные с малым временем пребывания в камере сгорания (либо требуются камеры с чрезвычайно большими размерами топок – макетов одних из главных элементов ТЭС).

Целесообразно разработать экспериментальную методику, обеспечивающую витание частицы (для совокупности одиночной, малой группы и потока частиц КЖТ) топливной композиции в потоке разогретого воздуха с возможностью контроля процессов ее зажигания и горения (с применением высокоскоростной видеорегистрации). Такие условия хорошо соответствуют топочным устройствам ТЭС, котельных и других различных энергетических установок, так как в последних частицы топлива не покоятся, а витают после впрыска в камеру сгорания форсункой. Характерные значения чисел Рейнольдса могут меняться от нескольких десятков до нескольких сотен в зависимости от размеров впрыскиваемых капель топлив, скоростей и траекторий их перемещения, а также тепловых условий нагрева. Как следствие, значения чисел Нуссельта изменяются от 2–4 до 15–16. Плотности тепловых потоков к поверхности капли топлива в реальных камерах сгорания могут достигать нескольких десятков кВт/м^2 . В диссертационных исследованиях реализация таких условий с применением лабораторного стенда затруднена. Скорости витания капель, соответствующие реальным топочным камерам, можно обеспечить. Поэтому основное внимание при подготовке диссертации уделено

экспериментальным исследованиям так называемого низкотемпературного зажигания (при температурах в модельной камере сгорания не более 1000 К) при перемещениях капель в камере сгорания со скоростью, не превышающей 5 м/с. Данное значение соответствует практически максимальным скоростям перемещения капель при впрыске топлива в топочные камеры котельных агрегатов ТЭС на жидком или суспензионном топливе.

К сожалению, известные экспериментальные подходы, основанные на распылении КЖТ в топочные камеры [37], не позволяют установить интегральные характеристики зажигания каждой капли топлива или малой группы таких капель. Это обусловлено трудностями видеорегистрации протекающих процессов (в условиях высоких температур они характеризуются большими скоростями, а также конструктивными ограничениями топочных камер). Важно правильно понимать вклад каждой капли суспензии в формирование температурного поля в камере сгорания, а также влияние капель на прогрев и зажигание соседних. В настоящем диссертационном исследовании решены сформулированные проблемы за счет создания специализированной модельной камеры сгорания и разработки соответствующей экспериментальной методики.

Целью настоящей работы является 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 впитании в модельной камере сгорания.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработка экспериментальной методики исследования характеристик процесса зажигания одиночных частиц перспективных для тепловых электрических станций суспензий КЖТ, их малой совокупности и капельного аэрозоля при впитании 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 для ТЭС 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 задержка зажигания и пороговая температура) зажигания КЖТ. Получение соответствующих зависимостей и аппроксимационных выражений. Прогнозирование по результатам экспериментов эффективных условий зажигания КЖТ в топочных камерах 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 (спае 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 композиционных жидких топлив на 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 котлоагрегатов 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.

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. Для сравнения характеристик зажигания витающих частиц и частиц, расположенных на спае малоинерционной термопары, проведены дополнительные эксперименты.

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 выполнения 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 антропогенные выбросы, полезно утилизировать многочисленные промышленные отходы, 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 движения частиц 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 топочную камеру 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 формулировке 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 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 им. профессора М.К. Коровина «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». Опубликованы 10 статей в международных рецензируемых журналах, индексируемых базами данных «Scopus» и «Web of Science»: «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».

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

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована 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

жидких композиционных топливных суспензий, определены основные достижения в области применения последних в качестве основного или дополнительного топлива ТЭС, нерешенные задачи в данной области, а также проблемы, сдерживающие развитие технологий КЖТ в теплоэнергетике, транспортном секторе и других отраслях.

Во второй главе приведено описание разработанных автором диссертации методик проведения исследований, экспериментального стенда, модельной камеры сгорания (для приближения условий инициирования горения к топкам ТЭС) и устройств ввода капель КЖТ в последнюю, а также методов оценки погрешностей результатов измерений.

В третьей главе приведены результаты исследования основных закономерностей и характеристик инициирования горения частиц композиционного жидкого топлива при витании в потоке разогретого воздуха в модельной камере сгорания. Определены необходимые и достаточные условия для реализации витания и зажигания частиц КЖТ, приготовленных на основе перспективных компонентов из числа отходов угле- и нефтепереработки. Установлены два устойчивых режима витания и зажигания в камере сгорания. Установлены отличия характеристик зажигания от экспериментов с закреплением капли КЖТ на держателе. Выделены перспективные добавки КЖТ, в том числе и для увеличения теплотворной способности. Изучены процессы газофазного и гетерогенного зажигания КЖТ в контролируемых условиях. Разработаны рекомендации использования результатов исследований, а также рекомендации по развитию сформулированного научного подхода для повышения эффективности сжигания суспензионных топлив (даже на основе отходов угле- и нефтепереработки) в топках ТЭС. Сделаны выводы о больших перспективах (по экологическим, энергетическим и экономическим причинам) внедрения суспензий КЖТ в топливный цикл ТЭС.

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

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ПРОЦЕССАХ ЗАЖИГАНИЯ И ГОРЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ЖИДКИХ ТОПЛИВ НА ТЭС

1.1. Развитие представлений об использовании суспензионных угольных топливных композиций на ТЭС

Эффективное и безопасное использование угольных ресурсов играет определяющую роль в области энергосбережения большинства государств. В условиях роста цен на нефтепродукты применение угольных суспензионных топлив в качестве основного энергоносителя конкурентоспособно по отношению к жидким углеводородным топливам и природному газу, сжигаемым в больших объемах в котельных установках. В энергетической стратегии России на период до 2030 года сформулированы основные задачи инновационного развития энергетической инфраструктуры, направленные на устойчивый рост российской экономики, повышение качества жизни граждан страны и укрепление внешнеэкономических позиций [48]. Для устойчивого развития энергетики целесообразно расширение топливной базы.

Водоугольное [38, 41, 44], органоводоугольное [21–27] и композиционное жидкое [49, 50, 51] топлива имеют несколько видов наименований в мировой литературе, например, водоугольная суспензия (ВУС) [19, 33, 40–42], мазутоугольное топливо (МВУТ) [50] искусственное композиционное жидкое топливо (ИКЖТ) [52, 53], суспензионное водошламовое топливо (ВШТ) [54] и др. Все перечисленные композиционные топлива приготавливаются на основе тонкоизмельченного угля (как правило, тониной помола от 50 мкм до 200 мкм) или отходов углеобогащения (фильтр-кеков фракциями не более 250 мкм [55]). В качестве жидкой фазы служит вода и различные отходы нефтепереработки, отработанные масла и другие горючие жидкости. Вследствие снижения пожароопасности процессов транспортировки и хранения этих отходов, улучшения экологических и экономических показателей по сравнению с

пылевидным сжиганием твердого топлива или мазута на ТЭС данные суспензии вызывают значительный интерес. Комплексная и совместная утилизация выделенных выше отходов на ТЭС с широким выбором концентраций различных компонентов в составе суспензий ВУТ, ОВУТ и КЖТ позволит сократить добычу основных ресурсов (угля, газа и нефти) без снижения объемов вырабатываемой тепловой и электрической энергии. Эти процессы будут способствовать стабилизации стоимости энергоресурсов, а также уменьшению издержек при выработке электрической и тепловой энергии на ТЭС.

История возникновения и использования угольных топливных суспензий (активно применялось креозотовое масло) относится к 1867–1870 гг. [56, 57]. Основатель «коллоидной мельницы», инженер Плаусон, работавший в Петербурге в 1913 г., предпринял первые попытки по приготовлению угольных суспензий. В 1934 г. профессор Кустов В.Ф. в энергетическом институте Академии наук СССР проводил исследования в области изучения свойств углемазутных смесей. В 1937 г. проведены первые эксперименты по сжиганию этих смесей в «Мартеновской печи» Московского металлургического завода «Серп и молот», а также на судне «Марат» [56, 57]. Проведены успешные эксперименты по сжиганию углемазутных суспензий в печных и котельных агрегатах, котлах паровозов [50, 58]. Использование такого топлива в промышленных масштабах на ТЭС требовало проведения обширных экспериментальных исследований и технико-экономических обоснований [28–30].

В настоящее время основные мировые запасы угля сосредоточены в России, Китае, США, Канаде, Австралии, ЮАР, Индии [3, 5, 7, 19]. Темпы добычи угля растут [7, 19]. Прогнозируется, что мировое потребление угля к 2040 г. вырастет на 35% [7]. Идея применения ВУТ вместо традиционных нефтепродуктов получила распространение в Германии, Китае, США, Швеции, Японии и в ряде других государств в начале 1970-х гг. [19]. Нефтяной кризис 1973 г. стимулировал развитие технологий использования в энергетике водоугольных и других топливных суспензий. В 1980-х гг. проводились конференции и симпозиумы,

охватывающие широкий круг вопросов и аспектов по подготовке ВУТ, изучению реологических свойств, характеристик процессов распыления, зажигания и горения, а также транспортировки и хранения в интересах ТЭС, водогрейных и технологических котельных, транспорта. Наиболее широкое применение водоугольные топлива получили в Китае и Японии. В 2001 г. в Китае произведено и переработано более 2 млн. т. ВУТ, а к 2006 г. объем вырос до 15 млн. т. К 2020 г. объем переработки ВУТ планируется довести до 100 млн. т. [19]. В настоящее время в Китае функционируют шесть заводов по производству ВУТ, а ТЭС на этом виде топлива ежегодно вырабатывают 2 млн. кВт энергии [59]. Важно отметить научную базу в области технологий использования ВУТ в теплоэнергетике, активно развиваемую в Китае, которая подтверждается трудами многочисленных исследователей [60–62]. При этом Китай значительную часть приготовленных суспензий ВУТ экспортирует в Японию, где сжигается более 800 тыс. т. ВУТ в год. Многие совместные проекты Китая и Японии в области ВУТ реализуются в промышленном секторе [19].

В СССР первый всплеск научных исследований и работ по созданию ВУС приходится [18] на 1950-е гг. Разрабатывались технологии по утилизации угольных шламов и отходов обогащения углей мокрым способом [50], использованию углей, добываемых гидравлическим способом. В решении основных исследовательских задач по использованию ВУТ были задействованы ведущие научные центры: Институт горючих ископаемых, НПО «Гидротрубопровод», ВНИИГидроуголь, ИФХ АН СССР, научно-производственные предприятия Кузбасса [18, 57]. Промышленное сжигание водоугольных суспензий в топочных устройствах началось в 1960-х гг. [63–65]. Топливные композиции ОВУТ имеют потенциал применения в малой энергетике [18, 50], при газификации (термической переработке) топлив [66], а также могут использоваться в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания [67]. Несмотря на многочисленные исследования (за последнее 40–50 лет) в области создания технологий использования ВУТ и ОВУТ [19, 50, 51], начиная от их приготовления [68–71] до сжигания [72–75], возникали определенные трудности

внедрения на объектах энергетики [19]. Процессы зажигания и горения ОВУТ наименее изучены в сравнении с ВУТ, по которым достаточно много экспериментальных и теоретических данных.

За последние 10–15 лет перспективным путем развития технологий применения водоугольных топлив на ТЭС, а также в котельных является переход на композиционные жидкие топлива (смесь отходов углепереработки и разнообразных отработанных нефтепродуктов). Создание КЖТ на основе различных отработанных горючих и легковоспламеняющихся жидкостей (водонефтяных эмульсий, нефтешламов, отработанных автомобильных, турбинных, трансформаторных или других масел) позволит, с одной стороны, улучшить физико-химические свойства ВУТ (в частности повысить длительность сохранения реологических свойств, инициировать процессы зажигания и горения, повысить теплоту сгорания), с другой, безопасно утилизировать пожароопасные жидкости с минимальными антропогенными выбросами в атмосферу. Именно такие топлива и стали основным объектом исследования при подготовке настоящей диссертационной работы.

1.2. Перспективные для ТЭС технологии приготовления водоугольных и органоводоугольных топлив, их основные компоненты

Вязкость и текучесть суспензий ВУТ и ОВУТ, наряду с гранулометрическим составом, сегментарной стабильностью и дисперсностью твердой фазы, являются важным фактором, определяющим технологии их транспортировки, хранения, зажигания и сжигания. Выделенные факторы оцениваются при анализе реологических характеристик данных топливных композиций [71, 76, 77]. Много работ посвящено исследованиям реологических свойств водоугольных суспензий с добавлением реагентов-пластификаторов (мазут, пластификатор, гумат натрия, лигносульфонат (ЛСТ), карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ) и желатин, поликарбоновые кислоты) с целью

сохранения стабильности и агрегативно-устойчивой структуры топливной композиции [68–71, 78].

Достоверных экспериментальных данных о влиянии на реологические свойства КЖТ добавляемых отработанных масел или нефтепродуктов не так много. В частности, для изменения вязкости и сохранения стабильности суспензии ВУТ на основе фильтр-кека «К» в последнюю добавлялись отработанные турбинные, трансформаторные и моторные масла [23, 68, 79]. В [80] исследована эффективная вязкость и свойства композиций ВУТ на основе угля марки «Г», антрацита, этанола и сульфогумата натрия при различных температурах. В [81] изучено влияние температурных режимов на реологические характеристики ВУТ, приготовленных с использованием различных марок («КС», «Т») фильтр-кеков обогатительных фабрик Кузбасса. Авторы [81] заключили, что при перекачке ВУТ на промышленных объектах (в частности, ТЭС) необходимо поддержание температуры суспензии 42–43⁰С. При этом важную роль играет технология приготовления суспензий ВУТ и ОВУТ.

В настоящее время наиболее широко используются кавитационный и гомогенизационный способы приготовления ВУТ и ОВУТ. Кавитационный способ приготовления топливных суспензий основан на измельчении угля в шаровой барабанной мельнице при одновременном смешивании с водой или водомасляной эмульсией. Данная технология характеризуется снижением давления и изменением температуры приготавливаемой суспензии с образованием паровых пузырей, а также разрушением структуры частиц угля вплоть до органических соединений [82]. В случае приготовления суспензий гомогенизационным методом используются диспергатор (гомогенизатор) с механическим вращающимся устройством (ротор, частота вращения которого изменяется от нескольких десятков до тысячи оборотов в минуту). В этом методе применяется измельченный уголь. В [82] даны сравнительные оценки эффективности приготовления ОВУТ в результате механоактивационного и кавитационного смешивания компонентов (водонефтяная эмульсия, бурый уголь) топлива. По мнению авторов [82] за счет введения в смесь ОВУТ около 20 % (с

учетом имеющейся в нефтяной эмульсии) воды может увеличиваться полнота сгорания топливной суспензии.

Результаты исследований [68] показали, что в зависимости от выбора способа и длительности приготовления ВУТ и ОВУТ обеспечиваются различные показатели сегментарной стабильности (минимальное расслоение) и реологические свойства топлива. Расслоение суспензий ВУТ, приготовленных с применением шаровой барабанной мельницы, начиналось спустя сутки после их приготовления [68]. Процесс расслаивания суспензий ВУТ продолжался в течение 3–5 суток. При использовании гомогенизационного способа приготовления ОВУТ с отработанными турбинными, трансформаторными, моторными маслами регистрировалась более устойчивая стабильность структуры топлива. Визуальные наблюдения показали, что толщина отделяющейся водной связки значительно ниже, чем при использовании кавитационного метода, которая не превышала 0,5 мм. В свою очередь, авторы [68] установили, что приготовление ОВУТ с помощью диспергатора позволяет снизить инерционность процессов зажигания практически в 2 раза (по сравнению с использованием шаровой барабанной мельницы). Поэтому существует некоторое оптимальное время приготовления (с точки зрения минимизации задержки зажигания) ВУТ [83] и ОВУТ [68].

Можно выделить работу [71], в которой подробно описывается влияние дисперсной структуры коагуляционного строения водоугольной суспензии. Установлено [71], что степень метаморфизма угля, его реакционная способность и концентрация дисперсной фазы являются важными параметрами при приготовлении стабильной суспензии ВУТ. В конечном итоге это влияет на интенсификацию процессов зажигания, устойчивое горение и теплоту сгорания топлива. Аналогичные заключения приводятся по результатам исследований [50].

Соответствующие вязкоупругие свойства суспензий КЖТ исследованы [84] путем распыления водоугольной суспензии через форсунку с использованием первичного кольцевого воздушного потока и вторичной непрерывной воздушной струи. Деформация капель ВУС (распад и разрыв на большие и мелкие фрагменты) во многом зависит [84] от аэродинамических сил, действующих со

стороны воздушного потока на поток топлива, их скорости движения и вязкости топлива.

Таким образом, из анализа результатов исследований можно сделать вывод о том, что на этапах транспортирования, хранения, последующего распыла форсуночным устройством и сжигания в камерах сгорания котлоагрегатов ТЭС важна разработка способов получения водоугольных и органоводоугольных топлив с контролируемыми физико-химическими и структурно-механическими свойствами. Сохранение реологических свойств КЖТ обеспечит минимальные затраты на их производство, а также уменьшит расходы на их гидротранспорт и погрузочно-разгрузочные работы [50].

1.3. Теоретические и экспериментальные исследования зажигания и горения капель композиционных жидких топлив

В период интенсивной разработки технологий вовлечения в теплоэнергетику угольных суспензий (начиная с 70-х XX века) вставали вопросы, требующие проведения соответствующих экспериментальных исследований. К настоящему времени многие особенности зажигания, механизмы горения ВУТ [19, 33–39, 41–43] и ОВУТ [18, 20–27, 49–53, 85], основные закономерности тепломассопереноса и фазовых превращений объяснены и изучены с использованием теоретических и экспериментальных данных. Особенности процессов зажигания и горения топливных суспензий в отличие от сжигания угля в пылевидном (твердом) состоянии [86] являются прогрев и испарение капли, низкотемпературная активация реакционной поверхности капли топлива, а также горение топлива за счет химической реакции микрочастиц угля с парами воды и кислорода для ВУТ [87] и продуктами испарения горючей жидкости для ОВУТ [21, 25, 85, 89].

В [37, 38, 90, 91] представлены результаты численных исследований основных закономерностей процессов тепломассопереноса при зажигании частицы ВУТ с учетом совместного протекания термохимических

взаимодействий паров воды и углерода кокса. Разработана модель зажигания водоугольной частицы в конвективном подводе тепла (рис. 1.3.1).

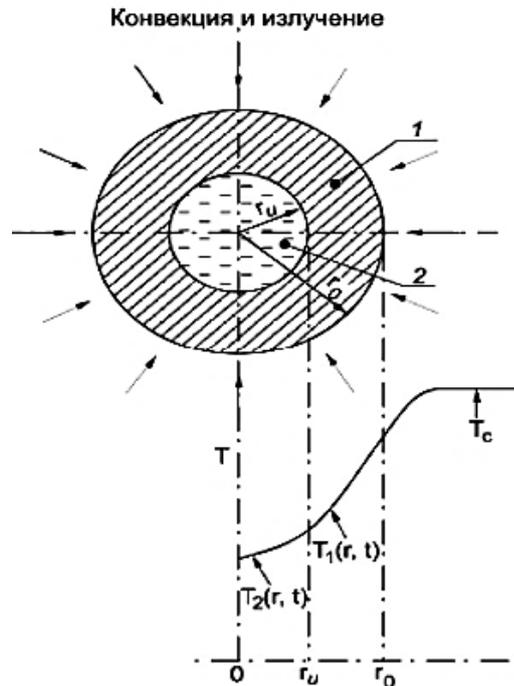


Рисунок 1.3.1. Частица топлива в потоке высокотемпературной газовой среды [38]: 1 – зона сухого углеродистого остатка; 2 – зона исходного влажного топлива

Установлено [37, 38, 90, 91], что тепловые эффекты испарения влаги с дальнейшей фильтрацией через пористую структуру и термическим разложением твердой части топлива в условиях радиационно-конвективного теплообмена существенно замедляют процессы зажигания ВУТ. Полученные временные характеристики позволили сделать вывод о двух режимах воспламенения топлива: низкотемпературный, при котором зависимость теплофизических свойств угля от температуры оказывает несущественное влияние на время задержки зажигания; высокотемпературный, при котором такое влияние существенно [37, 38, 90, 91].

Детальное описание механизмов тепломассообмена для большого класса жидких и твердых топлив приведено в теории зажигания конденсированных веществ (газофазные, гетерогенные, твердофазные модели зажигания) [92]. Модели зажигания [92] основаны на трех способах передачи теплоты: путем

конвекции горячих газов (конвективное зажигание), излучением от горячих газов или твердых раскаленных частиц (лучистое зажигание) и непосредственным контактом от холодного к более горячему телу (кондуктивное зажигание). Установлены [92] закономерности зажигания и интерполяционные зависимости конденсированных веществ, два предельных режима экзотермических реакций конденсированного вещества – самовоспламенение и зажигание, отличающиеся однородностью и неоднородностью прогрева топлива. Данная теория включает систему дифференциальных уравнений в частных производных, описывающую процессы зажигания и теплопереноса в твердой и газовой фазах. Представленные модели [92] могут использоваться для исследований закономерностей процессов зажигания частиц водоугольного и органоводоугольного топлива.

Подробное описание одной из первых наиболее полных моделей горения капли водоугольной суспензии, а также распыленного топлива в потоке разогретого воздуха приводится Делягиным Г.Н. [39, 93]. Предполагается [93], что горение основной массы твердой части ВУС протекает при прямом взаимодействии частиц угля и воды (при одновременном испарении последней). Пары воды при этом доставляются на горячую твердую поверхность капли ВУС. Скорости термического разложения угольной части зависят от температуры поверхности и концентрации водяных паров, доставляемых в зону реакции. На этапе выгорания капли ВУТ образуется пористая структура коксового остатка. В случае повышенных температур (более 1270 К) водяной пар может взаимодействовать с промежуточными продуктами реакций $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$ и $\text{CO} + \text{H}_2\text{O}$. При достаточной концентрации воды создаются более благоприятные условия для догорания продуктов реакции в непосредственной близости капли ВУТ [93].

Для минимизации расходов ВУТ и ОВУТ целесообразно установить необходимые (предельные) условия зажигания при низкотемпературных режимах (менее 1000 К) и выявить закономерности их протекания [21–27]. Это позволит существенно снизить времена выхода на номинальную мощность, повысить надежность и рабочий ресурс котельных агрегатов, вспомогательных систем и ТЭС в целом. Соответствующие численные исследования процессов

тепломассообмена и зажигания [94–96] проведены с угольными частицами размером от 50 до 500 мкм. Разработаны [94–96] математические модели зажигания при низкотемпературных режимах потока воздуха ($T < 500\text{K}$). Авторы [94–96] заключили, что для снижения рисков технологических аварий на тепловых электростанциях, связанных с применением пылевидного топлива, необходимо обеспечить минимальные температурные режимы, достаточные для зажигания частиц угля.

Для составов ВУТ и ОВУТ низкотемпературное зажигание [23] является наиболее перспективным направлением и важным, с точки зрения снижения энергозатрат, пожарной безопасности, повышения экологичности и других факторов. В [21–27] показано, что процессы зажигания и горения составов ОВУТ осуществлялись при относительно низких температурах T_g в диапазоне от 650 до 900 К, в то время как температура в промышленных камерах сгорания составляет более 1200 К (на тепловых электрических станциях и котельных). Для инициирования процессов зажигания и устойчивого горения отходов углепереработки совместно с отходами нефтяного происхождения и воды в составе ОВУТ необходим оптимальный выбор массовых концентраций твердых и жидких компонентов.

Известны различные методики исследования процессов зажигания капель ВУТ и ОВУТ: на разогретой массивной поверхности [32, 97] или пластине [98], с помощью лазера [99] и искрового разряда [100], методом подвешивания капли на спаяе термопары и различных держателях [23, 89, 100] в разогретом газовом потоке. Температуры реагирующих капель топлива определялись термопарами или фотометрическими измерительными преобразователями (более современными устройствами являются тепловизоры). В ряде других работ смеси угольных суспензий исследованы с использованием методов термального анализа горения (для угольных шламов с органическим растворителем при температурах 300–1270 К [101], а также оценкой влияния реологических свойств на характеристики зажигания при температурах 660–830 К [102]), помещения образцов топлива в муфельную печь при температурах до 1070 К (с целью

определения характеристик зажигания и горения [83]), а также с применением локального источника тепла (нагретого до высоких температур (950–1100 К) металлического диска) с целью установления необходимых условий зажигания топлива [103, 104].

Выявлены типичные последовательные стадии горения капель: инертный прогрев капли, испарение влаги с приповерхностного слоя и из внутренней области капли (испарение паров горючей жидкости), термическое разложение угля, выход летучих, формирование газопаровой смеси, зажигание газопаровой смеси с прогревом коксового остатка, гетерогенное горение углерода и инертный прогрев зольного остатка.

Известно [37, 39, 91, 93], что в процессе нагрева капли ВУТ формируется зона испарения (паровой слой) на поверхности последней. По мере роста температуры и формирования зоны испарения во внутренней области капли пары воды диффундируют во внешнюю среду (к периферии капли), угольные частицы диспергируют. Наблюдается незначительное уменьшение размера агломерата с образованием пористой оболочки. В процессе испарения воды происходит интенсивный выход летучих газов с образованием газопаровой смеси. Согласно гипотезе [37, 93] процесс термического разложения угля и зажигание летучих происходят после полного испарения жидкости из приповерхностного слоя капли вне зависимости от состава топлива. Установлено [39, 93], что горение газопаровой смеси вокруг объема частицы приводит к интенсификации процессов зажигания (термической деструкции) коксового остатка (углерода) на внешней поверхности и во внутренней области капли топлива. Также отмечается, что в случае использования водоугольного топлива на основе угля с высоким содержанием летучих веществ (например, бурого угля марки Б2) растет вероятность реализации эффектов «микровзрыва» капель вследствие их ускоренного нагрева.

При использовании ОВУТ интенсивность микровзрывов достаточно высокая, так как кроме воды в каплях топлива содержится жидкий горючий компонент (отходы нефтепродуктов и т.п.). Установлено [100], что режим

взрывного зажигания и горения происходит в определённых условиях, связанных с градиентом концентрации воды и нефтяной составляющей, так как диапазоны температуры кипения нефти смеси выше, чем температура кипения воды. Для высококипящих компонентов целесообразно поддерживать более высокие температуры, тогда как для низкокипящих компонентов характерно быстрое иницирование внутреннего кипения капли топлива [100]. Также важны скорости прогрева, кипения и испарения паров жидких горючих компонентов и воды, диффундирующих через поры частицы совместно с летучими веществами. В результате экспериментов [89] при исследовании процессов зажигания и горения смесей ОБУТ на основе каменного угля, водонефтяной эмульсии (с использованием топочного мазута) и КЖТ с метанолом при температуре воздуха 1120–1270 К установлено, что интенсивность микровзрывов капель (как эффект вторичного распыления топлива) с добавлением воды (10–30%) более высока, чем при добавлении метанола (10–30%). Но, с другой стороны, добавление метанола снижает времена задержки зажигания [89].

В [105] исследованы характеристики взрывного вскипания капли ВУТ (потенциальный метод вторичного распыливания на более мелкие фрагменты) в условиях интенсивного нагрева (тепловой поток $0,3\text{--}10\text{ кВт/см}^2$), путем помещения их в магнитное поле уловителя. Индуктивно заряженная капля ВУТ находилась в положении равновесия (геометрического центра) гравитационных сил, где осуществлялась высокоскоростная видеосъемка процессов взрывного вскипания (рис. 1.3.2). Для удержания капли топлива в нулевой позиции балансировалось изменение напряжения постоянного тока. По мере достижения предварительного выбранного размера капли ВУТ и геометрической точки проводился импульсный нагрев с помощью генерации лазерных лучей с двух сторон при одинаковой интенсивности и длине волны 1,06 нм. Эффект взрывного вскипания капли водоугольного топлива (диаметр капли $d=158\text{ мкм}$) достигается при тепловом потоке более 1 кВт/см^2 .

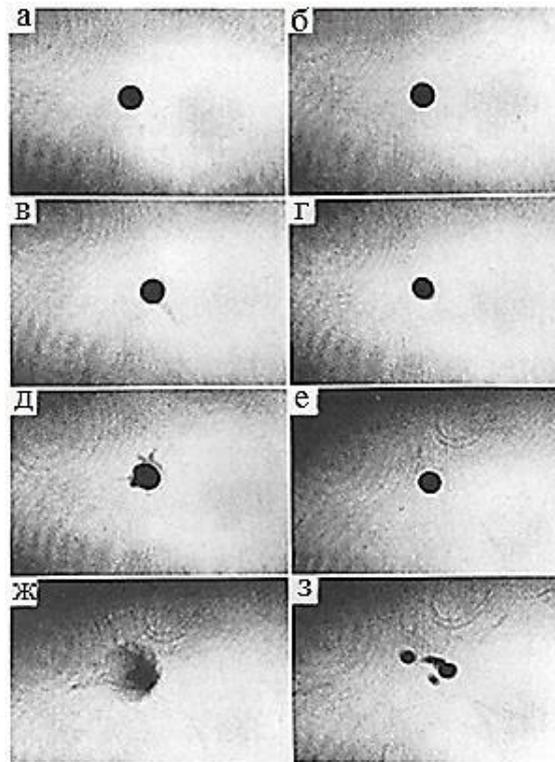


Рисунок 1.3.2. Видеокадры поведения капель ВУТ при интенсивном импульсном нагреве с последующим взрывным вскипанием и дроблением на более мелкие фрагменты [105]

Внутренний перегрев и результирующее взрывное вскипание капли как результат вторичного распыления на более мелкие капли [105] может реализовываться путем предварительной термальной подготовки в камере сгорания. Теоретическое решение задачи получено в рамках применения модели взрывного вскипания капли водоугольной суспензии [106] при лучистом подводе тепла высокой интенсивности. Установлено [106], что в процессе нагрева водоугольной частицы с помощью инфракрасного излучения вокруг её оболочки формируется паровой слой толщиной в 0,5 мкм при исходном радиусе частицы в 0,5 мкм. В таком случае угольные частицы ВУС, находящиеся в паровом слое, аккумулировали меньше энергии теплового излучения, что снижало скорость нагрева агломерата.

В экспериментальных исследованиях процессов зажигания и горения капель ВУТ [41, 99, 107–110] и ОБУТ [18, 21–27] широкое применение получил подход,

основанный на подвешивании капли топливной композиции на спае малоинерционной термопары. В качестве держателя также использовались кварцевые нити [89, 100, 111]. Следует отметить исследования [31], где приведены экспериментальные данные влияния материала держателя на характеристики зажигания капли ОБУТ на примере керамического стержня, спае термопары и металлической проволочки. Установлено [31], что при использовании держателя в виде керамического стержня к нему происходит значительный сток тепла от поверхности капли, времена задержки зажигания увеличивались более чем на 50% в сравнении с каплей, подвешенной на спае термопары. Использование малоинерционной термопары позволяло контролировать температуру топлива в процессе его нагрева, а также стадии инициирования процессов горения капли ВУТ и ОБУТ (вследствие ее покоя и видимой области видеорегистрации данных). Поэтому термопары часто применяют не только в таких исследованиях, но и при изучении процессов испарения жидкостей, суспензий, растворов, эмульсий.

На рисунке 1.3.3 показаны типичные стадии инициирования горения капли ВУТ [41], начиная от испарения влаги и заканчивая горением агломерата и диспергированием угольных частиц, полученных с помощью высокоскоростной видеокамеры. Подвешиваемая капля ВУТ на спае термопары помещалась в камеру сгорания цилиндрической формы с разогретым воздухом, где определялись температурные изменения последовательных стадий зажигания и горения. В эксперименте с каплей ВУТ на основе антрацита горение летучих веществ не наблюдалось. ВУТ на основе бурого и каменного углей, а также их смесей содержат большее количество летучих, горение которых способствовало быстрому прогреву и зажиганию частицы топлива (рис. 1.3.3). Увеличение массовой доли воды в суспензии влияет на время задержки и максимальную температуру горения капли. Все перечисленные факторы влияют на интегральные характеристики процессов зажигания и горения капель ВУТ.

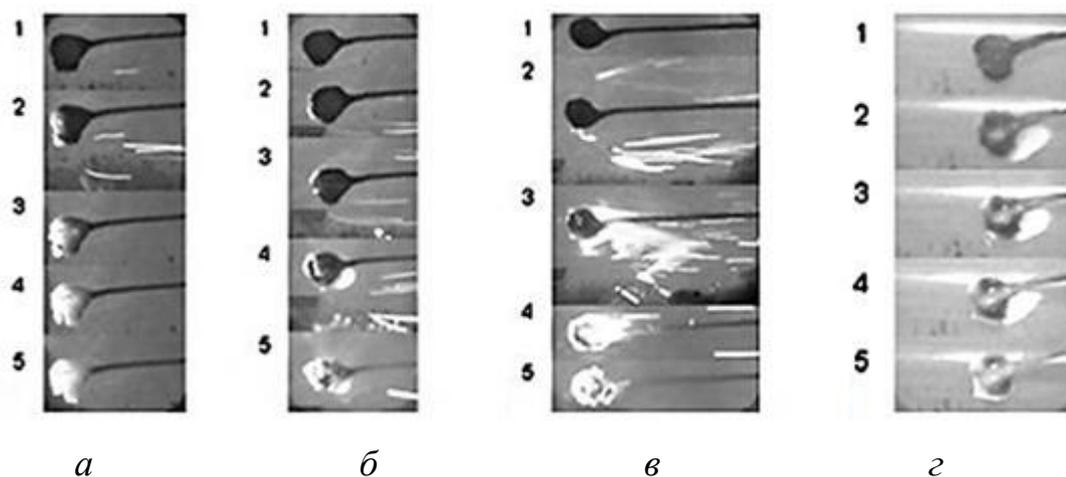


Рисунок 1.3.3. Зажигание и горение капель ВУТ на основе углей различной степени метаморфизма [41]: антрацита при среднем размере частиц 171 мкм (*a*); бурого угля при размере частиц 145 мкм (*б*); каменного угля при среднем размере частиц 135 мкм (*в*); смесей углей различных марок при среднем размере частиц 135 мкм (*г*)

В экспериментальных исследованиях процессов зажигания и горения капель ВУТ [99] использовался метод лазерного нагрева. Для контроля температуры капли топлива использовалась термопара с диаметром спая 120 мкм. В результате экспериментов по зажиганию одиночных капель ВУТ на основе антрацита, бурого, а также каменного угля установлено небольшое отклонение от линейной зависимости между временем горения (τ_b) и диаметром капли. Авторы [99] показали, что устойчивое горение летучих компонентов составляет лишь небольшой процент от общего времени горения капли ВУТ.

Эффективность сжигания ВУТ на основе различных отходов углеобогащения и низкосортных углей определяется оптимальным содержанием воды в составе топливной композиции. Важным фактором является процесс иницирования горения. Известно, что рост температуры частицы ВУТ в окислительной среде происходит весьма быстро по сравнению с традиционным угольным топливом вследствие формирования высокопористой оболочки агломерата и повышения температуры давления паров воды (на 10–20 °С) [39].

В [107, 109] приведены экспериментальные данные по влиянию концентрации воды на характеристики зажигания капель ВУТ на основе бурого угля. Экспериментальные стенды включали термоэлектрическую печь [109] и газовую горелку [107]. С помощью платинородиевых термопар контролировались изменения температуры капли ВУТ. Установлено [109], что при повышении температуры от 1070 К до 1110 К время испарения капель ВУТ ($d=1,15$ мм) изменялось на 7–11 % в зависимости от начального содержания воды (в диапазоне от 35–47 %). При этом длительность инициирования горения топлива изменялась в пределах от 21 % до 34%. Также показано, что изменение содержания летучих веществ от 20 % до 35 % приводит к уменьшению длительности инициирования зажигания и горения частиц ВУТ почти на 22 %. Необходимо отметить, что использование топливных композиций на основе бурых углей с высоким содержанием летучих может значительно снизить времена задержки зажигания и длительность горения в газовой фазе. Авторы [109] пояснили, что содержание воды в ВУТ с учетом исходной влажности угля и доля летучих газов являются важными характеристиками при протекании процессов зажигания и горения топлива. Аналогичные выводы приведены в [107]. Описаны [107] также тепловые процессы с эффектами «набухания» и «микровзрыва» капель ВУТ вследствие повышения давления внутри капли и разрыва ее оболочки. Авторы [107] рекомендуют предварительный подогрев водоугольной суспензии для более устойчивого и стабильного горения.

В [111] исследованы характеристики зажигания и горения капель ВУТ на основе каменного угля с использованием плоскопламенной метановой горелки. Капли топлива диаметром от 0,8 мм до 2 мм (при среднем размере частиц угля от 32 до 45 мкм) подвешивались на кварцевые волокна диаметром 150, 170 и 180 мкм. При помощи видеосъемки и цифровой обработки изображений проанализированы процессы инициирования горения капли ВУТ. В экспериментальных исследованиях по зажиганию капель ВУТ [89] и ОВУТ [89, 100] использовались держатели из кварцевой нити. Отмечается, что при зажигании капель ОВУТ [60] методом искрового разряда использование

держателя из кварцевой нити (диаметром 75 мкм) имеет незначительное влияние на процессы инициирования горения. Таким образом, можно заключить, что роль держателя зависит не только от свойств топлива, но и способа инициирования горения.

Известные результаты исследований процессов горения суспензий ОВУТ (например, [18, 23]) обосновывают перспективность их использования в энергогенерирующих установках (в первую очередь, на ТЭС). В качестве добавки органических жидких компонентов в водоугольные суспензии нередко используются: мазут [45, 83, 88, 97], этанол [97], нефтяная смесь [100], метанол [88], керосин [89], отработанные моторное [45] и рапсовое [66] масла.

В [23] представлены результаты экспериментальных исследований ОВУТ на основе различных отходов углепереработки (фильтр-кеки), низкосортного бурого угля и каменных углей совместно с отработанными автомобильным, турбинным, трансформаторным, компрессорным, касторовым маслами, а также мазутом, водонефтяной эмульсией и тяжелой нефтью. Следует также отметить исследования [112], где в качестве компонентов ОВУТ применялся уголь и промышленные сточные воды (при сравнении с характеристиками обычной водоугольной суспензии). Эксперименты проводились в условиях распыления и сжигания суспензий в опытно-промышленной установке. Сравнительный анализ сжигания топливовоздушной взвеси ВУТ и ОВУТ показал, что процессы зажигания и горения ОВУТ на основе сточных вод более устойчивы по сравнению с ВУТ. Авторы [112] объясняют это тем, что в сточных водах содержатся ионы металлов, которые играют роль катализатора для выхода и зажигания летучих, а также горения кокса.

В [45] исследован процесс горения ОВУТ, приготовленного кавитационным способом (КОВУТ) с использованием смесей «уголь – мазут – вода» и «уголь – отработанное масло – вода» (уголь марки «Д» шахты «Грамотеинская»). Образцы топлива массой 1 грамм помещались в муфельную печь с заданной температурой. В результате анализа процесса горения ОВУТ [45] установлено, что воспламенение данных топлив происходит при температурах более 870 К, а

устойчивое горение при достижении 1070 К. Аналогичные эксперименты по определению характеристик зажигания и горения кавитационного ВУТ (бурый уголь «Б2» – вода) и ОВУТ (бурый уголь «Б2» – вода – мазут) проведены в [83]. Повышение концентрации мазута от 0 до 25 % в составе ОВУТ (при содержании воды около 50 % во всех составах) приводило к уменьшению времени задержки зажигания до 10 с (при 1070 К). Количество теплоты, выделяемой при сжигании ОВУТ, увеличивалось от 20 МДж/кг до 40 МДж/кг с ростом доли мазута в указанном диапазоне.

Результаты исследований [21, 23] иллюстрируют влияние состава ОВУТ на характеристики устойчивого зажигания одиночной капли в потоке воздуха (при температуре $T_g=650-900$ К и скорости потока $V_g=0,5-5$ м/с). Так, при приготовлении топливных композиций варьировались массовые доли основных компонентов ОВУТ: угольной пыли (низкосортных бурых углей «Б1», «Б2», «Б3») или отходов углеобогащения (фильтр-кеков) «Д», «Г», «К», «Т», «СС» 40–60 %, горючей жидкости 0–20 %, воды 40–60 %. Для обработки результатов экспериментов и непрерывного слежения за изменением размеров капли использовалось программное обеспечение Tema Automotive. С применением средств высокоскоростной видеорегистрации установлены значения времен задержки зажигания (τ_d) и полного сгорания (τ_c) капель топливных композиций. Также для установления особенностей обтекания потоком воздуха капли ОВУТ и вычисления скорости V_g применялся метод «Particle Image Velocimetry» (PIV) совместно с программным обеспечением «Actual Flow».

Для всех исследованных составов органоводоугольных топлив установлен [21–23] идентичный механизм зажигания. На рисунке 1.3.4 приведены результаты измерения температуры внутри капли (T_d) ОВУТ с типичными стадиями инициирования горения топлива. Для контроля и измерения температуры использовалась платинородиевая термопара с инерционностью не более 1 с.

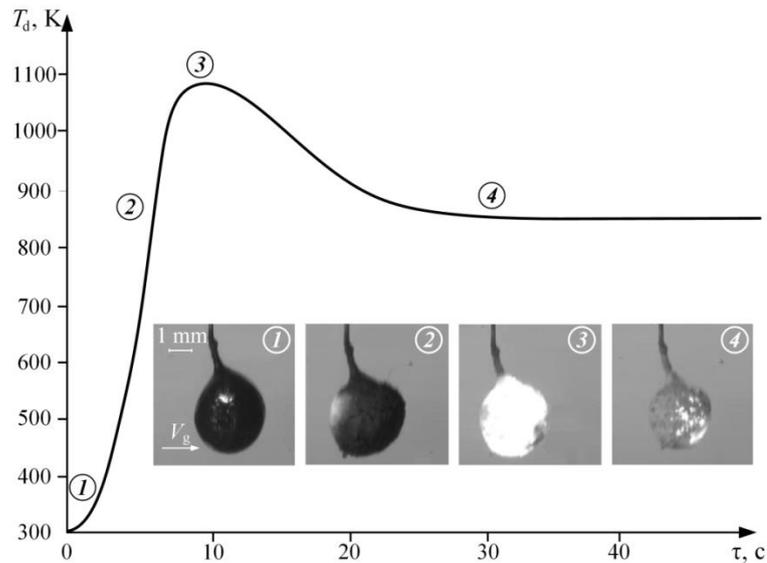


Рисунок 1.3.4. Изменение температуры в капле ОБУТ ($R_d \approx 1$ мм) при взаимодействии с потоком разогретого воздуха ($T_g \approx 850$ К и $V_g \approx 5$ м/с) для состава [21]: 94 % фильтр-кек (влажный) каменного угля марки «К», 5 % моторное масло отработанное, 1 % пластификатор «Неолас». Стадии процесса: 1 – прогрев; 2 – зажигание; 3 – горение; 4 – формирование зольного остатка

Выбор компонентного состава ОБУТ оказывает существенное влияние [21–23] на длительность процессов зажигания и горения капель с учетом роли температуры воздуха, размеров капель и их формы. Установлено [21–23], что увеличение концентрации воды в ОБУТ на 5–15 % приводит к ухудшению характеристик процесса инициирования горения на 30–40 %. Повышение содержания жидкого горючего компонента в ОБУТ может привести как росту, так и снижению времени задержки зажигания. Показано [21–23], что для капель с радиусом $R_d \approx 0,5$ мм уменьшение времени задержки зажигания не превышает 15 % при $0 < \varphi_f < 15$ %, а для капель с $R_d \approx 1,5$ мм изменение τ_d может достигать 30 % при идентичных условиях. Повышение доли обогащенного угля в ОБУТ характеризуется обратным эффектом. Так, небольшое добавление (до 10 %) обогащенного угля в состав ОБУТ приводило к уменьшению τ_d и τ_c на 20–30 % [21–23]. В [113] показано, что даже небольшое добавление высококачественного угля (до 5 %) в состав топлива на основе продуктов угле- и нефтепереработки

может существенно улучшить интегральные характеристики зажигания и горения КЖТ. Для зажигания таких суспензий КЖТ пороговыми температурами являются $T_g=750-800$ К. В частности [113], установлено уменьшение времени задержки зажигания на 15–20 % и длительности процесса горения КЖТ на 20 %.

Известны результаты исследований процессов зажигания и горения одиночных свободно падающих капель ВУТ через цилиндрический канал (рис. 1.3.5) в ламинарном потоке разогретого воздуха в диапазоне температур от 1300 до 1500 К [46, 47]. Водоугольное топливо приготавливалось на основе обогащенного каменного угля и битумного угля с размерами фракций частиц 3 и 40 мкм. Эксперименты [46, 47] проводились с предварительно подготовленными агломератами размерами 150–900 мкм [47]. Установлено, что агломераты ВУТ с размерами 200–500 мкм горят в две стадии: фаза горения летучих (10–20 %) и фаза окисления коксового остатка. При этом температура пламени летучих превышала температуру в печи на 700 К [47]. Время горения коксового остатка во многом зависит от размера агломерата ВУТ. В [47] подчеркивается, что задержка зажигания является важным фактором при горении ВУТ. Для типичных размеров агломератов около 250 мкм и концентрации твердой части 40 % времена задержки зажигания составляли почти 25 % от времени существования агломератов в потоке воздуха при температуре 1450 К. Кроме того, гетерогенное горение коксового остатка составляло около 80 % от всего времени горения, а температура в процессе горения превышала температуру горячих газов на 500–700 К. Исследованный состав топлива авторы [46, 47] рекомендуют использовать в котлах, работающих на нефти.



Рисунок 1.3.5. Схема экспериментального стенда для исследования зажигания и горения одиночных свободно падающих капель ВУТ [47]

Подобные экспериментальные исследования проведены для смесей «уголь – нефть» и «уголь – нефть – вода» [114]. Изучены процессы сжигания капель топливных композиций размерами от 600 до 700 мкм при прохождении через поток разогретого воздуха (при температуре 1220–1270 К). Использовался цилиндрический (керамический) канал длиной 1,06 м. Авторы [114] подчеркивают, что содержание жидкого горючего компонента интенсифицирует воспламенение агломерата за счет наличия насыщенных паров продуктов испарения. Нефтяной компонент влияет на времена задержки зажигания ОВУТ. При этом добавление небольшого количества воды усиливало агломерацию капли топлива. С помощью микроскопа проанализированы характеристики зольного остатка [114]. Показано, что добавление жидкого горючего компонента способствует росту массы зольного остатка.

Известные технологии сжигания угольных суспензий в топках котлоагрегатов ТЭС, промышленных и отопительных котельных подразумевают

распыление через форсунку [115, 116] топливовоздушной взвеси [72–75]. Процесс горения распыленного ВУТ является более сложным и имеет отличительные особенности от традиционных жидких топлив энергетических предприятий (например, мазута). Для увеличения полноты сгорания и уменьшения количества недожога необходимо обеспечить наибольшее время пребывания частиц ВУТ в зоне высоких температур топочного пространства. Взаимодействие потока капель ВУТ с потоком воздуха может способствовать их распаду на более мелкие фрагменты (в зависимости от вязкости и внешних условий в процессе интенсификации горения в камере сгорания).

В [117] приведены результаты численных исследований процессов деформации и разрыва капли ВУТ (как результат вторичного распада) в непрерывном потоке воздуха, представлена модель распада капли топлива. Показано [117], что полученные в ходе расчетов данные хорошо соответствуют экспериментальным результатам с учетом погрешности измерений. В [73, 75, 118] в «Ansys Fluent» выполнено моделирование горения распыленного ВУТ с применением вихревого способа сжигания.

Анализ выше перечисленных работ показал, что создание технологий энергоэффективного сжигания ОВУТ на ТЭС позволит утилизировать в промышленных масштабах многочисленные отходы угле– и нефтепереработки, нефтяные шламы, различные отработанные масла, низкосортные угли и др. На основании обзора данных математического моделирования и экспериментов в области зажигания и горения капель ВУТ и ОВУТ можно сделать вывод о том, что отсутствуют результаты для капель суспензионных топлив, соответствующие условиям сжигания в топочном пространстве, т.е. без применения держателей.

При сравнении теоретических [37–39, 93] и экспериментальных [21, 23, 25, 31] результатов предполагалось, что спай термодпары, кварцевые нити, керамические стержни и тонкие металлические проволочки могут приводить к изменениям условий теплопереноса (наличие стока тепла к держателю) в подвешенной на них капле топлива. Преимуществом термодпары является возможность контроля температуры в капле топлива. В случае исследований

зажигания и горения свободно падающих капель топлива [46, 47, 114] есть ряд ограничений, связанных с малым временем пребывания в камере сгорания (определяемым размерами цилиндрического канала) и ламинарным течением потока горячих газов. При этом нагрев капли за счет теплопроводности воздушного зазора накладывает дополнительные ограничения на скорость нагрева топлива. Поэтому для полного сгорания распыленной ВУТ и ОВУТ необходимо создать условия с максимальным временем нахождения частиц топлива в пламени (реакционной зоне). Одним из способов организации сжигания таких топлив является применение вихревого факела (диаметром 400–1000 мм) [74].

К сожалению, известные экспериментальные подходы, основанные на распылении ВУТ и ОВУТ в пространстве модельных топочных камер (соответствующих котельным установкам ТЭС), не позволяют установить временные характеристики зажигания каждой частицы топлива или малой группы таких частиц [37], в том числе и для мелкодисперсного угля [120, 121]. Это обусловлено трудностями видеорегистрации процессов, которые при высоких температурах протекают с большой скоростью [120, 121], а также ограничением конструкций камер сгорания.

Целесообразно создание экспериментальной методики, обеспечивающей витание (вращающихся и умеренно перемещающихся в потоке разогретого воздуха во взвешенном состоянии, с нерегулярным характером описываемых траекторий движений) капли (частицы) топлива в среде закрученного потока разогретого воздуха. Данный метод исследования позволит определить характеристики зажигания КЖТ и реализовать условия, максимально приближенные к процессам в реальных камерах сгорания, так как в них частицы топлива не покоятся, а витают после вдувания в модельную камеру сгорания форсункой, чем выгодно отличается от привычных подходов с зажиганием фиксированных капель топлива. Причем, в первую очередь для КЖТ, необходимо исследовать низкотемпературные (менее 1000 К) режимы зажигания [21–26, 30, 31], которые позволили бы существенно снизить времена выхода агрегатов, систем и ТЭС в целом на заданные режимы работы.

Как следствие, актуальны задачи разработки экспериментальной методики и создания соответствующего стенда для изучения процессов зажигания частиц КЖТ при контролируемом витании в модельной камере сгорания.

Выводы по первой главе

1. Проанализированы основные этапы развития угольных суспензионных технологий, направленных на создание группы перспективных энергоресурсов (топлив) ТЭС.
2. Выделены основные технологии приготовления жидких композиционных топлив с учетом различных основных компонентов ОБУТ и добавок, влияющих на их реологические свойства и характеристики горения.
3. Выполнен анализ современного состояния теоретических и экспериментальных исследований условий и характеристик зажигания и горения композиционных жидких топливных суспензий, определены основные достижения, нерешенные задачи в данной области. Выделены проблемы, сдерживающие развитие технологий КЖТ в теплоэнергетике, транспортном секторе и других отраслях.
4. Сделано заключение о целесообразности разработки методик изучения процессов зажигания и горения капель перспективных для ТЭС суспензий КЖТ, исключающих влияние держателей на тепломассообменные процессы, фазовые превращения и химическое реагирование.
5. В качестве основных компонентов суспензий КЖТ на ТЭС целесообразно использовать многочисленные промышленные отходы, угли разного сорта, нефтешламы и отработанные горючие жидкости. Концентрации и свойства компонентов следует выбирать исходя из конкретных требований к интегральным параметрам процессов сжигания (в частности, экологическим, энергетическим или технико-экономическим [28–30]).

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Перспективные для ТЭС компоненты суспензионных топлив и их свойства

Композиционное жидкое топливо представляет смесь трех и более компонентов: мелкодисперсный уголь (угольная пыль) или отходы углепереработки (фильтр-кек), вода, жидкое горючее вещество, масло или другой нефтепродукт, пластификатор. В настоящей диссертационной работе использовались угли низкой и средней степени метаморфизма, а также продукты их переработки и углеобогащения. Размеры частиц варьировались от 40 до 200 мкм. Также в качестве твердого компонента может применяться углеродный остаток, образующийся при пиролизе автомобильных шин [23]. В проведенных экспериментах рассмотрены возможности применения отходов углеобогажительных фабрик (фильтр-кеков), содержащих частицы мелкодисперсного угля (размеры около 100 мкм). Используемые в экспериментах угольные шламы получены в результате промывания каменной угольной породы водным раствором. Применяемый метод обогащения угля (метод флотации [122]) реализуется в специальных емкостях и фильтр-прессах. Образующаяся при промывке и отжиге угольная смесь является фильтр-кеком.

В качестве жидкого горючего компонента топливных суспензий могут использоваться отходы продуктов нефтяного происхождения: отработанные масла двигателей внутреннего сгорания, энергоустановок (турбин, насосов, компрессоров), механизмов (трансмиссии, редукторов, гидроприводов), масла растительного происхождения (касторовое, рапсовое, пальмовое) и др.

В таблицах 2.1.1–2.1.5 приведены основные свойства исследованных компонентов КЖТ [23, 123]:

1. Бурый уголь марки «Б2», разрез «Бородинский» Красноярского края.
2. Каменный уголь марки «К», шахта «Березовская» Кемеровской области.

3. Каменный уголь марки «Д», Листвянское месторождение Новосибирской области.
4. Фильтр-кек (сухой) каменного угля марки «Ж», обогатительная фабрика «Беловская» Кемеровской области.
5. Фильтр-кек (сухой) каменного угля марки «К», обогатительная фабрика «Северная» Кемеровской области.
6. Фильтр-кек (сухой) каменного угля марки «Д», обогатительная фабрика «Листвянская» Новосибирской области.
7. Фильтр-кек (сухой) каменного угля марки «Г», обогатительная фабрика шахты им. Кирова Кемеровской области.
8. Фильтр-кек (сухой) каменного угля марки «СС», обогатительная фабрика «Черниговская-Коксовая» Кемеровской области.
9. Фильтр-кек (сухой) каменного угля марки «Г», обогатительная фабрика «Калтанская-Энергетическая» Кемеровской области.

Жидкие горючие компоненты КЖТ:

1. Автомобильное моторное масло Total 9000 отработанное.
2. Турбинное масло отработанное (марка Тп-22с по ТУ 38.101.821-2001).
3. Трансформаторное масло отработанное (марка ТСП по ГОСТ-76).
4. Мазут (марка М-100 по ГОСТ 105.85-99).
5. Касторовое масло отработанное (из манометра грузопоршневого МП-60).
6. Компрессорное масло отработанное (марка К-19).
7. Керосин (марка ТС-1).
8. Рапсовое масло (растительное)

Таблица 2.1.1. Результаты технического анализа угольных компонентов

Образец	W^a , %	A^d , %	V^{daf} , %	$Q_{s,v}^a$, МДж/кг
1	14,11	4,12	47,63	22,91
2	2,05	14,65	27,03	29,76
3	10,09	8,52	40,19	24,82

4	–	57,67	45,24	20,9
5	–	26,46	23,08	24,83
6	–	36,99	41,47	19,24
7	–	33,82	43,11	22,16
8	–	50,89	30,16	15,23
9	–	21,20	16,09	26,92

Таблица 2.1.2. Элементный состав угольных компонентов

Образец	C ^{daf} , %	H ^{daf} , %	N ^{daf} , %	S _t ^d , %	O ^{daf} , %
1	73,25	6,516	0,79	0,435	18,99
2	79,79	4,486	1,84	0,868	12,70
3	77,46	6,253	2,27	0,347	13,64
4	73,16	4,999	2,60	0,645	18,60
5	87,20	5,090	2,05	1,022	4,46
6	73,27	4,904	0,02	0,218	21,59
7	75,12	4,638	0,02	0,226	19,99
8	87,47	5,039	2,15	0,444	4,77
9	90,13	4,255	2,31	0,441	2,77

Таблица 2.1.3. Результаты анализа характеристик образцов кеков

Образец	Массовая доля сухого угля, %	Q ^a _{s,v} , МДж/кг
1 (влажный) К	56,5	14,03
2 (влажный) Д	43,2	8,31
3 (влажный) Г	47,0	10,41
4 (влажный) СС	62,1	9,46
5 (влажный) Т	60,9	16,42
6 (влажный) Ж	62,0	12,91

Увеличение общемировых объемов потребления нефти и нефтепродуктов, применяемых в современных технологиях (в том числе на энергетических

предприятий), ведет к интенсивному увеличению объемов отработанных масел или других горючих жидкостей (отходов), которые требуют своевременной утилизации (наиболее рациональный по экологическим, энергетическим и экономическим причинам способ – сжигание на ТЭС в составе водосодержащих суспензий), направленной на улучшение экологической обстановки и охраны природы [23, 30, 124].

Анализ статистических данных показывает, что объемы отработанных моторных масел ежегодно составляют 30–40 млн. тонн [8, 9], отработанных энергетических масел 32–35 млн. тонн [5, 10], нефтешламов 60 млн. тонн [11]. Использование различных горючих жидкостей (в том числе отработанных растительных масел и других горючих компонентов) обусловлено выбором в качестве добавки к ВУТ низкосортного угля или отходов углепереработки (ОВУТ или КЖТ).

Таблица 2.1.4. Результаты анализа характеристик жидких горючих

Образец	Плотность при $T=293$ К, кг/м ³	W^a , %	A^d , %	T_f , К	T_{ign} , К	$Q_{s,v}^a$, МДж/кг
1	871	0,28	0,78	405	491	44
2	868	–	0,03	448	466	44,99
3	877	–	–	421	442	44,98
4	1000	6,12	4,06	438	513	39,4
5	961	0,08	0,013	558	586	36,73
6	887	–	0,023	458	502	45,2
7	885	–	–	303 – 333	573	43,8
8	911	0,28	0,03	515	590	39,52

Для увеличения продолжительности сохранения структурной вязкости и замедления процесса расслоения топливных композиций в составе КЖТ использовался пластификатор «Неолас», свойства которого приведены в табл.

2.1.5. Концентрация вводимой добавки составляла 0,5–1 %. Данная технология хранения топливных композиций в резервуарах позволяет использовать их в течение продолжительного времени.

Таблица 2.1.5. Основные характеристики пластификатора

Показатель	Значение
Внешний вид	Бесцветная жидкость
Содержание ПАВ, % масс.	25
рН раствора	6,5
Плотность при $T=293$ К, кг/м ³	954

2.2. Методика приготовления топливных композиций

Твердый компонент (бурый уголь марки «Б2») предварительно измельчался до пылевидного состояния (с тониной помола от 40 до 200 мкм) быстроходной роторной мельницей Pulverisette 14 (скорость вращения ротора 6000–20000 об/мин). Следует отметить, что используемые угольные отходы (кеки) не требовали дополнительного помола, так как содержали частицы мелкодисперсного угля размерами от 50 до 250 мкм.

Приготовление смесей КЖТ осуществлялось при температуре 293 К, давлении 101,3 кПа и влажности воздуха 80 %. Использовался гомогенизатор MPW–324. На первом этапе подготавливалась водомасляная эмульсия с учетом относительных массовых концентраций масла, воды и пластификатора. Компоненты взвешивались аналитическими весами ViBRA HT 84RCE, затем помещались в емкость для смешивания. Перемешивание компонентов эмульсий длилось в течение 3 мин. Затем в водомасляную эмульсию вводился угольный компонент в соответствии с требуемой относительной массовой концентрацией, и компоненты смешивались до однородной структуры. Длительность перемешивания суспензии составляла 10 минут. Подготовленные образцы ОБУТ объемом около 0,25 дм³ помещались в стеклянные герметичные емкости. При

визуальном наблюдении анализировалась длительность сохранения структурной однородности (отсутствия расслоения) топливных композиций, которая в среднем составляла 8–10 суток [23]. Вязкость топливных композиций, измеренная ротационным вискозиметром ЭАК-1М, при температуре около 300 К изменялась в диапазоне 0,20–0,25 Па·с при варьировании концентрации угля в составе ОВУТ от 45 % до 60 %.

Помимо гомогенизационного способа приготовления ВУТ и ОВУТ известен кавитационный метод, основанный на мокром помоле угля в шаровой барабанной мельнице до мелкодисперсного состояния (до 2 мкм) с частичным распадом на органические составляющие. Основными деталями мельницы являются вращающийся барабан, мелющие шары, или цельпесы, оказывающие механическое воздействие на частицы угля. Для сравнительной оценки реологических свойств и характеристик зажигания КЖТ проведены [68] серии экспериментов для составов топлив с применением обеих технологий приготовления. Применение гомогенизационного способа имеет ряд преимуществ по сравнению с кавитационным, в частности, снижение инерционности процессов зажигания и повышение структурной стабильности КЖТ [68]. Поэтому использование гомогенизационной технологии приготовления составов КЖТ стало основным в выполняемой диссертационной работе.

2.3. Экспериментальный стенд и методика исследования процессов зажигания и горения витающих частиц композиционного жидкого топлива

На рисунке 2.3.1 представлена схема стенда, используемого при исследовании фазовых превращений зажигания и процессов горения витающих частиц КЖТ в потоке разогретого воздуха (до 1000 К), формируемом в специализированной конусообразной модельной камере сгорания, изготовленной из оптически прозрачного жаропрочного кварцевого стекла. Для исследования характеристик процессов зажигания и горения витающих частиц КЖТ в отличие от стационарно подвешиваемых капель (на спаяе термопары, стержнях,

проволочках [23, 99, 100] и др.) проводилась оценка необходимых параметров для витания капли топливной композиции в камере. Целью оценки являлось определение геометрических размеров расширяющейся части кварцевой трубы (с конусообразными входными и выходными каналами), в которой происходило зажигание капли потоком нагретого воздуха. В качестве перспективной (с точки зрения трудоемкости изготовления, размещения в лаборатории и соответствия условиям сжигания топлив на ТЭС) конструкции принята модельная конусообразная камера сгорания. Это позволяло за счет изменения давления потока воздуха (проявляющегося в наличии перепада давления по высоте слоя) в вертикальном направлении удерживать каплю в заданном диапазоне высот. Исходные данные для расчета представлены в таблице 2.3.1.

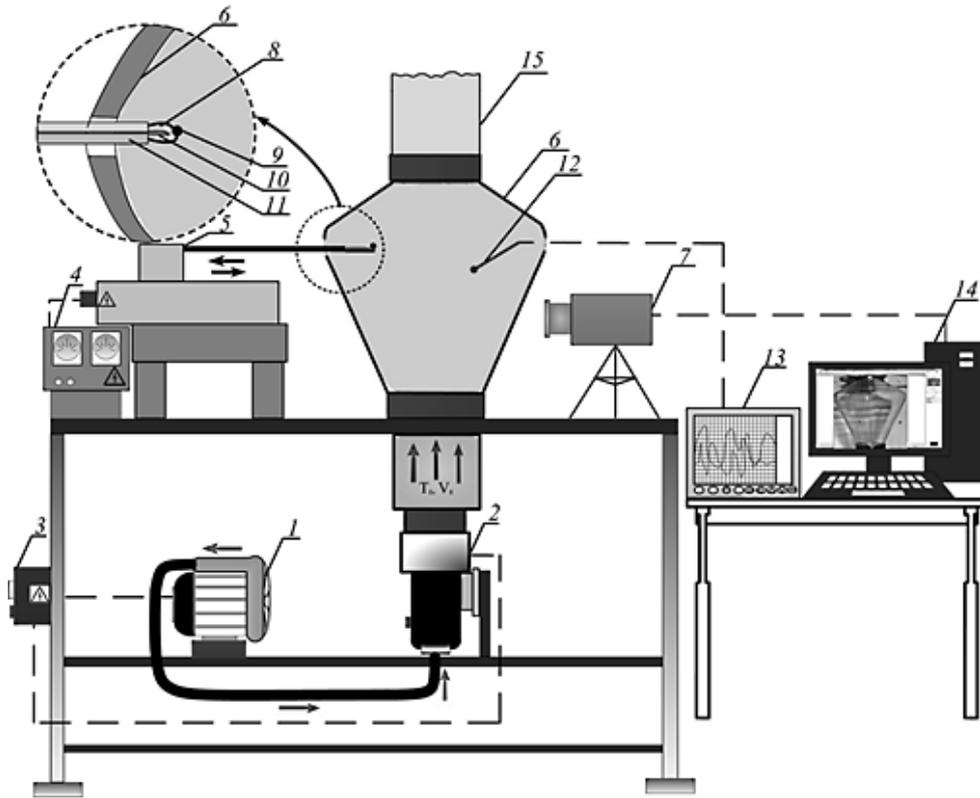


Рисунок 2.3.1. Схема экспериментального стенда [127]: 1 – нагнетатель; 2 – воздухонагреватель; 3 – пульт управления; 4 – блок питания и управления координатным механизмом; 5 – координатный механизм; 6 – специализированная конусообразная камера горения из кварцевого оптического стекла; 7 – высокоскоростная видеочка; 8 – нихромовая проволочка; 9 – капля топливной композиции; 10 – режущий элемент; 11 – металлические полые стержни; 12 –

хромель-алюмелевая термопара; 13 – регистратор температуры; 14 – персональный компьютер с программным обеспечением; 15 – гофрированный термоизолированный канал для удаления продуктов сгорания

Таблица 2.3.1. Исходные данные для расчета параметров конусообразной модельной камеры сгорания

№ п/п	Параметр	Значение	Примечание
1	Начальный диаметр конуса, мм	80	Диаметр трубы d_{tr} соответствует входному диаметру конуса
2	Расход вентилятора высокого давления при $T=293$ К, (V_a) л/мин.	1200	Вентилятор вихревой Leister Robust (50 Гц)
3	Размер (диаметр) капли, мм	1,5	Без учета коэффициента сферичности
4	Начальная температура воздуха (для зажигания ОБУТ), К	753	–
5	Номинальная (максимальная) температура воздуха, К	923	–
6	Влажность исходной капли КЖТ (W^a), % масс.	43,5	–
7	Зольность исходной капли КЖТ (A^d), % масс.	25	–

Расчет геометрических размеров камеры выполнен по методике определения витания одиночной капли [125], для которой предполагается равенство сил аэродинамического сопротивления частицы и гравитационных сил в восходящем потоке воздуха.

При расчете условий витания капли КЖТ приняты допущения:

1. Коэффициент сферичности капли $\phi=0,73$ [126].
2. Перемещение капли в вертикальном направлении в диапазоне $h=0-120$ мм (высота рассчитываемой конусообразной камеры).

3. Свойства компонентного состава КЖТ (плотность, зольность и др.) подчиняются аддитивному правилу, и их можно определить с использованием соответствующих свойств компонентов.

Методика расчета витания капли аналогична [128]. Скорость потока воздуха по сечению канала, при которой одиночная капля переходит во взвешенное состояние, является скоростью витания [129]. Она соответствует началу разрушения монодисперсного взвешенного слоя. При этом

$$\varepsilon = 1,$$

где ε – пористость (относительная доля объема, не заполненного твердой фазой)

$$\varepsilon = 1 - \rho_n / \rho_d, \quad (2.3.1)$$

ρ_n – насыпная плотность, ρ_d – плотность тела (капли).

Скорость витания может быть определена по выражениям [128]:

$$Re_{vit} = \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}}, \quad (2.3.2)$$

$$\omega_{vit} = \frac{Re_{vit} \mu_a}{d_d \rho_a}, \quad (2.3.3)$$

где Re_{vit} – критерий Рейнольдса, ω_{vit} – скорость витания, м/с; d_d – диаметр капли, м; ρ_a , μ_a – плотность (кг/м³) и динамический коэффициент вязкости (Па·с) воздуха; Ar – критерий Архимеда.

Плотность и динамический коэффициент вязкости воздуха (табл.2.3.2) приняты при температуре 823 К [130].

Таблица 2.3.2. Параметры воздуха

Плотность, кг/м ³	0,43
Динамический коэффициент вязкости, Па·с	$376 \cdot 10^{-7}$

Критерий Архимеда вычисляется по выражению [128]:

$$Ar = \frac{d_d^3 g \rho_d - \rho_a}{\nu_a^2 \rho_a} = \frac{d_d^3 g \rho_a (\rho_d - \rho_a)}{\mu_a^2}, \quad (2.3.4)$$

где ν_a – кинематический коэффициент вязкости среды, м²/с; μ_a – динамически коэффициент вязкости среды, Па·с.

Размер капли (эквивалентный диаметр):

$$d_d = d\varphi, \quad (2.3.5)$$

С учетом отклонения от сферической формы размер капли составит [126]:

$$d_d = d\varphi = 1,5 \cdot 0,73 = 1,095 \text{ мм.}$$

Для вычисления критерия Архимеда необходимо определить плотность капли ОВУТ. В соответствии со справочными данными [131, 132] плотность угольной пыли в составе КЖТ 1700 кг/м³ (влажность исходной капли $W^a=43,5\%$).

Плотность капли ОВУТ в начальном состоянии:

$$\rho_d = 0,435 \cdot 998 + 0,565 \cdot 1700 = 1394 \text{ кг/м}^3$$

В дальнейшем при известном элементном составе используемого твердого топлива плотность капли уточняется по данным [133]:

$$\rho_d = \frac{100\rho_{org}}{100 - A^c \left(1 - \frac{\rho_{org}}{2900}\right)}, \quad (2.3.6)$$

$$\rho_{org} = \frac{10^5}{0,344C^p + 4,25H^p + 23}, \quad (2.3.7)$$

где ρ_{org} – плотность органической массы топлива; C^p, H^p – процентное содержание углерода и водорода в топливе; A^c – зольность на сухую массу топлива.

Критерий Архимеда для температуры воздуха 823 К:

$$Ar = \frac{d_d^3 g \rho_s \cdot (\rho_d - \rho_a)}{\mu_a^2} = \frac{(1,095 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 9,8 \cdot 0,43 \cdot (1394 - 0,43)}{(376 \cdot 10^{-7})^2} = 5453,68.$$

Критерий Рейнольдса:

$$\text{Re}_{vit} = \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}} = \frac{5453,68}{18 + 0,6 \cdot \sqrt{5453,68}} = 87,52.$$

Скорость витания:

$$\omega_{vit} = \frac{\text{Re}_{vit} \mu_a}{d_d \rho_a} = \frac{87,52 \cdot 376 \cdot 10^{-7}}{1,095 \cdot 10^{-3} \cdot 0,43} = 6,98 \text{ м/с.}$$

Вентилятор высокого давления вихревой Leister Robust позволяет обеспечить максимальный расход воздуха $V_v=1200$ л/мин при 293 К, что соответствует скорости воздуха 4–5 м/с в канале диаметром 80 мм.

Массовый расход воздуха:

$$G_a = \rho_a^{20} V_a, \quad (2.3.8)$$

Скорость воздуха в канале:

$$w = \frac{V_v}{F} = \frac{V_v}{0,785 \cdot d_{tr}^2}, \quad (2.3.9)$$

При температуре воздуха в канале 823 К с учетом его плотности 0,43 г/л массовый расход воздуха:

$$G_a = \rho_a^{20} V_a = 1,2 \cdot 1200 = 1440 \text{ г/мин.}$$

$$V_a = \frac{G_a}{\rho_a^{550}} = \frac{1440}{0,43} = 3348 \text{ л/мин или } V_a = \frac{3348 \cdot 10^{-3}}{60} = 0,0558 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Скорость воздуха в канале диаметром 80 мм составляет:

$$w = \frac{V_v}{F} = \frac{V_v}{0,785 \cdot d_{tr}^2} = \frac{0,0558}{0,785 \cdot (80 \cdot 10^{-3})^2} = 11,1 \text{ м/с.}$$

Таким образом, требуемая скорость витания будет обеспечена, и капля (частица) суспензии КЖТ способна перемещаться вертикально в камере вдоль расширяющейся части конуса. При расчете принималось, что меньший диаметр конуса соответствует диаметру кварцевой трубы. Максимальную высоту конуса примем 120 мм (вследствие ограничений размеров экспериментального стенда). Считалось, что скорость витания частицы 6,98 м/с соответствует области с меньшим диаметром конуса (80мм).

Рассмотрим итоговое состояние капли (чтобы определить угол раскрытия конуса) – полное выгорание органической массы с образованием зольного каркаса. Для данного промежуточного состояния капли ее диаметр (d_d) соответствует 1,095 мм (модель сохраняющегося зольного каркаса). Зольность (A^d) исходной капли ОБУТ 25 %.

Плотность зольного каркаса:

$$\rho_{zk} = \rho_z A^d, \quad (2.3.10)$$

Плотность зольного каркаса в частице диаметром 1,095 мм составит:

$$\rho_{zk} = \rho_z A^d = 2400 \cdot 0,25 = 600 \text{ кг/м}^3,$$

где ρ_z – истинная плотность золы (в диапазоне 2100–2400 для Кузнецких углей) [134].

Критерий Архимеда:

$$Ar = \frac{d_d^3 g \rho_a (\rho_{zk} - \rho_a)}{\mu_a^2} = \frac{(1,095 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 9,8 \cdot 0,43 \cdot (600 - 0,43)}{(376 \cdot 10^{-7})^2} = 2346,4.$$

Критерий Рейнольдса:

$$Re_{vit} = \frac{Ar}{18 + 0,6\sqrt{Ar}} = \frac{2346,4}{18 + 0,6 \cdot \sqrt{2346,4}} = 49,85.$$

Скорость витания:

$$\omega_{vit} = \frac{Re_{vit} \mu_a}{d_d \rho_a} = \frac{49,85 \cdot 376 \cdot 10^{-7}}{1,095 \cdot 10^{-3} \cdot 0,43} = 3,98 \text{ м/с.}$$

Диаметр конуса:

$$d = \sqrt{\frac{V_a}{0,785w}}, \quad (2.3.11)$$

При данной скорости и расходе воздуха 0,0588 м³/с диаметр конуса составляет:

$$d = \sqrt{\frac{V_a}{0,785w}} = \sqrt{\frac{0,0588}{0,785 \cdot 3,98}} = 0,137 \text{ м}$$

Следовательно, больший диаметр конуса составляет 137 мм. Высота конуса принята ранее 120 мм. Таким образом, угол раскрытия конуса составляет около 24 градусов (рисунок 2.3.2, а).

В связи с технологическими ограничениями завода-изготовителя внесен поправочный коэффициент при выплавке конусообразной камеры из кварцевого прозрачного оптического стекла (рисунок 2.3.2, б). Как следствие, большой диаметр конуса увеличен практически в два раза (составил 258 мм). Размеры входных и выходных каналов, угол раскрытия конуса остались без изменений. Для контроля температуры в камере сгорания хромель-алюмелевой термопарой, а также ввода и сброса капель КЖТ в ее боковой части сделаны два технологических отверстия диаметром 11 мм. Камера изготовлена общей высотой 325 мм. Объем камеры сгорания составил 6 л. Высота активной зоны витания частиц ОВУТ составляет около 200 мм. Это позволило расширить границы допустимых скоростей витания частиц (для совокупности одиночной, малой группы и потока капель) КЖТ.

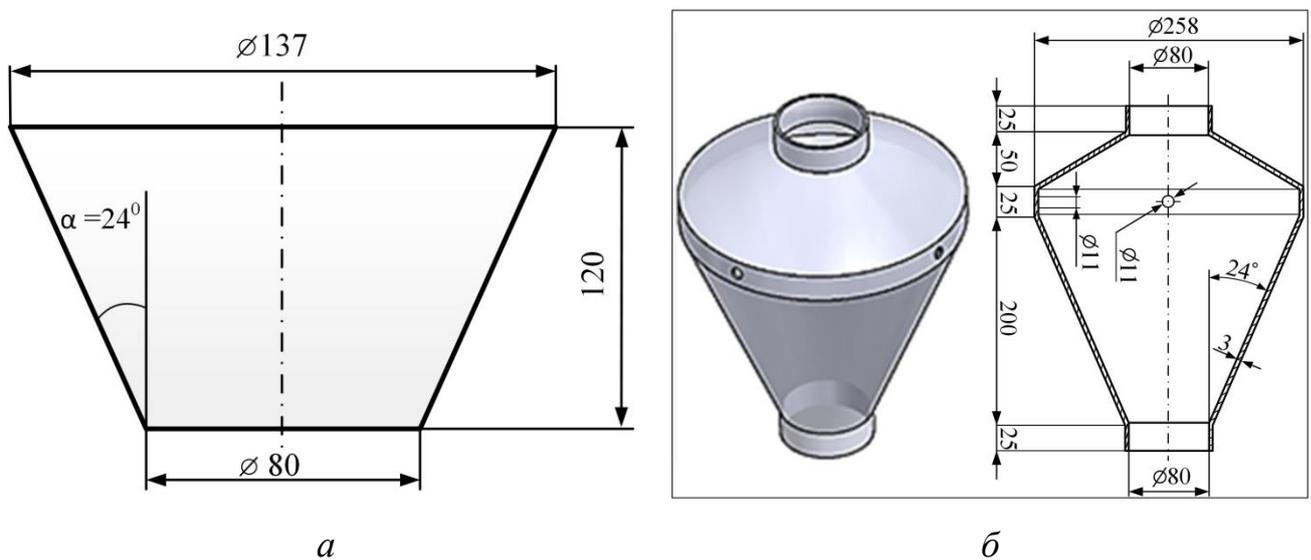


Рисунок 2.3.2. Конусообразный канал для создания условий витания частиц КЖТ (а); модельная конусообразная камера сгорания, выплавленная завод-изготовителем (б) [125]

С помощью управляемого регулятора частоты вращения вентилятора высокого давления задавался необходимый расход воздуха и скорость потока,

который проходил через нагнетатель 2 и воздухонагреватель 3, а затем в камеру сгорания. Регулируемый диапазон частот от 20 до 50 Гц соответствовал значениям скорости потока воздуха на входе в модельную камеру от 2 до 5 м/с. Максимальный расход при скорости потока 5 м/с воздуха составлял 1200 л/мин. При соответствующем расходе, скорости и температуре воздуха осуществлялся контроль процесса витания частиц топлива в потоке воздуха.

Для измерения и контроля температуры внешней поверхности стенки камеры сгорания также применялась тепловизионная съемка (рис. 2.3.3) устройством Testo 885 (погрешностью измерения ± 2 К или 2 % от измеренного значения).

Температура и скорость движения воздуха в камере сгорания менялись в диапазонах: 500–900 К и 0,5–5 м/с, соответственно. В нижней и верхней частях камеры сгорания установлены распределительные решетки (сетки), изготовленные из нержавеющей стали с размером ячейки 0,5×0,5 мм. Эти решетки предназначены для усреднения (выравнивания) профиля скорости потока воздуха по сечению камеры сгорания.

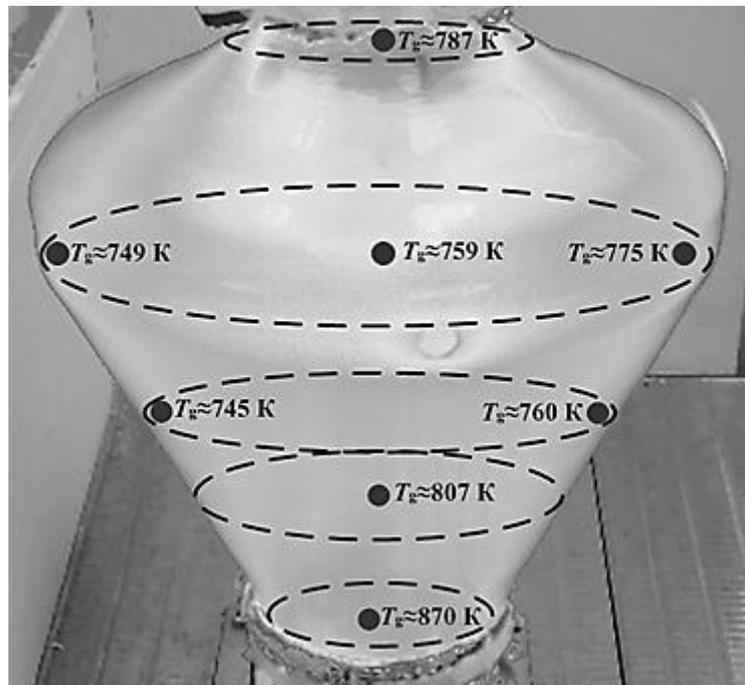


Рисунок 2.3.3. Типичное распределение температуры в использованной модельной камере сгорания при температуре воздуха $T_g=920$ К [127]

Объемная концентрация кислорода в разогретом воздухе измерялась газоанализатором Testo 340 (погрешность $\pm 0,2$ %, дискретность измерения 0,01 %) и составляла 20,5 % для выделенных диапазонов изменения T_g и V_g .

Генерирование капли КЖТ осуществлялось при помощи автоматического дозатора Finnpiquette Novus 19 (минимальный и максимальный дозируемые объемы – 1 мкл и 10 мкл, шаг варьирования – 0,1 мкл) с применением различных насадок. Также в качестве вспомогательного элемента для дозирования капли суспензии использовалась кювета.

Масса компонентов КЖТ и начальная масса капли (m_d) определялась с помощью аналитических весов ViBRA HT 84RCE 16 (рисунок 2.3.1) (с дискретностью измерения 0,1 мг).

Размер капли КЖТ (радиус R_d) измерялся перед вводом в камеру сгорания (рисунок 2.3.1) с использованием высокоскоростной монохромной камеры 10 Phantom Miro M310 (скорость съемки более 3000 кадров в секунду при разрешении 1280x800 пикселей), а также программного обеспечения Tema Automotive (вычислением по видеogramмам) с учетом заранее заданных масштабных коэффициентов. Применялись цветная (Phantom V 411) и монохромная (Phantom Fastcam SA1) высокоскоростные видеокамеры со скоростью съемки до 10^5 кадров в секунду. Для каждого изображения капли вычисляли шесть условных диаметров, затем среднее значение радиуса R_d [23, 27, 85]. Систематическая погрешность определения размеров капель не превышала 4%.

В проведенных экспериментах регистрировались параметры: температура (T_g) и скорость (V_g) потока воздуха, размер (R_d) и масса (m_d) капли топлива, время введения капли в камеру до сброса (τ_m) и время задержки зажигания (τ_d). Для контроля времени τ_d применялись алгоритмы непрерывного слежения в программном обеспечении «Tema Automotive», позволяющие определять характерную цветопередачу – интенсивность свечения образца топлива в процессе инициирования горения [21, 23]. В частности, с применением монохромной видеокамеры и программного обеспечения Tema Automotive в

регистрационной области выставлялся градиент цветопередачи, соответствующий условиям, при которых образец топлива горит (по цветовой модели 255 соответствует белому цвету, 0 – черному; принималось, что свечению – горению образца соответствовал диапазон RGB 220–255). В программном обеспечении «Тема Automotive» этот параметр имел название «Threshold». Время τ_d определялось как интервал от момента помещения капли в камеру до достижения «Threshold» (в области, соответствующей зажиганию) значения 220 (на любом участке поверхности капли топлива). Как правило, происходило зарождение локального очага горения на поверхности капли КЖТ.

Для контроля правомерности использования цветовой модели «RGB» при определении времени задержки зажигания топливной композиции проведены дополнительные эксперименты. В них капля ОБУТ генерировалась на спае малоинерционного термоэлектрического (платина-платинородиевый, диапазон измеряемых температур 273–1873 К, систематическая погрешность ± 1 К, инерционность не более 1 с, диаметр спае около 0.1 мм) преобразователя и вводилась в цилиндрический канал камеры сгорания [23]. Аналогично экспериментам [21, 23] термопреобразователь подключался к многоканальному регистратору и непрерывно контролировал изменение температуры в центре капли топлива. Допустимое отклонение по толщине пленки ОБУТ вокруг спае относительно среднего значения принималось не более 10 %. Такой подход позволял регистрировать температуру в капле (T_d), по значению которой контролировалось выполнение критериев зажигания и завершения процесса горения топливной композиции [21, 23]. В частности, в соответствии с основными заключениями для рассматриваемой системы в качестве критериев устойчивого зажигания использовалось одновременное выполнение неравенства $T_d > T_g$ и достижение скорости изменения T_d не менее 10 К/с [21, 23, 85].

Процесс горения считался завершенным при температуре T_d , близкой к значению T_g . На рисунке 2.3.4 приведен типичный тренд изменения температуры капли ОБУТ с иллюстрацией характерных значений «Threshold» для двух областей поверхности капли – соответствуют реагирующей (светящейся) и

нераагирующей (затемненной). Выделенные корреляции измерений T_d и параметров обработки в программном комплексе Tema Automotive с использованием цветовой модели RGB показали правомерность использования довольно узкого диапазона (220–255) изменения параметра «Threshold» для контроля условий устойчивого зажигания топлива.

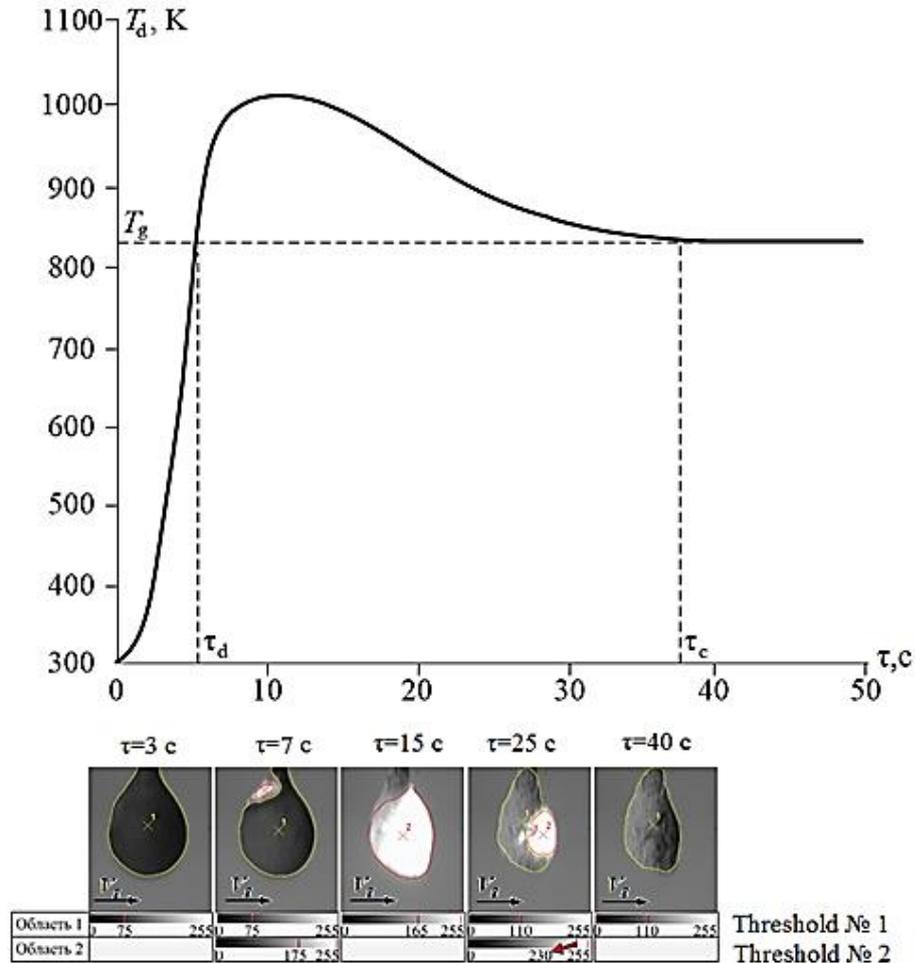


Рисунок 2.3.4. Тренд изменения температуры капли ОВУТ с иллюстрацией схемы выбора критерия зажигания при применении цветовой модели RGB на спаре термопары [21, 23] (при $R_d \approx 0,8$ мм, $T_g \approx 830$ К, $V_g \approx 5$ м/с)

Для контроля скорости движения потока разогретого воздуха V_g проводились дополнительные эксперименты с применением программного обеспечения «Actual Flow» и совместной реализацией оптических методов «Particle Image Velocimetry» (PIV) [135, 136] и «Stereo PIV» [137, 138]. Для этого к входному каналу нагнетателя 2 подключался баллон с трассирующими частицами

(применялись частицы диоксида титана размерами 80–100 нм). Трассеры вдувались в нагнетатель и с потоком воздуха двигались в камеру. Напротив камеры под углом 90° относительно друг друга устанавливались кросскорреляционная камера 11 и двухимпульсный твердотельный лазер 13. Измерение мгновенного поля скорости потока воздуха основано на регистрации перемещения трассирующих частиц за фиксированный интервал времени. Измерительной областью распыленного потока считалась плоскость светового ножа лазера. Трассирующие частицы освещались в импульсном режиме. Образы частиц регистрировались цифровой кросскорреляционной высокоскоростной видеокамерой. Последующая обработка изображений позволяла рассчитать смещения частиц за время между вспышками источника света и скорости трассеров. После получения полей скорости движения трассеров и вычисления V_g проводились основные эксперименты с зажиганием витающих частиц КЖТ (без трассеров в потоке воздуха). В этих экспериментах кросскорреляционные элементы не использовались. Значения V_g на входе в камеру б варьировались в диапазоне 0,5–5 м/с.

2.4. Ввод и сброс капель жидкого композиционного топлива в модельную камеру сгорания

Одиночная капля КЖТ. Ввод капли, а также небольшой группы капель топлива в камеру сгорания осуществлялся с помощью автоматизированного координатного механизма [139]. Последний позволяет совершать поступательные движения в горизонтальной плоскости от внешней стенки камеры сгорания к ее оси симметрии с регулируемым шагом и скоростью. Непосредственный ввод капли в модельную камеру сгорания (и сброс) осуществлялись с помощью специализированного элемента, условная схема которого представлена на рисунке 2.4.1, а.

Группа из трех капель КЖТ. В отличие от экспериментов [139] с одиночной каплей непосредственный ввод группы из трех капель в камеру сгорания (их

синхронный сброс) осуществлялся с помощью специализированного элемента, который представляет три идентичные конструкции (рисунок 2.4.1, *а*), соединенные (спаянные) между собой (рисунок 2.4.1, *б*) [140]. Для более удобного размещения и сброса группы каплей топлива эти металлические элементы были спаяны под разным углом и с небольшим сдвигом в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Синхронный сброс всех каплей осуществлялся с помощью моторизованного механизма, связанного с системой ее ввода в камеру сгорания. Режущий элемент 3 сбрасывал каплю 1 с нихромового держателя 2 при достижении центральной части камеры сгорания (рисунок 2.4.1).

На нихромовую проволочку (диаметр $d=0,3$ мм) 2, проходящую внутри двух параллельно расположенных полых направляющих 4, генерировалась капля КЖТ 1 заданного размера (радиус варьировался в диапазоне 0,3–1,5 мм) (рисунок 2.4.1). При перемещении подвижной платформы координатного механизма 7 (рисунок 2.3.1) в сторону камеры сгорания происходило натяжение нихромовой проволочки и ее движение в противоположном направлении (от камеры сгорания). При этом частица ОБУТ зацеплялась режущим элементом и отрывалась с проволочки в камеру сгорания при достижении ее оси симметрии. Время, в течение которого капля поступала в камеру сгорания и отрывалась от нихромовой проволочки, составляло в среднем около 1 с, при установленной скорости движения координатного механизма 0,15–0,2 м/с.

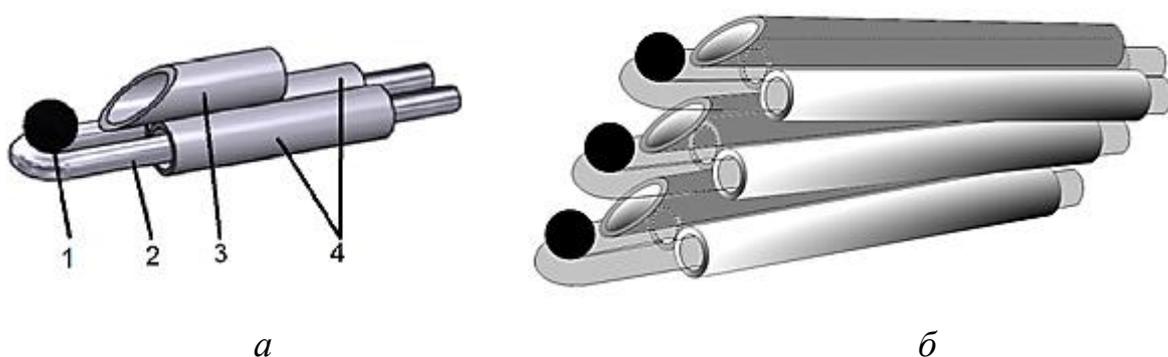


Рисунок 2.4.1. Устройства сброса одиночной (*а*) и группы (*б*) каплей КЖТ [139–140]: 1 – капля КЖТ; 2 – тонкая нихромовая проволочка; 3 – режущий элемент; 4 – металлические направляющие

Распыливание топливной композиции (аэрозоль). Для установления отличий инерционности процессов зажигания одиночной и малой группы витающих частиц КЖТ в сравнении с полидисперсным потоком создана специализированная система впрыска топливной композиции в модельную камеру сгорания. Это позволило сделать оценку отличий характеристик зажигания аэрозольного потока КЖТ от одиночной витающей частицы. Поскольку процессы сжигания КЖТ в топках осуществляются после распыла полидисперсного потока в камеру сгорания, то влияние взаимодействия капель, столкновений, дробления и коагуляции становятся важным фактором устойчивости и интенсивности процессов горения частиц топлива. Представляет интерес экспериментальное исследование последствий столкновений капель ОБУТ при витании их в потоке воздуха. Последствия столкновений капель топлива изучались путем статистического анализа экспериментальных данных [141].

В отличие от экспериментов [139, 140] с одиночной каплей и группой из трех капель КЖТ в конструкцию камеры сгорания внесены изменения. Применен вращательный лопастной механизм 3 (с частотой вращения 400–600 об/мин), установленный в нижней части камеры сгорания, создающий дополнительное интенсивное закручивание потока воздуха. При использовании объемов топливной композиции до 2 мл установка данного механизма не требовалась. Для распыла потока топливной суспензии 7 использовался Т-образный смеситель 5, в один из каналов которого подавался сжатый воздух, а во второй – КЖТ (рисунок 2.4.2.). Давление воздуха варьировалась в диапазоне 150–200 кПа. Производительность используемого воздушного компрессора составляла 0,5 л/с. Система позволяла генерировать капли топлива различных размеров (полидисперсный поток). Средний размер капель впрыскиваемого ОБУТ варьировался в диапазоне R_d от 0,1–1 мм. Для торможения скорости потока разогретого воздуха 9 совместно с уходящими газами на выходе из камеры, поддержания температуры и интенсификации завихрения нагретого воздуха в верхней части камеры установлен ограничитель потока воздуха 8 (рис. 2.4.1).

Начальная скорость движения капель (на выходе из сопла смесителя) и скорость встречного потока воздуха изменялись в диапазонах от 2,5–3,5 м/с и 3–4 м/с соответственно. Измерение температуры T_g проводилось двумя хромель-алюмелевыми термопарами (диапазон измерения 273–1373 К, погрешность ± 3 К, инерционность 3 с) через отверстие 10.

Процессы дробления, коагуляции и распада витающих капель КЖТ, а также их размеры регистрировались с применением системы высокоскоростных видеокамер. Витающие частицы КЖТ описывали круговые траектории движения, т.е. по горизонтальному сечению камеры сгорания. Видеорегистрация кадров процессов столкновения частиц велась по мере приближения к фокусному расстоянию объектива. Вследствие ограничений глубины резкости используемой оптической системы можно получить четкое изображение только тех объектов, которые попали в плоскую область пространства ± 5 мм вокруг фокусировки объекта. Систематические погрешности определения размеров капель КЖТ с применением видеорегирующей системы не превышали 3 %. Максимальные случайные погрешности составили 3–4 %.

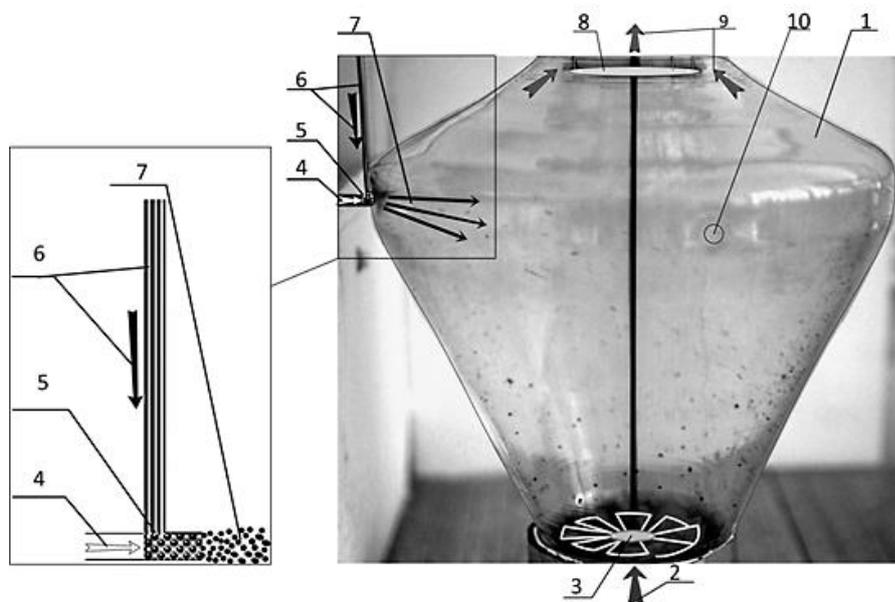


Рисунок 2.4.2. Модельная камера сгорания с системой впрыска полидисперсного потока КЖТ [141]: 1 – стенка камеры из термостойкого оптически прозрачного кварцевого стекла; 2 – поток воздуха; 3 – вращательный лопастной механизм; 4 – канал подвода сжатого воздуха; 5 – смеситель; 6 – канал подвода ОБУТ; 7 – поток

капель ОБУТ; 8 – ограничитель потока воздуха; 9 – поток газов на выходе из камеры; 10 – технологическое отверстие для измерения температуры

Созданный экспериментальный подход позволил обеспечить условия протекания тепломассообменных процессов, приближенные к реальным камерам сгорания, используемым на энергетических предприятиях, так как в них частицы топлива не покоятся, а витают после впрыска форсункой в камеру сгорания. Эти особенности отличают созданный стенд от традиционных подходов с зажиганием закрепляемых капель ОБУТ на малоинерционных термopарах и других держателях [23, 89, 97]. Методика исследования может использоваться для различных составов в широком диапазоне варьирования компонентов КЖТ: жидких горючих веществ, воды и твердой горючей основы.

Выводы по второй главе

1. Разработан не имеющий аналогов экспериментальный стенд с применением специализированной модельной камеры сгорания из жаропрочного кварцевого стекла с конусообразными входными и выходными каналами для изучения процессов зажигания и горения частиц КЖТ при витании в потоке разогретого воздуха (до 1000 К) с варьируемой температурой и скоростью его движения. Предложен подход, позволяющий приблизить условия эксперимента к топочным процессам ТЭС по витанию частиц топлива в камерах сгорания.
2. Создана методика обработки экспериментальных результатов по определению времени задержки зажигания витающей капли с использованием цветовой модели RGB и программным обеспечением «Тема Automotive» (для непрерывного слежения за объектом контроля и определения интенсивности свечения образца топлива). Данная методика позволяет определять начальный момент зажигания и горения капель ОБУТ как в условиях стационарного расположения, так и при витании частицы КЖТ в диапазоне градиента цветопередачи 220–255.

3. Разработаны устройства ввода и сброса одиночных и небольшой группы капель КЖТ в камеру сгорания. Также разработана и смонтирована система впрыска аэрозольного потока капель ОВУТ в модельную камеру сгорания с применением вспомогательных элементов обеспечения условий витания.
4. Предлагаемая методика диссертационного исследования позволяет определить интегральные характеристики и выявить основные закономерности процессов зажигания и горения витающих частиц КЖТ с учетом систематических и случайных погрешностей средств измерения.
5. Методика экспериментальных исследований является инструментом для изучения зажигания и горения частиц ОВУТ при их витании в потоке разогретого воздуха в модельной камере сгорания, позволяющим реализовать условия эксперимента, максимально приближенные к топочным процессам. Это позволит разработать рекомендации по практическому применению полученных результатов применительно к топкам агрегатов для различных составов топливных композиций при оптимальных концентрациях различных компонентов КЖТ.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ЗАЖИГАНИЯ ВИТАЮЩИХ КАПЕЛЬ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ДЛЯ ТЭС ЖИДКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ТОПЛИВ

3.1. Условия и характеристики, соответствующие различным режимам витания, зажигания и горения капель перспективных композиционных жидких топлив

Проведены [139] экспериментальные исследования процессов витания капель (частиц) органоводоугольных топлив (радиусы $R_d=0,4-0,9$ мм) с их последующим зажиганием и горением. С использованием высокоскоростной видеосъемки регистрировались траектории и области перемещения капель КЖТ в модельной камере сгорания. Определены необходимые условия витания капель КЖТ (R_d , T_g , V_g), приготовленных из отходов углепереработки (как наиболее перспективных для ТЭС с точки зрения технико-экономических, энергетических и экологических индикаторов [28–30]), с последующими стадиями инициирования процесса горения.

Для определения механизма зажигания витающей капли КЖТ в закрученном потоке воздуха исследован состав на основе бурого угля (таблица 3.1.1). Кроме того, проведены эксперименты по определению значений параметров T_g^{\min} и V_g^{\min} для условий витания капли без зажигания и с зажиганием с использованием композиционных топлив на основе бурого, каменного угля, фильтр-кека «К», характеристики которых приведены в таблице 3.1.2. Размеры частиц угля составляли 80–100 мкм. Основные характеристики (влажность, зольность, содержание летучих, температуры воспламенения, теплота сгорания) компонентов КЖТ представлены в [23].

При проведении серии экспериментов [139] и анализе видеозаписей установлено, что среди множества траекторий движения витающей капли топлива в объеме камеры сгорания можно выделить четыре основных (характеризуют режимы витания) с локальными участками их зажигания. Видеограммы основных

траекторий представлены на рис. 3.1.1.

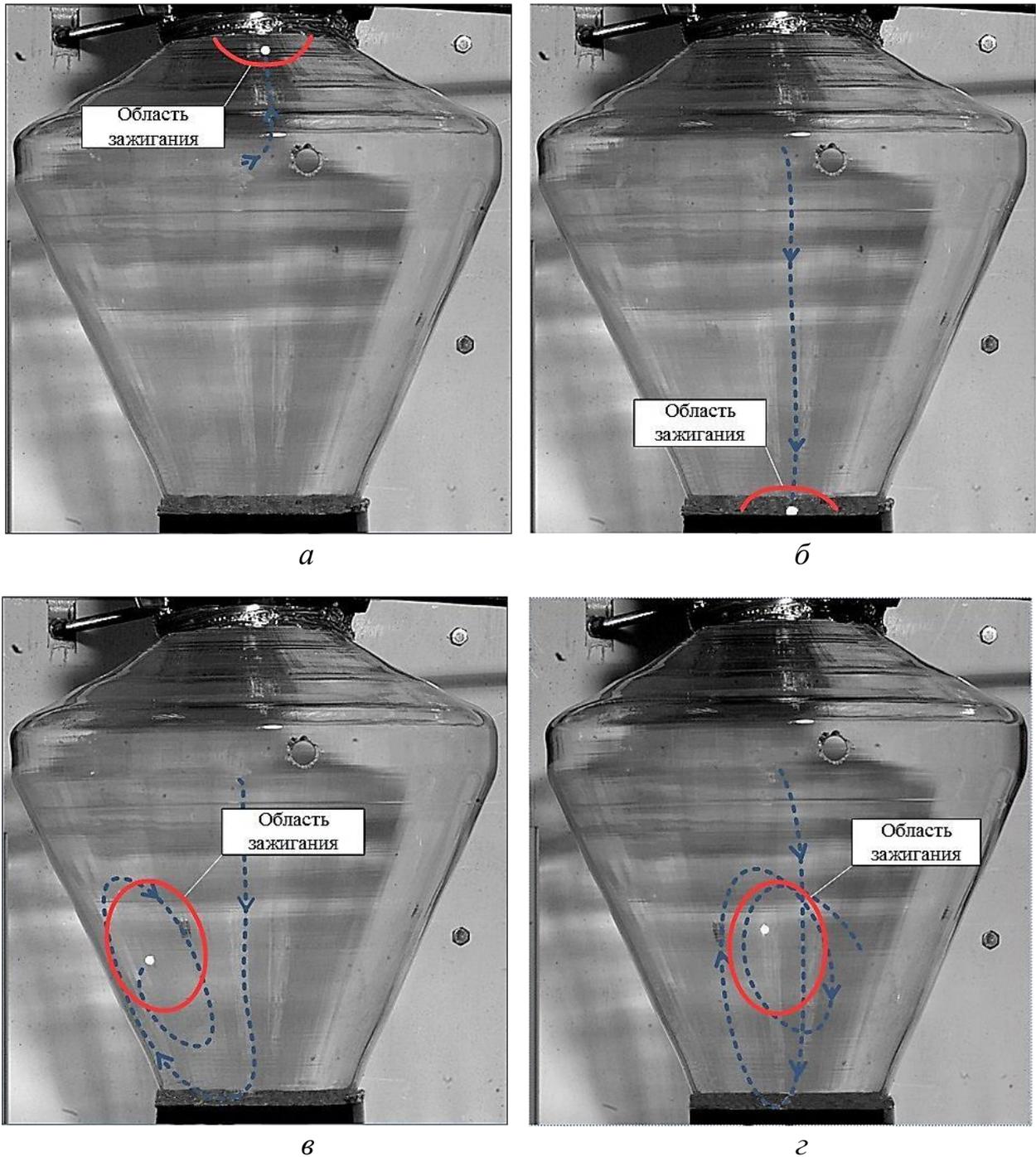


Рисунок 3.1.1. Видеogramмы экспериментов [31, 139] с каплями КЖТ (40 % бурого угля «Б2», 49 % воды, 10 % отработанного моторного масла, 1 % пластификатора) при характерном уносе и падении, а также реализации четырех режимов зажигания (для условий R_d менее 0,4 мм, $T_g \approx 730-750$ К, $V_g \approx 4$ м/с: *a* – первый; R_d более 1 мм, $T_g \approx 730-750$ К, $V_g \approx 4$ м/с: *б* – второй; $R_d = 0,3-1$ мм, $T_g \approx 730-750$ К, $V_g \approx 4$ м/с: *в* – третий, *г* – четвертый)

После помещения капли КЖТ с помощью элемента подачи и сброса в модельную камеру сгорания происходил ее отрыв. В этот период времени (с момента входа капли КЖТ в камеру) регистрировалось интенсивное изменение ее внешнего вида (за счет испарения влаги и горючей жидкости приповерхностный слой становился пористым) с последующей трансформацией поверхности. При дальнейшем анализе целесообразно использовать термин «частица». При первом режиме (рис. 3.1.1, *a*) капля после отрыва от устройства подачи уносилась в верхнюю часть конусообразного канала за счет воздействия потока газовой среды. Впоследствии частица топлива зажигалась, либо прилипала к верхней металлической сетке или покидала модельную камеру через вытяжной зонт.

Второй режим (рис. 3.1.1*б*) характеризовался падением капли топлива под действием силы тяжести в нижнюю часть камеры на распределительную металлическую решетку и прилипанием к последней за счет действующих сил сцепления, где, соответственно, и происходило зажигание.

Третий (рис. 3.1.1*в*) и четвертый (рис. 3.1.1*г*) режимы характеризовались витанием и зажиганием частицы в пристеночной (вдоль образующих конуса) и центральной областях (вдоль вертикальной оси симметрии) модельной камеры, соответственно. При этом витание частицы сопровождалось периодическим контактом со стенками камеры сгорания (в том числе касанием нижней сетки и верхнего ограничителя), что в некоторых случаях приводило к разрушению частицы и диспергированию фрагментов топлива. Умеренное перемещение витающей частицы сопровождалось описанием сложных криволинейных и эллиптических траекторий движения. Реализация третьего и четвертого режимов, скорее всего, связана со значением угла сброса капли КЖТ в камеру сгорания. На рис. 3.1.2 показаны траектории движения одиночной витающей зажигающей частицы КЖТ вдоль стенки модельной камеры сгорания. На рис. 3.1.3 представлены траектории перемещения (с различными участками) группы из трех частиц КЖТ с реализацией процессов их витания и зажигания.

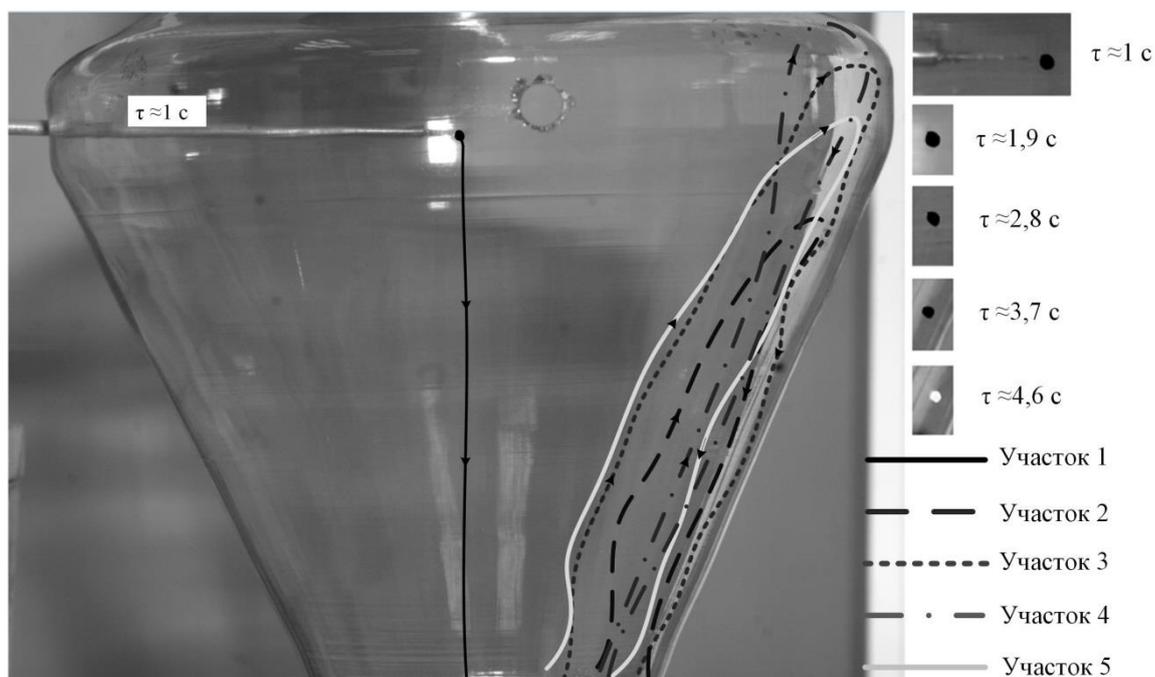


Рисунок 3.1.2. Типичные кадры видеogramмы экспериментов [139] с каплей КЖТ (на основе 40 % бурого угля «Б2», 49 % воды, 10% отработанного моторного масла и 1 % пластификатора) в процессе ее витания и зажигания для условий $R_d \approx 0,5$ мм, $T_g \approx 840$ К, $V_g \approx 4$ м/с

Немонотонное (по скорости) движение витающих частиц связано с реализацией газофазного окисления горючей парогазовой смеси, сгоранием паров горючей жидкости и летучих газов, прогревом и гетерогенным зажиганием коксового остатка, его выгоранием и формированием зольного остатка, а также выделением газообразных продуктов сгорания. Нередко обезвоженные или загоревшиеся частицы, а также частицы зольного остатка вылетали из объема камеры сгорания через верхний конусообразный канал (с последующим прилипанием к распределительной решетке или уносом частиц через вытяжной зонт), проходя ограничитель потока воздуха 8 (рис. 2.4.2.). Следует отметить, что каждому режиму соответствовал определенный диапазон изменения параметров R_d , T_g , V_g , при котором регистрировалось устойчивое зажигание образцов топлива. В таблице 3.1.1 представлены условия и параметры, соответствующие витанию и зажиганию каплей КЖТ на основе бурого угля (50 %), отработанного моторного масла (10 %), воды (39 %) и пластификатора (1 %).

673	607	625	643	632	частица не зажигается, не витает	частица зажигается на сетке, витает	частица витает, не зажигается	частица витает, не зажигается
723	595	672	674	676	частица зажигается на сетке, не витает	частица зажигается на сетке, витает	частица зажигается на сетке, витает	частица зажигается на сетке, витает
773	667	712	684	698	частица зажигается на сетке, витает	частица зажигается на сетке, витает	частица зажигается на сетке, витает	частица зажигается на сетке, витает
823	691	743	773	729	частица зажигается на сетке, витает	частица зажигается на сетке, витает	частица витает, зажигается	частица витает, зажигается
873	713	778	810	780	частица зажигается на сетке, витает	частица зажигается на сетке, витает	частица витает, зажигается	частица витает, зажигается
903	-	805	857	794	-	частица витает, зажигается	частица витает, зажигается	частица витает, зажигается

Для четырех исследованных режимов перемещения капель КЖТ в модельной камере сгорания оптимальная (для обеспечения витания) скорость потока воздуха на входе в камеру составила около 3–4 м/с. Первый режим зажигания реализовывался при размерах частиц R_d менее 0,4–0,5 мм и температуре воздуха в центральной части камеры от 670 К и более (частицы уносились газовым потоком). Второй режим осуществлялся при размерах капель $R_d \geq 0,6$ мм и температуре в центральной части камеры от 670 К – зажигание происходило на металлической сетке (решетке) нижнего основания конуса. Для третьего и четвертого режимов характерны близкие условия реализации процессов витания и последующего зажигания капель КЖТ радиусом $R_d \approx 0,4–0,7$ мм и T_g в центральной области камеры более 730К.

Установленные режимы витания и зажигания существенно зависят от размера капель КЖТ. С увеличением размера капли повышается площадь поверхности, с которой испаряется вода и горючая жидкость. Возрастает масса вдуваемых паров горючей жидкости и продуктов термического разложения. Для разных размеров капель КЖТ предполагается различное время выхода газообразных и летучих продуктов при определенных V_g и T_g . Соответственно, для больших капель скорость прогрева $v(T, t)$ растет медленнее, чем при меньших радиусах R_d . В свою очередь, это влияет на массу частицы топлива. При равенстве силы тяжести (mg) частицы и подъемной силы (ρsv^2) восходящего потока (предполагается равенство гравитационных сил и аэродинамического сопротивления в восходящем потоке воздуха) происходил переход в состояние витания. Также условием устойчивого витания капель КЖТ в камере сгорания является равенство силы давления потока газа и веса слоя, приходящего на единицу площади поперечного сечения. Такой характер близок к процессам сжигания угля в псевдооживленном слое [143], достаточно широко распространенным в топочных камерах ТЭС и котельных в Китае и Японии, работающих на ВУТ. Необходимо отметить, что при достижении соответствующих стадийных процессов инициирования горения частиц КЖТ изменялась высота витания в модельной камере сгорания, вследствие действующих на них аэродинамических сил и уменьшения массы частицы. При этом высота сброса капель КЖТ с устройства подачи составила 235 мм.

Анализ выделенных режимов витания и зажигания капель КЖТ показал, что кроме размеров частиц значительное влияние на процессы инициирования горения оказывают температура и скорость потока воздуха. Выполненные эксперименты [142] показали, что рост температуры воздуха (газовой среды) приводил к интенсификации процессов зажигания и горения витающих капель КЖТ, так как с повышением T_g увеличивается количество энергии, подводимый к поверхности капли КЖТ в единицу времени. Повышение скорости потока воздуха ускоряет процесс перехода в состояние витания частицы топлива с учетом влияния конвективного и радиационного теплообмена. Так, для потока воздуха

$T_g \approx 600\text{--}700$ К в диапазоне скоростей 2–5 м/с зажигание частиц топлива происходило на распределительной металлической сетке, а в дальнейшем частица подхватывалась потоком воздуха и витала. При скорости нагретого потока воздуха 4 м/с (как наиболее оптимальной для условий витания) с температурой около 770 К и выше эти процессы происходили намного интенсивнее, что способствовало быстрой реализации процессов витания и зажигания, а также более длительному пребыванию частиц в камере сгорания. Повышение скорости потока воздуха до 5 м/с могло приводить как к ускорению процессов инициирования горения витающих частиц, так и к небольшому росту интегральных характеристик тепломассопереноса. Это обусловлено незначительным снижением температуры воздуха в объеме камеры сгорания. Однако повышение скорости потока воздуха до 5 м/с может сыграть положительную роль в реализации процессов зажигания витающих частиц КЖТ.

Таблица 3.1.2 иллюстрирует влияние компонентного состава суспензии КЖТ (размеры капель $R_d=0,55\text{--}0,9$ мм) на условия реализации процесса витания без горения и с устойчивым зажиганием (при $T_g=670\text{--}890$ К и $V_g=3\text{--}5$ м/с). При низких температурах потока воздуха (около 640 К) возможно витание частиц после высыхания на распределительной сетке. Однако их зажигание не регистрировалось, так как предельная температура зажигания для составов КЖТ на основе бурого угля на сетке составляла 670 К, а в режиме витания около 770 К. Для ОВУТ на основе фильтр-кеков минимальная температура зажигания еще выше (770–800 К). Следовательно температуру 640 К целесообразно поддерживать для режима витания без зажигания любых составов топливных композиций (например, в процессе сушки топливных компонентов). Установленные отличия связаны с минимальными значениями температуры потока воздуха (для разных режимов), а также свойствами различных твердых (угли различной степени метаморфизма бурый «Б2» и каменный «Д», влажный фильтр-кек «К»), жидких горючих компонентов (например, отработанные моторное, турбинное, трансформаторное, компрессорное, касторовое масла, мазут, керосин) и пластифицирующей добавки (таблицы 2.1–2.5). Бурые угли

характеризуются минимальными температурами термического разложения и зажигания (по сравнению с фильтр-кеком или каменным углем), высоким содержанием летучих веществ, теплота сгорания которых способствует ускоренному прогреву и зажиганию углеродистого остатка.

Таблица 3.1.2. Минимальные (пороговые) значения параметров, соответствующие витанию и зажиганию частицы КЖТ [139, 142]

Топливная композиция	Начальный размер капле R_d , мм	Условия витания без зажигания			Условия зажигания при витании		
		V_g , м/с	T_{g1} , К	T_{g2} , К	V_g , м/с	T_{g1} , К	T_{g2} , К
Кек "К"+отр. мотор.масло 5%	0,55	4	673	643	4	873	810
	0,65	4	673	643	4	873	810
	0,9	4	673	643	4	873	810
Кек "К"+отр. турбин. масло 5%	0,55	4	673	643	4	873	810
	0,65	4	673	643	4	873	810
	0,9	4	673	643	4	873	810
Кек "К"+отр. моторн. масло 10%	0,55	4	673	643	3	823	768
	0,65	4	673	643	3	823	768
	0,9	4	673	643	4	823	773
Кек "К"+отр. турб. масло 10%	0,55	4	673	643	4	873	810
	0,65	4	673	643	4	873	810
	0,9	4	673	643	4	873	810
Бурый уголь 40%+вода 50%+отр.тран с.масло 10%	0,55	4	673	643	3	888	815
	0,65	4	673	643	3	888	815
	0,9	4	673	643	4	888	818
Бурый уголь 40%+вода	0,55	4	673	643	3	823	773
	0,65	4	673	643	3	823	773

50%+отр. мот. масло 10%	0,9	4	673	643	4	823	773
Бурый уголь 40%+вода 50%+отр. турбин. масло 10%	0,55	4	673	643	3	823	773
	0,65	4	673	643	3	823	773
	0,9	4	673	643	4	823	773
Бурый уголь 50%+вода 40%+отр. мот. масло 10%	0,55	4	673	643	3	793	743
	0,65	4	673	643	3	793	743
	0,9	4	673	643	4	793	750
Бурый уголь 40%+вода 50%+керосин 10%	0,55	3	673	643	4	853	793
	0,65	3	673	643	4	853	793
	0,9	4	673	643	4	853	793
Бурый уголь 40%+вода 50%+мазут 10%	0,4	3	673	643	3	888	815
	0,65	4	673	643	3	888	815
	0,9	5	673	643	4	888	818
Бурый уголь 40%+вода 50%+кастор. масло 10%	0,4	3	673	643	3	823	768
	0,65	4	673	643	3	823	773
	0,9	5	673	643	4	823	773
Бурый уголь 40%+вода 50%+комп. масло 10%	0,4	3	673	643	3	773	728
	0,65	4	673	643	3	773	733
	0,9	5	673	643	4	773	733
Камен. уголь 30%+бур. уг. 10%+вода 50%+компр. масло 10%	0,4	3	673	643	3	873	810
	0,65	4	673	643	4	873	810
	0,9	5	673	643	4	873	813

T_{g1} – температура воздуха, задаваемая нагревателем, К; T_{g2} – максимальная температура нагретого воздуха в камере сгорания, К (в нижней области конусообразного канала).

40 % бурый уг. “Б2”, 50 % вода, 10 % мазут	0,4	>1,6	818–850	783–818	0,6–0,9	624–688	615–683	1,5–1,8	818–850	784–818	1,2–1,5	810–850	780–818
	0,5	>1,4	825–850	789–818	0,4–0,6	624–703	615–683	0,9–1,4	815–850	784–818	1,1–1,2	810–850	780–818
	0,6	–	–	–	0,5–0,6	624–703	615–683	1,2–2,2	815–850	784–818	1,2–2,1	810–850	780–818
40 % бурый уг. “Б2”, 50 % вода, 10 % компр. масло, 1 % пласт.	0,4	>1,8	728–850	553–818	0,6–0,8	624–723	615–708	1,1–2,1	730–850	718–818	1,4–1,6	730–850	686–818
	0,5	>1,5	733–850	658–818	0,6–0,7	624–780	615–774	1,1–1,5	730–850	718–818	1,2–1,3	728–850	718–818
	0,6	–	–	–	0,4–0,7	624–793	615–776	1,8–3,7	730–850	718–818	1,2–2,1	728–850	718–818
40 % бурый уг. “Б2”, 50 % вода, 10 % кастор. масло, 1 % пласт.	0,4	>1,6	768–850	720–818	0,6–0,7	659–703	635–687	1,2–1,8	770–850	716–818	1,2–1,4	768–850	714–818
	0,5	>1,3	773–850	725–818	0,7–0,9	659–743	615–733	0,8–1,4	770–850	716–818	0,9–1,1	773–850	716–818
	0,6	–	–	–	0,6–0,7	659–743	615–733	1,2–3,8	770–850	716–818	1,6–2,4	773–850	716–818

Здесь R_d – радиус капли, мм; V_p – скорость частицы, м/с; T_{g1} – температура воздуха на входе в камеру сгорания, К; T_{g2} – температура воздуха в центральной части камеры сгорания, К.

При втором режиме капля топлива зажигается непосредственно на металлической сетке (в диапазоне температуры воздуха 615–770 К). Необходимо отметить, что скорость движения частицы вычислялась с момента отрыва от сетки и одновременного ее зажигания. Из расчетных данных следует, что скорость движения частицы имела небольшие значения (0,6–0,8 м/с).

Третий и четвертый режимы зажигания и витания одиночной частицы КЖТ характеризовались близкими диапазонами изменения параметров воздуха (T_g и

V_g). Этот результат обусловлен равномерным прогревом частицы в потоке воздуха вследствие ее вращения. Наряду с этим третий и четвертый режимы реализовались посредством периодического и кратковременного контакта с металлической сеткой. Полученные результаты показывают, что зажигание витающих частиц происходит при более высоких температурах в диапазоне 730–850 К. Скорости движения частиц для третьего режима составили 1,1–3,7 м/с, а для четвертого – 1,4–2,1 м/с. При этом скорость полета частицы такова, что она в течение некоторого периода времени (3–8 с) успевает несколько раз описать схожие для третьего и четвертого режимов траектории движения. Большим размерам частицы соответствовали широкие диапазоны изменения параметров воздуха для третьего и четвертого режимов. Перечисленные особенности, скорее всего, обусловлены интенсивным выходом паров воды и горючей жидкости из «внутрипорового» пространства, а также зажиганием смеси летучих и продуктов термического разложения коксового остатка в зависимости от концентрации веществ и скорости их окисления. При этом частица активно трансформировалась, менялся ее размер (сначала в сторону увеличения, а затем ее уменьшения). Это приводило к изменению действующих на частицу аэродинамических сил. Как следствие, от эксперимента к эксперименту реализовывался третий или четвертый режимы зажигания (с витанием частицы в центральной, либо пристеночной области модельной камеры). Реализация первого, третьего и четвертого режимов имеет схожий механизм инициирования горения ОВУТ, так как зажигание происходит непосредственно в процессе движения. При витании основными способами подвода тепла является конвективный и радиационный теплообмен. Что же касается второго режима при зажигании на металлической сетке, преобладающим способом подвода тепла является теплопроводность (кондуктивный). Как только вес частицы топлива уравновешивался с силами восходящего потока нагретого воздуха, она переходила в стадию режима витания и последующего горения.

При сравнении времен задержки зажигания КЖТ в условиях, соответствующих четырем выделенным режимам инициирования горения

установлено, что максимальные значения τ_d соответствуют третьему режиму. Это обусловлено меньшей температурой воздуха при движении частиц в пристеночной области камеры (на 20–30 К относительно центральной части). Минимальные значения τ_d соответствуют первому режиму (для капель малых размеров). Второй режим зажигания ОВУТ характерен для больших капель. Четвертому режиму соответствуют средние значения времен τ_d (относительно трех других).

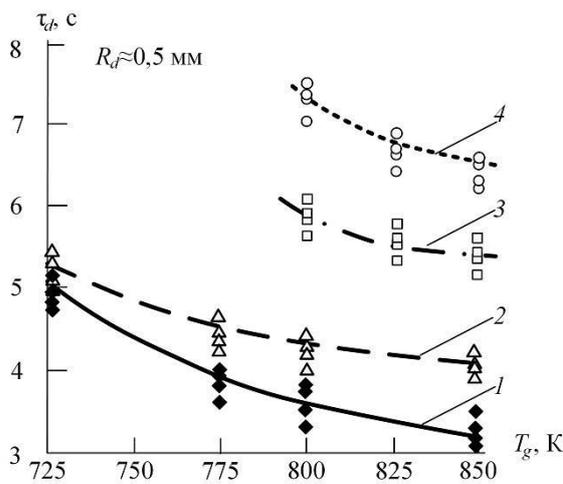
3.2. Отличия характеристик зажигания композиционного жидкого топлива при витании капли и ее удерживании на стержне, проволочке, спае термопары

Основным параметром, характеризующим интегральные индикаторы инициирования горения, считается время задержки зажигания (τ_d). Полученные экспериментальные результаты [139, 145, 146] по определению времен τ_d (рис. 3.2.1–3.2.3) показали существенное их отличие для исследованных составов КЖТ (номера кривых на рисунках соответствуют составам, указанным в табл. 3.2.1). Существенное отличие зарегистрировано при определении времени задержки зажигания для стационарного положения капли КЖТ (в случае ее помещения на спае термопары) и для условий витания.

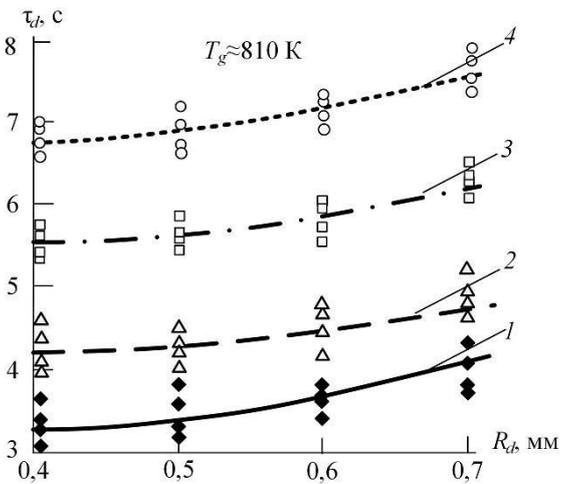
При витании одиночной капли топлива регистрировалось снижение времени задержки ее зажигания по сравнению с расположением на спае малоинерционной термопары при сопоставимых компонентных составах, начальных температурах воздуха и исходном диаметре капли. В среднем снижение времени задержки зажигания (при сравнении с условиями витания) составляло 0,5–4 с.

Таблица 3.2.1. Относительные массовые концентрации компонентов в исследованных составах КЖТ [139]

Номер состава	Твердые компоненты, %		Жидкие горючие компоненты, %		Вода, %	Пластификатор, %
	Уголь «Б2»	Кек «К»	Отработанное моторное масло	Отработанное турбинное масло		
1	50	-	10	-	39,5	0,5
2	50	-	-	10	39,5	0,5
3	-	50,5	10	-	39	0,5
4	-	50,5	-	10	39	0,5

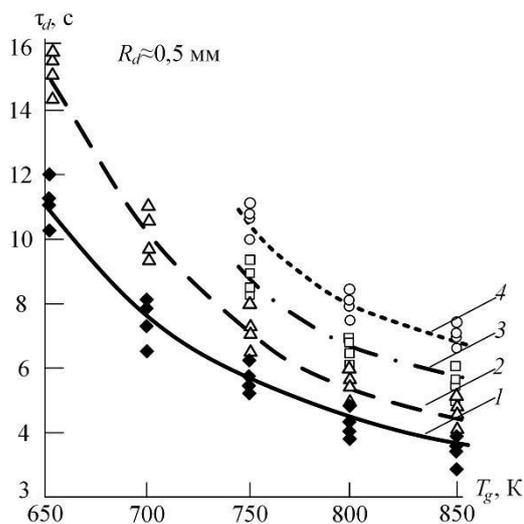


а

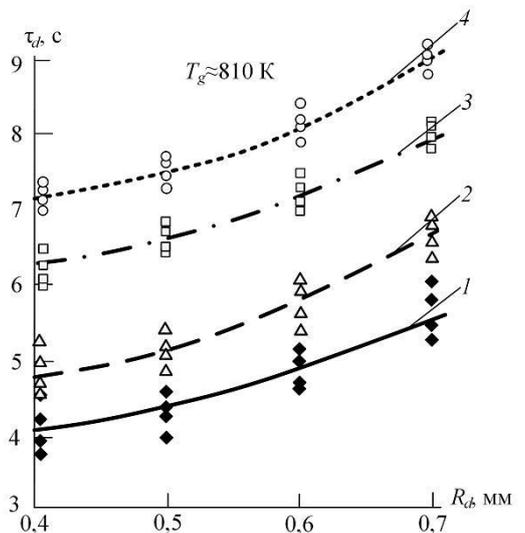


б

Рисунок 3.2.1. Времена задержки зажигания капле КЖТ при витании в камере сгорания в зависимости от T_g (а) и R_d (б) [139]: 1–4 соответствуют номерам составов из табл. 3.2.1



а



б

Рисунок 3.2.2. Времена задержки зажигания КЖТ [139] на спае малоинерционной (номинальная статическая характеристика – платинородий-платина, диапазон измеряемых температур 273–1873 К, систематическая погрешность ± 1 К, инерционность не более 1 с, диаметр спае около 0,1 с) термопары в зависимости от T_g (а) и R_d (б): кривые 1–4 соответствуют номерам составов из табл. 3.2.1

В проведенных экспериментах реализовывалось перспективное для использования на объектах энергетики низкотемпературное (до 1000 К) зажигание исследованных суспензий КЖТ. Для различных компонентных составов предельные (минимальные) температуры зажигания существенно отличались. Более высокой начальной температурой зажигания (около 800 К) характеризовались составы композиций на основе кека. Это связано, в первую очередь, с более высокой зольностью кека «К» (табл. 2.1.1), а также с более высокой степенью углефикации исходного каменного угля (марки «К»), из которого был получен кек. Эти параметры существенно влияют на теплофизические характеристики частицы топлива (увеличение теплоемкости с ростом зольности), что, в свою очередь, определяет интенсивность ее прогрева и, соответственно, выхода летучих веществ (табл. 2.1.1), а также наличие в коксовом остатке горючих веществ (в основном углерода), доступных для горения. В серии проведенных экспериментов с исследованными КЖТ при соответствующей температуре и размере капли топлива иногда наблюдалось разделение частицы КЖТ на фрагменты (особенно для топливных композиций на основе бурого угля, которому характерен эффект диспергирования). Последние интенсивно сгорали. Образовывались локальные источники горения в различных областях камеры. В этом случае было достаточно сложно определить времена задержки зажигания, что вызвало необходимость увеличения числа экспериментов.

Заметное влияние на время задержки зажигания оказывает вид жидкого горючего компонента КЖТ [147]. Например, использование отработанного турбинного масла увеличивает время задержки зажигания примерно на 1 с (по сравнению с отработанным моторным маслом) для соответствующих твердых

горючих компонентов капли КЖТ. Скорее всего, это связано с тем, что в отработанном моторном масле содержится большое количество легких фракций углеводородов, характеризующихся более низкой теплотой парообразования. Это дает возможность интенсивнее прогревать частицу топлива от периферийных областей к центру с меньшими затратами тепла на испарение жидких горючих и негорючих компонентов.

Из представленных результатов видно, что времена задержки зажигания для режима витания капли КЖТ в модельной камере сгорания (рис. 3.2.1, *a*) ниже, чем в условиях стационарного расположения ее на спае термопары (рис. 3.2.2, *a*). Так, например, при одинаковом начальном радиусе капли и температуре около 800 К расхождение во временах задержки зажигания составляет 1,5–2 с. Разница между временами задержки зажигания для рассмотренных режимов с уменьшением температуры воздуха увеличивается. Этот эффект можно объяснить тем, что при расположении капли топлива на спае термопары ее прогрев и зарождение локального очага горения во всех экспериментах происходили со стороны набегающего потока (рис. 2.3.4) разогретого воздуха. Концентрация воздуха, его температура и скорость движения [85] максимальны именно в этой области (по сравнению с боковой поверхностью капли и ее следом). В случае витания капли происходит ее вращение, и она прогревается более равномерно по всей поверхности. Быстрее реализуются процессы испарения и термического разложения. Также можно отметить, что в условиях витания частицы топлива отсутствуют стоки тепла на термопару или керамический стержень (свойственны экспериментам [31] с различными держателями частиц КЖТ). Этот эффект способствует интенсивному прогреву капли и меньшим временам задержки зажигания (рис. 3.2.1 и 3.2.2), а также соответствует механизму подвода энергии в распыленному топливу в камерах сгорания энергетических, технологических и отопительных котлов.

С ростом температуры воздуха времена задержки зажигания существенно снижаются как для стационарного положения капли, так и в режиме витания (рис. 3.2.2 и 3.2.1). Представленные результаты (рис. 3.2.1 и 3.2.2) хорошо

соответствуют современным представлениям о возможных подходах к интенсификации процессов теплообмена при гетерогенном горении и газификации в случае перехода, например, от слоевого сжигания топлива к факельному или от газификации в плотном слое к кипящему.

На рис. 3.2.1, б и 3.2.2, б видно, что на времена задержки зажигания существенно влияет начальный размер капли КЖТ. При его увеличении времена задержки зажигания возрастают как для стационарного положения капли, так и для режима витания. Чем больше начальный размер капли КЖТ, тем существеннее отличаются интегральные параметры процесса зажигания. Если сравнить времена задержки зажигания частицы с радиусом $R_d \approx 0,7$ мм на рис. 3.2.1, б и 3.2.2, б, то при температурах около 810 К значения τ_d могут отличаться более чем в 2 раза. Это свидетельствует о том, что при решении задачи оптимизации процесса горения топлива на основе КЖТ в реальной энергетической установке (котельной или ТЭС) можно существенно изменять (оптимизировать) основные конструктивные параметры распылительной форсунки, подбирая необходимый диаметр капель топлива и регулируя расход воздуха. Такая задача достаточно актуальна, так как ее решение позволит увеличить срок службы горелочного устройства (путем выбора необходимого помола твердого горючего компонента ОВУТ), а также подобрать необходимый коэффициент избытка окислителя в топке энергетической установки, от которого будет существенно зависеть химический и механический недожог топлива – определяющие параметры работы современных ТЭС. Данные вопросы особенно важны в последнее время, так как 2017 г. объявлен годом экологии в России.

При повышении температуры воздуха наблюдается уменьшение отличий времен задержки зажигания для двух рассмотренных режимов. Это связано с интенсификацией процессов теплообмена при возрастании температуры и хорошо соответствует современным представлениям о механизмах горения одиночных частиц твердого топлива и ВУТ [37, 38, 91].

В экспериментах [139, 145] при витании капли КЖТ регистрировалось зажигание и гетерогенное горение коксового остатка практически по всей

поверхности (нет отчетливых локальных зон или очагов, как в экспериментах [85]). Как следствие, инерционность зажигания снижается по сравнению с режимом на спае термопары [139,145].

Известным экспериментальным подходом, хорошо зарекомендовавшим себя для изучения горения одиночных капель (частиц) ВУТ и ОВУТ, является закрепление капли на каком-либо держателе (металлическая проволочка, керамический стержень, спай миниатюрной и малоинерционной термопары) с дальнейшим её помещением в поток воздуха (рис. 3.2.3).

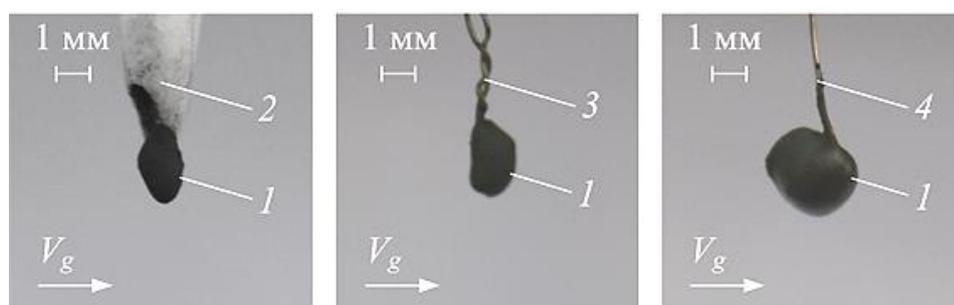


Рисунок 3.2.3. Внешний вид каплей ОВУТ (на основе кека «К» и отработанного турбинного масла) на разных держателях [31]: 1 – капля топлива; 2 – керамический стержень; 3 – спай термопары; 4 – металлическая проволочка

При небольших размерах капли (менее 2 мм) сток теплоты к держателю (или, наоборот, дополнительный приток энергии через держатель к частице топлива) может значительно повлиять на характерные временные параметры процесса горения (время задержки зажигания и полного сгорания капли), что является ограничением данного подхода. Эксперименты [31], проведенные с использованием держателей, позволили получить ряд зависимостей, поясняющих характер и масштабы влияния материала держателя (рис. 3.2.3), используемого для подвешивания капли топлива в потоке разогретого воздуха, на характеристики зажигания ОВУТ [23].

Исключить влияние держателя на характеристики зажигания топлива не представляется возможным. Однако эксперименты [31] показали, какой из трех применяемых держателей (спай термопары, металлическая проволочка, керамический стержень) оказался наиболее приемлемым (с минимальным

влиянием на инерционность исследованного процесса) для изучения процессов зажигания и горения одиночных неподвижных капель КЖТ. На основе сопоставления интегральных характеристик (рис. 3.2.4, *a*, *б*) можно заключить, что наибольшее влияние на процесс теплопереноса в системе «капля топлива – разогретый воздух» имеет керамический стержень (регистрировались максимальные времена задержки зажигания). Наименьшие времена задержки зажигания установлены при размещении капли КЖТ в потоке воздуха на спае термопары. При креплении капли КЖТ на металлической проволочке зарегистрированы максимальные времена задержки зажигания (по сравнению с экспериментом с использованием термопары). Поэтому соответствующая кривая занимает среднее положение на рис. 3.2.4, *a*. При сравнении интегральных характеристик витающих частиц КЖТ установлены меньшие времена задержки зажигания (кривая 1), чем при помещении в поток капель топлив закрепляемых на различных держателях (даже при материале с малой теплопроводностью).

На рис. 3.2.4, *б* видно, что с повышением размера капли (радиуса R_d) увеличиваются времена задержки зажигания τ_d . При использовании в экспериментах металлической проволочки и спае термопары и для размещения капли КЖТ в потоке разогретого воздуха зарегистрированы достаточно близкие значения времен задержки зажигания топливной композиции.

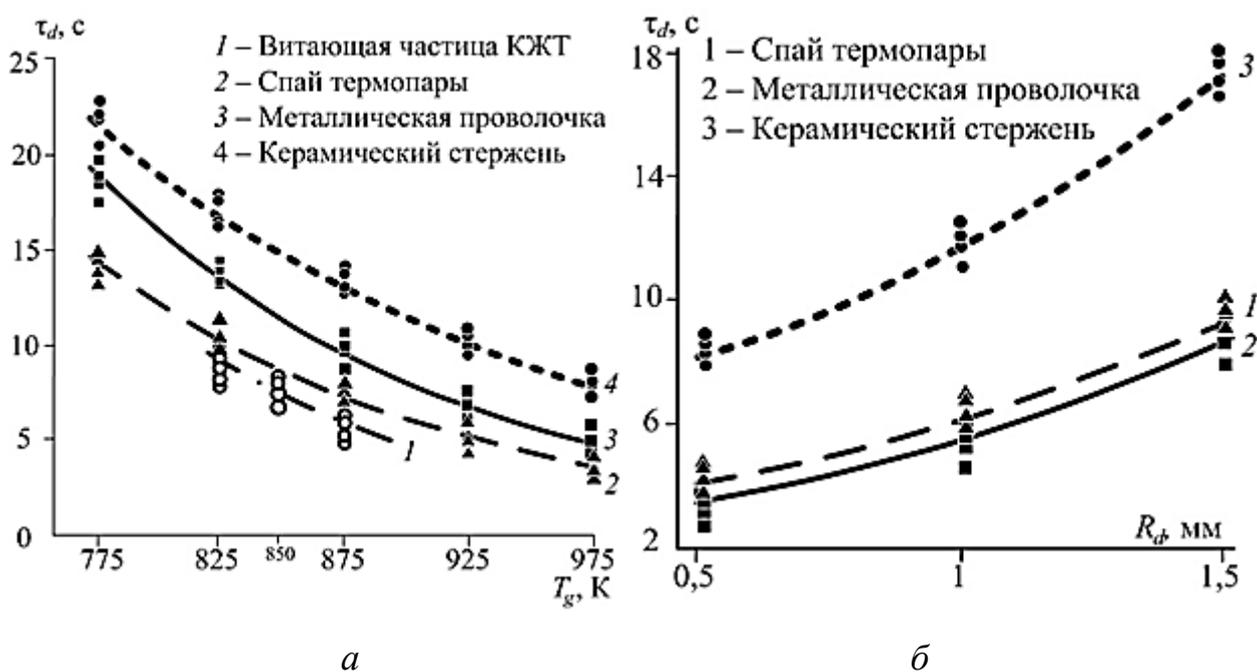


Рисунок 3.2.4. Времена задержки зажигания (*a*) каплей ОБУТ от температуры воздуха ($R_d \approx 1$ мм, $V_g \approx 3$ м/с) и размера (*б*) капли ОБУТ ($T_g \approx 920$ К, $V_g \approx 3$ м/с) при применении разных держателей [23, 31]

При подвешивании капли топлива на керамическом стержне наблюдались [37] большие времена задержки зажигания. В частности, при радиусе $R_d \approx 1$ мм расхождение времени задержки зажигания при применении керамического стержня и термопары составило около 6 с, что в масштабах исследуемого процесса инициирования горения достаточно существенно. Из анализа результатов следует, что в исследованиях процессов зажигания и горения стационарно закрепленной капли КЖТ выбор держателя, используемого для размещения капли в потоке, имеет определяющее значение при достаточно небольших размерах капли (радиусом менее 1,5 мм) и температурах менее 975 К.

В экспериментах [31, 139] зарегистрирован достаточно значительный сток тепла от поверхности капли к керамическому стержню. При этом времена задержки зажигания в данном случае превышали аналогичную характеристику при использовании спая термопары более чем на 50 % (рис. 3.2.4, *a*). Данное отличие обусловлено тем, что керамика характеризуется минимальной теплопроводностью (около 0,4 Вт/(м·К)) и температуропроводностью (около $1,6 \cdot 10^{-7}$ м²/с), но максимальной из исследованных материалов держателей теплоемкостью. Платинородий-платиновые спаи термопары имеют максимальные температуропроводность (около $2 \cdot 10^{-5}$ м²/с) и теплопроводность (около 70 Вт/(м·К)) по сравнению со стальной проволокой и керамическим стержнем. Плотность платинородиевого сплава в несколько раз выше стали и больше, чем керамики, в 10 раз. Как следствие, по спаю термопары после ее прогрева в зону реагирования поступает дополнительный приток энергии, и частица прогревается снаружи потоком воздуха, а изнутри от держателя. Стальная проволока имеет средние значения (около $1,3 \cdot 10^{-5}$ м²/с) температуропроводности (по сравнению с платинородий-платиновым спаем). Поэтому времена задержки зажигания ОБУТ чуть больше на рис. 3.2.3 для кривой 2 по сравнению с кривой 1 [23].

Результаты экспериментов по низкотемпературному зажиганию капли КЖТ на спае термопары и в режиме витания [139, 145] показывают, что существенное влияние на время задержки зажигания оказывает температура разогретого воздуха (характер соответствующих зависимостей существенно нелинейный). Минимальная температура зажигания для стационарно расположенной капли (на спае термопары) составляет около 650 К, а для режима витания капли около 740 К (для составов на основе бурого угля) при $V_g \approx 4$ м/с, как показано на рис. 3.2.5.

При обтекании стационарно расположенной капли КЖТ воздухом реализуется ее прогрев в основном со стороны набегающего потока при постоянной температуре T_g . Локальный очаг зажигания углеродного остатка формируется в этой же зоне. Далее формируется фронт горения, и частица топлива реагирует по всей поверхности. В случае витания капли гетерогенное горение реализуется по всей поверхности (частица вращается и прогревается более равномерно). Поэтому во втором случае требуются несколько большие предельные (минимальные) температуры для устойчивого горения. К тому же для условий витания капли в конусе регистрировалось некоторое (довольно ограниченное) расхождение значений температуры в различных точках модельной камеры сгорания (как в направлении центральной оси симметрии, так и в радиальном направлении).

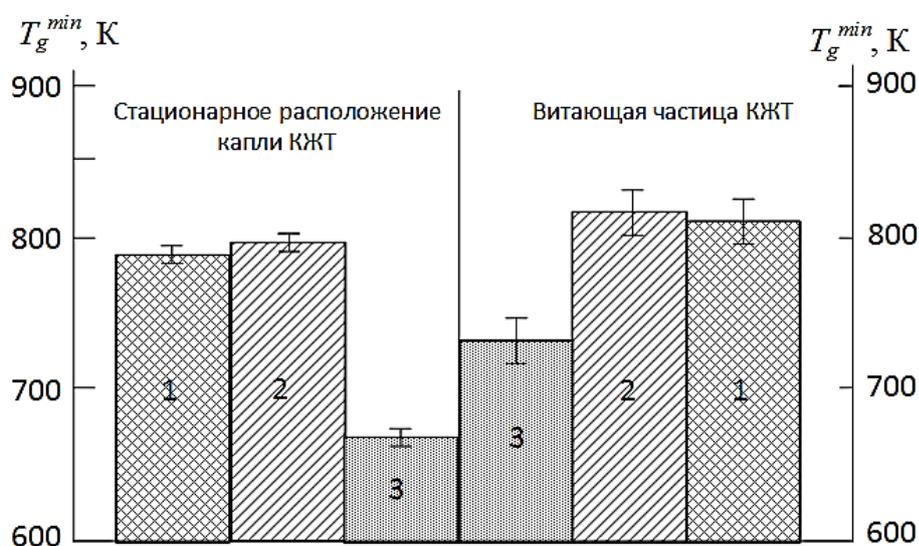


Рисунок 3.2.5. Минимальные температуры зажигания КЖТ [139, 145]: 1 – 94 % КЕК «К», 1 % пластификатор, 5 % отработанное турбинное масло; 2 – 94 % КЕК

«К», 1 % пластификатор, 5 % отработанное моторное масло; 3 – 47 % бурый уголь «Б2», 47 % вода, 5 % отработанное турбинное масло, 1 % пластификатор

Формируемый поток воздуха имеет максимальную температуру в окрестностях нижнего основания и оси симметрии конусообразного канала (рис. 2.3.3), минимальную – в окрестности отверстия для ввода капли. Максимальное отличие температур воздуха в этих областях составило менее 4 % относительно значения T_g . Как было показано ранее (рис. 3.1.3), движение капли характеризуется достаточно сложной криволинейной траекторией. Причем в большинстве случаев реализовывалось пристеночное движение. При движении капли вниз под действием силы тяжести после сброса и далее при движении вверх (витание) после испарения жидких компонентов КЖТ возможно колебание температуры воздуха и, соответственно, изменение скорости прогрева капли. Изменение последней с замедлением темпа в верхней пристеночной области цилиндрической части (вблизи максимального сечения) камеры сгорания происходило заметно при относительно низких начальных температурах воздуха. Именно перемещением (витанием) капли по разным траекториям в модельной камере (с небольшими выделенными градиентами температуры) можно объяснить большой диапазон изменения экспериментальных значений τ_d в сериях при идентичных T_g и R_d на рис. 3.2.1 и 3.2.2 по сравнению с ее расположением на спае термопары. Предложенный подход по исследованию интегральных характеристик зажигания капель топлива КЖТ в режиме витания в модельной камере сгорания может быть реализован для различных составов с широким диапазоном содержания основных компонентов ОВУТ и ВУТ: жидких горючих веществ, воды и твердой горючей основы.

3.3. Влияние формы витающей частицы композиционного жидкого топлива на интегральные характеристики зажигания

Эксперименты [147, 148] показали, что определяющую роль при иницировании горения каплей КЖТ играют процессы их теплообмена с потоком воздуха. При этом важнейшим параметром, помимо температуры и скорости движения воздуха, а также размеров частицы, является конфигурация поверхности последней [148]. Установлено [147, 148], что для частиц неправильной формы (существенно отличающихся от сферы) характерна минимальная инерционность зажигания. Этот результат обусловлен соответствующей интенсификацией теплообмена частицы с воздухом и очень важен для практических приложений. Представляет интерес исследование данного эффекта (разных конфигураций частиц) без держателя частицы, т.е. при ее витании в потоке воздуха.

Для генерации каплей КЖТ (состав представлен в табл. 3.3.1) фиксированного размера использовалась [147] металлическая кювета, а также дозатор со специализированными наконечниками. Применяемые методики позволяли изготавливать частицы трех форм (рис. 3.3.1): сфера, эллипсоид, многогранник. Условным многогранником неправильной формы считалась частица, конфигурация которой содержала несколько (как правило, 5–7) вершин и граней. Средние размеры частиц изменялись в диапазоне 0,5–5 мм. Для сфер этими размерами были диаметры D_d . Для эллипсоида вычисления проводились по двум максимальным размерам a_d и b_d (поперечный, продольный): $D_d=(a_d+b_d)/2$; для многогранника использовались четыре размера a_d , b_d , c_d и e_d (поперечный, продольный, большой и малый): $D_d=(a_d+b_d+c_d+e_d)/4$. Для их обозначения использовался также параметр D_d . Максимальные погрешности определения размеров частиц составили 3 %.

Таблица 3.3.1. Состав КЖТ с учетом относительных массовых концентраций компонентов [147]

Угольный компонент, %	Жидкий горючий компонент, %	Вода, %	Пластификатор, %
-----------------------	-----------------------------	---------	------------------

Кек «К»	Отработанное моторное масло		
50,5	10	39	0,5

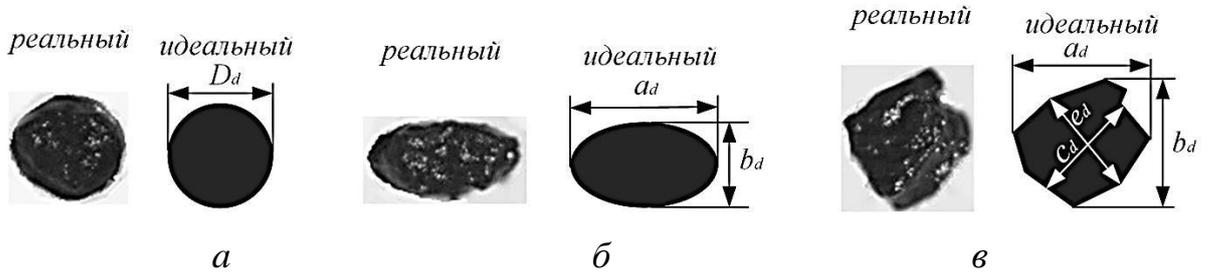


Рисунок 3.3.1. Изображения (кадры видеogramм [147] и условные аналоги) частиц топлив в форме сферы (а), эллипсоида (б) и многогранника (в)

На рис. 3.3.2 выделены типичные треки (траектории) движения (витания) частиц ОВУТ в камере сгорания. Аналогично предыдущим экспериментам выделены два режима устойчивого витания частиц топлива: в центральной и в пристеночной (боковой) частях камеры.

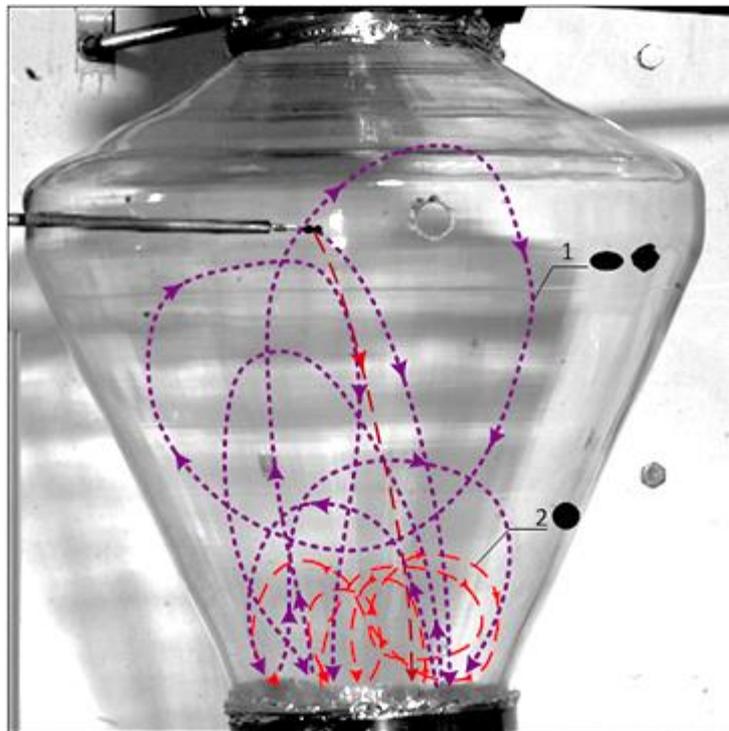


Рисунок 3.3.2. Типичные треки перемещения (витания) частиц КЖТ разной формы (1 – эллипсоид и многогранник, 2 – сфера) при зажигании [147]

Видеограммы экспериментов [147] показали, что форма частицы КЖТ существенно влияет на траекторию ее перемещения в камере сгорания (рис. 3.3.2). Для сферических частиц характерны относительно небольшие (по продольным и поперечным размерам) области перемещения в модельной камере сгорания. На рис. 3.3.2 можно видеть, что они располагаются вблизи нижней (соответствует входу потока воздуха) части камеры. Частицам в форме эллипсоида и многогранника характерны существенно большие по размерам (в несколько раз) области перемещения. Видеограммы проведенных экспериментов показали, что для таких частиц свойственно закручивание потоком. В этом случае к линейной скорости добавляется еще вращательная составляющая. Как следствие, частица получает дополнительный импульс и ускоряется. Поэтому треки для частиц таких форм имеют существенно большие протяженности по сравнению со сферами. Очевидно, что сферы также могут вращаться относительно своего центра масс при движении в камере сгорания. Но за счет меньшего аэродинамического сопротивления скорости этого вращения в несколько раз ниже, чем для эллипсоида или 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 [147]. Возрастают относительные скорости движения частицы и потока воздуха. В частности, приведенные аппроксимационные выражения на рис. 3.3.3 и 3.3.4 иллюстрируют, что значения τ_d могут отличаться для исследованных форм частиц на 25–35 %. В соответствии с современными представлениями о теплообменных процессах между газовой средой и телами 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. Как следствие, с ростом силы аэродинамического сопротивления увеличиваются силы

инерции и трения. Интенсифицируется теплообмен с воздухом, уменьшаются характерные длительности выделенных выше стадий зажигания и времена τ_d .

Так как сферические частицы витают в нижней части камеры (на входе потока воздуха), то можно было ожидать минимальные времена τ_d вследствие более высоких температур. Однако рис. 3.3.3 и 3.3.4 иллюстрируют определяющую роль конвективной составляющей теплообмена и вклад интенсивного вращательного движения частиц в форме эллипсоидов и многогранников. Можно сделать вывод о том, что частицы в форме, существенно отличающейся от сферической, зажигаются при меньших температурах воздуха и временах τ_d . Влияние конфигурации частицы с ростом температуры (рис. 3.3.3) снижается.

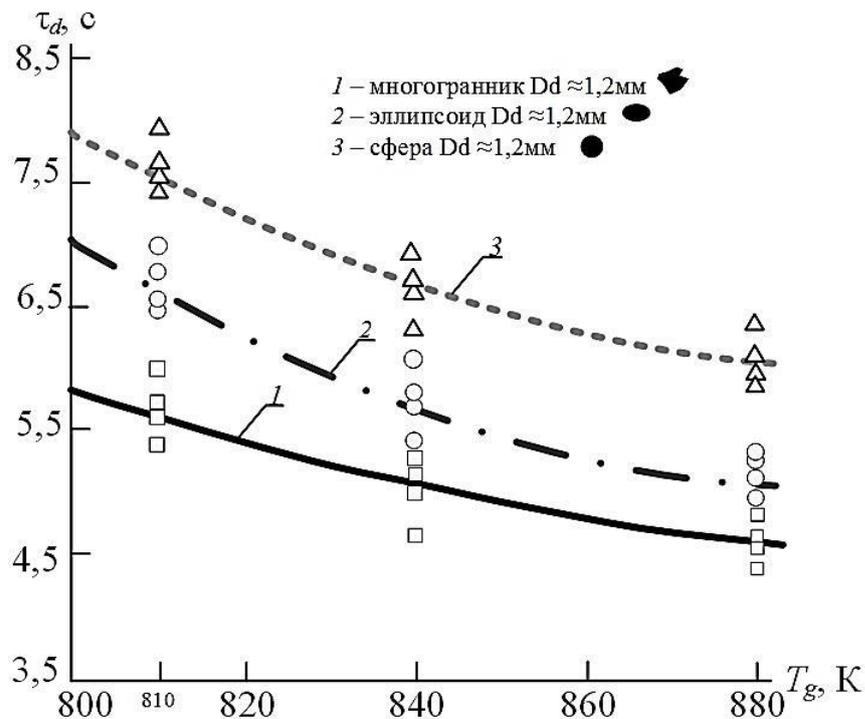


Рисунок 3.3.3. Времена задержки зажигания витающей частицы (с разной формой) КЖТ от температуры воздуха [147]

На рис. 3.3.4 можно отметить, что выделенные отличия времен задержки зажигания частиц с разной конфигурацией поверхности характерны всему исследованному диапазону изменения размеров D_d . Можно сделать вывод об общности данной закономерности. Так как с уменьшением размеров частиц всех

конфигураций их форма приближается к сферической, то можно было прогнозировать уменьшение отличий времен τ_d при уменьшении D_d .

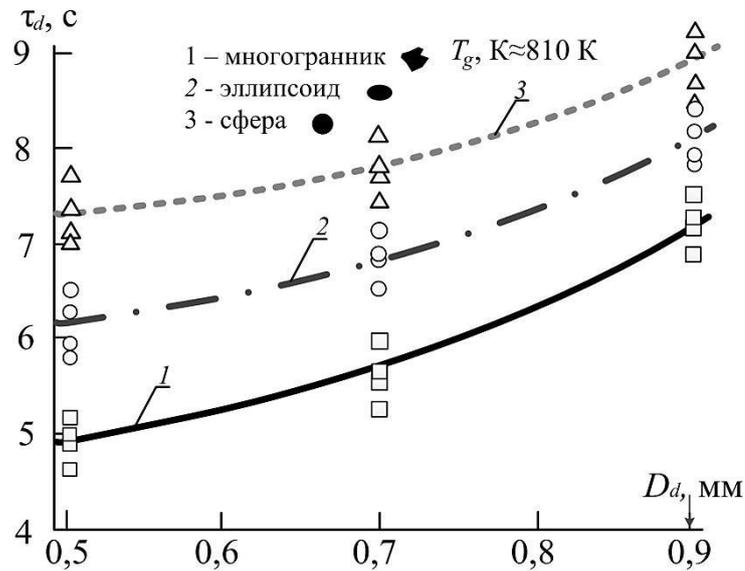


Рисунок 3.3.4. Времена задержки зажигания витающей частицы (с разной формой) КЖТ от ее размера [147]

В проведенных опытах такой эффект не зарегистрирован. Скорее всего, это обусловлено особенностями вращательного движения частиц соответствующих форм при перемещении в потоке воздуха. В случае неподвижных (закрепленных на спае термопары) частиц ОВУТ данный эффект (сближение времен τ_d при уменьшении D_d) проявлялся отчетливо (рис. 3.3.5).

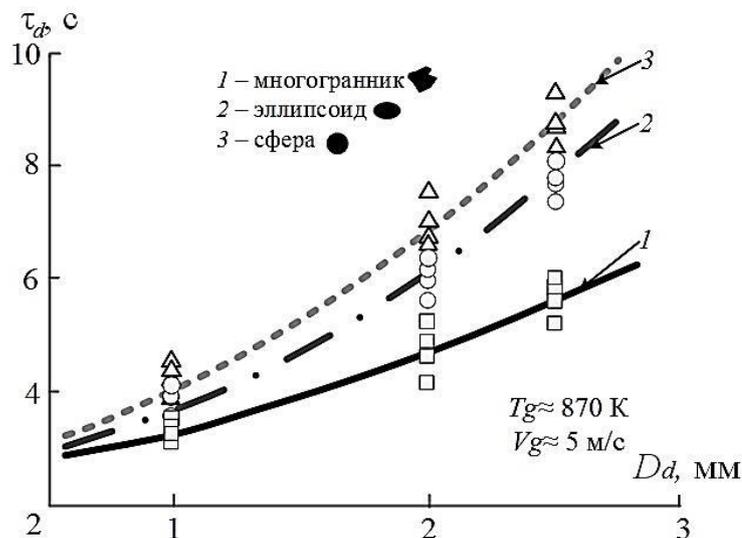


Рисунок 3.3.5. Времена задержки зажигания частицы (с разной формой) КЖТ от ее размеров при стационарном удерживании на спае термопары [148]

В экспериментах [148] установлено, что меньшие времена задержки зажигания частиц ОБУТ в форме многогранников (рис. 3.3.5) обусловлены заметной интенсификацией конвективных течений в малом приповерхностном слое. В случае частиц неправильной формы (многогранника) процесс взаимодействия с внешней газовой средой более сложный. Поток воздуха при натекании на соответствующие выступы с поверхности частицы (вершины многогранника) разделяется существенно неравномерно. Скорости потока воздуха вблизи выступов (вершин многогранников) на поверхности частицы существенно возрастают, так как формируются локальные вихри. Последние сносятся потоком из фронтальной части к следу. Это приводит к тому, что размеры зоны с кратным уменьшением скоростей движения воздуха в следе частицы в форме неправильного многогранника могут существенно (на 40–70 %) увеличиваться по сравнению со сферой и эллипсоидом (при идентичных размерах). Таким образом, за счет интенсивного зарождения вихрей во фронте и их роста в следе (и увеличения последнего) частицы ее прогрев интенсифицируется. Для частиц неправильной формы характерен более интенсивный теплообмен с потоком (аналогия с элементами шероховатости поверхности и пористости). На поверхности частицы формируется несколько зон зажигания. Выявленные особенности движения и зажигания частиц КЖТ различной конфигурации подтверждают возможность применения такого вида топлива в теплогенерирующих установках ТЭС без усложненной системы топливоподачи, поскольку неправильность формы частицы КЖТ является положительным фактором для повышения эффективности зажигания и горения топлива.

На рис. 3.3.6 приведены типичные кадры экспериментов [148], на которых видно зарождение нескольких локальных зон зажигания для частицы – многогранника и единого фронта горения для сферы и эллипсоида.

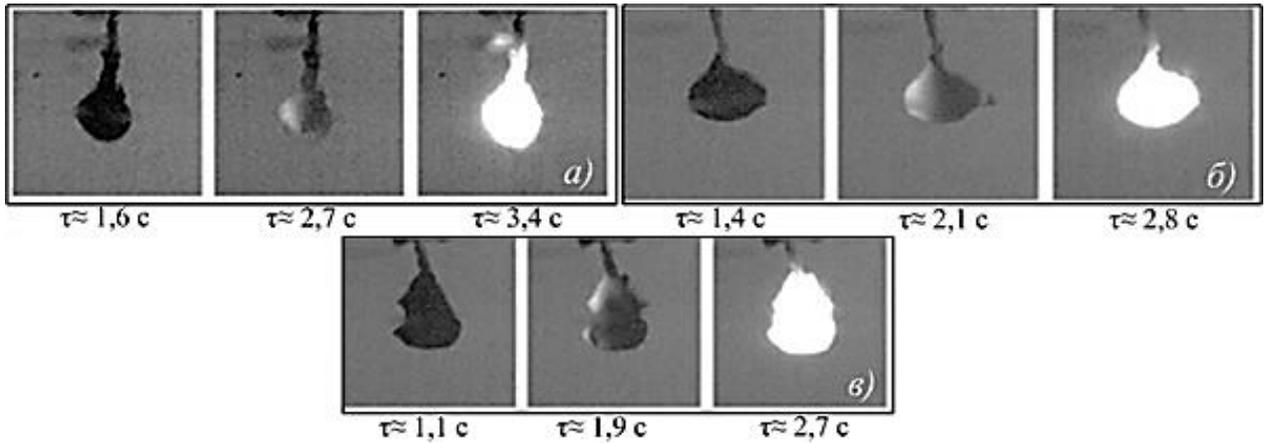


Рисунок 3.3.6. Кадры видеogramм для иллюстрации зарождения фронта гетерогенного горения частицы (*a* – сфера, *б* – эллипсоид, *в* – многогранник) ОВУТ на выступах с ее поверхности при стационарном удерживании на спае термопары [148]

Видеogramмы экспериментов [148] показали, что влияние формы частицы топлива особенно заметно на начальной стадии исследуемого процесса горения. Условия распространения фронта горения и завершения этого процесса практически идентичны для разных форм. Зарождение же очага горения углерода для разных конфигураций происходило со значительно отличающимися тепловыми условиями и характеристиками зажигания. Для всех выполненных экспериментов формирование очага горения реализовывалось со стороны набегающего потока воздуха. Это обусловлено соответствующими особенностями обтекания частиц. В случае сферы такой очаг возгорания (зарождался фронт горения) располагался, как правило, на оси симметрии частицы. Для эллипсоидов характерно некоторое смещение положения зоны зажигания относительно оси симметрии в направлении одной из боковых вершин. В экспериментах с неправильными многогранниками фронт горения формировался в области, соответствующей максимальным по размерам выступам (вершинам) многогранника со стороны набегающего потока. При этом их положение (сверху, снизу или вблизи условной оси симметрии), как правило, не имело особого значения. В этом случае регистрировались минимальные длительности

характерных стадий исследуемых процессов. Как следствие, времена задержки зажигания частиц в форме неправильных многогранников были минимальны по сравнению с конфигурациями, соответствующими сферам и эллипсоидам (рис. 3.3.5). С ростом доли летучих этот эффект может усиливаться (например для составов на основе бурого угля или отдельно взятых жидких горючих компонентов).

Также в [149] показано, что наличие искусственных пор в капле ОВУТ вызывает интенсификацию процессов зажигания. Капля топлива ускоренно нагревается за счет увеличения площади поверхности, которая приводит к дополнительному теплообмену с окружающей средой. Показано [149], что время задержки зажигания уменьшается на 20 % с ростом числа пор, в частности с ростом удельной поверхности капли (на 10–20 %).

Установленные в экспериментах [147, 149] закономерности зажигания частиц КЖТ с разной конфигурацией поверхности расширяют современные представления о процессах зажигания водоугольных и органоводоугольных топливных композиций. Их можно применять для развития соответствующих моделей теплопереноса (в частности, [37, 38, 91]) в условиях фазовых превращений и химического реагирования, а также для настройки параметров функционирования энергетического оборудования с целью повышения эффективности его работы при сжигании КЖТ.

Выделенные особенности более интенсивного реагирования частиц неправильной формы даже при меньших температурах воздуха (в камере сгорания траектории перемещения частиц – эллипсоидов и многогранников соответствовали температурам на 20–30 К меньше, чем сферам) позволяют сделать вывод о том, что этот эффект (форма частицы) следует использовать для развития низкотемпературного (предельного или порогового) зажигания [23]. Можно прогнозировать большие перспективы для теплоэнергетики, так как основную сложность традиционно вызывают процессы розжига топлив на ТЭС и последующий недожог вследствие относительно невысоких температур инициирования горения, до которых прогреваются топочные камеры.

3.4. Влияние компонентного состава на характеристики зажигания жидкого композиционного топлива

3.4.1. Роль основных компонентов (твердого горючего, жидкого горючего и негорючего)

Для композиционных жидких топлив, приготовленных на основе твердых (отходов углепереработки и др.) и жидких (отработанных масел и др.) горючих, а также воды характерна существенно отличающаяся инерционность процессов зажигания и горения. Выбор оптимальных (по требуемым экологическим, энергетическим или технико-экономическим критериям ТЭС и котельных [28–30]) концентраций применяемых компонентов с учетом их свойств и параметров (минимальных температур зажигания, содержание жидкой и твердой фазы, размера капель, размера частиц угля, содержание летучих и др.) позволил [139, 145], с одной стороны, минимизировать τ_d , с другой, установить масштабы влияния на процессы устойчивого горения КЖТ в топках котлоагрегатов ТЭС с различной производительностью.

Для капель КЖТ, приготовленных на основе отходов обогащения углей разных марок, в рамках проведенных исследований получены зависимости [139, 145] времени задержки зажигания от температуры в камере сгорания. С ростом температуры интенсифицируется протекание физико-химических превращений на поверхности и в глубинных слоях капли топлива (инертный прогрев, испарение воды, термическое разложения угля, термохимическое взаимодействие паров воды и горючей жидкости с углеродом, окисление летучих, гетерогенное зажигание и последующее горение коксового остатка). Поэтому рост температуры в камере сгорания в диапазоне 840–880 К приводил к уменьшению длительности инициирования горения коксового остатка на 15–25 % (рис. 3.4.1.1) [150].

Эксперименты [150] показали, что для капель КЖТ, приготовленных на основе фильтр-кеков, характерна существенно отличающаяся инерционность

зажигания. В первую очередь, это связано с отличиями свойств данных компонентов (табл. 2.1.1–2.1.3). Максимальные времена задержки зажигания зарегистрированы для составов на основе фильтр-кеков каменных углей марок «СС» и «Ж» (рис. 3.4.1). Данные компоненты, несмотря на достаточно низкую влажность (табл. 2.1.3), характеризуются высокой (более 50 %) зольностью (зола является негорючим балластом). Поэтому доля способного к реагированию вещества у данных компонентов мала по сравнению с другими фильтр-кеками. Это является причиной больших времен задержки зажигания КЖТ на основе фильтр-кеков «СС» и «Ж» (особенно при температурах, близких к пороговым – минимальным, необходимым для зажигания).

Рис. 3.4.1.1 иллюстрирует близкие времена задержки зажигания составов КЖТ, полученных на основе отходов обогащения каменных углей марок «К», «Д», «Г» и «Т». Фильтр-кеки марок «Г» и «Д», несмотря на большую влажность, характеризуются относительно низкой зольностью и содержат 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 углерода.

Сравнение результатов экспериментов, полученных при зажигании витающих в модельной камере сгорания капель КЖТ, приготовленных на основе фильтр-кеков разных марок и отработанного турбинного масла с результатами для одиночных капель, подвешенных на спале термопары, показал, что отличие времен задержки зажигания может достигать 20–25 % в диапазоне температур воздуха 840–880 К. Однако следует отметить, что при увеличении температуры внешней газовой среды инерционность зажигания капель КЖТ отличалась незначительно для условий модельной камеры сгорания и стационарного подвешивания на держателе капли КЖТ.

Кривые на рис. 3.4.1.2 иллюстрируют влияние компонентного состава КЖТ на интегральные характеристики процесса зажигания одиночных витающих

частиц в модельной камере сгорания в зависимости от температуры воздуха (810–900 К).

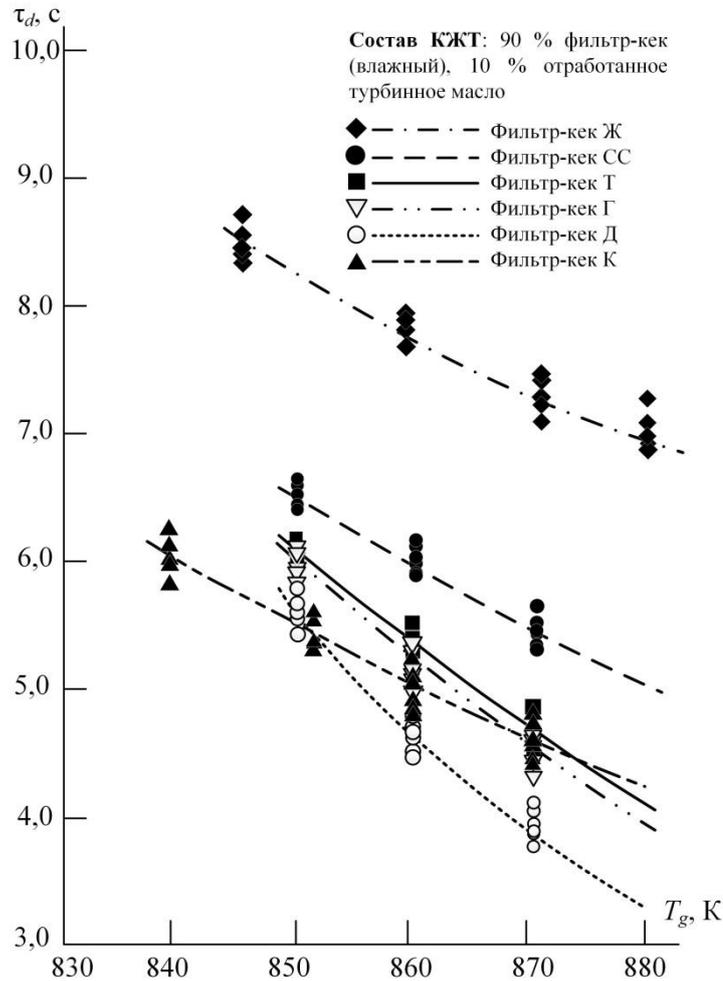


Рисунок 3.4.1.1. Времена задержки зажигания капле ($R_d \approx 0,75$ мм) КЖТ на основе фильтр-кеков разных марок в зависимости от температуры воздуха ($V_g \approx 4$ м/с) [150]

Установленные отличия τ_d связаны с использованием разных компонентов КЖТ: углей (каменного угля марки «Д» и бурого угля марки «Б2»), фильтр-кека «К», горючих жидкостей (отработанного турбинного, автомобильного, компрессорного масел). Для составов КЖТ 1 и 2 отличие τ_d при $T_g \approx 810$ К составило 10 %, а при $T_g \approx 870$ К около 20 %. Это обусловлено более длительным прогревом коксового остатка, необходимым для реализации зажигания КЖТ на основе каменного угля. Снижение инерционности зажигания КЖТ возможно при смешивании в составе суспензии каменного и бурого углей. Бурые угли

характеризуются минимальными температурами термического разложения и зажигания (по сравнению с каменными), высоким содержанием летучих веществ, теплота сгорания которых способствует ускоренному прогреву и зажиганию углеродистого остатка (табл. 2.1.1).

Времена задержки зажигания КЖТ на основе фильтр-кека «К» с добавлением турбинного и автомобильного отработанных масел имеют достаточно близкие значения (рис. 3.4.1.2). Несмотря на это, установленные отличия, вероятнее всего, объясняются различиями свойств использованных жидких нефтепродуктов (в частности, температур зажигания, табл. 2.4). Проведенные эксперименты также иллюстрируют целесообразность добавления в суспензии отработанных масел разного происхождения для улучшения характеристик зажигания и повышения теплоты сгорания композиционных топлив в топочных камерах ТЭС.

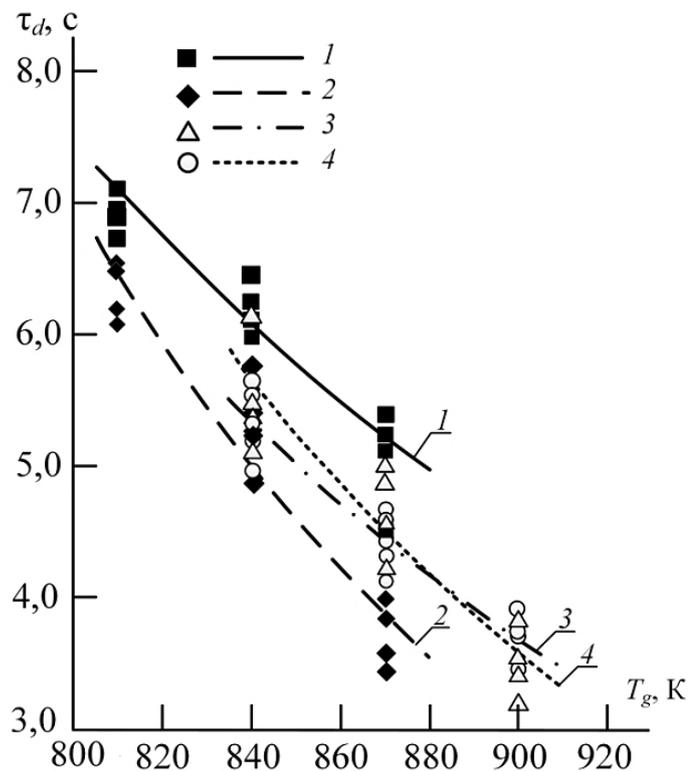


Рисунок 3.4.1.2. Зависимости [150] времен задержки зажигания одиночных капель КЖТ различных составов от температуры воздуха в камере сгорания (1 – 10% уголь «Б2», 30% уголь «Д», 10% отработанное компрессорное масло, 50% вода; 2 – 40% уголь «Б2», 10% отработанное турбинное масло, 50% вода; 3 – 90%

влажный кек «К», 10% отработанное автомобильное масло; 4 – 90% влажный кек «К», 10% отработанное турбинное масло)

Увеличение начального размера капель суспензий КЖТ приводило к увеличению времени задержки зажигания (рис. 3.4.1.3). Чем больше размер капли, тем длительнее протекает процесс инертного прогрева и обезвоживания ее приповерхностного слоя. Для крупных капель также более выражен эффект стока тепла в глубинные слои по сравнению с каплями меньших размеров. Кроме того, пары воды могут создавать буферный слой, препятствующий теплообмену между поверхностью частицы КЖТ и потоком воздуха. Это приводит к уменьшению скорости роста температуры поверхности капли топливной композиции в процессе прогрева и, как следствие, значительному увеличению инерционности процесса зажигания. Например, с ростом начального радиуса капель ОБУТ на основе фильтр-кека марки «Г» и отработанного турбинного масла в диапазоне 0,4–0,7 мм регистрировалось увеличение времени задержки зажигания в среднем на 30 % (рис. 3.4.1.3).

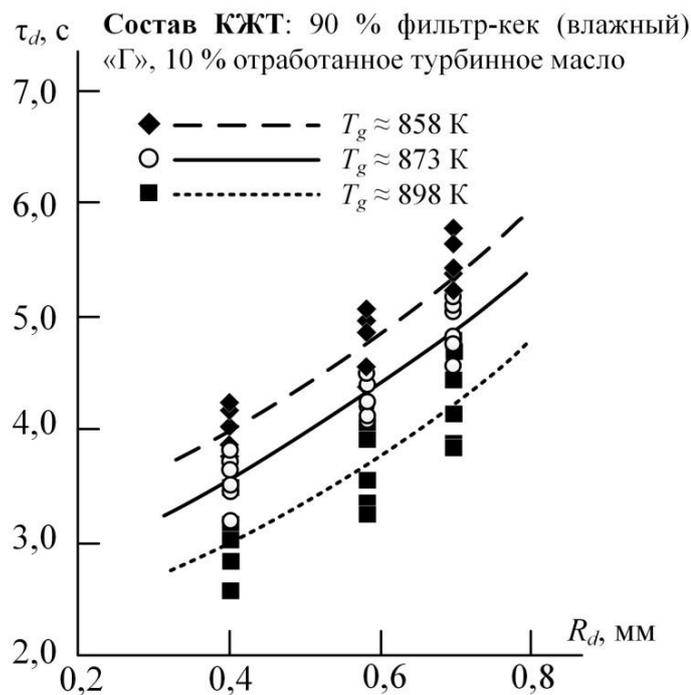


Рисунок 3.4.1.3. Времена задержки зажигания КЖТ в зависимости от начального радиуса капель ($V_g \approx 4 \text{ м/с}$) [150]

Изменение концентрации компонентов в составе суспензий КЖТ оказывает значительное влияние на инерционность зажигания полученной суспензии. Рис. 3.4.1.4 иллюстрирует снижение времени задержки зажигания КЖТ на основе бурого угля при увеличении концентрации отработанного турбинного масла. Горение паров масла интенсифицирует прогрев углерода, снижая тем самым длительность инициирования его гетерогенного зажигания. Кроме того, интенсивное парообразование жидкого горючего компонента способствует диспергированию твердых частиц и эффекту «микровзрывов» [18], заключающемуся в быстром высвобождении паров нефтепродукта и летучих компонентов через поры частицы КЖТ. Этот эффект приводил к увеличению площади реакционной поверхности и ускоренному прогреву коксового остатка.

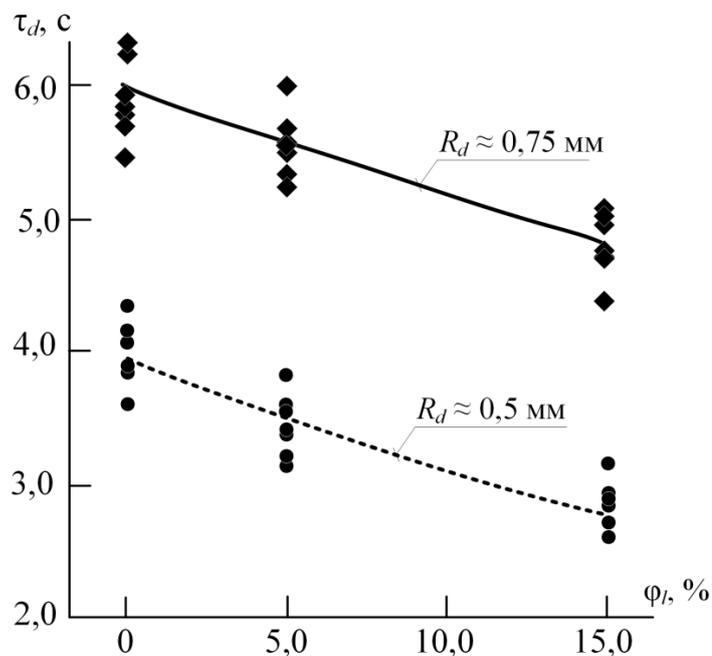


Рисунок 3.4.1.4. Времена задержки зажигания капель КЖТ (45 % бурый уголь, 55...50...40 % вода, 0...5...15 % отработанное турбинное масло) в зависимости от массовой концентрации жидкого горючего компонента ($T_g \approx 850$ К, $V_g \approx 4$ м/с) [150]

Зарегистрированные в экспериментах [150] эффекты обусловлены свойствами турбинного масла. Как показали исследования [27], отработанное турбинное масло по сравнению с другими рассмотренными в [27] нефтепродуктами (отработанным автомобильным, компрессорным,

трансформаторным маслами, мазутом, водонефтяной эмульсией), оказывает наиболее выраженное действие в качестве катализатора зажигания топливных суспензий, что объясняется низкими значениями теплоты парообразования, температуры вспышки и зажигания данного компонента. Следует отметить, что при использовании других жидких горючих нефтепродуктов в составе КЖТ на основе бурого угля может наблюдаться увеличение инерционности зажигания.

Снижение времени задержки зажигания витающей капли КЖТ наблюдалось также при увеличении концентрации угольной пыли в составе суспензии (рис. 3.4.1.5). Дополнительная добавка в виде 5 % бурого угля в составе суспензии КЖТ приводила к снижению инерционности зажигания полученного топлива на 15–25 % (рис. 3.4.5). Такое существенное снижение времени задержки зажигания при сравнительно небольшом изменении компонентного состава топлива обусловлено двумя взаимосвязанными факторами. Во-первых, с увеличением доли высокорекреационного угля возрастает общая горючая масса (в том числе концентрация реакционных летучих компонентов). Во-вторых, снижается доля воды в составе суспензии, испарение которой является наиболее энергоемким (теплота парообразования 2 МДж/кг) процессом в рассматриваемой системе.

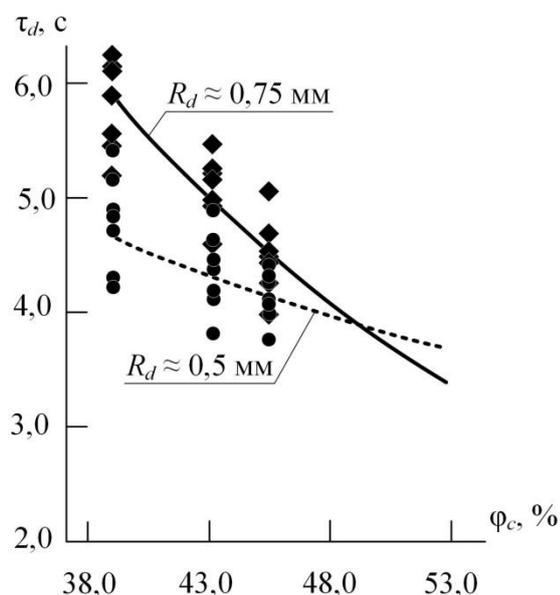


Рисунок 3.4.1.5. Времена задержки зажигания капель КЖТ (39...43...45 % бурый уголь, 51...47...45 % вода, 10 % отработанное турбинное масло) в зависимости от массовой концентрации твердого горючего компонента ($T_g \approx 825$ К, $V_g \approx 4$ м/с) [150]

При увеличении доли воды в составе суспензии наблюдается значительное увеличение времени задержки зажигания витающих частиц КЖТ. Для состава на основе бурого угля с ростом концентрации воды от 40 % до 50 % времена задержки зажигания возрастали в среднем на 25–30 % (рис. 3.4.1.6). Пары воды в окрестности капли и в порах приповерхностного слоя препятствуют испарению жидкого нефтепродукта и термическому разложению органической массы угля и замедляют прогрев топлива. Однако при увеличении температуры в камере сгорания (особенно выше 850 К) рост концентрации воды оказывает незначительное влияние на зажигание КЖТ.

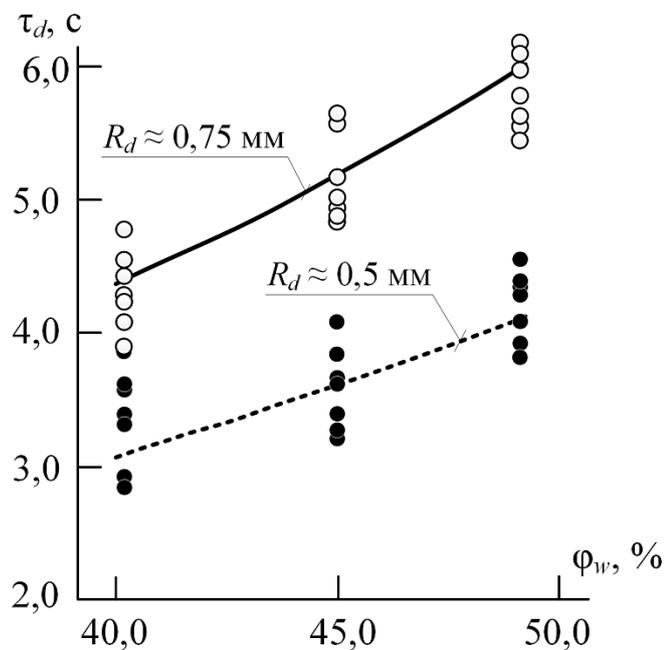


Рисунок 3.4.1.6. Времена задержки зажигания капель КЖТ (45...40...35 % бурый уголь, 40...45...50 % вода, 15 % отработанное турбинное масло) в зависимости от массовой концентрации воды ($T_g \approx 850$ К, $V_g \approx 4$ м/с) [150]

Наибольший интерес представляло [150] влияние тонины помола угольной пыли, используемой в составе КЖТ, на характеристики зажигания витающих капель (частиц) суспензионного топлива. Установленные зависимости, приведенные на рис. 3.4.1.7, показывают 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 810–870 К, поскольку с уменьшением размера угольных частиц процессы их нагрева, термического разложения и зажигания протекают быстрее. Однако значительное уменьшение тонины помола угля в целях снижения инерционности зажигания топливной композиции, скорее всего, будет нецелесообразно при сжигании КЖТ в промышленных котельных агрегатах ТЭС, что обусловлено, в первую очередь, увеличением затрат на приготовление топлива. Поэтому целесообразно использовать другие способы интенсификации зажигания КЖТ, рассмотренные в диссертационной работе.

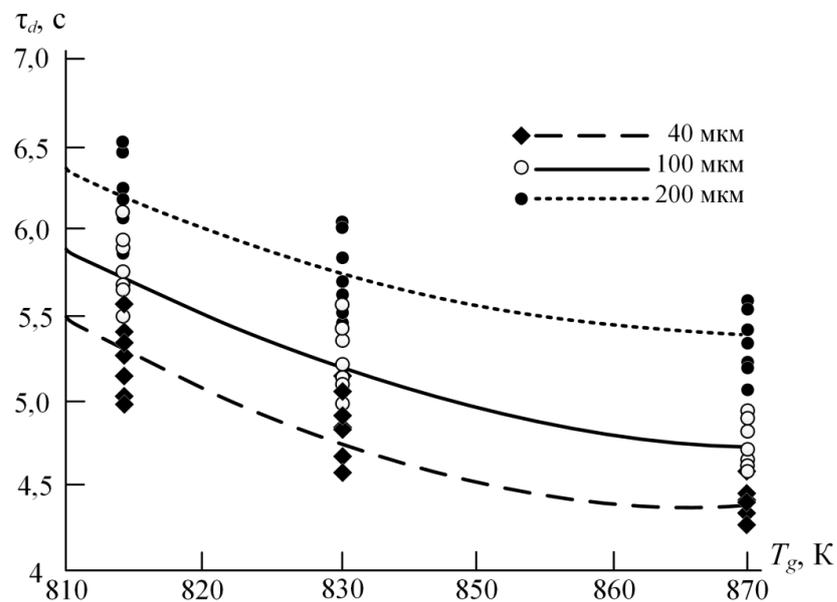


Рисунок 3.4.1.7. Времена задержки зажигания капель КЖТ (40 % бурый уголь, 50 % вода, 10 % отработанное турбинное масло) в зависимости от температуры воздуха при разной тонине помола твердого горючего компонента ($R_d \approx 0,75$ мм и $V_g \approx 4$ м/с) [150]

3.4.2. Закономерности зажигания композиционного топлива при добавлении порошка алюминия

Создание композиционных жидких топлив на основе промышленных отходов является перспективным способом их утилизации при сжигании в

котельных агрегатах ТЭС. Однако теплота сгорания таких топлив ниже, чем у традиционных энергоресурсов. Целесообразно повысить теплотворную способность данных видов топлив. Одним из возможных и достаточно часто применяемых способов увеличения температуры горения КЖТ является добавка небольшого количества алюминиевого порошка (Al) [151–153]. Последний традиционно используется в качестве добавки для твердых ракетных топлив. Добавление небольшого количества алюминиевой пудры является перспективным путем оптимизации горения суспензионных угольных композиций на ТЭС. В качестве исходного КЖТ использовался [151–153] состав на основе 89 % фильтрека «Г» (влажный), 10 % отработанного масла, 0,5–1 % пластификатора. Далее исходную топливную композицию металлизировали добавкой алюминиевого порошка (марки ПАП-2, размер частиц до 10 мкм) концентрацией 2–5 %, доводя до однородности суспензии КЖТ с помощью гомогенизатора. Верхняя граница диапазона варьирования концентрации алюминиевого порошка обусловлена тем, что при превышении концентрации металлического порошка более 5 % происходит значительное увеличение вязкости, что делает такое неуместным для большинства систем нагнетания, применяемых в системах топливоподачи ТЭС и котельных, работающих на жидком и суспензионном топливе.

Экспериментальные исследования [151–153] процессов сжигания металлизированных КЖТ проводились при подвешивании капли на спаяе термопары (хромель-алюмелевая, диапазон измеряемых температур $T=650–1300$ К, систематическая погрешность $\Delta T \sim 0,004T$, инерционность не более 0,5 с, диаметр спая 0,3 мм). Выбор данного подхода обусловлен необходимостью регистрации температуры топлива в процессе прогрева, зажигания и горения. В случае витания капли КЖТ в камере сгорания такую регистрацию достоверно выполнить сложно. Подвешиваемая капля топлива помещалась в поток воздуха (0,5–5 м/с) с температурой 750–1100 К, формирующийся в термостойком стеклянном цилиндре. Данный температурный диапазон являлся целесообразным и рациональным с экологической точки зрения [28–30]. Процессы зажигания и горения капель КЖТ аналогично витающим частицам регистрировались на

высокоскоростную видеокамеру (Phantom V 411). Систематическая ошибка времени измерения составляла менее 1мс. Случайные ошибки компенсировались многократными повторениями измерений в серии экспериментов. Для контроля температур горения дополнительно использовалась тепловизионная съемка с Testo 885.

Рис. 3.4.2.1 иллюстрирует, что добавление металлического порошка приводит к некоторому увеличению времени задержки зажигания по сравнению с соответствующими значениями для КЖТ без примеси алюминия при низких температурах. Когда температура воздуха превышает температуру зажигания алюминиевого порошка (920 К), времена τ_d сравнимы с наблюдаемыми для КЖТ без Al. Данные отличия обусловлены следующими факторами. Во-первых, частицы алюминия аккумулируют определенную теплоту, снижая тем самым скорость нагрева капли КЖТ. Во-вторых, частицы алюминия могут гореть, приводя к дополнительному прогреву топливной массы в процессе выгорания. Переход на концентрации Al ~4 % приводит к резкому увеличению τ_d при низких температурах. Однако при более высоких температурах (более 1000 К) зависимости практически сходятся. Данный эффект демонстрирует, что оптимальное значение металлизации топлива имеет смысл определять для низких температур зажигания капель КЖТ в топочных камерах котельных и ТЭС.

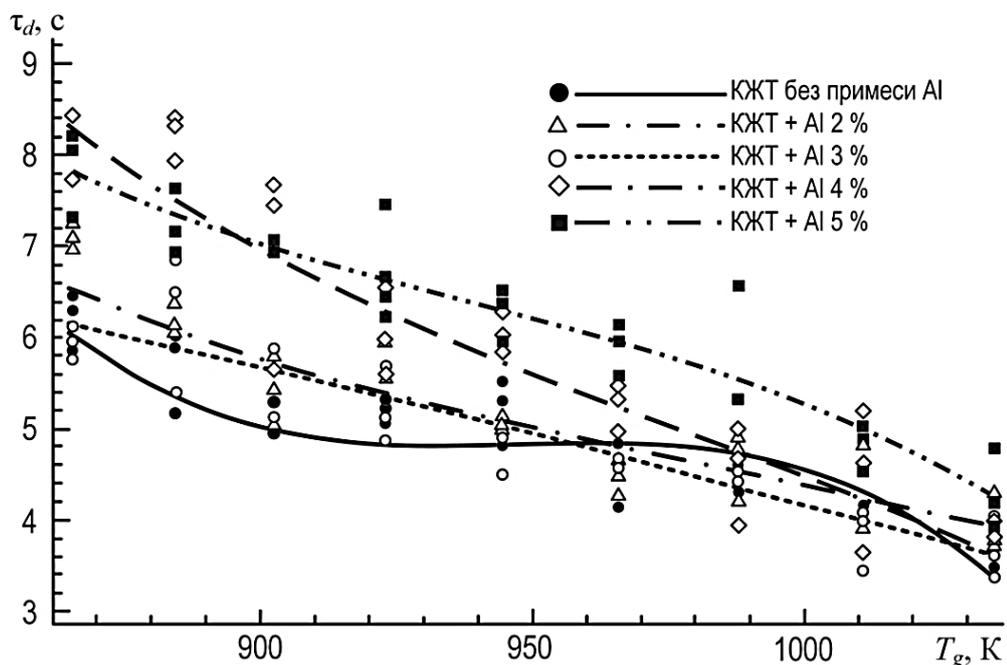
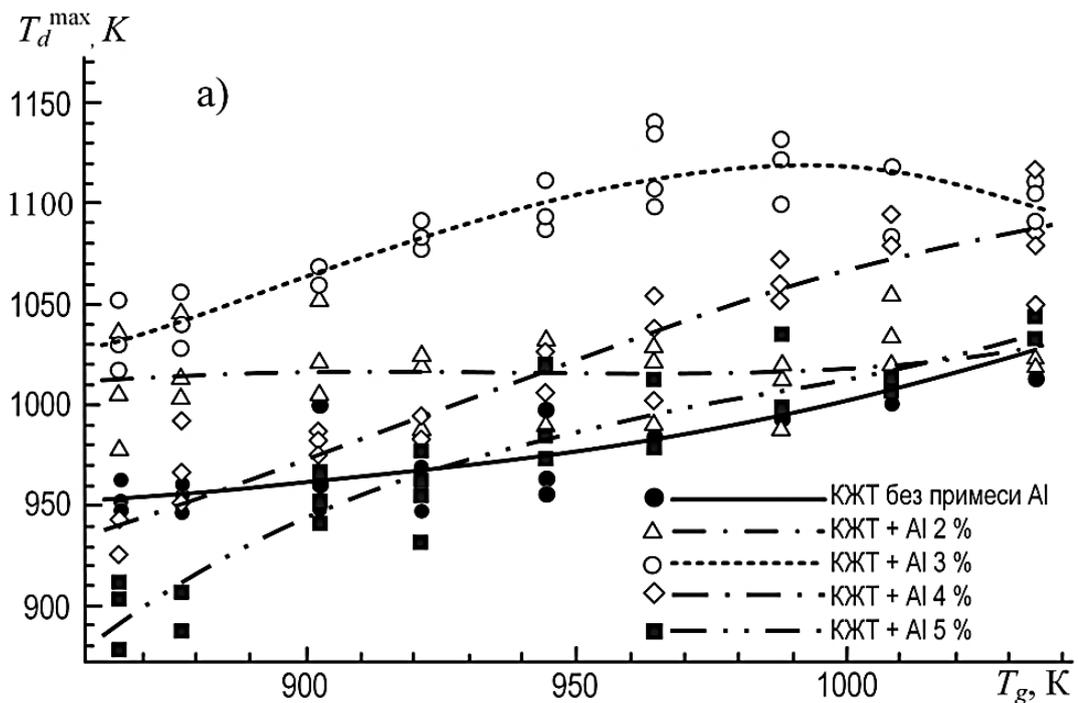


Рисунок 3.4.2.1. Изменение времен задержки зажигания капель КЖТ с различной концентрацией алюминиевого порошка при разных температурах потока разогретого воздуха [152, 153]

На рис. 3.4.2.2, *a* представлены максимальные температуры горения T_d^{\max} в зависимости от температуры воздуха (для различных концентраций алюминия в составе КЖТ). Из экспериментальных данных можно видеть, что существует три режима горения после введения частиц Al:

- 1) стабилизация максимальной температуры горения в широком диапазоне температур окружающей среды при концентрации алюминия 2 %;
- 2) значительное увеличение максимальной температуры горения T_d^{\max} для узкого диапазона температуры воздуха, когда концентрация активирующей добавки составляет 3 %;
- 3) дальнейшее увеличение концентрации металла (выше 3 %) ведет к практически линейному росту максимальной температуры горения T_d^{\max} с температурой воздуха T_g .



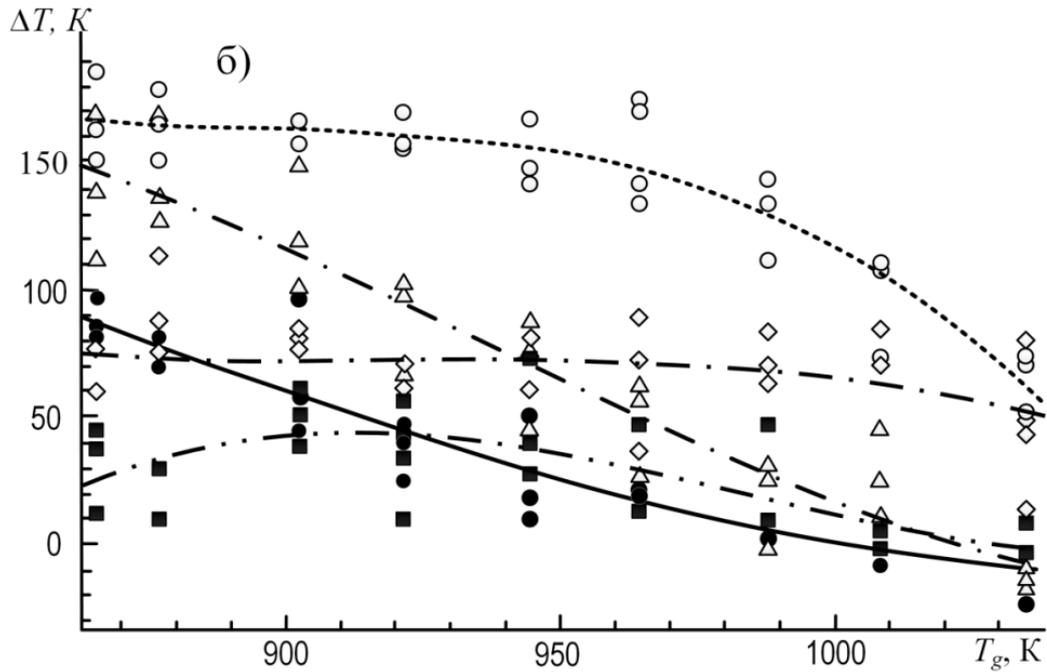


Рисунок 3.4.2.2. Изменение максимальной температуры горения T_d^{\max} с рабочими температурами разогретого воздуха для КЖТ [152, 153] с различной концентрацией алюминиевого порошка (а); разница максимальных температур горения при идентичных параметрах воздуха (б)

В случае сжигания капли КЖТ с концентрацией Al более 3 % левая часть температурной зависимости демонстрирует низкие температуры горения. Следует также отметить превышение температуры горения над температурой потока воздуха. На рис. 3.4.2.2, б можно видеть, что для КЖТ без Al наблюдается непрерывно уменьшающаяся разница температуры горения капли топлива с ростом температуры воздуха. Некоторые металлизированные топлива могут сохранять эту разницу в широком диапазоне температур воздуха. С другой стороны, максимальные значения превышения температур горения зависят от концентрации алюминиевого порошка. Они растут до тех пор, пока концентрация порошка алюминия не достигнет 3 %, и резко уменьшаются при превышении этого значения. Как можно видеть, металлизация топлива с концентрацией 4–5% не позволяет существенно улучшить параметры горения КЖТ. Заметим, что это уменьшает температуры горения и в то же время увеличивает времена задержки

зажигания (рис. 3.4.2.1). Поэтому КЖТ с добавлением 3 % алюминия порошка является наиболее оптимальным вариантом металлизации.

Из анализа характеристик зажигания металлизированных КЖТ можно выделить три основных эффекта:

- 1) повышение концентрации алюминиевого порошка до 2 % позволяет стабилизировать максимальную температуру горения по всему рассмотренному диапазону температуры воздуха;
- 2) для получения абсолютных максимумов температур горения целесообразно повышение концентрации алюминия до 3 %. Данная добавка является наиболее оптимальной, но эффективность может быть достигнута в относительно узком диапазоне температур воздуха (960–1010 К);
- 3) определена разница между температурой горения и температурой окружающей среды (с 4 % алюминиевого порошка) в 70–75 К для широкого диапазона температур воздуха.

Важной характеристикой исследованных процессов является длительность горения топлива. Данный параметр вместе с температурой горения позволяет проводить интегральные оценки эффективности выработки энергии при горении. На рис. 3.4.2.3 показаны зависимости времен полного сгорания металлизированного КЖТ от температуры воздуха (для различных концентраций металлической примеси). Кривая для времени полного сгорания для КЖТ без Al почти горизонтальна для всего диапазона текущей температуры окружающей среды. Однако добавление порошка (2 % масс.) приводит к снижению продолжительности горения в целом с ростом температуры воздуха. Дальнейшее увеличение концентрации алюминия приводит к росту общего времени горения на 50–100 % с соответствующими сложными температурными зависимостями (рис. 3.4.2.3). Состав топлива с 4 % металлического порошка показывает линейное уменьшение длительности горения с ростом температуры теплоносителя. Этот фактор вместе с линейным увлечением максимальной температуры горения, и почти линейной зависимостью изменений времени задержки, означает, что эффективное горение такого КЖТ обеспечивается при более высоких

температурах воздуха, чем рассмотренный диапазон. Как следствие, для большинства промышленных топочных агрегатов (в том числе для котлоагрегатов ТЭС) применение указанного состава КЖТ нецелесообразно с экологической точки зрения. Поэтому можно заключить, что более высокий уровень металлизации КЖТ также является неуместным с экономической точки зрения. Добавка, обеспечивающая максимальную температуру горения (3 % алюминиевого порошка) и оптимальные тепловые условия, дает увеличение общего времени горения приблизительно на 30 %. Таким образом, это позволяет поддерживать высокие температуры в течение длительного времени, в том числе и для витающих частиц КЖТ.

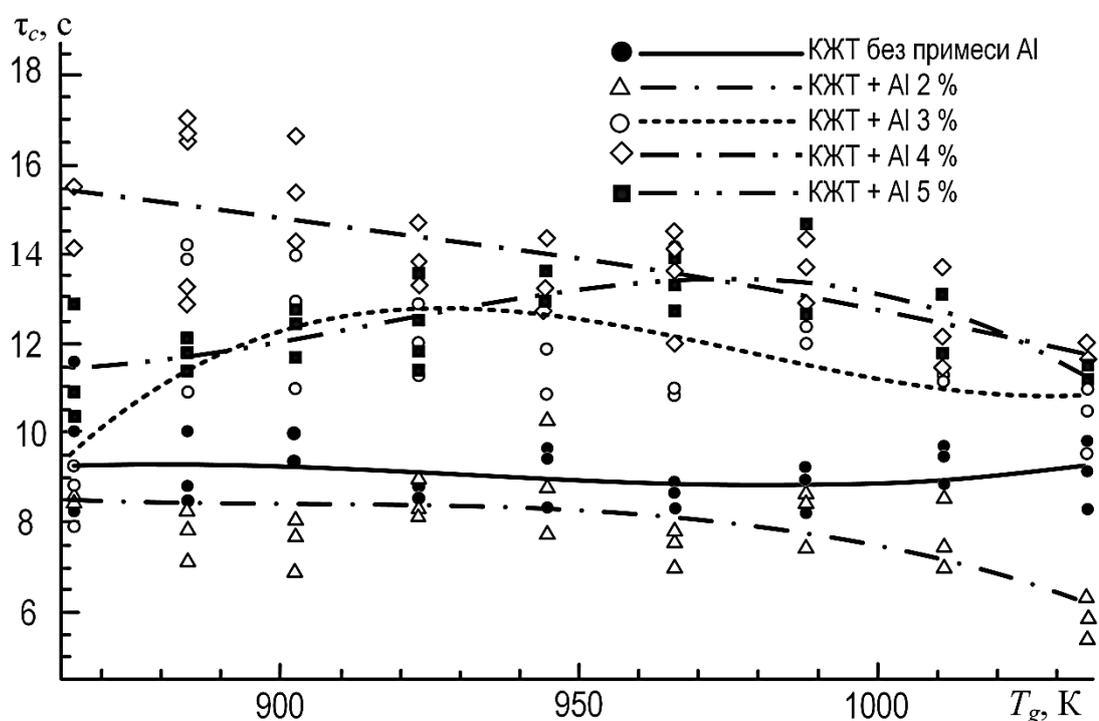


Рисунок 3.4.2.3. Общее время сгорания в зависимости от температуры воздуха для образцов КЖТ с различной концентрацией алюминиевого порошка (точки являются измеренными данными, кривые – кубическими среднеквадратичными значениями данных экспериментов [152, 153])

В результате проведенных экспериментов можно отметить значительное влияние типа, свойств и концентрации компонентов суспензионных топлив на процесс зажигания последних. Зарегистрированная близкая инерционность

зажигания суспензий КЖТ, приготовленных на основе влажных отходов обогащения каменных углей разных марок, иллюстрирует значительный потенциал использования различных отходов углеобогащения в энергетическом секторе. Добавление небольшого количества (до 5 %) алюминиевого порошка заметно улучшает теплотворную способность топливной композиции в сравнении с традиционными (на основе воды, угля и отработанной горючей жидкости) суспензиями КЖТ, сохраняя при этом задержку зажигания на заранее прогнозируемом уровне. Этот аспект важен для минимизации недостатков суспензионных топлив в сравнении с углями. Однако выявленный положительный эффект должен быть соотнесен с изменением стоимости топлива и процесса его приготовления в соответствующих системах ТЭС в результате металлизации за счет введения в его состав частиц алюминия.

3.4.3. Применение растительных добавок в составе композиционных жидких топлив

Для определения потенциальных преимуществ КЖТ при добавлении растительных примесей выполнены эксперименты с применением рапсового масла [154] в качестве экологически чистой примеси, которая может позволить повысить теплоту сгорания, улучшить вязкостные характеристики суспензии, расширить компонентную сырьевую базу для приготовления КЖТ. Внедрение возобновляемых ресурсов в топливный сектор ТЭС является одним из перспективных путей преодоления энергетического кризиса. Использование растительной биомассы для производства различных топлив никого не удивляет. Однако существует два общеизвестных пути ее эффективной переработки и применения в интересах теплоэнергетики.

Первый – производство биогаза и биодизельного топлива. Расширение области применимости биомассы путем применения ее в составе твердых и жидких промышленных топлив позволит, с одной стороны, удешевить

производство тепловой энергии, а с другой, создать альтернативные источники котельного топлива для сельскохозяйственных регионов.

Вторым общепризнанным способом повышения энергоэффективности производств является использование горючих отходов в качестве компонентов суспензионных топлив ТЭС и котельных. Такие отходы, как правило, обладают пониженной теплотворной способностью, что вынуждает исследователей искать оптимальные комбинации компонентов смесового топлива, нивелирующие негативные эффекты.

Известны результаты изучения возможности объединения двух вышеперечисленных подходов для повышения эффективности сжигания смесевых промышленных топлив на ТЭС, а также для расширения номенклатуры компонентов смесевых топлив [154]. Для проведения исследований была приготовлена топливная смесь на основе фильтр-кека газового угля (90 вес.%) и рапсового масла (10 вес.%). Использовался стенд, схема которого представлена на рис. 3.4.3.1. Вместе с водоугольной смесью были исследованы свойства полностью возобновляемого биотоплива, состоящего из 60–70% рапсового масла и 30–40% наполнителя (молотая сушеная солома/листья с теплотой сгорания 16,8 МДж/кг). Биотопливо такого типа ранее не применялось в промышленных и энергетических теплогенерирующих системах, хотя их реологические свойства вполне сопоставимы со свойствами водоугольных топлив.

Рапсовое масло является привлекательным компонентом смесевых топлив в связи с тем, что оно хорошо загорается только в тонкораспыленном состоянии или в присутствии легковоспламеняемого наполнителя [154]. Данный фактор существенно упрощает его хранение и транспортировку. Временные параметры зажигания и горения топлив регистрировались с помощью высокоскоростной видеокамеры Phantom V411, температура горения наблюдалась с помощью малоинерционной хромель-алюмелевой термопары, на спай которой и подвешивалась исследуемая порция топлива перед вводом в модельную камеру сгорания.

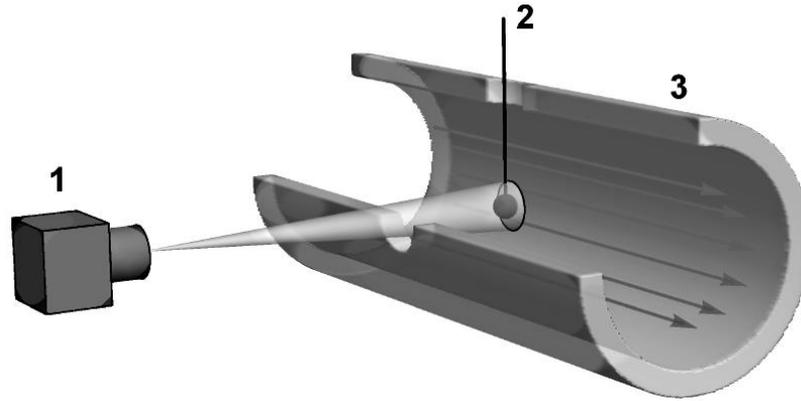


Рисунок 3.4.3.1. Схема экспериментального стенда [154]: высокоскоростная видеокамера (1), держатель с образцом топлива (2), цилиндрический канал из жаропрочного стекла (3)

Зависимости времени задержки зажигания исследованных топлив от температуры воздуха показаны на рис. 3.4.3.2. В качестве эталона использована ранее известная зависимость для смеси фильтр-кека и мазута.

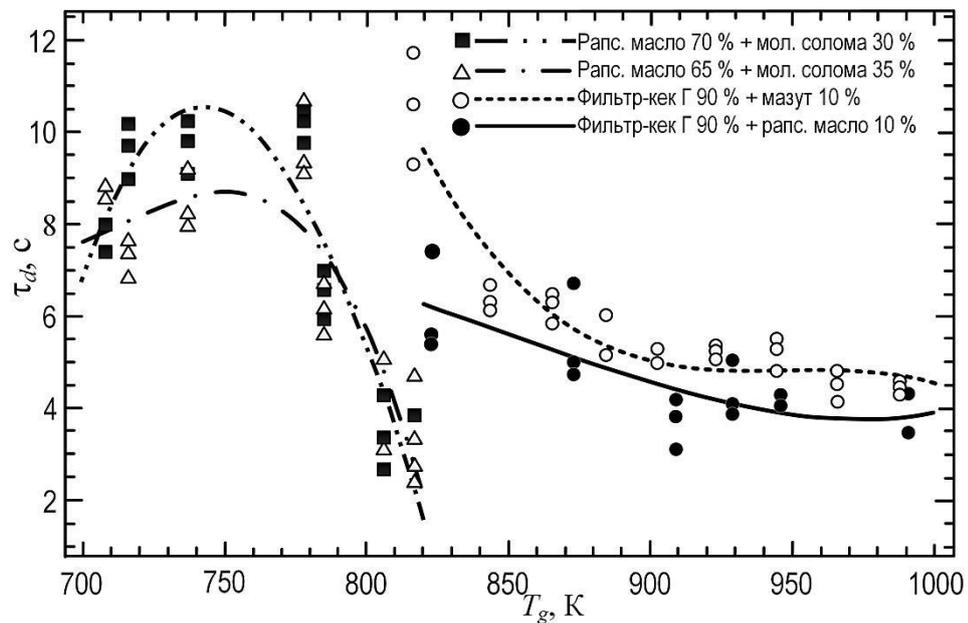


Рисунок 3.4.3.2. Время задержки зажигания топливных смесей в зависимости от температуры воздуха [154]

Зависимость времени полного сгорания порции топлива (во всех экспериментах капля диаметром 1,5 мм) от температуры воздуха показана на рис. 3.4.3.3.

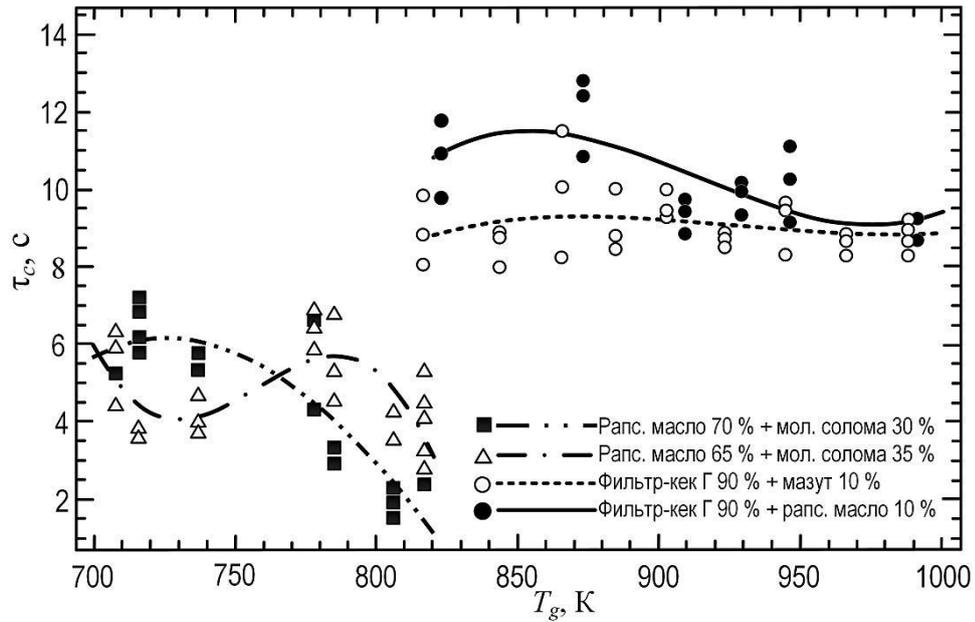


Рисунок 3.4.3.3. Время полного сгорания порции топливной смеси в зависимости от температуры воздуха [154]

Измерения временных параметров процессов зажигания и горения топлив показывают, что водоугольная смесь, дополненная рапсовым маслом, показывает параметры зажигания, в целом превосходящие наблюдаемые для аналогичной смеси, содержащей мазут. Задержка зажигания стала меньше, а ее зависимость от температуры воздуха – слабее. Время горения незначительно выросло, при этом снизилось тепловыделение. В сравнении с водоугольными смесями полностью возобновляемое биотопливо демонстрирует большую инерционность при низких температурах и существенно меньшую (до двух раз) длительность горения. Оптимальная температура поджига биотоплива составляет 800 К, тогда как для водоугольной смеси предпочтительнее более высокие температуры (выше 900 К).

Максимальные температуры горения топливных смесей в зависимости от температуры воздуха показаны на рис. 3.4.3.4. Разница температур горения биотоплива и водоугольных смесей достигает 100–150 К. Биотопливо с большим количеством наполнителя имеет высокую стабильность температуры горения при колебаниях температуры воздуха [154]. Для водоугольной смеси с примесью

рапсового масла характерно высокотемпературное горение в сравнении с аналогичной суспензией КЖТ, содержащей мазут [154].

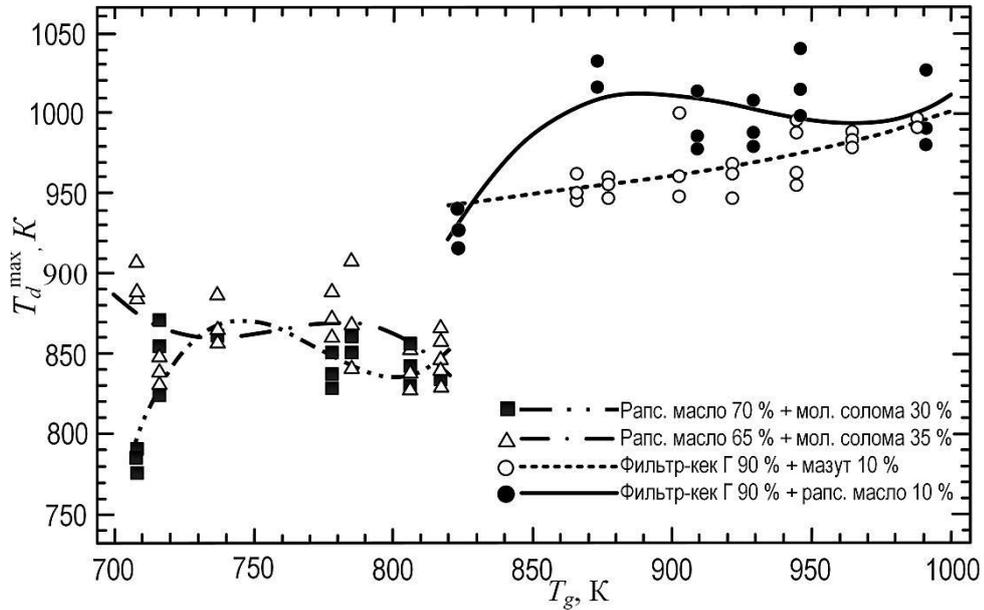


Рисунок 3.4.3.4. Максимальная температура горения топливной смеси в зависимости от температуры воздуха [154]

Сводная диаграмма по температурам зажигания/горения топливных смесей показана на рис. 3.4.3.5.

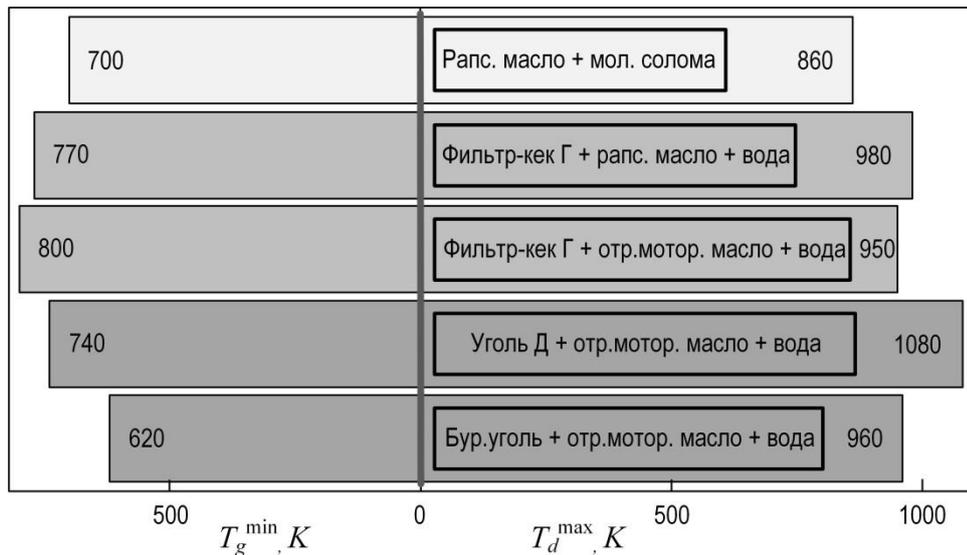


Рисунок 3.4.3.5. Сводная диаграмма характерных температур топливных смесей [154]. Топливные смеси: полностью возобновляемое биотопливо, водоугольная смесь с рапсовым маслом, водоугольные смеси на основе фильтр-кека Г, различных углей (Д, Б2) и отработанного моторного масла.

Исследования [154] позволяют заключить, что комбинирование компонентов топлив биологического происхождения с промышленными отходами приводит к созданию топлив, свойства которых не уступают привычным топливным смесям, созданным из промышленных отходов [28–30]. С другой стороны, применение, например, рапсового масла как в составе водоугольных смесей, так и в составе биотоплив в энергетических котлах ТЭС, а также на производственных и отопительных котельных позволяет расширить сырьевую базу теплоэнергетики за счет дешевых и доступных компонентов. Рассмотренные топливные смеси обладают близкими реологическими свойствами, что позволяет применять их в котлах с одной и той же системой впрыска. Невысокая инерционность зажигания биотоплива дает возможность использовать его в качестве стартового топлива при запуске котельных агрегатов (перед переключением на водоугольные смеси) ТЭС.

3.4.4. Предельные условия и основные характеристики газофазного и гетерогенного зажигания перспективных композиционных топлив

Для поддержания заданной тепловой нагрузки и повышения срока службы энергетического оборудования ТЭС необходимо создание условий стабильного воспламенения, устойчивого горения и полного выгорания топлива в топочных камерах. Это особенно актуально при сжигании сложных топливных композиций. Целесообразно минимизировать перепады температур в топочном пространстве или непосредственно в факеле горения КЖТ. Для обоснования целесообразности применения жидких композиционных топлив в энергетике нужны достоверные экспериментальные данные о закономерностях процессов газофазного и гетерогенного зажигания капель КЖТ, объясняющих доминирование одного из этих двух механизмов. Известно, что тепловой эффект горения летучих сильно зависит как от внешних условий (температура и скорость воздушного потока вокруг капель топлива), так и от состава топлива.

В случае витания капли КЖТ имеются ограничения по определению отличий временных характеристик газофазного и гетерогенного зажигания, а также их достоверной регистрации. Для анализа влияния перечисленных факторов на процессы зажигания целесообразно, с одной стороны, провести исследование закономерностей зажигания топливной композиции в контролируемых условиях, а с другой, изучить особенности химических процессов, происходящих при зажигании КЖТ.

Для композиционных жидких топлив на основе отходов угле- и нефтепереработки [18, 21–27, 49, 50] возможно приготовление смесей с заранее заданными свойствами, с использованием известных данных о влиянии различных компонентов. Так, нефтеорганические добавки позволяют значительно ускорить процессы зажигания за счет внесения большого количества горючих летучих компонентов вместе с существенным увеличением теплоты сгорания суспензионных топлив в целом [18, 153]. Некоторые из добавок представляют смеси только жидкого или только газообразного компонента [155]. Можно изучить влияние процессов зажигания газообразных летучих компонентов топлива на развитие последующих стадий горения топливной композиции.

При проведении экспериментов [156] были использованы три состава КЖТ на основе фильтр-кека «СС» (90 %), отработанного моторного, турбинного масла и мазута (10 % масс.) с разным количеством содержания летучих (табл. 2.4). Применяемый угольный компонент (фильтр-кек) представляет осадок из низкоспекающего угля, который содержит менее 15 % летучих веществ в сухом состоянии (свойства приведены в табл. 2.1.1). Для горючих жидкостей также свойственна различная скорость испарения и теплота сгорания. Содержание воды в рассматриваемом фильтр-кеке составляет около 40 %, 60 % – измельченный уголь с размерами частиц 100 мкм. Рассматриваемые КЖТ позволяют визуализировать эффекты подогрева топлива, выхода летучих веществ, газофазного и гетерогенного зажигания. Следует отметить, содержание большого объема воды в составе КЖТ приводит к некоторому замедлению роста

температуры горения. Данные компонентные составы сохраняют структурную стабильность в течение нескольких дней.

Эксперименты [156] проводились с использованием трубчатой муфельной печи (рис. 3.4.4.1), обеспечивающей условия рационального теплообмена для исследования процессов газофазного и гетерогенного зажигания капли КЖТ. Создаваемые условия без упорядоченного движения воздуха позволили детально регистрировать стадии прогрева и зажигания топлива. Подвешиваемая на держателе капля топлива перемещалась с помощью координатного механизма в активную зону печи. С противоположной стороны печи устанавливалась высокоскоростная камера (Phantom V411) с необходимыми параметрами съемки (частота 2500 кадров в секунду, разрешение кадра 1024x768), что достаточно для видеорегистрации зажигания в газовой фазе и дальнейшего гетерогенного горения топлива. Выбранная частота кадров позволяет измерять задержку зажигания с шагом 4 мкс. Применение цветной видеокамеры позволило адекватно разделить стадии зажигания, так как стало возможным выделить существенную разницу температур горения летучих и твердой части топлива на разных стадиях прогрева. Использование высокоскоростной видеорегистрации также позволяет определить характерные изменения размеров и формы капли при горении, визуализировать испарение воды и выход летучих компонентов КЖТ (парогазовой режим). Таким образом, возможно достоверное распознавание зон газофазного и гетерогенного зажигания.



Рисунок 3.4.4.1. Схема эксперимента [156]: 1 – высокоскоростная видеокамера; 2 – трубчатая муфельная печь; 3 – капля топлива на держателе

Температура в муфельной печи варьировалась в диапазоне 873–1073 К. Выбор значений температуры обусловлен тем, что при более низких ($T_g < 873\text{K}$) не обеспечивалось устойчивое зажигание КЖТ. При температуре воздуха в печи выше 1100 К отличия времен задержки газофазного и гетерогенного зажигания КЖТ минимальны. В таких условиях сложно проводить анализ даже с применением высокоскоростной видеокамеры. На рис. 3.4.4.2 показаны типичные кадры зажигания капли КЖТ при $T=873\text{K}$.

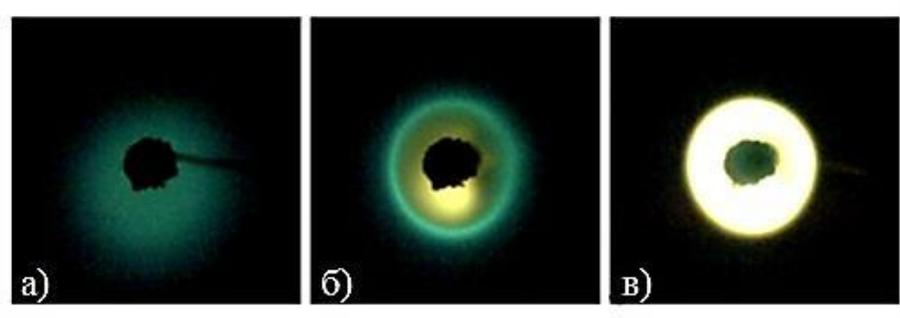


Рисунок 3.4.4.2. Типичная последовательность состояний, регистрируемых во время инициирования горения КЖТ [156]: газофазное зажигание (а), пиковое состояние горения летучих (б), момент после гетерогенного зажигания (в)

Используя данный подход, можно отметить отличия стадий прогрева и зажигания КЖТ (рис. 3.4.4.2). Момент зажигания газовой фазы определяется появлением зеленого/синего свечения (а, б – пиковое) вокруг капли. Интенсивность в кадре должна быть более чем 0,5 % от динамического диапазона (прекращение пиксельных искажений камеры). Гетерогенное воспламенение определяется как момент перехода зеленого/синего до ярко желтого свечения, которое не исчезает в течение 100 миллисекунд (при стабильном гетерогенном зажигании). Данные измерения позволяют увидеть и проанализировать динамику горения от момента зажигания капли топлива до ее выгорания.

Можно выделить: медленные (за счет радиационного нагрева до порогового зажигания) и быстропротекающие (газофазное зажигание и дополнительный нагрев образца топлива) процессы. Первая категория имеет масштаб, равный

секундам, а вторая существенно более короткое время (миллисекундная шкала). Типичные кривые гетерогенного зажигания в зависимости от температуры печи представлены на рис. 3.4.4.3.

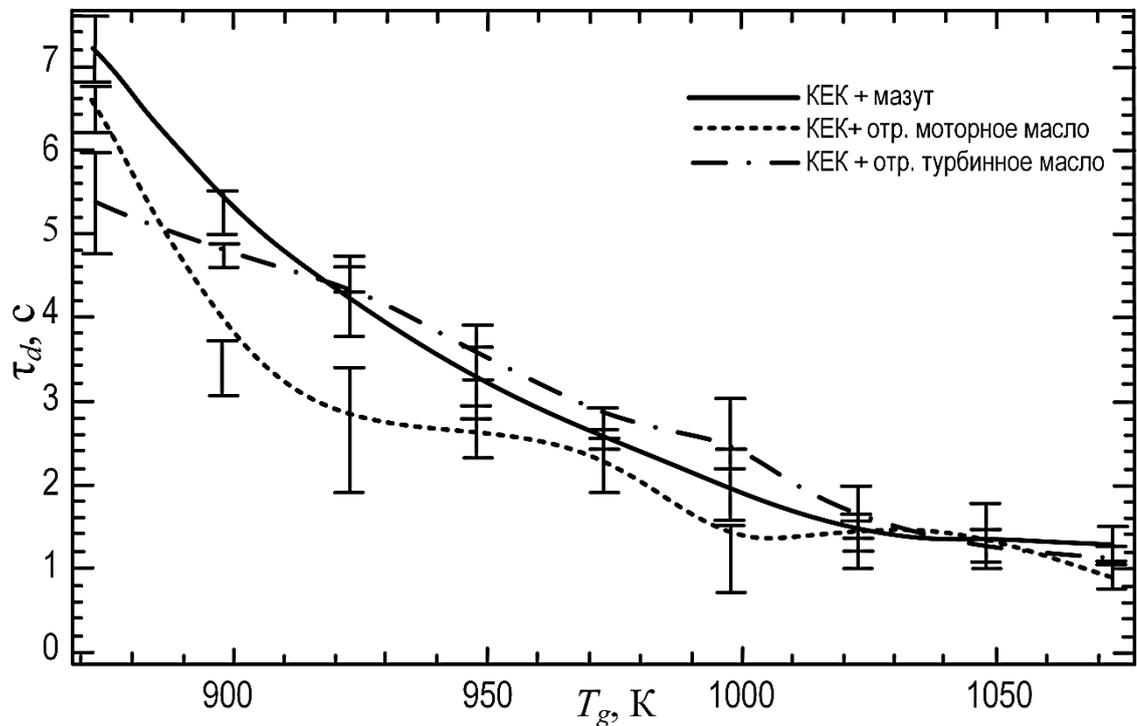


Рисунок 3.4.4.3. Времена задержки зажигания в зависимости от температуры воздуха [156]

При минимальных и близких к пороговым температурах воздуха времена τ_d составляли около 7 с, а при температурах более 1000 К времена задержки зажигания снижались до 1 с. Небольшие колебания представленных трендов возникают вследствие определенного изменения размеров капель топлива, а также различием видов применяемых горючих жидкостей. Представленные кривые становятся близкими при $T_g > 1000$ К. Характерная продолжительность процессов определяется кондуктивным и радиационным нагревом топлива. Следует отметить, что длительность медленной части воспламенения и горения сильно зависят от свойств кека в составе КЖТ. При этом содержание воды составляет около 54 %, а доля твердой части (уголь) приблизительно 36 %. Испарение воды определяет длительность предварительного нагрева капли топлива перед ее зажиганием, что влияет на теплопроводность кека. Вклад

жидкого горючего компонента в зажигание – дополнительный нагрев топлива при горении летучих веществ, как правило, немного быстрее, чем для твердых компонентов [18, 156]. Использование других видов угля, фильтр-кеков (например, с вдвое большим содержанием летучих веществ) может сделать более ценным (малая инерционность) в газовой фазе зажигания топливной композиции.

Анализ видеокadres показал, что между газофазным и гетерогенным зажиганием существует определенная разница (рис. 3.4.4.4).

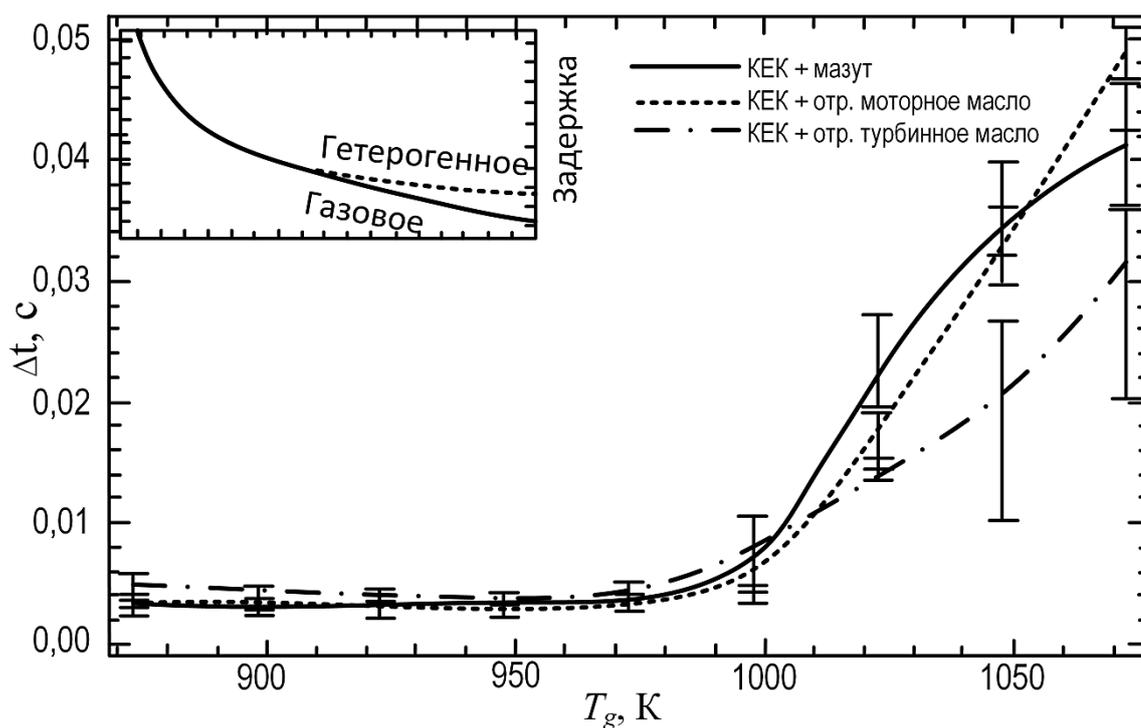


Рисунок 3.4.4.4. Времена задержки газофазного и гетерогенного зажигания в зависимости от температуры воздуха [156]

Из рис. 3.4.4.4 видно, что выявленная разница сохраняет почти постоянное значение в диапазоне температуры нагрева печи до 1000 К. Дальнейший быстрый рост связан с нестабильной скоростью формирования горючей парогазовой смеси (которую составляют скорость испарения и скорость термического разложения угля) и интенсивным образованием паров жидких компонентов в глубине капли. Первый упомянутый процесс определяет постепенно растущую концентрацию летучих компонентов вокруг капли. Второй означает, что вода начинает закипать при определенном значении температуры капли. Это подразумевает значительное

замедление повышения температуры внутри капли, потому что формирование объема выделяемого пара требует затрат огромного количества поступающей энергии. Таким образом, облако летучих веществ, окружающее каплю топлива, будет состоять из горючей части и паров воды, концентрация которых сильно увеличивается при начале внутреннего кипения. Температура этого облака может расти намного быстрее, чем температура капли КЖТ из-за малой доли летучих. Поэтому зажигание летучих происходит быстрее относительно гетерогенного зажигания, задержка которого снижается вследствие постепенного роста температуры окружающей среды и выхода паров жидкости.

Вставка слева (рис. 3.4.4.4) схематично иллюстрирует задержку зажигания в момент начала кипения воды. Существенное влияние зажигания летучих веществ наблюдается, когда температура в печи становится выше 1000 К. Состав КЖТ с моторным маслом показывает наибольшую разницу между газофазным и гетерогенным зажиганием при максимальной температуре окружающей среды. Этот фактор обусловлен низкой температурой вспышки, невысокой теплотой парообразования и кипения моторного масла (в сравнении с другими горючими жидкостями).

На рис. 3.4.4.5 показаны расчетные изменения скорости роста температуры (тепловой эффект) подповерхностного слоя топлива в зависимости от температуры муфельной печи.

Очевидно, что при достижении температуры 950 К значения dT/dt начинают убывать, что определяется более медленным уменьшением задержки гетерогенного зажигания относительно задержки газовой стадии воспламенения. Такой эффект возникает вследствие существенного повышения скорости испарения воды в глубине капли топлива с последующим выходом паров через поверхность капли (с эффектом охлаждения или поддержанием температуры), в момент газофазного зажигания. Рассматриваемый процесс не может изменить тенденцию изменения температуры к уменьшению из-за сильного окисления топлива, которое протекает параллельно. Однако скорость изменения температуры становится в четыре раза медленнее, чем при более низких

температурах. Горение летучих веществ вокруг капли не позволяет значительно повысить скорость нагрева капли топлива. Масштаб влияния горения летучих веществ на режим нагрева топлива можно оценить изменением скорости роста температуры приблизительно на 10 %, что следует после газофазного зажигания (рис. 3.4.4.5 пик разницы между красной и синей кривой). Разрыв между двумя моментами зажигания растет более чем в 10 раз с увеличением температуры окружающей среды от 973 К до 1073 К (от 4 мкс до 50 мс).

Оценить динамику горения КЖТ достаточно трудно как теоретически, так и экспериментально. Это возможно сделать путем экспериментального анализа яркости. Теплота сгорания пропорциональна излучаемой энергии и, следовательно, интегральной яркости видеок кадров горячей капли КЖТ.

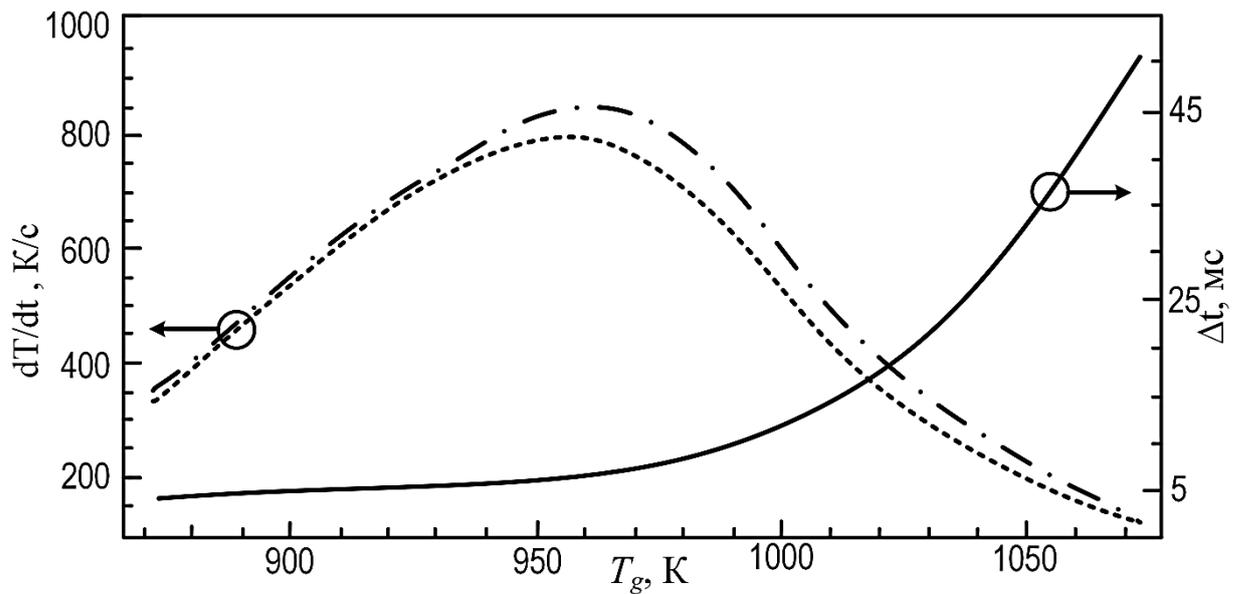


Рисунок 3.4.4.5. Расчетные скорости изменения температуры в подповерхностном слое капли топлива в зависимости от температуры воздуха (штриховая кривая – зависимость до момента газофазного зажигания, штрихпунктирная – после него, сплошная кривая – отличие между моментами газофазного и гетерогенного зажигания); при $T_g \geq 970$ К наблюдается падение в результате предварительного начала кипения воды в глубинных слоях капли КЖТ [156]

На рис. 3.4.4.6, а видны выделенные тенденции изменения яркости в зависимости от температуры в муфельной печи. Каждая линия тренда показывает

интегральную яркость видеокадров, осредненных за весь временной интервал между газофазным и гетерогенным зажиганием. Таким образом, эта величина пропорциональна условной эффективной мощности сгорания летучих веществ. Стоит отметить, что водоугольное топливо без добавления нефтяных компонентов (например, отработанных масел и др.) выделяет очень малое количество летучих для адекватной регистрации газофазного зажигания при $T_g < 970$ К. Тенденции нормализуются по максимальному значению, что хорошо показывает динамику тепловыделения за счет сжигания летучих веществ. Топливные композиции с добавками отработанного турбинного масла и мазута имеют аналогичные зависимости в отличие от состава с отработанным моторным маслом. Так, при температуре около 970 К для первых двух кривых наблюдается некоторый изгиб, что отражает ранее упомянутый процесс интенсивного выхода паров из глубины капли, который замедляет уменьшение скорости образования горючих летучих веществ (за счет эффекта охлаждения капли).

Дальнейшее повышение яркости (после 1020 К) наблюдается вследствие образования золы (угольной части) на поверхности капли, что в итоге может повлиять на зажигание летучих. Этого недостаточно для стабильного гетерогенного воспламенения, которое регистрируется спустя десятки миллисекунд после дополнительного нагрева.

Состав топливной композиции с отработанным моторным маслом показывает разную динамику (штриховая линия на рис. 3.4.4.6, *a*). Это обусловлено более низкой температурой вспышки масла, что малозаметно влияет на динамику значение температуры топлива.

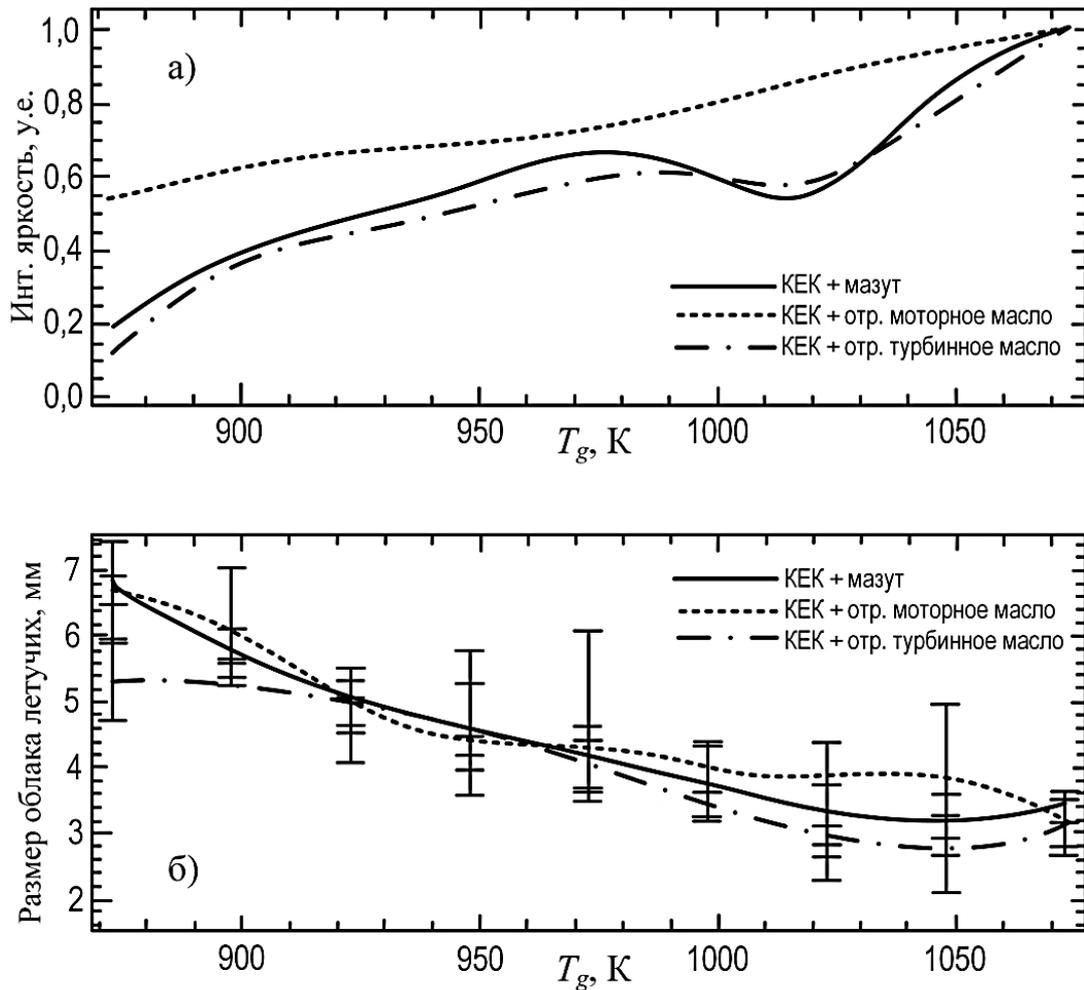


Рисунок 3.4.4.6. Изменение средней интегральной яркости горения летучих для интервала между газофазным и гетерогенным зажиганием топливной смеси (а). Рост максимального диаметра облака горящих летучих, соответствующий рис. 3.4.3.2 (б) [156]

Представленные на рис. 3.4.4.6, б зависимости позволяют оценить количество выделяющейся теплоты при сгорании летучих веществ. Как можно видеть, диаметр облака, соответствующий максимальной скорости горения летучих газов, снижается с увеличением температуры печи для всех рассматриваемых топливных композиций. Он уменьшается практически в два раза, когда температура возрастает от 870 К до 1070 К. В то же время яркость увеличивается в 2–5 раза (рис. 3.4.4.5, а). Это позволяет сделать общий вывод о пространственной плотности выработки тепловой энергии летучих веществ, увеличивающийся 35–40 раз с ростом температуры. Вертикальная линия сетки на

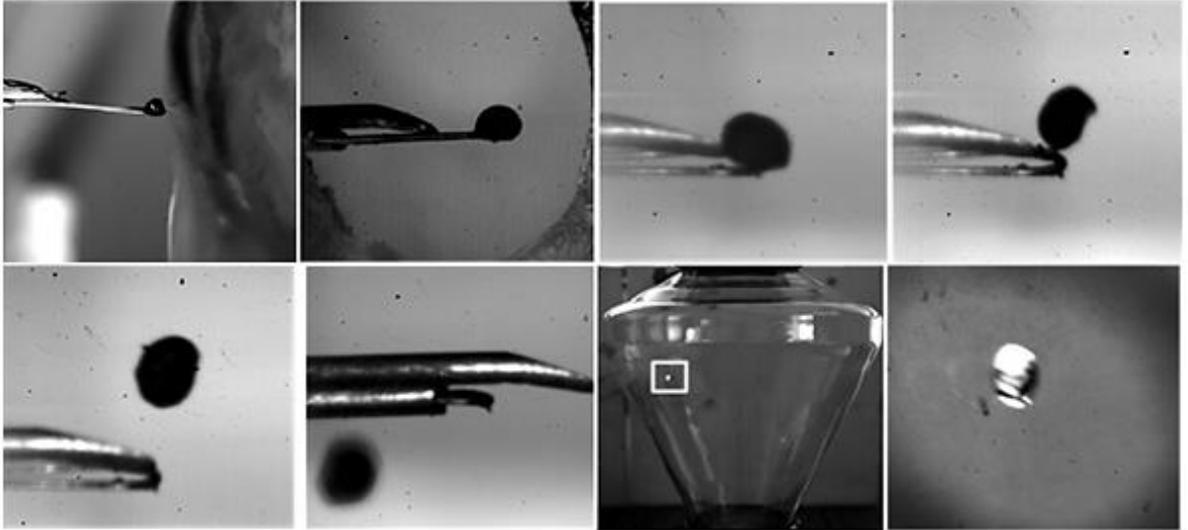
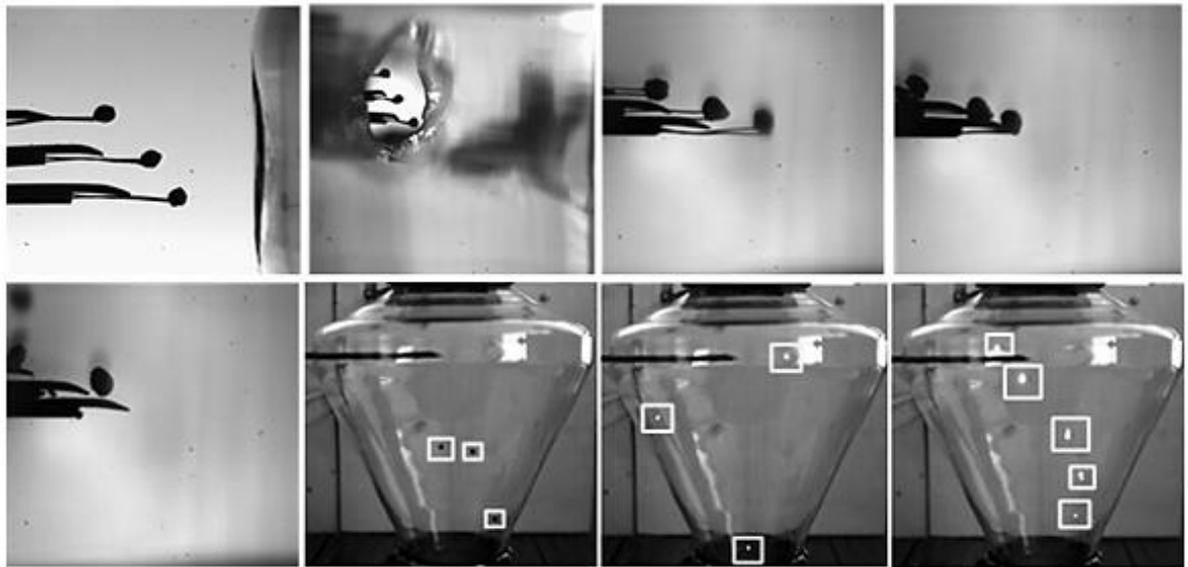
рис. 3.4.4.6, б показывает типичный размер облака горения летучих для капли КЖТ с $D \approx 2$ мм (или $R_d \approx 1$ мм). Максимальный пик горения летучих приходится при соотношении $2/5$ радиуса капли от ее поверхности. Увеличение скорости горения летучих в основном связано с существенным уменьшением задержки зажигания в целом. Это приводит к гораздо меньшим потерям летучих веществ во время нагрева топлива. Полученный результат вместе с установленным ростом скорости выделения летучих с соответствующей температурой означает, что при более высокой температуре большая часть горючих веществ может способствовать нагреву топлива вместо того, чтобы использоваться в топочном пространстве котельных агрегатов ТЭС. Однако даже этот эффект не вносит существенного вклада в гетерогенное зажигание.

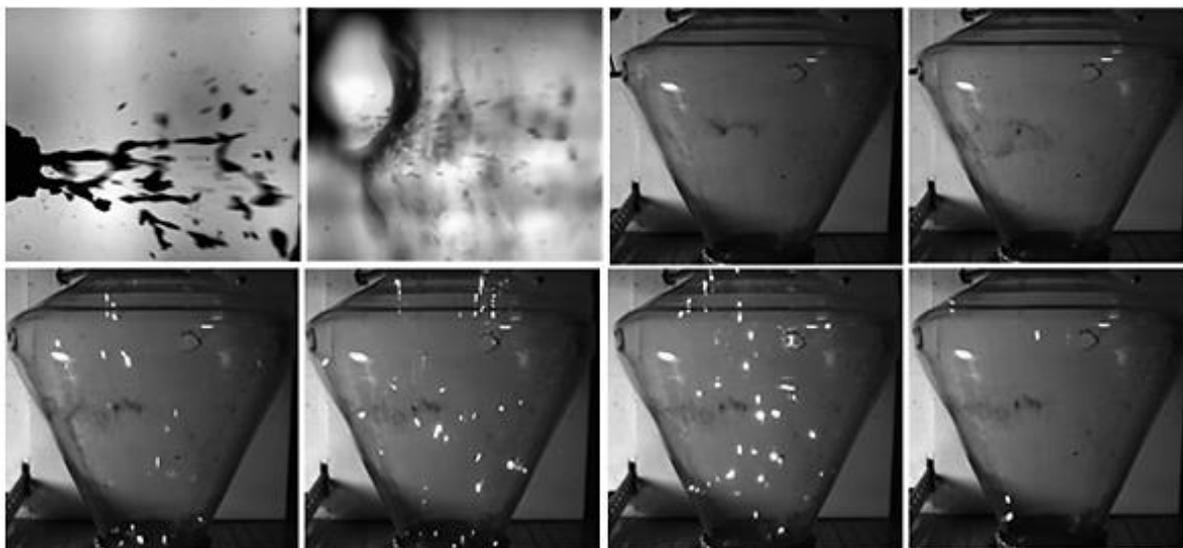
3.5. Зажигание малой совокупности капель и топливного аэрозоля композиционного жидкого топлива

Предложенный экспериментальный подход к исследованию процессов зажигания и горения частиц КЖТ, витающих в среде закрученного (вихревого) течения воздуха, позволяет установить и сопоставить временные характеристики зажигания одиночных, малой группы, а также полидисперсного потока частиц топлива [127]. Для сжигания распыленного топлива в топочных камерах котлоагрегатов ТЭС, а также технологических и отопительных котлов необходимо создание условий устойчивого зажигания и горения большой совокупности частиц КЖТ. Поэтому определение отличий условий и характеристик зажигания большой и малой совокупности частиц КЖТ является особенно важным.

На рис. 3.5.1, а, б приведена последовательность кадров ввода и сброса (отрыва от нихромовой проволоочки) одиночной капли и группы из трех капель КЖТ до момента их зажигания. При достижении минимальной массы частицы, соответствующей условиям перехода во взвешенное состояние, начиналось ее витание. Перемещение частицы сопровождалось ее вращением и изменением скорости движения вдоль направляющей потока воздуха. Анализ [145] показал,

что частица композиционного топлива переходит в состояние витания не полностью освобожденной от влаги или горючей жидкости, а в условиях равенства силы тяжести и подъемной силы газов.

*a**б*



в

Рисунок 3.5.1. Последовательность видеокadres каплей КЖТ с момента ввода, сброса, витания, зажигания и последующего горения в модельной камере сгорания: *а* – одиночной капли, *б* – группы из трех капель, *в* – полидисперсного потока [127]

В большинстве экспериментов происходило измельчение частиц (как без зажигания, так и в процессе горения). Образовывалась совокупность мелких частиц. Такие последствия наблюдались при столкновении частиц между собой (в экспериментах с большой концентрацией частиц КЖТ) или касании со стенками модельной камеры сгорания. В итоге образовывались не менее 3–5 (иногда более 10) горящих частиц меньших размеров. Времена их зажигания и полного сгорания существенно отличались от аналогичных параметров для частиц КЖТ без разрушения в процессе горения [145]. В связи с этим серии экспериментов с зажиганием одиночной и группы из трех витающих частиц КЖТ проводились при сохранении их целостности (без разрушения на отдельные фрагменты). Выполнялась дополнительная выборка видеокadres.

Дополнительно проведена регистрация исследуемых процессов с разрушением на малые (вторичные) частицы топлива (последний кадр на рис. 3.5.1, *б*). Для полидисперсного потока, впрыскиваемого в камеру сгорания КЖТ (рис. 3.5.1, *в*) характерно формирование различных форм агломератов, что

приводит к довольно значительным колебаниям измеряемого параметра – времени задержки зажигания. Наряду с этим происходило образование дополнительных вихревых течений газовой среды за счет совместного вдува воздуха (при давлении около 150 кПа) вместе с потоком КЖТ, что также способствовало незначительному уменьшению температуры воздуха (на 20 К). Используемый объем топлива при этом составлял 1,5 мл.

В группе исследований последних лет, проанализированных в обзорной статье [18], установлено, что по мере увеличения температуры воздуха и интенсивного нагрева капли суспензионного топлива пары воды и газообразные вещества диффундируют во внешнюю среду с поверхности капли. В результате этого часть угольных частиц диспергирует. Также происходит интенсивный выход летучих газов с образованием газопаровой смеси. Кроме того, ускоренный нагрев и внутренней перегрев капли может способствовать возникновению явления микровзрыва с образованием более мелких фрагментов. Перечисленные эффекты особенно заметны для составов КЖТ на основе мелкодисперсного бурого угля и различных жидких горючих компонентов (например, отработанных масел).

Для сравнения интегральной характеристики зажигания τ_d (рис. 3.5.2) в экспериментах с одиночными, небольшой группой (из трех) капель, полидисперсным потоком последних применена суспензия КЖТ на основе 90 % фильтр-кека марки «Г» (табл. 2.1.1–2.1.3) и 10 % отработанного турбинного масла (табл. 2.1.4). Для капель КЖТ, приготовленных на основе отходов обогащения каменных углей (фильтр-кеков), характерно формирование более устойчивых агломератов с сохранением монолитности в потоке нагретого воздуха (эффект диспергирования не является определяющим).

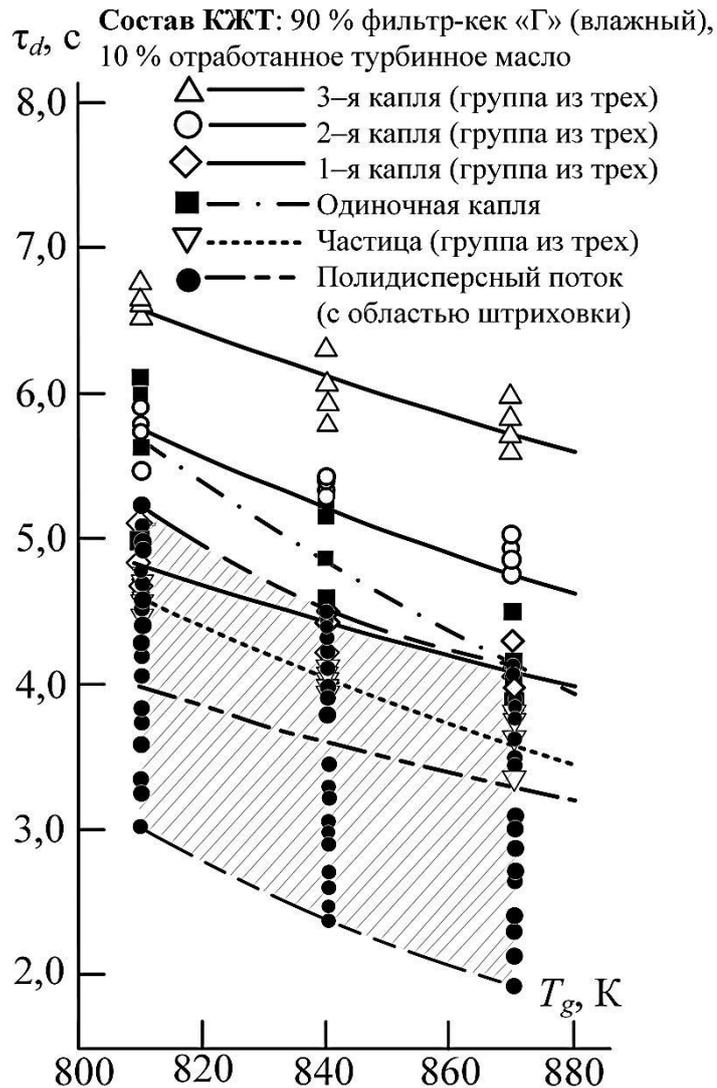


Рисунок 3.5.2. Зависимости времен задержки зажигания одиночной капли, группы из трех капель, малых частиц (в результате разрушения группы капель) и полидисперсного потока КЖТ от температуры воздуха при $R_d \approx 0,5$ мм и $V_g \approx 4$ м/с [127]

Перемещение витающих частиц происходило в пристеночной части нижнего усеченного конуса, а также в центральной части модельной камеры сгорания. Стадийность процессов прогрева и зажигания аналогична установленной в [23, 37] для капель ОБУТ и ВУТ, подвешенных на держателе в потоке разогретого воздуха. Следует отметить, что для большинства витающих одиночных, малой группы, а также частиц полидисперсного потока КЖТ зажигание регистрировалось в нижней части конусообразного канала, т.е. в

области более высоких температур воздуха (рис. 2.3.3). Анализировались характеристики зажигания только при устойчивом витании каплей КЖТ в камере сгорания. Из рассмотрения исключались эксперименты, в которых фрагменты топлива прилипали к распределительным решеткам, расположенным вблизи верхнего и нижнего выходного основания камеры или к её стенкам.

Полидисперсный поток КЖТ представляет многофазную дисперсную среду, состоящую из смеси паров воды, горючей жидкости, летучих и мелких угольных частиц [150]. Особенностью зажигания и горения частиц полидисперсного потока КЖТ, витающих в потоке воздуха, является существенное отличие скоростей и температур, которое связано с неравномерным распределением размеров и различных конфигураций частиц КЖТ. Для полидисперсного потока КЖТ также характерны процессы столкновения частиц (дробление, коагуляции, распад и др.) в объеме камеры сгорания, которые играют важную роль в процессах зажигания и горения топливных суспензий [18].

На рис. 3.5.2 приведены зависимости времен задержки зажигания витающих частиц КЖТ от температуры воздуха (в рамках диапазона, соответствующего устойчивому зажиганию $T_g=810-870$ К). Каждая кривая на рис. 3.5.2 является аппроксимацией экспериментальных точек, полученных в результате серии измерений. Для частиц полидисперсного потока регистрировалось различное время задержки зажигания (вследствие значительных отличий размеров частиц топлива). В связи с этим τ_d вычислялись в течение 2 с после момента появления первых свечений (вспышек, соответствующих зажиганию мелких фрагментов суспензионных топлив) на поверхности множества витающих частиц аэрозоля КЖТ (заштрихованная область), распределенных по всей камере сгорания. Времена задержки зажигания таких частиц регистрировались в довольно близком одинаковом диапазоне размеров R_d от 0,45 мм до 0,5 мм, соответствующие как одиночной, так и группе капель КЖТ.

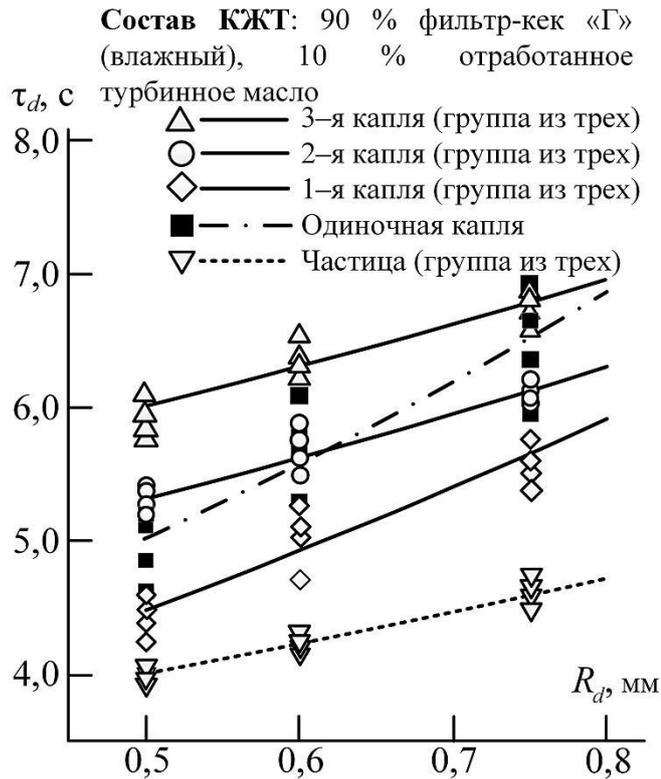


Рисунок 3.5.3. Зависимости времен задержки зажигания одиночной капли, группы из трех капель, малых частиц (в результате разрушения группы капель) КЖТ от их размеров при $T_g \approx 840$ К и $V_g \approx 4$ м/с [127]

Рис. 3.5.3 иллюстрирует времена задержки зажигания одиночной витающей капли, группы из трех и малых частиц, образующихся в результате разрушения целых из группы трех капель, в зависимости от их размеров ($R_{drop} = 0,5 - 0,75$ мм) при $T_g \approx 840$ К и $V_g \approx 4$ м/с. Отклонение размеров частиц топлива на 10–15 % относительно $R_{drop} \approx 0,6$ мм приводит к изменению τ_d на 0,5–1 с. Это сопоставимо с изменением τ_d , обусловленным варьированием температуры разогретого воздуха (рис. 3.5.2). Разброс экспериментальных значений времен задержки зажигания отдельных частиц в группе (из трех) составляет около 1,5 с, что объясняется их соударением со стенками камеры сгорания. Выделенные области на рис. 3.5.2 и размещение кривых для одиночной частицы в пределах этих областей иллюстрируют слабое влияние соседних частиц в группе на характеристики зажигания. Столкновение частиц КЖТ друг с другом в малой совокупности не оказывало существенное влияние на параметры зажигания в связи с малой

вероятностью их соударений. В котельных агрегатах ТЭС применяются полидисперсные капельные потоки. Поэтому проанализированный эффект может быть определяющим и его целесообразно учитывать при прогнозировании характеристик зажигания. Полученные экспериментальные данные (рис. 3.5.2) позволяют сделать вывод о том, что некоторая средняя для всех выполненных экспериментов зависимость времени задержки зажигания находится в диапазоне между кривыми для одиночных и группы из трех капель. Небольшая область значений времени задержки зажигания (4,2–5,2 с) аэрозольного потока капель КЖТ также входит в этот диапазон. Остальные значения τ_d , соответствующие потоку частиц КЖТ, лежат в области ниже кривых, соответствующих одиночной и вторичным (образовавшимся в результате разрушения) частицам. Максимальные отклонения составляют почти 30 %. Данные отличия обусловлены, скорее всего, тем, что при формировании дозатором одиночных капель последние принимают форму, близкую к сферической. Для полидисперсного потока КЖТ характерно образование различных конфигураций частиц с многочисленными вершинами, выступами и гранями при вдуве в камеру сгорания.

Выполненные эксперименты показали, что в результате столкновений частиц топлива со стенками камеры сгорания могут формироваться отколовшиеся (вторичные) частицы малых размеров. Эти частицы загораются заметно быстрее исходных частиц. Вместе с тем, вторичные частицы, возникающие при разрушении исходных, имеют времена задержки зажигания, практически не зависящие от размера исходных частиц (рис. 3.5.3). Скорее всего, возможно получать топливные суспензии со стабильным временем задержки зажигания (вне зависимости от случайных небольших колебаний температуры в камере сгорания), подбирая оптимальное соотношение размеров капель в потоке впрыскиваемого топлива.

Таким образом, представленные на рис. 3.5.3 отличия интегральных характеристик зажигания одиночных, небольшой группы и полидисперсного потока частиц КЖТ, витающих в модельной камере сгорания, иллюстрируют

правомерность прогноза характеристик зажигания полидисперсного потока по экспериментам с одиночной каплей (частицей) топливной суспензии. Следует отметить, что для полидисперсных частиц, витающих в топочном пространстве, характерны довольно сложные траектории перемещения, приводящие к периодическим изменениям интегральных характеристик зажигания. При этом следует учитывать процессы столкновения (дробление, коагуляция, распад) капель топлива. Для обеспечения устойчивости процессов инициирования горения необходимо создавать при впрыске в камеру сгорания более однородный капельный поток. Полученные результаты [127] важны для обоснования целесообразности и правомерности исследований процессов зажигания КЖТ в модельных камерах сгорания на примере одиночных капель.

3.6. Анализ последствий столкновений витающих капель композиционного жидкого топлива

Для топливного аэрозоля определяющую роль могут играть процессы столкновения капель (дробление, коагуляция, распад). Поэтому представляет интерес изучение последствий столкновений капель КЖТ между собой при витании в потоке воздуха и последующем их зажигании в модельной камере сгорания [141].

Последствия столкновений капель топлива изучались [141] путем статистического анализа экспериментальных данных. Оценка результатов позволяет спрогнозировать, с какой долей вероятности эти события могут произойти. Для приготовления состава КЖТ применялись следующие компоненты: 89 % фильтр-кека марки «Г», 10 % отработанного турбинного масла и 1 % пластификатора. В серии экспериментов используемый объем топлива составил около 4 мл.

В результате обработки и статистического анализа экспериментальных данных установлены три возможных варианта последствий столкновения витающих капель КЖТ: дробление капли на несколько более мелких фрагментов,

коагуляция (слипание частиц КЖТ, образование агломератов с пористой структурой) и распад агломератов (столкновение коагулированных частиц без существенного изменения размеров) за определённый интервал времени. Процесс дробления был зарегистрирован от начала впрыска топливной суспензии в камеру сгорания до момента ее окончания, продолжительность которой составила около 6 с. Последствия коагуляции капель регистрировались аналогично в момент распыла КЖТ, а также в при витания агломератов частиц топлива в потоке воздуха после частичного их обезвоживания. Периоды распадов образовавшихся агломератов КЖТ наблюдались до момента начала устойчивого зажигания частиц. Типичные последствия столкновения и деформации двух капель топлива показаны на рис. 3.6.1–3.6.3.

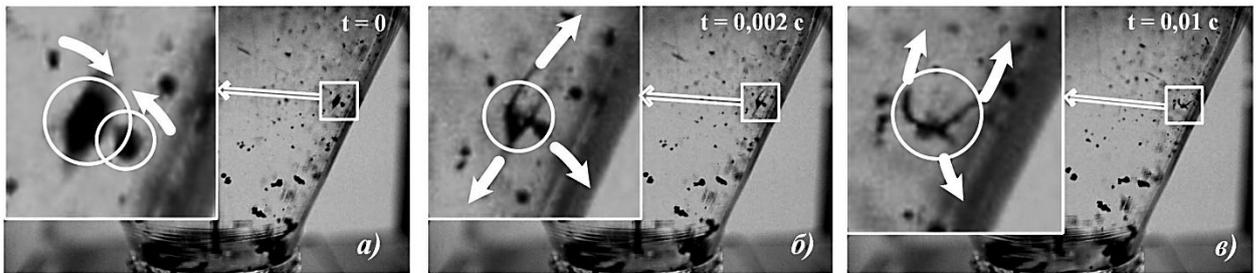


Рисунок 3.6.1. Дробление капель КЖТ [141]

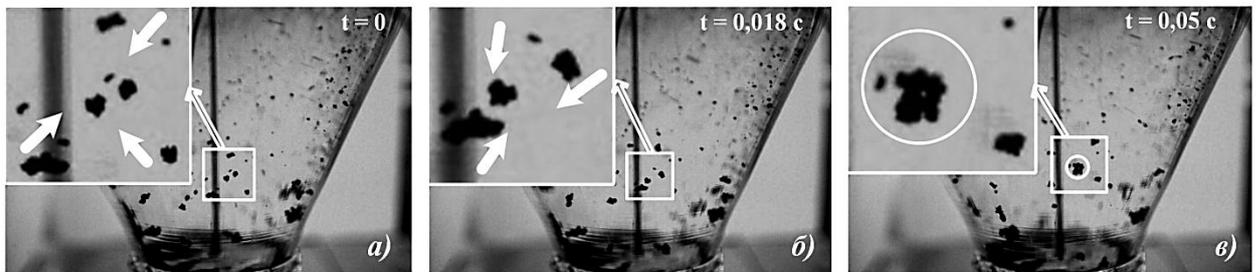


Рисунок 3.6.2. Коагуляция капель КЖТ [141]

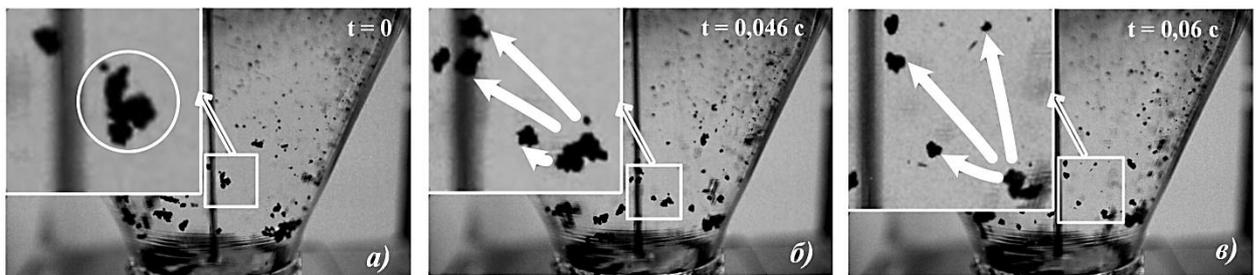


Рисунок 3.6.3. Распад частиц КЖТ [141]

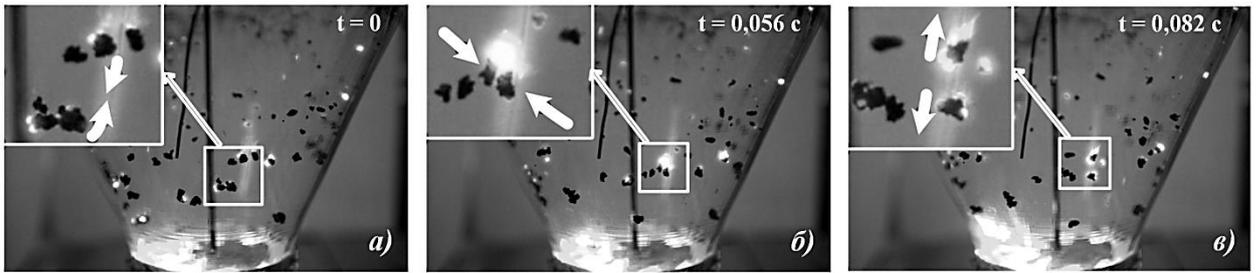


Рисунок 3.6.4. Столкновение зажигающих частиц КЖТ [141]

На рис. 3.6.1 показаны кадры с реализацией процесса дробления двух капель КЖТ вследствие их соударения. В начальный период времени скорость движения капель топлива (при давлении вдуваемого воздуха около 200 кПа) выше ($V_p \approx 3$ м/с), чем скорость капель, идущих спереди или находящихся в режиме витания ($V_p < 3$ м/с). Установлено, что капли могут деформироваться с характерным расплющиванием и распадом на более мелкие, принимая формы сферы, эллипсоида и многогранников при последующем прогреве и испарении влаги с приповерхностного слоя частицы. Дальнейшее развитие столкновения двух капель КЖТ приводит к коагуляции (рис. 3.6.2, а, б) или слипанию нескольких различных по размеру частиц в более крупные – агломераты, (рис. 3.6.2, б, в) с размерами R_d до 4 мм. Формирование таких частиц зависит от условий взаимодействия между витающими частицами КЖТ, а также свойств угольных частиц. Установлено, что в момент впрыска капель топлива возможны процессы дробления и коагуляции наступающих друг друга последовательных капель. Наибольшую степень влияния на процесс коагуляции оказывает концентрация твердой фазы, так как это взаимосвязано со структурной вязкостью и прочностью дисперсной системы. По мере роста концентрации агломератов уменьшается количество мелких частиц, что обусловлено процессами прогрева и испарения жидкого горючего компонента и воды.

В [158] показано влияние коагулирующих и разделяющихся на мелкие фрагменты ОБУТ на интегральные характеристики зажигания для случая детерминированного взаимодействия (искусственного столкновения в контролируемых условиях). Установлено, что коагуляция капель ОБУТ приводит

к увеличению времени их нагревания и зажигания (до 35 % по сравнению с аналогичными параметрами отдельных капель). В частности, разделение капель ОВУТ после столкновения приводит к многократному уменьшению времени задержки зажигания по сравнению с условиями без столкновения частиц. Это происходит, поскольку столкновение значительно уменьшает размеры капель топлив, вследствие чего время нагрева и зажигания для меньших капель снижается в несколько раз [158].

На рис. 3.6.3 показаны последствия распада образовавшего агломерата на отдельные более мелкие частицы КЖТ. Процессы распада коагулированных агломератов возникают вследствие (рис. 3.6.3, *а*, *б*) столкновения коагулировавшихся частиц без существенного изменения размеров (рис. 3.6.3, *с*). Разлетевшиеся частицы в процессе витания через некоторый промежуток времени могут снова коагулировать.

Следующими стадиями фазовых превращений и химического реагирования являются зажигание частицы КЖТ с последующим ее горением. Из рис. 3.6.4, *а* видно, что две частицы неправильной формы (многогранники) с локальными очагами зажигания движутся навстречу. Далее эти частицы сталкиваются (рис. 3.6.4, *б*), происходит интенсивный выход летучих продуктов с формированием общего фронта горения. После столкновения частицы КЖТ разлетаются в стороны (рис. 3.6.4, *в*). Однако это не исключает вероятности повторного столкновения с другими агломератами КЖТ, находящимися вблизи друг от друга. Эти эффекты во многом зависят от размеров и конфигурации частиц, а также сопутствующих аэродинамических сил.

На основе экспериментальных данных представлена гистограмма (рис. 3.6.5) вероятностей P_1 (дробление), P_2 (распад), P_3 (коагуляция). Контроль и идентификация процессов столкновения витающих частиц (влажные и обезвоженные) КЖТ в потоке воздуха достаточно сложны. Поэтому в столкновениях могут участвовать одновременно несколько витающих частиц КЖТ (что соответствует условиям сжигания в топочных камерах реальных котельных агрегатов ТЭС). Взаимодействие капель (частиц) КЖТ при их

столкновении между собой определялось безразмерным критерием R_{d1}/R_{d2} . Установлено, что все эти процессы протекают при различных колебаниях размеров частиц R_{d1} и R_{d2} , и критерий R_{d1}/R_{d2} составлял, соответственно, для дробления 0,5–1,7, распада 0,5–1,9 и коагуляции 0,5–2,2. Относительная доля использования, соответствующая некоторому событию P_1 , P_2 , P_3 , изменяется от 0 до 1 (соответствует вероятности от 0 до 100 %). Значения P_1 , P_2 , P_3 оценивались при обработке видеок кадров с не менее чем 50 столкновениями. При вычислении значений были использованы формулы:

$$P_1=N_1/(N_1+N_2+N_3), P_2=N_2/(N_1+N_2+N_3), P_3=N_3/(N_1+N_2+N_3),$$

где N_1 , N_2 , N_3 – число столкновений, в результате которых реализуется три варианта событий: дробление, распад и коагуляция.

Анализ полученной гистограммы (рис. 3.6.5) показывает, что вероятности дробления и коагуляции капель КЖТ при соотношении размеров от 0,5 до 2,2 составляют около 50 % (P_1) и 30 % (P_3), соответственно. На долю вероятности распада агломератов приходится около 20 % (P_2). Пока соотношение размеров R_{d1}/R_{d2} двух сталкивающихся капель топливной суспензий близко к 1, вероятности дробления и коагуляции практически сопоставимы (40–60%). При этом одновременно в потоке воздуха присутствуют влажные и сухие частицы топлива.

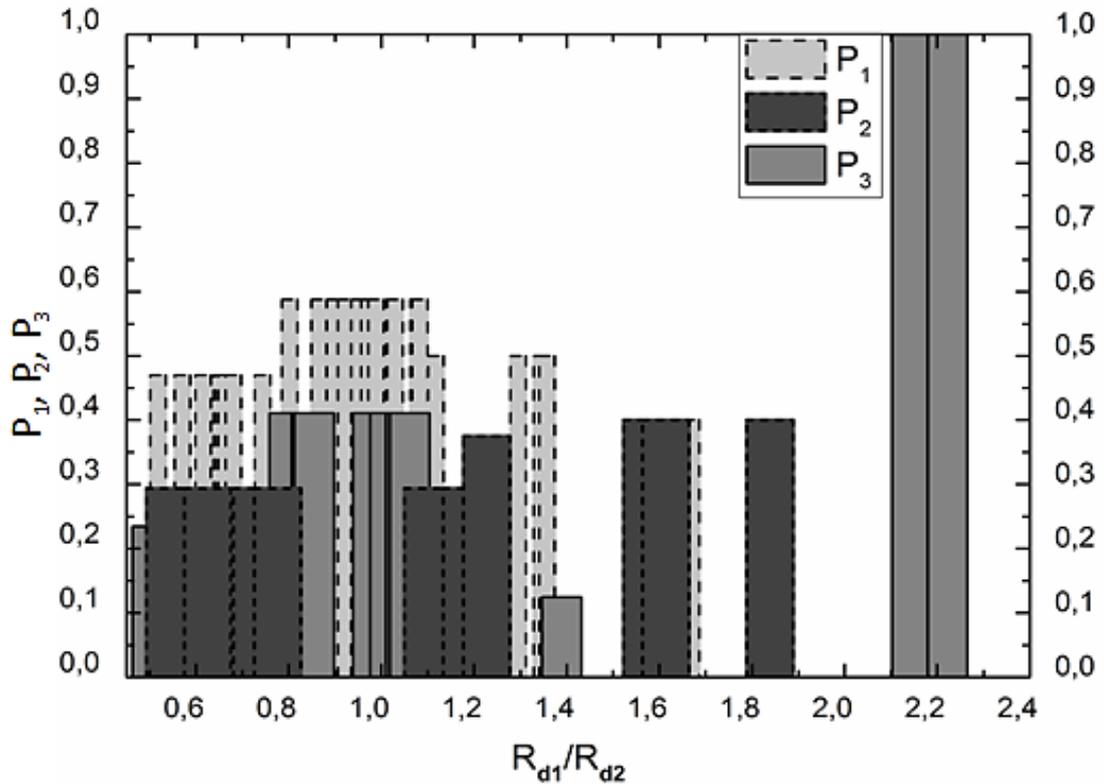


Рисунок 3.6.5. Статистический анализ последствий столкновений двух капель КЖТ при их витании в потоке воздуха [141]

Так как вязкость капель КЖТ на этапе впрыска топливной суспензии достаточно большая, то наблюдается доминирование процессов дробления и коагуляции. С параллельным воздействием температуры воздуха уменьшается вязкость капель КЖТ и возрастает число обезвоженных частиц. Поэтому возрастает вероятность образования агломератов. Но не исключена и вероятность распада образовавшихся агломератов при витании их камере сгорания. В промежуточном случае R_{d1}/R_{d2} от 1,5 до 2 вероятности коагуляции практически нулевая, а вероятности дробления и распада сопоставимы. Как только соотношение размеров R_{d1}/R_{d2} растет от 1 до 1,5, коагуляция капель становится достаточно редкой. При соотношении размеров частиц топлива R_{d1}/R_{d2} больше 2 вероятность коагуляции стремительно увеличивается до $P_3 \sim 1$, и этот процесс начинает доминировать.

3.7. Рекомендации по развитию сформулированного в диссертации подхода и использованию результатов исследований для повышения эффективности сжигания КЖТ на ТЭС

Суспензии, приготовленные на основе отходов угле- и нефтепереработки, являются перспективными композиционными топливами ТЭС по экологическим, энергетическим и технико-экономическим индикаторам [28–30]. Экономическая целесообразность использования КЖТ обусловлена доступностью широкого выбора компонентов и их низкой стоимостью. Применение КЖТ является перспективным в сравнении с традиционными технологиями пылевидного сжигания углей разного сорта. Наличие воды в составе КЖТ (в том числе и отходов) снижает их энергетические показатели вследствие дополнительно расходуемой энергии на прогрев и испарение жидкости. Однако за счет низкотемпературной активации паров воды и горючей жидкости с микрочастицами угля [23] (реализации устойчивого зажигания при температуре менее 1000 К) возможно значительное снижение энергозатрат на инициирование реакций окисления и горения, что является положительным эффектом применения КЖТ. Преимуществом сжигания КЖТ также является высокая пожаровзрывобезопасность по сравнению с пылевидным топливом. С экологической точки зрения применение угольных суспензий существенно снижает антропогенные выбросы (оксиды серы и азота) и золошлаковые отходы (облегчая эксплуатацию котельных установок) ТЭС по сравнению со сжиганием традиционного угля [28–30].

Предложенный подход экспериментального исследования [139, 145] характеристик зажигания витающих частиц КЖТ позволяет реализовать условия, максимально приближенные к процессам, протекающим в реальных топочных камерах ТЭС. Созданная модельная камера сгорания может быть использована для экспериментальных исследований инициирования горения витающих частиц многочисленных топливных композиций, включающих твердые, жидкие горючие компоненты, а также воду. Ввиду специфики конструкции данный вариант имеет

преимущества, так как специальная форма камеры позволила осуществлять более равномерное обтекание капли топлива разогретым воздухом, следовательно, и более интенсивные тепломассообменные процессы. В частности, возможно исследование особенностей сжигания пылеугольного топлива, например мелкодисперсного бурого угля. Данная камера сгорания также может быть применена для сушки (или обжига) различных пористых, твердых (например, угольных), сыпучих и волокнистых (например, древесные опилки, растительные остатки и др.) частиц с учетом их дисперсности. Возможно также проведение газонализа продуктов сгорания (CO , NO_x , SO_2 и др.) различных топливных композиций при достаточном объеме их сжигания.

Разработанный экспериментальный подход целесообразно использовать для развития следующих перспективных направлений исследований:

- 1) комплексный анализ экологических, технико-экономических и энергетических индикаторов сжигания на ТЭС суспензий КЖТ, приготовленных из большой группы перспективных компонентов (например, с использованием методик [159, 160]): технологические и сточные воды; отработанные индустриальные масла, мазут, водонефтяные эмульсии, нефтешламы, смолы, эфиры, спирты; кеки, пудра, угли, порода; смачиватели и пластификаторы;
- 2) изучение влияния большой группы добавок и примесей к КЖТ для варьирования экологических, технико-экономических и энергетических индикаторов сжигания на ТЭС суспензионных топлив в широких диапазонах. Особый интерес представляют примеси растительного происхождения (например, опилки, солома, рапсовое, пальмовое, подсолнечное, оливковое масло, известняк, биоэтанол, метанол, метиловые эфиры, кора деревьев, минералы, смолы, лесные горючие материалы и др.), так как характеризуются малыми экологическими последствиями процессов сжигания (в частности, опасные оксиды серы и азота практически не выделяются);
- 3) комплексный анализ зольного остатка совместно с антропогенными выбросами для изучения всех факторов экологического воздействия технологий КЖТ на перспективы развития угольной теплоэнергетики;

4) развитие моделей зажигания и горения суспензий КЖТ для обеспечения адекватного прогнозирования экологических, технико-экономических и энергетических индикаторов сжигания топлив в различных энергетических установках (тепловые электрические станции, котельные, доменные печи). В качестве основных моделей можно использовать постановки с одиночными каплями суспензий и типичными камерами сгорания;

5) формирование режимных карт (включают температуры, расходы компонентов топлив и воздуха, допустимые выбросы и зольность, требуемую теплоту сгорания) эффективного сжигания КЖТ на основе разного типа отходов, т.е. прогнозирование эффективных схем подготовки суспензий, их транспортировки, хранения, сжигания на ТЭС, улавливания антропогенных выбросов и переработки золы с учетом потенциальных возможностей тех или иных регионов мира, содержания полезных ископаемых, темпов их добычи, объемов и темпов накопления промышленных отходов.

Обобщение результатов экспериментальных исследований позволило сформулировать следующие рекомендации по практическому применению перспективных суспензий КЖТ в теплоэнергетике:

- 1) для приготовления композиционных топлив целесообразно использовать отходы углепереработки (фильтр-кеки), низкосортные бурые угли и отработанные масла нефтяного происхождения (в частности, турбинные, автомобильные, компрессорные, трансформаторные и др.); также можно применять масла растительного происхождения (рапсовое, пальмовое и др.) и металлические примеси (например, алюминиевый порошок) для изменения экологических, энергетических и технико-экономических индикаторов;
- 2) генерация неправильных форм (существенно отличающихся от сферы) частиц КЖТ позволяет интенсифицировать теплообмен с разогретым воздухом за счет витания и аэродинамических эффектов, вследствие которых уменьшаются длительности характерных стадий зажигания и времена τ_d ;
- 3) небольшое количество дополнительной примеси бурого угля приводит к значительному снижению инерционности и минимальных температур

зажигания витающих капель КЖТ; для КЖТ на основе фильтр-кеков с добавлением обогащенного угля или низкосортного, но с высоким содержанием летучих веществ (например, бурого угля) возможно аналогичное снижение инерционности зажигания;

- 4) увеличение массовой доли воды (от 40 до 50 %) в составе КЖТ приводит к значительному увеличению времен τ_d (в среднем на 30 %) витающих частиц топлива в камере сгорания; данный эффект особо следует учесть, так как это позволит существенно уменьшить расходы тепла на испарение воды из капли топлива;
- 5) уменьшение размера частиц угля «Б2» с 200 мкм до 40 мкм в составе КЖТ приводит к снижению времен задержек зажигания на 15–25 % при соответствующей температуре и скорости потока воздуха; при этом следует учесть определенные затраты на приготовление КЖТ с заданной тониной помола;
- 6) добавление в состав КЖТ небольшого количества (до 5%) алюминиевого порошка дает различные энергетические эффекты (режимы и температуры горения); для металлизированного КЖТ с концентрацией порошка 3 % характерно повышение максимальной температуры горения более чем на 100 К, сохраняя при этом времена задержки зажигания близкими для КЖТ без примеси алюминия;
- 7) добавление в состав КЖТ растительных примесей (например, рапсового масла) позволяет значительно усилить основные интегральные параметры сжигания (температура и длительность горения, инерционность зажигания и пороговая температура инициирования горения) суспензий даже на основе отходов угле – и нефтепереработки;
- 8) целесообразно добавление жидких горючих компонентов в водоугольные суспензии (т.е. получение композиций ОБУТ), так как этот подход приводит к росту теплоты сгорания, снижению инерционности зажигания и повышению длительности сохранения структурной стабильности (замедлению расслоения) топлива.

Выводы по третьей главе

1. Выделены диапазоны изменения параметров, соответствующие витанию частиц КЖТ без горения и с устойчивым зажиганием топлива. Определены четыре возможных режима зажигания капель КЖТ с разными траекториями перемещения в камере сгорания (обусловлены соотношением аэродинамических сил). При этом реализация устойчивого витания и зажигания наблюдалась только в двух режимах. Установлены численные значения параметров (температура и скорость движения потока воздуха, размер капель, компонентный состав КЖТ и скорость движения частиц в момент зажигания), соответствующих выделенным режимам зажигания. Получено удовлетворительное соответствие результатов исследований для группы КЖТ с разными перспективными для сжигания на ТЭС компонентами.
2. С использованием интегральных характеристик зажигания, регистрируемых в экспериментах с закрепленными на спаях термопар или проволочках каплями топлива и находящимися в процессе витания (с учетом зависимостей τ_d от T_g и R_d), можно прогнозировать, насколько характеристики зажигания КЖТ в лабораторных условиях при применении самого распространенного подхода с подвешиванием капель топлив будут отличаться от реальных камер сгорания котельных агрегатов ТЭС, в которых последние непрерывно витают практически до полного сгорания.
3. Установлено, что при идентичных условиях проведения экспериментов для витающих частиц КЖТ характерны меньшие (на 7–25 %) времена задержки зажигания, чем для капель топлива, стационарно расположенных в потоке воздуха, что связано с различным протеканием процессов теплопереноса. Так при витании капли реализуется более равномерное обтекание потоком разогретого воздуха (за счет вращения), что приводит к интенсификации процессов испарения влаги и горючей жидкости, термического разложения кека.

4. Знание температур зажигания КЖТ при витании каплей и стационарном положении на спае термопары создает предпосылки для разработки более адекватной физической и математической модели (с учетом граничных условий) топочных процессов при сжигании КЖТ с использованием современных пакетов Ansys, Fluent, SigmaFlow и др.
5. Меньшие времена задержки зажигания установлены для условий витания капли в сравнении с ее стационарным расположением в потоке воздуха. При одинаковом начальном размере капли и соответствующих температурах времена задержки зажигания могут достигать примерно в 2 раза меньших значений для условий витания по сравнению со стационарным расположением капли. Это обусловлено вращением капли в потоке воздуха, более равномерным прогревом и отсутствием стока тепла от поверхности к центру капли КЖТ (характерно для условий зажигания на спае термопары, металлической проволочке или керамическом стержне).
6. Выделенные отличия интегральных характеристик зажигания частиц топлив с разной конфигурацией поверхности позволяют сделать вывод о том, что в этом направлении имеется большой резерв по оптимизации процессов зажигания. Для минимизации затрат ресурсов на реализацию процессов сжигания КЖТ в энергетических установках можно рекомендовать использование специализированных устройств (например, сит или решеток на распылителях) для генерирования частиц с формой, существенно отличающейся от сферической (с максимальным аэродинамическим сопротивлением).
7. Устойчивое зажигание одиночных витающих капель КЖТ, приготовленных на основе бурого угля, отходов углеобогащения разных марок и отработанного турбинного масла возможно в диапазоне температур 810–870 К. Такие невысокие пороговые температуры иллюстрируют большие перспективы использования подхода с витанием капель для различных топливных композиций, получаемых, в том числе, из промышленных отходов.

8. Снижению времени задержки зажигания способствует увеличение температуры в камере сгорания и уменьшение размера капель топлива. Кроме этого, факторами, оказывающим определяющее влияние на зажигание, являются свойства и концентрации используемых для приготовления топлива компонентов. Снижение инерционности зажигания зарегистрировано при использовании в составе ОВУТ фильтр-кеков с низкой зольностью и повышенным содержанием летучих веществ. Для исследованной топливной композиции увеличение влажности суспензии на 10 % приводило к росту инерционности в среднем на 35 %. Увеличение массовой доли твердого горючего компонента в составе ОВУТ на основе бурого угольной пыли даже на 5 % приводило к снижению времени задержки зажигания на 15–25 %.
9. Добавление небольшого количества (до 5 %) алюминиевого порошка заметно улучшает теплотворную способность топливной композиции в сравнении с традиционными КЖТ, сохраняя при этом задержку зажигания на приемлемом уровне. Установлено, что для металлизированного КЖТ с концентрацией 3% (как наиболее оптимальной) алюминиевого порошка значительно увеличиваются максимальные температуры горения (более 100 К), сохраняя при этом времена задержки зажигания, близкие для КЖТ без примесей. При этом различные уровни металлизации КЖТ могут давать перспективные эффекты: режимы, широкие диапазоны температур горения и др.
10. Вода, кипящая в глубине капли топлива при температуре $T_g \geq 970$ К, приводит к существенному увеличению разницы между газофазным и гетерогенным зажиганием от 4 мс до 50 мс для всех исследованных составов. Динамика горения летучих веществ показывает существенное увеличение тепловой мощности горения с соответствующей температурой печи (в 15–40 раз) для различных топливных композиций. Однако этот эффект не оказывает заметного влияния на задержку гетерогенного зажигания, что, скорее всего, связано с доминированием процессов кондуктивного и радиационного теплообмена в муфельной печи.

11. Установленные относительно малые времена задержки зажигания мелких вторичных капель, неизбежно возникающих в процессе соударений исходных капель топлива, позволяют оценить нижний порог (минимальные значения) времен задержки зажигания для разных размеров исходных капель.
12. Выделенные отличия характеристик зажигания КЖТ для трех исследованных схем впрыска топлива (одиночные капли, их малая совокупность, полидисперсный поток) показали, что при прогностических оценках интегральных характеристик зажигания КЖТ можно использовать подход, основанный на использовании одиночной капли соответствующей топливной суспензии.
13. Полученные экспериментальные данные позволяют прогнозировать параметры полидисперсного потока КЖТ, обеспечивающие его устойчивое зажигание в топочных камерах ТЭС с учетом оптимальных концентраций используемых компонентов.
14. На основе установленных интегральных характеристик зажигания витающих капель КЖТ, а также свойств используемых компонентов и их относительных концентраций в топливе, можно разработать адекватные физические и математические модели горения топлива в реальных энергетических установках.
15. В результате анализа процессов столкновений витающих частиц КЖТ можно сделать вывод о том, что для эффективного зажигания и горения КЖТ конструкция форсуночного устройства должна обеспечивать оптимальное соотношение расхода воздуха и однородности размеров капель. Это приведет к уменьшению факторов коагуляции, что, соответственно, повысит полноту выгорания топлива и снизит недожог. Выполненный статистический анализ показал, что как только критерий соотношения R_{d1}/R_{d2} растет от 1 до 1,5, коагуляция капель становится достаточно редкой. В частности, целесообразно располагать несколько форсунок таким образом, чтобы вдуваемые капельки КЖТ сталкивались друг с другом с высокой скоростью,

образуя более мелкие капли, которые могли бы воспламениться с гораздо меньшей задержкой.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

A^d – зольность в сухом состоянии, %;

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

H^{daf} – содержание водорода на сухое беззольное состояние, %;

m_d – начальная масса капли, г;

N^{daf} – содержание азота на сухое беззольное состояние, %;

O^{daf} – содержание кислорода на сухое беззольное состояние, %;

$Q_{s,v}^a$ – высшая теплота сгорания, МДж/кг;

R_d – начальный радиус капли, мм;

S_t^d – массовая доля общей серы на сухое состояние, %;

T_d^{max} – максимальная температура в центре капли в процессе её нагрева, К;

T_{ign} – температура зажигания жидкого горючего нефтепродукта, К;

T_f – температура вспышки жидкого горючего нефтепродукта, К;

T_g – температура воздуха, К;

T_g^{min} – минимальная температура воздуха, необходимая для устойчивого зажигания, К;

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

W^a – влажность, %;

V_g – скорость потока воздуха, м/с;

V_g^{min} – минимальная скорость потока воздуха, достаточная для устойчивого зажигания, м/с;

V_p – скорость витающей частицы в момент ее зажигания, м/с;

τ – время, с;

τ_c – время полного сгорания, с;

τ_d – время задержки зажигания, с;

ϕ_c – массовая доля твердого горючего компонента, %;

ϕ_l – массовая доля жидкого горючего компонента, %;

ϕ_w – массовая доля воды, %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мастепанов, А.М. Ситуация на мировом нефтяном рынке: некоторые оценки и прогнозы / А.М. Мастепанов // Энергетическая политика. – 2016. – №2. – С. 7–20.
2. ОПЕК Annual Statistical Bulletin, [Электронный ресурс]. - 2016. - 128р. - Режим доступа: <http://www.opec.org/>
3. Coal Information 2012. Luxembourg: International Energy Agency [Электронный ресурс]. - 2012. - 566 р. - Режим доступа: <http://www.iea.org>
4. International Energy Outlook with projections to 2040. Washington: U.S. Energy Information Administration [Электронный ресурс]. - 2013. - 234 р. – Режим доступа: <http://www.eia.gov>
5. BP Statistical Review of World Energy. London: BP [Электронный ресурс]. - 2016. - 30 р. - Режим доступа: <http://www.bp.com>
6. Key World Energy Statistics. 2014. Paris: International Energy Agency [Электронный ресурс]. - 2014. - 81 р. - Режим доступа: <http://www.iea.org>
7. Kontorovich, A. E. Long-term and medium-term scenarios and factors in world energy perspectives for the 21st century / A. E. Kontorovich, M. I. Epov, L. V. Eder // Russian Geology and Geophysics. – 2014. – Vol. 55, No. 5-6. – P. 534–543.
8. Tripathi, A. K. Selective production of valuable hydrocarbons from waste motorbike engine oils via catalytic fast pyrolysis using zeolites / A. K. Tripathi, D. K. Ojha, R. Vinu // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2015. – Vol. 114. – P. 281–292.
9. Lam, S. S. Catalytic microwave pyrolysis of waste engine oil using metallic pyrolysis char / S. S. Lam, R. K. Liew, C. K. Cheng, H. A. Chase // Applied Catalysis B: Environmental. – 2015. – Vol. 176–177, No. 1. – P. 601–617.
10. Chayka, O. G. Monitoring the formation of waste oils / O. G. Chayka, O. Z. Kovalchuk, Y. A. Chayka // Proceedings Scientific Works. – 2009. – P. 221–224.
11. Hu, G. Recent development in the treatment of oily sludge from petroleum

- industry: A review / G. Hu, J. Li, G. Zeng // *Journal of Hazardous Materials*. – 2013. – Vol. 261. – P. 470–490.
12. Nikolaichuk, L. A. Prospects of ecological technologies development in the Russian oil industry / L. A. Nikolaichuk, P. S. Tsvetkov // *International Journal of Applied Engineering Research*. – 2016. – Vol. 11, No. 7. – P. 5271–5276.
 13. Boughton, B. Environmental Assessment of Used Oil Management Methods / B. Boughton, A. Horvath // *Environmental Science & Technology*. – 2004. – Vol. 38, No. 2. – P. 353–358.
 14. Kapustina, V. System analysis of waste oil management in Finland / V. Kapustina, J. Havukainen, T. Virkki-Hatakka, M. Horttanainen // *Waste Management & Research*. – 2014. – Vol. 32, No. 4. – P. 297–303.
 15. Burdukov, A. P. Mechanical activation of micronized coal: Prospects for newcombustion applications / A. P. Burdukov, V. I. Popov, M. Yu. Chernetskiy, A. A. Dekterev, K. Hanjalic // *Applied Thermal Engineering*. – 2014. – Vol. 74. – P. 174–181.
 16. Kim, R.-G. Intrinsic reaction kinetics of coal char combustion by direct measurement of ignition temperature / R.-G. Kim, C.-H. Jeon // *Applied Thermal Engineering*. – 2014. – Vol. 63. – P. 565–576.
 17. Bartoňová, L. Unburned carbon from coal combustion ash: An overview / Lucie Bartoňová // *Fuel Processing Technology*. – 2015. – Vol. 134. – P. 136–158.
 18. Глушков, Д. О. Органоводоугольное топливо: проблемы и достижения (обзор) / Д. О. Глушков, П. А. Стрижак, М. Ю. Чернецкий // *Теплоэнергетика*. – 2016. – № 10. – С. 31–41.
 19. Ходаков, Г. С. Водугольные суспензии в энергетике / Г. С. Ходаков // *Теплоэнергетика*. – 2007. – № 1. – С. 35–45.
 20. Glushkov, D. O. Burning Properties of Slurry Based on Coal and Oil Processing Waste / D. O. Glushkov, S. Y. Lyrshchikov, S. A. Shevyrev, P. A. Strizhak // *Energy & Fuels*. – 2016. – Vol. 30, No. 4. – P. 3441–3450.
 21. Glushkov, D. O. Influence of organic coal-water fuel composition on the characteristics of sustainable droplet ignition / D. O. Glushkov, D. P. Shabardin,

- P. A. Strizhak, K. Yu. Vershinina // *Fuel Processing Technology*. – 2016. – Vol. 143. – P. 60–68.
22. Glushkov, D. O. Heat transfer under ignition of droplet of composite liquid fuel made of coal, water and oil in an oxidant flow / D. O. Glushkov, N. E. Schlegel, P. A. Strizhak, K. Yu. Vershinina // *Advances and Applications in Fluid Mechanics*. – 2016. – Vol. 19, No. 1. – P. 157–168.
23. Вершинина, К. Ю. Низкотемпературное зажигание отходов переработки угля в виде органоводоугольных топливных композиций: диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук: 01.04.17 / Вершинина Ксения Юрьевна. Томск, - 2016. – 191 с.
24. 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.
25. Glushkov, D. O. Minimum temperatures for sustainable ignition of coal water slurry containing petrochemicals / D. O. Glushkov, P. A. Strizhak, K. Yu. Vershinina // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – Vol. 96. – P. 534–546.
26. Glushkov, D. O. 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. – Vol. 13, No. 1. – P. 81–92.
27. Vershinina, K. Yu. Maximum combustion temperature for coal-water slurry containing petrochemicals / K. Yu. Vershinina, P. A. Strizhak // *Energy*. – 2017. – Vol. 120. – P. 34–46.
28. Nyashina, G. S. Environmental potential of using coal-processing waste as the primary and secondary fuel for energy providers / G. S. Nyashina, J.C. Legros, Strizhak P. A. // *Energies*. – 2017. – Vol. 10, No. 3 – P. 405.
29. Dmitrienko, M. A. Environmentally and economically efficient utilization of coal processing waste / M. A. Dmitrienko, P. A. Strizhak // *Science of the Total Environment*. 2017. – Vol. 598. – P. 21–27.

30. Dmitrienko, M. A., Environmental indicators of the combustion of prospective coal water slurry containing petrochemicals / M. A. Dmitrienko, G. S. Nyashina, P. A. Strizhak // *Journal of Hazardous Materials*. – 2017. – Vol. 338. – P. 148–159.
31. 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. Iegorov, P. A. Strizhak // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – Vol. 107. – P. 10–20.
32. Glushkov, D. O. Hot surface ignition of a composite fuel droplet / D. O. Glushkov, P. A. Strizhak, K. Yu. Vershinina // *Matec Web of Conference*. – 2015. – Vol. 23, No. 01063. – P. 1–4.
33. Ходаков, Г. С. Суспензионное угольное топливо / Г. С. Ходаков, Е. Г. Горлов, Г. С. Головин // *Химия твердого топлива*. – 2005. – № 6. – С. 15–32.
34. Бородуля, В. А. Некоторые особенности сжигания в кипящем слое водоугольного топлива из белорусских бурых углей / В. А. Бородуля, Э. К. Бучилко, Л. М. Виноградов // *Теплоэнергетика*. – 2014. – № 7. – С. 36–41.
35. Осинцев, К. В. Исследование факельного сжигания водоугольных суспензий в топках энергетических котлов / К. В. Осинцев // *Теплоэнергетика*. – 2012. – № 6. – С. 21–27.
36. Баранова, М. П. Сжигание водоугольных суспензионных топлив из низкометаморфизованных углей / М. П. Баранова, Т. А. Кулагина, С. В. Лебедев // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. – 2009. – № 9. – С. 24–27.
37. Кузнецов, Г. В. Влияние условий теплообмена на характеристики зажигания частиц водоугольного топлива / Г. В. Кузнецов, В. В. Саломатов, С. В. Сыродой // *Теплоэнергетика*. – 2015. – №10. – С. 16–21.
38. Кузнецов, Г. В. Численное моделирование зажигания частиц водоугольного топлива / Г. В. Кузнецов, В. В. Саломатов, С. В. Сыродой // *Физика горения и взрыва*. – 2015. – Т. 51, № 4. – С. 1–8.
39. Делягин, Г. Н. Вопросы теории горения водоугольной суспензии в потоке

- воздуха / Г. Н. Делягин // Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий. – Москва: «Наука». – 1967. – С. 45–55.
40. Делягин, Г. Н. Сжигание водоугольных суспензий на опытно-промышленной установке / Г. Н. Делягин, Б. В. Канторович, В. И. Караченцев // Уголь. – 1964. – № 9. – С. 86-87.10.
41. Kijo-Kleczkowska, A. Combustion of coal-water suspensions / A. Kijo-Kleczkowska // Fuel. – 2011. – Vol. 90. – P. 865–877.
42. Murko, V. I. Investigation of the spraying mechanism and combustion of the suspended coal fuel / V. I. Murko, V. I. Fedyaev, V. I. Karpenok, I. M. Zasyplin, Y. A. Senchurova, A. Riesterer // Thermal Science. – 2015. – Vol. 19, No. 1. – P. 243–251.
43. Jianzhong, L. Pilot-scale investigation on slurring, combustion, and slagging characteristics of coal slurry fuel prepared using industrial wasteliquid / L. Jianzhong, W. Ruikun, X. Jianfei, Z. Junhu, C. Kefa // Applied Energy. – 2014. – Vol. 115. – P. 309–319.
44. Трубецкой, К. Н. Водоугольное топливо – результаты разработки и перспективы применения в России / К.Н. Трубецкой, В.Е. Зайденварг, А. С. Кондратьев, В. И. Мурко, Г. А. Кассихин, И. Х. Нехороший // Теплоэнергетика. – 2008. – № 5. – С. 49–52.
45. Федорова, Н. И. Анализ характера горения композиционных топлив, полученных кавитационным методом / Н. И. Федорова, Ю. Ф. Патраков, В. Г. Сурков, А. К. Головки // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2007. – № 4. – С. 38-41.
46. Atal, A. Observations on the combustion behavior of coal water fuels and coal water fuels impregnated with calcium magnesium acetate / A. Atal, Y. A. Levendis // Combustion and Flame. – 1993. – Vol. 93, No. 1–2. – P. 61–89.
47. Atal, A. Combustion of CWF agglomerates from pulverized or micronized bituminous coal, carbon black, and diesel soot / A. Atal, Y. A. Levendis // Combustion and Flame. – 1994. – Vol. 93, No. 4. – P. 326–342.
48. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года// распоряжение

- Правительства Российской Федерации №1715-р от 13.11.2009 г. [Электронный ресурс]: – Официальный сайт министерства энергетики <http://minenergo.gov.ru>.
49. 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.
 50. Горлов, Е. Г. Композиционные водосодержащие топлива из углей и нефтепродуктов / Е. Г. Горлов // Химия твердого топлива. – 2004. – № 6. – С. 50–61.
 51. Патраков, Ю. Ф. Композиционное водосодержащее топливо из низкосортных углей Кузбасса / Ю. Ф. Патраков, Н. И. Федорова, А. И. Ефремов // Вестник Кузбасского ГТУ. – 2006. – № 3. – С. 81–83.
 52. Овчинников, Ю. В. Исследование воспламенения твердых топлив и ИКЖТ / Ю. В. Овчинников, А. И. Цепенюк, А. В. Шихотинов, Е. В. Татарникова // Доклады Академии наук высшей школы РФ. – 2011. – С. 117–126.
 53. Глушков, Д. О. Сравнительная оценка основных характеристик зажигания капель водоугольного и искусственного композиционного жидкого топлива в потоке разогретого воздуха / Д. О. Глушков, П. А. Стрижак // Химическая физика и мезоскопия. – 2015. – Т. 17, № 4. – С. 501–510.
 54. Горлов, Е. Г. Условия реализации шламов угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий в виде суспензионного топлива / Е. Г. Горлов, А. И. Серегин, Г. С. Ходаков // Химия твердого топлива. - 2007. - № 6. - С. 51–57.
 55. Мурко, В. И. Совершенствование технологического комплекса по приготовлению и сжиганию суспензионного угольного топлива на основе отходов углеобогащения / В. И. Мурко, В. И. Федяев, Х. Л. Айнетдинов, А. В. Яковенко, П. С. Воскобойников // Уголь. – 2013. – №4. – С. 50–52.
 56. Кустов, В. Ф. Топливные суспензии / В. Ф. Кустов // – М.-Л.: Изд. АН СССР, 1942. – 185 с.

57. Заостровский, А. Н. Развитие техники получения и использования суспензионного топлива / А. Н. Заостровский // Вестник Кузбасского государственного университета. – 2009. – №3. – С. 89–90.
58. Иванов, В. М. Топливные эмульсии и суспензии / В. М. Иванов, Б. В. Канторович // М.:Металлургиздат, -1963. - 181 с.
59. Мальцев, Л. И. Прикладные аспекты технологии приготовления и сжигания водоугольного топлива / Л. И. Мальцев, И. В. Кравченко, А. И. Кравченко, В. Е. Самборский // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. – 2011. – №1(6). – С. 25–30.
60. Zhao H., Breakup and atomization of a round coal water slurry jet by an annular air jet / H. Zhao, H.-F. Liu, J.-L. Xu, W.-F. Li, W. Cheng // Chemical Engineering Science. – 2012. – Vol. 78. – P. 63–74.
61. Tu, Y. Method for evaluating packing condition of particles in coal water slurry / Y. Tu, Z. Xu, W. Wang // Powder Technology. – 2015. – Vol. 281. – P. 121–128.
62. He, Q. The utilization of sewage sludge by blending with coal water slurry / Q. He, D. Xie, R. Xu, T. Wang, B. Hu // Fuel. – 2015. – Vol. 159. – P. 40–44.
63. Делягин, Г. Н. Радиационный теплообмен в топке парового котла при сжигании водоугольных суспензий / Г. Н. Делягин, А. Г. Онищенко // Горение дисперсных топливных систем. – Москва: Наука, 1969. – С. 40–47.
64. Исаев, В. В. Энергетическое использование отходов углеобогащения путем их сжигания в виде водоугольных суспензий на углеобогатительных фабриках / В. В. Исаев, Г. Н. Делягин, В. М. Иванов // Вопросы гидравлической добычи угля. – 1968. – Вып. XIII. – С. 148–156.
65. Саломатов, В. В. Перевод котлов малой мощности на водоугольную технологию / В. В. Саломатов, У. В. Дорохова, С. В. Сыродой // Ползуновский вестник. – 2013. – №4-3. – С. 38–46.
66. Svoboda, K. Fluidized bed gasification of coal–oil and coal–water–oil slurries by oxygen–steam and oxygen–CO₂ mixtures / K. Svoboda, M. Pohorely, M. Jeremias, P. Kamenikova, M. Hartman, S. Skoblja, M. Syc // Fuel Processing Technology. – 2012. – Vol. 95. – P. 16–26.

67. Soloiu, V. Combustion characteristics of a charcoal slurry in a direct injection diesel engine and the impact on the injection system performance / V. Soloiu, J. Lewis, Y. Yoshihara, K. Nishiwaki // *Energy*. – 2011. – Vol. 36, No. 7. – P. 4353–4371.
68. Вершинина, К. Ю. Влияние технологии приготовления органоводоугольных топлив на характеристики их зажигания / К. Ю. Вершинина, Г. В. Кузнецов, П. А. Стрижак // *Кокс и химия*. – 2016. – №4. – С. 16–25.
69. Солодов, Г. А. Стабилизация водоугольных суспензий органическими реагентами / Г. А. Солодов, А. Н. Заостровский, А. В. Папин, Т. А. Папина // *Вестник Кузбасского ГТУ*. – 2003. – № 2. – С. 79–82.
70. Круть, А. А. Совершенствование технологий приготовления водоугольных суспензий (ВУС) / А. А. Круть // *Прикладная гидромеханика*. – 2014. – Т. 16. – № 2. – С. 36–47.
71. Баранова, М. П. Технология получения и использования топливных водоугольных суспензий из углей различной степени метаморфизма: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.14.01 / Баранова Марина Петровна. Москва, - 2014. – 38 с.
72. Цепенюк, А. И. Исследование процессов горения искусственного композитного жидкого топлива в циклонном предтопке / А. И. Цепенюк, Ю. В. Овчинников, Ю. В. Стрижко, С. В. Луценко // *Энергетик №7, НТФ «Энергопрогресс»*, Москва, - 2011. – С. 45–47.
73. Мурко, В. И. Исследования технологии сжигания суспензионного угольного топлива в вихревой камере / В. И. Мурко, Ю. А. Сенчурова, В. И. Федяев, В. И. Карпенюк // *Вестник Кузбасского ГТУ*. – 2013. – № 2. – С. 103–105.
74. Журавлева, Н. В. Вихревая технология сжигания суспензионного водоугольного топлива / Н. В. Журавлева, В. И. Мурко, В. И. Федяев, Д. А. Дзюба, Ю. А. Сенчурова, А. Н. Заостровский // *Экологические аспекты. Экология и промышленность России*. – 2009. №1. – С. 6–9.
75. Пузырев, Е. М. Технология сжигания водоугольного топлива в энергетических котлах / Е. М. Пузырев, В. А. Голубев // *Вестник Алтайской*

- науки. – 2014. – №4. – С. 325–331.
76. Ходаков, Г. С. Реология суспензий. Теория фазового течения и ее экспериментальное обоснование / Г. С. Ходаков // Российский химический журнал. – 2003. – Т. XVII. – №2. – С. 33–44.
77. Zhu, J. Investigation on the rheological and stability characteristics of coal-water slurry with long side-chain polycarboxylate dispersant / J. Zhu, G. Zhang, G. Liu, Q. Qu, Y. Li // Fuel Process. Technol. – 2014. – Vol. 118. – P 187–191.
78. Hong, N. Effect of polycarboxylic acid used as high performance dispersant on low rank coal-water slurry / N. Hong, S. Zhang, C. Yi, X. Qiu // Journal of Dispersion Science and Technology. – 2016. – Vol. 37, No 3. – P 415–422.
79. Zhang, K. Evaluation of modified used engine oil acting as a dispersant for concentrated coal water slurry / K. Zhang, L. Jin, Q. Cao // Fuel. – 2016. – Vol. 175. – P. 202–209.
80. Хилько, С. Л. Особенности реологического поведения коллоидных топлив / С. Л. Хилько // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. – 2011. – № 1(6). – С. 47–51.
81. Мурко, В. И. Исследование влияния температуры на реологические характеристики суспензионного топлива / В. И. Мурко, Г. Д. Вахрушева, В. И. Федяев, В. И. Карпенко, В. П. Мастихина, Д. А. Дзюба // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2012. – №3 (91). – С. 86–92.
82. Сурков, В. Г. Сравнительная оценка эффективности механоактивационного и кавитационного способа получения органоводоугольных топлив / В. Г. Сурков, А. К. Головкин // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – №6–2. – С. 206–208.
83. Архипов, В. А. Исследование физико-химических и энергетических характеристик органоводоугольных топлив / В. А. Архипов, А. М. Сидор, В. Г. Сурков // Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика. – 2013. – № 5. – С. 39–47.

84. Zhao, H. Influence of rheological properties on air blast atomization of coal-water slurry / H. Zhao, Y. Hou.-B., H.-F. Liu, X.-S. Tian, J.-L. Xu, W.-F. Li, Liu Y., F.-Y. Wu, J. Zhang, K.-F. Lin // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. – 2014. – Vol. 211. – P. 1–15.
85. Glushkov, D. O. Ignition of promising coal-water slurry containing petrochemicals: Analysis of key aspects / D. O. Glushkov, S. V. Syrodoy, A. V. Zakharevich, P. A. Strizhak // *FuelProcessing Technology*. – 2016. – Vol. 148. – P. 224–235
86. Gajewski, W. Analysis of cyclic combustion of solid fuels / W. Gajewski, A. Kijo-Kleczkowska, J. Leszczynski // *Fuel*. – 2009. – Vol. 88. – P. 221–234.
87. Ермакова, Л. А. Физико-химическая модель горения капель водоугольного топлива / Л. А. Ермакова, С. П. Мочалов, С. Н. Калашников, А. А. Пермяков // *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. – 2012.- №1. – С. 37–40.
88. Saito, M. Single droplet combustion of coal-oil/methanol/water mixtures / M. Saito, M. Sadakata, T. Sakai // *Fuel*. – 1983. – Vol. 62, No. 12. – P. 1481–1486.
89. Yao, S. C. Burning of suspended coal-water slurry droplet with oil as combustion additive / S. C. Yao, P. Manwani // *Combustion and Flame*. – 1986. – V. 66, No. 1. – P. 87–89.
90. Сыродой, С. В. Зажигание водоугольной частицы лучисто-конвективным теплом / С. В. Сыродой, В. В. Саломатов // *Горение и плазмохимия*. – 2011. – Т 9. – №1. – С. 29–34.
91. Сыродой, С. В. Численное моделирование зажигания водоугольной частицы с учетом испарения влаги и эндотермического разложения твердой горючей компоненты / С. В. Сыродой, В. В. Саломатов, Г. В. Кузнецов // *Ползуновский вестник*. – 2013. – № 4–3. – С. 28–32.
92. Вилюнов, В. Н. Теория зажигания конденсированных веществ / В. Н. Вилюнов // Новосибирск: Наука, 1984. – 190 с.

93. Делягин, Г. Н. Вопросы теории воспламенения и горения распыленной водоугольной суспензии / Г. Н. Делягин // В кн.: Кинетика и аэродинамика процессов горения топлива. – М.: Наука, 1969. – С. 111–127.
94. Glushkov, D. O. Mathematical simulation of the ignition of coal particles in airflow / D. O. Glushkov, G. V. Kuznetsov, P. A. Strizhak // *Solid Fuel Chemistry*. – 2015. – Vol. 49, No. 2. – P. 73–79.
95. Glushkov, D. O Numerical research of heat and mass transfer during low-temperature ignition of a coal particle / D. O. Glushkov, P. A. Strizhak, O. V. Vysokomornaya // *Thermal Science*. – 2015. – Vol. 19, No. 1. – P. 285–294.
96. Glushkov, D. O. Low-Temperature Ignition of Coal Particles in an Airflow / D. O. Glushkov, G. V. Kuznetsov, P. A. Strizhak // *Russian Journal of Physical Chemistry B*. – 2015. – Vol. 9, No. 2. – P. 242–249.
97. Adiga, K. C. Coal slurries in mixed liquid fuels: rheology and ignition characteristics / K. C. Adiga, Y. K. Pithapurwala, D. O. Shah, B. M. Moudgil // *Fuel Processing Technology*. – 1988. – Vol. 18, No. 1. – P. 59–69.
98. Mizomoto, M. Combustion of a coal-oil mixture droplet on a hot surface / M. Mizomoto, I. Masuda, S. Ikai // *Combustion and Flame*. – 1986. – Vol. 63, No. 1–2. – P. 289–301.
99. Burdukov, A. P. The rheodynamics and combustion of coal-water mixtures / A. P. Burdukov, V. I. Popov, V. G. Tomilov, V. D. Fedosenko // *Fuel*. – 2002. – Vol. 81, No. 7. – P. 927–933.
100. Law, C. K. Combustion characteristics of droplets of coal/oil and coal/oil/water mixtures / C. K. Law, H. K. Law, C. H. Lee // *Energy*. – 1979. – Vol. 4. – P. 329–339.
101. Shin, Y.-J. Preparation of coal slurry with organic solvents // Y.-J. Shin, Y.-H. Shen // *Chemosphere*. – 2007. – Vol. 68, No. 2. – P. 389–393.
102. Cheng, J. Effects of pore fractal structures of ultrafine coal water slurries on rheological behaviors and combustion dynamics // J. Cheng, J. Zhou, Y. Li, J. Liu, K. Cen // *Fuel*. – 2008. – Vol. 87, No. 12. – P. 2620–2627.
103. Захаревич, А. В. Зажигание модельных смесевых топливных композиций

- одиночной, нагретой до высоких температур частицей / А. В. Захаревич, В. Т. Кузнецов, Г. В. Кузнецов, В. И. Максимов // Физика горения и взрыва. – 2008. – Т. 44, № 5. – С. 54–57.
104. Galchenko, N. K. Conditions and characteristics of coal water slurry containing petrochemicals ignition by hot particle / N. K. Galchenko, V. V. Medvedev, A. G. Nigay, D. S. Sivkov // *Matec Web of Conference*. – 2016. Vol. 72, No. 01032.
105. Maloney, D. J. Evaporation, agglomeration, and explosive boiling characteristics of coal water fuels under intense heating conditions / D. J. Maloney, J. F. Spann // *Symposium (International) on Combustion* – 1989. – Vol. 22, No. 1. – P.1999–2008.
106. Sitarski, M. Absorption of infrared radiation inside an explosively boiling fine coal-water particle / M. Sitarski // *Particulate Science and Technology* – 1987. – Vol.5, No. 2. – P.193–205.
107. Yao, S. Behavior of suspended coal-water slurry droplets in a combustion environment / S. Yao, L. Liu // *Combustion and Flame*. – 1983. – Vol. 51, No. C – P. 335–345.
108. Sakai, T. Single-droplet combustion of coal slurry fuels/ T. Sakai, M. Saito // *Combustion and Flame*. – 1983. – Vol. 51, No. C. – P. 141–154.
109. Yavuz, R. Combustion characteristics of lignite-water slurries / R. Yavuz, S. Küçükbayrak, A. Williams // *Fuel*. – 1998. – Vol. 77, No. 11. – P. 1229–1235.
110. Murdoch, P. L. The mechanism of combustion of coal-water slurries / P. L. Murdoch, M. Pourkashanian, A. Williams // *20th International Symposium on Combustion*. – 1985. – Vol. 20, No. 1. – P. 1409–1418.
111. Bhadra, T. Ignition and combustion of isolated coal water slurry droplet / T. Bhadra, K. Annamalai // *ASME ASIA '97 Congress&Exhibition, Singapore 1997*.
112. Jianzhong, L. Pilot-scale investigation on slurring, combustion, and slagging characteristics of coal slurry fuel prepared using industrial wasteliquid / L. Jianzhong, Ruikun W., Jianfei X., Junhu Z., Kefa C. // *Applied Energy*. – 2014. – Vol. 115. – P. 309–319.

113. Glushkov, D. O. Variation of heating and ignition conditions for composite liquid fuel droplets on addition of dressed coal / D. O. Glushkov, P. A. Strizhak, K. Yu. Vershinina // *JP Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2016 – Vol. 13. – P. 71–80.
114. Miyasaka, K. Combustion and agglomeration of coal oil mixtures in furnace environments / K. Miyasaka, C. K. Law // *Combustion Science and Technology*. – 1980. – Vol. 24, No. 1–2. – P. 71–82.
115. Chen, X. An investigation on characteristics of coal–water slurry prepared from the solid residue of plasma pyrolysis of coal / X. Chen, L. Zhao, X. Zhang, C. Qian // *Energy Conversion and Management*. – 2012. – Vol. 62. – P. 70–75.
116. Daviault, S. G. Atomization performance of petroleum coke and coal water slurries from a twin fluid atomizer / S. G. Daviault, O. B. Ramadan, E. A. Matida, P. M. Hughes, R. Hughes // *Fuel*. – 2012. – Vol. 98. – P. 183–193.
117. Tavangar, S. CFD simulation for secondary breakup of coal-water slurry drops using OpenFOAM / S. Tavangar, S. H. Hashemabadi, A. Saberimoghdam // *Fuel Processing Technology*. – 2015. – Vol. 132. – P. 153–163.
118. Сенчурова, Ю. А. Математическое моделирование процесса распыления и сжигания водоугольного топлива вихревой топке / Сенчурова Ю. А., Заречнева Е. В. // *Вестник Кузбасского ГТУ*. – 2012. – № 6. – С. 122–105.
119. Серант, Ф. А. Приготовление водоугольного топлива и технология его сжигания / Ф. А. Серант, А. И. Цепенюк, Ю. В. Овчинников, С. В. Луценко, Е. Г. Карпов // *Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии*. – 2011. – №1. – С. 95–101.
120. Burdukov, A. P. Autothermal combustion of mechanically-activated micronized coal in a 5 MW pilot-scale combustor / A. P. Burdukov, V. I. Popov, T. S. Yusupov, M. Yu. Chernetskiy, K. Hanjalic // *Fuel*. – 2014. – Vol. 122. – P. 103–111.
121. Son, S. Y. Effect of coal particle size on coal-water slurry (CWS) atomization / S. Y. Son, K. D. Kihm // *Atomization and Sprays*. – 1998. – Vol. 8, No. 5. – P. 503–519.

122. Абрамов А. А. Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых / А. А. Абрамов // М. : Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, – 2004. – Т. 2. – 510 с.
123. Лырщиков, С. Ю. Определение термокинетических параметров разложения углей и отходов их переработки по результатам термогравиметрии / С. Ю. Лырщиков, П. А. Стрижак, С. А. Шевырев // Кокс и химия. – 2016. – № 7. – С. 31–38.
124. Kapustina, V. System analysis of waste oil management in Finland / V. Kapustina, J. Havukainen, T. Virkki-Hatakka, M. Horttanainen // Waste Management & Research. – 2014. – Vol. 32, No. 4. – P. 297–303.
125. Валиуллин, Т. Р. Разработка модельной камеры сгорания для исследования зажигания капель органоводоугольных топлив, витающих в потоке окислителя / Валиуллин Т. Р., Шевырев С.А. // Труды XXI Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 130-летию со дня рождения профессора М. И. Кучина. – Изд-во ТПУ, 2017. Т.2. С. 177–179.
126. Баскаков, А. П. Расчеты аппаратов кипящего слоя: справочник / А. П. Баскаков, И. П. Мухленов, Б. С. Сажин, В. Ф. Фролов // Л.: Химия, 1986. – 352 с.
127. Валиуллин Т. Р. О зажигании капель жидких композитных топлив в условиях низких температур / Т. Р. Валиуллин; науч. рук. П. А. Стрижак // Творчество юных - шаг в успешное будущее: Арктика и её освоение: материалы IX Всероссийской научной молодежной конференции с международным участием с элементами научной школы имени профессора М.К. Коровина, г. Томск, 10-14 октября 2016 г. — Томск : Изд-во ТПУ, 2016. — С. 279-281.
128. Аэров, М. Э. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем / М. Э. Аэров, О. М. Годес // Л.: Химия, 1968. – 247 с.

129. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков // Л.: Химия, 1976. – 552 с.
130. Варгафтик, Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н. Б. Варгафтик // М.: Наука, 1972. – 720 с.
131. Сухоруков, В. И. Научные основы совершенствования техники и технологии производства кокса / В. И. Сухоруков // Екатеринбург: АЛЛО, 1999. – 393 с.
132. Гува, А. Я. Краткий теплофизический справочник / А. Я. Гува // Новосибирск: Сибвузиздат, 2002. – 300 с.
133. Антонов, П. П. Уточненный тепловой расчет топок низкотемпературного кипящего слоя / П. П. Антонов, А. М. Сидоров, А. С. Тюркин, Ф. В. Щербаков // Ползуновский вестник. – 2008. – № 1–2. – С. 115–122.
134. Павленко, С. И. Мелкозернистые бетоны из отходов промышленности / С. И. Павленко // М.: АСВ, – 1997. – 176 с.
135. Volkov, R. S. Experimental investigation of mixtures and foreign inclusions in water droplets influence on integral characteristics of their evaporation during motion through high-temperature gas area / R. S. Volkov, G. V. Kuznetsov, P. A. Strizhak // International Journal of Thermal Sciences. – 2015. – Vol. 88. – P. 193–200.
136. Volkov, R. S. Water droplet deformation in gas stream: Impact of temperature difference between liquid and gas / R. S. Volkov, G. V. Kuznetsov, P. A. Strizhak // International Journal of Heat and Mass Transfer. v 2015. – Vol. 85. – P. 1–11.
137. Stepanov, E. Yu. A stereo piv system for measuring the velocity vector in complex gas flows / E. Yu. Stepanov, V. P. Maslov, D. L. Zakharov // Measurement Techniques. – 2009. – Vol. 52, No. 6. – P. 626–631.
138. Legrand, M. Atmospheric low swirl burner flow characterization with Stereo PIV / M. Legrand, J. Nogueira, A. Lecuona, S. Nauri, P.A. Rodríguez // Experiments in Fluids. – 2010. – Vol. 48, No. 5. – P. 901–913.

139. 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.
140. 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.
141. Valiullin, T. R. Statistical analysis of consequences caused by the collisions of soaring drops of organic coal-water fuel / T. R. Valiullin, J. C. Legros, P. P. Tkachenko // *Matec Web of Conferences*. – 2017. – Vol. 91, No. 01001.
142. 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.
143. Белоусов, В. Н. Топливо и теория горения / В. Н. Белоусов, С. Н. Смородин, О. С. Смирнова // Ч1. Топливо: Учебное пособие. СПбГТУРП. – СПб. – 2011. – 84с: ил.15.
144. 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.
145. Валиуллин, Т. Р. Зажигание капли органоводоугольного топлива при витании в потоке разогретого воздуха / Т. Р. Валиуллин, П. А. Стрижак, С. А. Шевырев, А. Р. Богомоллов // *Теплоэнергетика*. – 2017. – №1. – С. 62–71.
146. Валиуллин, Т. Р. Низкотемпературное зажигание капель жидких композиционных топлив при витании их в потоке разогретого воздуха/ Т. Р. Валиуллин // Труды XX Международного научного симпозиума имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня основания

- Томского политехнического университета. – Изд-во ТПУ, 2016. – Т.2. – С. 313–314.
147. 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.
148. Glushkov, D. O. Effect of the shape of an organic water–coal fuel particle on the condition and characteristics of its ignition in a hot air flow / D. O. Glushkov, A. V. Zakharevich, P. A. Strizhak, S. V. Syrodoy // *Russian Journal of Physical Chemistry*. – 2016. – Vol. 10, No. 6. – P. 935–945.
149. 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.
150. 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.
151. 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.
152. 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.
153. Valiullin, T. R. Combustion of the waste-derived fuel compositions metallized bu aluminum powder / T. R. Valiullin, R. I. Egorov, P. A. Strizhak // *Combustion and Flame*. – 2017. – Vol. 182. – P. 14–19.
154. Valiullin, T. R. Perspectives of usage of the rapeseed oil for doping of the waste-based industrial fuel / T. R. Valiullin, R. I. Iegorov, P. A. Strizhak // *Energy&Fuels*. – 2017. Vol. 31, No.9. – P. 10116-10120.
155. Sazhin, S. S. Modelling of fuel droplet heating and evaporation: Recent results and unsolved problems / S. S. Sazhin // *Fuel*. – 2017. – Vol. 196. – P. 69–101.

156. Валиуллин, Т. Р. Термодинамическая эффективность использования органоводоугольного топлива / С. А. Шевырёв, Т. Р. Валиуллин, К. Ю. Вершинина // Проблемы геологии и освоения недр: труды XXI Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 130-летию со дня рождения профессора М. И. Кучина, Томск, 3-7 апреля 2017 г.: в 2 т. — Томск : Изд-во ТПУ, 2017. — Т. 2. — С. 215-217.
157. Valiullin, T. R. The effect of the petrochemicals at the ignition of the coal-water / R. I. Egorov, T. R. Valiullin, P. A. Strizhak // Applied Thermal Engineering. — 2016. — Vol. 106. — P. 351–353.
158. Kuznetsov, G.V. Coagulation and splitting of droplet of coal-water slurry containing petrochemicals and their effect on ignition characteristics / G. V. Kuznetsov, P. A. Strizhak // Applied Thermal Engineering. — 2017. — Vol. 116. — P. 266–277.
159. Dmitrienko, M.A. Technoeconomic analysis of prospects of use of organic coal-water fuels of various component compositions / M. A. Dmitrienko, P. A. Strizhak, Yu. S. Tsygankova // Chemical and Petroleum Engineering. — 2017. — Vol. 53, No. 3–4. — P. 195–202.
160. Glushkov, D.O. Ignition of composite liquid fuel droplets based on coal and oil processing waste by heated air flow / D. O. Glushkov, P. A. Strizhak // Journal of Cleaner Production. — 2017. — Vol. 165. — P. 1445–1461.