

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

На правах рукописи

**Вершинина Ксения Юрьевна**

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

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

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

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

Томск – 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	С.
ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ПРОЦЕССАХ ЗАЖИГАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ЖИДКИХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ УГЛЕЙ И ОТХОДОВ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ.....	19
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	32
2.1. Характеристики компонентов органоводоугольных топлив.....	32
2.2. Методика приготовления топливных композиций.....	36
2.3. Оценка стабильности органоводоугольных топливных композиций ..	40
2.4. Экспериментальный стенд и методика исследования процессов зажигания и горения капель органоводоугольных топлив.....	45
Выводы по второй главе.....	57
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ЗАЖИГАНИЯ КАПЕЛЬ ОРГАНОВОДОУГОЛЬНЫХ ТОПЛИВНЫХ КОМПОЗИЦИЙ.....	59
3.1. Стадии зажигания и последующего горения капель органоводоугольных топлив .....	59
3.2. Влияние температуры окислителя на характеристики зажигания органоводоугольных топлив .....	77
3.3. Определение характеристик зажигания органоводоугольных топлив при варьировании скорости потока окислителя .....	87
3.4. Зажигание капель органоводоугольных топлив при разных начальных размерах .....	89

3.5. Влияние концентрации воды на характеристики зажигания органоводоугольных топлив .....	93
3.6. Закономерности зажигания органоводоугольных топлив при варьировании концентрации твердого горючего компонента .....	100
3.7. Изучение роли жидкого горючего компонента органоводоугольных топлив при их зажигании в потоке окислителя .....	110
3.8. Минимальные температуры зажигания типичных органоводоугольных топлив .....	126
3.9. Влияние технологии и длительности приготовления органоводоугольных топлив на характеристики их зажигания .....	131
3.10. Влияние материала держателя капли топлива на характеристики ее зажигания .....	139
3.11. Зажигание органоводоугольного топлива на основе углей разной степени метаморфизма .....	145
3.12. Анализ возможности использования воды разного качества при приготовлении органоводоугольных топлив .....	151
3.13. Зажигание органоводоугольных топлив с размерами капель, соответствующими форсуночным устройствам котельных установок ....	156
3.14. Рекомендации по использованию полученных результатов .....	164
Выводы по третьей главе.....	167
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	171
ЛИТЕРАТУРА .....	174

## 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, мм;
- $N^{daf}$  – 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, %;
- $T_d$  – температура в центре капли, К;
- $T_d^{max}$  – 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 окислителя, К;
- $T_g^{min}$  – минимальная температура окислителя, необходимая для устойчивого зажигания, К;
- $V^{daf}$  – выход летучих веществ на сухую беззольную массу топлива, %;
- $W^a$  – влажность, %;
- $V_g$  – скорость потока окислителя, К;
- $\tau$  – время, с;
- $\tau_b$  – время горения, с;
- $\tau_c$  – время полного сгорания, с;
- $\tau_d$  – время задержки зажигания, с;
- $\varphi_c$  – массовая доля угля в составе топливной суспензии, %;
- $\varphi_l$  – массовая доля жидкого горючего компонента в составе топливной суспензии, %;
- $\varphi_w$  – массовая доля воды в составе топливной суспензии, %.

## ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в условиях нестабильности объемов добычи и цен на нефтяные и газовые энергоресурсы роль угля среди энергетических полезных ископаемых возрастает. По оценкам экспертов [1–4] во многих странах мира в ближайшие десятилетия будет наблюдаться рост добычи и потребления угля (таблица 1).

Таблица 1. Объемы добычи бурого и каменного угля в мире

Страна	Статистические данные, млн. т. [1–4]						Прогноз, млн. т. [5]		
	2003	2005	2007	2009	2011	2013	2020	2032	2044
Китай	917,4	1174,8	1345,8	1486,5	1758,0	1840	–	–	–
США	553,6	580,2	587,7	540,8	556,1	500,5	–	–	–
Индия	144,4	162,1	181,0	210,8	215,7	228,8	–	–	–
Индонезия	70,3	93,9	133,4	157,6	217,3	258,9	–	–	–
Австралия	189,4	205,7	217,5	232,9	232,5	269,1	–	–	–
Россия	127,1	139,2	148,0	142,1	158,5	165,1	–	–	–
Южная Африка	134,1	137,7	139,6	141,2	141,8	144,7	–	–	–
Германия	54,1	53,2	51,5	44,4	44,6	43,0	–	–	–
Польша	71,4	68,7	62,3	56,4	56,6	57,6	–	–	–
Казахстан	43,3	44,2	50,0	51,5	56,2	58,4	–	–	–
В мире	–	–	–	–	–	–	10500	11500	12000

Комментарий: данные приведены по углям, поставляемым на экспорт. С учетом внутреннего рынка потребления значения могут быть увеличены на 12–17 %.

Следует отметить, что значительная доля добываемого угля обогащается. Неизбежным следствием этого процесса является образование высокозольных отходов, масса которых на сегодняшний день оценивается миллионами тонн (таблица 2) [1–4]. Можно утверждать, что с ростом объемов добычи углей по всему миру ежегодный прирост отходов углепереработки также увеличится. Утилизация отсевов, шламов, отходов углеобогащения является одной из ключевых задач как для отдельных обогатительных фабрик, так и для угледобывающих регионов в целом.

Возможность расширения площадей для складирования отходов углепереработки достаточно ограничена. С учетом объемов накопленных отходов и увеличением темпа прироста новых проблема их масштабной утилизации приобретает все большую значимость.

Таблица 2. Мировые запасы отходов обогащения углей энергетических марок

Страна	Статистические данные, млн. т. [1–4]		Прогноз, млн. т. [5]		
	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	–	–	–
Южная Африка	15,6	15,9	–	–	–
Германия	3,9	3,8	–	–	–
Польша	5	5,1	–	–	–
Казахстан	4,9	5,1	–	–	–
В мире	–	–	924	1012	1056

Комментарий: данные приведены с учетом объемов добычи угля (таблица 1).

Принималось во внимание, что в разных странах существенно отличается соотношение долей обогащаемого и экспортируемого углей. С учетом внутреннего рынка потребления значения могут быть увеличены на 50–60 %.

Объемы отходов углепереработки избыточны для их утилизации, например, только при строительстве дорог, зданий и сооружений или в сельском хозяйстве [6, 7]. Очевидна необходимость развития технологий утилизации подобных отходов в нескольких направлениях. В качестве одного из приоритетов выступает сжигание отходов переработки угля. Многие отходы углеобогащения являются потенциальным топливом (хотя и низкокачественным), т.к. содержат горючую составляющую – частицы угля (чаще всего размером до 100 мкм).

Функционирование нефтеперерабатывающей, энергетической, химической, транспортной отраслей промышленности неизбежно сопряжено с образованием широкой номенклатуры жидких отходов (например, отработанных масел различных энергоустановок, турбин, двигателей, трансформаторов, нефтяных шламов и отложений, образующихся при очистке нефтепроводов и резервуаров, фусов и т.д.). Наряду с отходами углерепереработки, отходы нефтяного происхождения и отработанные масла образуют массы, исчисляемые миллионами тонн в год [3, 9–12], и также требуют утилизации. В таблицах 3 и 4 приведены статистические данные, иллюстрирующие темпы добычи нефти в развитых нефтедобывающих странах в период 2009–2013 гг. и интенсивный рост объемов производства отработанных нефтепродуктов.

Таблица 3. Объемы добычи нефти в мире [8]

Страна	Добыча сырой нефти (1000 бар/день)				
	2009	2010	2011	2012	2013
Саудовская Аравия	8184,0	8165,6	9311,0	9763,0	9637,0
Россия	9650,4	9841,3	9943,3	10042,9	10146,6
США	5353,5	5470,8	5652,5	6484,6	7441,2
КНР	3794,6	4076,4	4052,1	4074,2	4164,1
Канада	1217,2	1227,1	1260,8	1308,5	1380,9
Иран	3557,1	3544,0	3576,0	3739,8	3575,3
ОАЭ	2241,6	2323,8	2564,2	2653,0	2796,5
Ирак	2336,2	2358,1	2652,6	2942,4	2979,6
Кувейт	2261,6	2312,1	2658,7	2977,6	2924,7
Венесуэла	2878,1	2853,6	2880,9	2803,9	2789,5
Мексика	2601,4	2577,2	2552,5	2547,9	2522,2

Таблица 4. Объемы производства отработанных нефтепродуктов

Автомобильные масла	Индустриальные масла	Нефтешламы
ежегодно образуется 30–40 млн. метрических тонн [9, 10]	ежегодно образуется 32–35 млн. метрических тонн [3, 11]	ежегодно образуется 60 млн. тонн, уже накоплено в мире более 1 млрд. тонн [12]

Комментарий: значения приведены на основе усреднения данных [3, 9–12].

По причине своей масштабности проблема утилизации жидких отходов нефтяного происхождения имеет общемировой характер и осложняется не только ограниченностью площадей, пригодных для складирования отходов, но в большей степени их экологической опасностью. Попадая в водоемы, почву, подземные воды, жидкие нефтепродукты наносят огромный ущерб окружающей среде [13–16].

В спектре технологий и способов, используемых для утилизации жидких отходов нефтяного происхождения можно выделить следующие: сжигание в энергетических установках при очень высоких (как правило, более 1200 К) температурах; сливание в баки длительного хранения (типично для стран с большими территориями); выгрузка в окружающую среду (создание сливных водоемов или использование существующих); регенерация и очистка масел с целью повторного использования. Однако все перечисленные подходы имеют существенные ограничения по объемам единовременно используемых низкосортных топлив [1–4].

Проведенный обзор современного состояния угледобывающей и нефтеперерабатывающей отраслей промышленности иллюстрирует масштабность проблемы утилизации отходов и побочных продуктов этих отраслей промышленности. Одним из перспективных способов решения данной проблемы является вовлечение углей низкосортных марок, отходов углеобогащения, а также отходов нефтяного происхождения в энергетический сектор в качестве компонентов водоугольных (ВУТ) и органоводоугольных (ОВУТ) топлив.

ВУТ представляет [17–26] суспензию на основе воды и измельченного угля или горючего угольного отхода, а также небольшого количества химических добавок (пластификаторов, стабилизаторов, поверхностно-активных веществ). В отличие от ВУТ, состав ОВУТ включает [27–31] и жидкий горючий компонент, в качестве которого целесообразно использовать отработанные масла или иные отходы нефтяного происхождения. Следует подчеркнуть, что сжигание жидких отходов

нефтяного происхождения в исходном состоянии требует довольно больших ресурсов, однако в составе ОБУТ может эффективно использоваться для интенсификации зажигания топливного состава, а также для улучшения его реологических характеристик.

Анализ публикаций последних 20–25 лет (например, [17–26, 32–50]) позволяет сделать предположение о том, что на сегодняшний день созданы фундаментальные основы технологии промышленного приготовления и сжигания ВУТ в топках энергетических котлоагрегатов. К настоящему времени в области водоугольных технологий разработаны экспериментальные методики, физические и математические модели, прогностические математические модели, методы и алгоритмы численного моделирования, получены зависимости интегральных характеристик от основных параметров процесса, сформулированы теоретические следствия и практические рекомендации. Результаты исследований [17–26, 32–50] дают представление об основных закономерностях процессов горения капель ВУТ.

Помимо результатов исследований в различных исследовательских центрах и лабораториях имеется практический опыт сжигания ВУТ в промышленных масштабах. Можно отметить опыт Китая и Японии – стран, наиболее активно использующих ВУТ в энергетике. На территории Японии в течение последних лет сжигается примерно 800 тыс. тонн ВУТ в год. В 2001 г. в Китае ежегодно производилось и потреблялось более 2 млн. тонн ВУТ, в 2006 г. – уже около 15 млн. тонн. К 2020 г. производство ВУТ в Китае планируется довести до рекордных 100 млн. тонн в год [50].

Опыт перевода энергетических установок на сжигание ВУТ в России не так масштабен и успешен [51]. В 1989 году построен опытно-промышленный углепровод «Белово – Новосибирск» (протяженность 262 км, расчетная пропускная способность 3 млн. тонн ВУТ в год, приемный терминал на Новосибирской ТЭЦ-5). Трубопровод предназначен для транспорта ВУТ с 62 % – ным содержанием угля. За период с 1989 г. по 1997 г. по трубопроводу доставлено на Новосибирскую ТЭЦ-5 около 350 тыс. м<sup>3</sup>

ВУТ. В 1997 г. в период профилактики Новосибирской ТЭЦ-5 трубопровод был остановлен и не функционирует по настоящее время [51]. Причин приостановления работы трубопровода было несколько, но одной из определяющих выступило замерзание ВУТ и возросшие затраты на транспортировку топлива.

При изучении характеристик горения капель ВУТ [17–26, 32–50] температуры окислителя – источника зажигания составляют, как правило, не менее 1200 К. Такие значения соответствуют режимам работы топок энергетических котлоагрегатов. Однако результаты исследований [52–54] показали, что угольная энергетика имеет перспективы развития в направлении низкотемпературного (менее 1000 К) сжигания топлива. Важно отметить, что в отличие от ВУТ, данные теоретических и экспериментальных исследований зажигания ОВУТ весьма ограничены. Условия протекания этого процесса могут существенно отличаться от аналогичных характеристик для ВУТ вследствие наличия в составе ОВУТ жидкого горючего компонента. Поэтому использование теоретических следствий, установленных в результате исследования зажигания капель ВУТ, для анализа аналогичных процессов с каплями ОВУТ невозможно [51].

Выбросы в атмосферу продуктов сгорания, а также риск возникновения нерегламентированных взрывов и возгораний на этапах подготовки, хранения, подачи топлива являются ключевыми проблемами, характерными для функционирования пылеугольных электростанций. В свете их решения одним из наиболее перспективных направлений развития угольной энергетики является использование ОВУТ и ВУТ. Установлено [18, 45], что сжигание ВУТ позволяет значительно снизить образование оксидов серы и азота по сравнению со сжиганием пылеугольного топлива. Кроме того, перевод твердых топлив в состояние суспензий и снижение температур на этапах подготовки и сжигания топлива позволяет существенно снизить выбросы оксидов серы и азота и обеспечить пожаровзрывобезопасность

процесса производства энергии по сравнению с традиционным сжиганием пылеугольного топлива.

Исследование процессов зажигания и горения новых составов композиционных жидких топлив представляет значительный интерес для решения задач расширения топливной базы, утилизации отходов угле- и нефтепереработки, снижения выбросов загрязняющих веществ, обеспечения пожаровзрывобезопасности технологического процесса производства энергии.

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

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Разработка экспериментальной методики, создание стенда, планирование и проведение экспериментальных исследований условий и характеристик низкотемпературного зажигания отходов переработки угля в виде органоводоугольных топливных композиций.
2. Выбор компонентов и методик для приготовления органоводоугольных топливных композиций, изучение свойств компонентов ОВУТ.
3. Изучение механизма и стадий зажигания капли ОВУТ в потоке разогретого окислителя.
4. Регистрация и вычисление интегральных характеристик процесса зажигания различных составов органоводоугольных топливных композиций (времена задержки зажигания и полного сгорания, минимальные температуры инициирования горения, тренды температуры в центре капли топлива в процессе нагревания).
5. Установление диапазонов влияния основных параметров (температура, скорость потока окислителя, вид и концентрации компонентов топлива) на характеристики (времена задержки зажигания, минимальные температуры инициирования горения, тренды температуры топлива в процессе реагирования) и условия зажигания капель ОВУТ.

6. Определение влияния компонентного состава, способа и длительности процесса приготовления ОБУТ на характеристики зажигания.
7. Разработка рекомендаций по использованию полученных результатов при зажигании органоводоугольных топливных композиций в промышленных установках.

Научная новизна работы. Разработана экспериментальная методика исследования комплекса взаимосвязанных процессов тепломассопереноса, фазовых превращений и химического реагирования при зажигании капель ОБУТ в потоке разогретого воздуха, отличающаяся от известных использованием средств высокоскоростной (до  $10^5$  кадров в секунду) видеорегистрации, автоматизированных систем с держателями (обеспечивается возможность варьирования материала, из которого изготовлены держатели) капель топлив, панорамных оптических методов визуализации и цветовой модели RGB для регистрации времен задержки зажигания и полного сгорания одиночной капли ОБУТ. Установлены характеристики (минимальные или пороговые температуры, времена задержки зажигания и др.) и необходимые условия низкотемпературного зажигания одиночных капель ОБУТ в потоке окислителя. Определен механизм и выделены характерные стадии инициирования горения одиночной капли ОБУТ при взаимодействии с потоком разогретого окислителя. Установлены зависимости интегральных характеристик тепломассопереноса, фазовых превращений и химического реагирования (времена задержки зажигания, полного сгорания, температуры в центре и на поверхности капли) для разных компонентных составов ОБУТ от температуры, скорости движения окислителя, размеров и формы частиц (капель); концентрации компонентов. Проведен анализ свойств (вязкость, стабильность, плотность, зольность, влажность, теплота сгорания) ОБУТ, приготовленных на основе отходов обогащения угля (фильтр-кеков) и типичных отработанных нефтепродуктов. Определено влияние способа приготовления ОБУТ на характеристики его зажигания и горения.

Установлены отклонения характеристик зажигания ОБУТ, приготовленных на основе воды разного качества.

Практическая значимость работы. Для различных составов ОБУТ, компонентами которых являются типичные отходы углеобогащения, угли разных марок, а также распространенные горючие жидкости нефтяного происхождения определены условия и характеристики устойчивого (характеризуется переходом к стадии горения) зажигания. Показаны диапазоны изменения основных параметров инициирования горения в низкотемпературном режиме. Разработаны рекомендации для приготовления составов ОБУТ (включающие описание способов подготовки компонентов, методов и длительностей их смешивания) для обеспечения лучшей стабильности и характеристик зажигания топлива. Результаты исследования могут использоваться в энергетике для расширения сырьевой базы, обеспечения пожаровзрывобезопасности производства энергии, улучшения экологической обстановки вблизи теплоэнергетических объектов.

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

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

Тематика исследований соответствует приоритетным направлениям развития науки в Российской Федерации (указ Президента РФ № 899 от 7 июня 2011 г.): «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная

энергетика», «Безопасность и противодействие терроризму», 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», «Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера»).

Научные положения, результаты и выводы, выносимые на защиту:

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

зажигания на 40–70 К, а времена задержки зажигания могут уменьшиться на 25–35 %.

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

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

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

1. XX Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии», Томск, 14–18 апреля 2014 г.
2. XI Международная конференция студентов и молодых учёных «Перспективы развития фундаментальных наук», Томск, 22–25 апреля 2014 г.
3. Национальный конгресс по энергетике, г. Казань, 8–12 сентября 2014 г.
4. XII Международная конференция студентов и молодых учёных «Перспективы развития фундаментальных наук», г. Томск, 21–24 апреля 2015 г.
5. Международная молодежная научная конференция «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования», г. Томск, 22–23 апреля 2015 г.

6. XX Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках», г. Звенигород, 24–29 мая 2015 г.
7. III Международный молодёжный форум «Интеллектуальные энергосистемы», г. Томск, 28 сентября–2 октября 2015 г.
8. XXI Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии», г. Томск, 5–9 октября 2015 г.
9. Всероссийская научная конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий», г. Томск, 13–15 октября 2015 г.
10. IX Всероссийская конференция с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения», г. Новосибирск, 16–18 ноября 2015 г.
11. XX Юбилейный Международный научный симпозиум студентов и молодых ученых им. академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр», г. Томск, 4–8 апреля 2016 г.
12. Международная молодежная научная конференция «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования», г. Томск, 19–21 апреля 2016 г.
13. XV Минский международный форум по тепломассообмену, г. Минск, 23–26 мая 2016 г.).
14. The 3rd International Congress on Water, Waste and Energy Management, г. Рим, 18–20 июля 2016 г.

Публикации. Результаты диссертационных исследований опубликованы в 28 печатных работах, в том числе 4 – в журналах из списка, рекомендованного ВАК РФ: «Химия твердого топлива», «Кокс и химия», «Химическое и нефтегазовое машиностроение», «Пожаровзрывобезопасность». Опубликовано 9 работ в международных

рецензируемых журналах, индексируемых базами данных «Scopus» и «Web of Science»: «Fuel Processing Technology» (ИФ=3.8), «Applied Thermal Engineering» (ИФ=3.1), «Energy & Fuels» (ИФ=2.8), «JP Journal of Heat and Mass Transfer», «Advances and Applications in Fluid Mechanics», «Matec Web of Conferences», «Procedia - Social and Behavioral Sciences». Получены 6 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Диссертация изложена на 191 странице машинописного текста, содержит 70 рисунков и 25 таблиц. Библиография включает 158 наименований.

Краткое содержание работы.

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 органоводоугольных, а также водоугольных топливных суспензий, определены основные достижения, нерешенные задачи в данной области, а также проблемы, сдерживающие развитие технологий ОВУТ (особенно при низкотемпературном режиме инициирования горения).

Во второй главе приведено описание разработанных автором диссертации экспериментального стенда и методик проведения исследований, а также методы оценки погрешностей результатов измерений.

В третьей главе приведены результаты исследования основных закономерностей и характеристик процессов низкотемпературного инициирования горения одиночных капель органоводоугольных топливных композиций в потоке окислителя. Установлены значения времен задержки зажигания и полного сгорания одиночных капель органоводоугольных топлив различных составов при варьировании температуры и скорости потока окислителя в широком диапазоне, вида и концентраций используемых

компонентов. Разработаны рекомендации по использованию полученных результатов в большой и малой энергетике.

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

## **ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ПРОЦЕССАХ ЗАЖИГАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ЖИДКИХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ УГЛЕЙ И ОТХОДОВ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ**

Исследования особенностей применения в энергетике композиционных суспензий на основе угля берут свое начало в конце 50-х – начале 70-х годов прошлого века [55–61]. В этот период появлялись первые работы, ориентированные на развитие и совершенствование технологий трубопроводного транспорта угля в виде водоугольной суспензии. Вместе с этим развивались идеи об эффективных условиях сжигания водоугольных суспензий [62–67]. В период с 1970 г. по 1990 г. исследования в области зажигания и горения водоугольных топливных композиций переживали подъем и динамичное развитие. Появлялись публикации (например, [68–86]) по распылению, газификации, сжиганию ВУТ в кипящем слое, использованию ВУТ в двигателях внутреннего сгорания, а также влиянию различных присадок и реагентов, улучшающих реологические характеристики ВУТ. Исследования проводились по всему миру – в Германии, Японии, СССР, США, Италии, Китае, Канаде и ряде других государств. Принято считать, что нарастающий интерес к использованию водоугольных суспензий в энергетической отрасли был обусловлен, в первую очередь, обострившейся в конце 70-х годов XX века ситуацией на мировом рынке энергоносителей, связанной с «нефтяным кризисом», подтолкнувшим многие государства на формирование новых подходов использования энергоресурсов и изменение стратегий энергобезопасности. Уголь, в отличие от нефти и газа, являлся наиболее распространённым и доступным энергетическим ресурсом. Поэтому водоугольные суспензии рассматривались в качестве реальной альтернативы нефтепродуктам [68–73].

Последние 20–25 лет интенсивно развивались технологии транспорта и промышленного сжигания ВУТ. Наибольших успехов в этой области добились научные и производственные коллективы из Китая. Если в 2001 г. в

Китае ежегодно производилось и потреблялось 2 млн. тонн ВУТ, то в 2006 г. уже 15 млн. тонн (такого объема достаточно для производства 10–12 гигаватт электрической энергии) [51]. К 2020 г. производство ВУТ в Китае планируется довести до 100 млн. тонн в год [19]. Водоугольные топливные композиции активно применяются для сжигания в промышленных энергоустановках и в Японии. На территории этой страны в течение последних лет сжигается примерно 800 тыс. тонн ВУТ в год. К сожалению, в СССР и России масштабное вовлечение ВУТ в теплоэнергетику не было реализовано, несмотря на многочисленные публикации советских и российских исследователей по тематике ВУТ.

К настоящему времени можно выделить труды научных коллективов и отдельных ученых, работавших в области исследования водоугольных топливных композиций, среди которых: Делягин Г.Н., Ходаков Г.С., Горлов Е.Г., Мурко В.И., Бурдуков А.П., Патраков Ю.Ф., Попов В.И., Дектерев А.А., Чернецкий М.Ю., Ведрученко В.Р., Баранова М.П., Алексеенко С.В., Саломатов В.В., Богомоллов А.Р., Кузнецов Г.В., Сыродой С.В., Цепенюк А.И., Овчинников Ю.В., Осинцев В.В., Архипов В.А., Лиштван И.И., Gajewski W., Kijo-Kleczkowska A., Wang H., Svoboda K., Liu H., Lee C.H., Liu J., Sakai T., Manwani P., Kim S.H., Mohapatra S.K., Pisupati S.V., Hu B.

Следует отметить, что процессы зажигания и горения ВУТ изучены более полно (за последние 35–40 лет опубликованы сотни работ по развитию водоугольных технологий) по сравнению с аналогичными процессами для различных составов ОБУТ. Распространение экспериментальных и теоретических заключений, сформулированных при исследовании ВУТ на органоводоугольные суспензии сложно считать приемлемым подходом, поскольку добавление жидких горючих компонентов в водоугольные топливные композиции может существенно изменять условия и характеристики инициирования горения таких топлив.

Согласно результатам экспериментальных и теоретических исследований [21–24, 36, 88–93] процесс инициирования горения капли

водоугольной суспензии включает несколько типичных стадий: испарение влаги, термическое разложение угля, горение летучих, зажигание коксового остатка. Следует отметить, что независимо от методики, применяемой в экспериментальных исследованиях (например, при термогравиметрическом анализе [94–96] навески топлива, при нагреве капли лазером [91], искровым разрядом [90], потоком воздуха [97–99], а также при контакте капли ВУТ с разогретой поверхностью [73]), реализовывались все перечисленные стадии зажигания.

В работах [90, 100] установлено, что в процессе нагрева капля топлива значительно трансформируется, жидкие компоненты испаряются, газообразные вещества диффундируют во внешнюю среду через поверхность капли, определенная доля угольных частиц диспергирует, образуется агломерат – частица ВУТ. На этапе испарения влаги из приповерхностного слоя размер капли топлива немного уменьшается, затем капля начинает «разбухать» за счет интенсивного выхода летучих из пор угля. В соответствии с гипотезой [100] зажигание ВУТ происходило только после полного испарения воды из приповерхностного слоя капли. Установлено [90, 100], что газофазное горение парогазовой смеси в окрестности капли прогревает коксовый остаток до температур, необходимых для его зажигания. Авторы [100] также заключили, что использование в составе ВУТ угля с высоким содержанием летучих приводит к более интенсивному пламенному горению парогазовой смеси в окрестности капли, и, как следствие, ускоренному прогреву и зажиганию коксового остатка. Интерес представляет анализ этих закономерностей для суспензий ОВУТ и их сравнение с ВУТ.

Достаточно большое внимание научные коллективы, работающие с ВУТ (например, [75–96]), уделяли эффекту «микровзрывов» (рисунок 1.1), возникающему при нагреве капель композиционных топлив. В частности, при зажигании капель ОВУТ (в составах использовался бурый или каменный уголь с массовой долей 50 % и керосин в диапазоне массовых концентраций

8–25 %) в высокотемпературной (1023 К) газовой среде была установлена интересная особенность – в процессе нагрева в объеме капли образуются отверстия, формирующиеся при резком «выбросе» паров воды и летучих веществ.

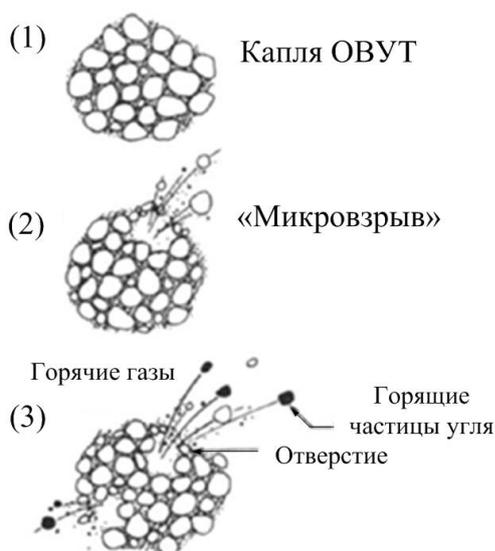


Рисунок 1.1. Схема образования «микровзрывов» в процессе нагрева капли ОВУТ [99]

По мнению авторов [99] за счет увеличения площади поверхности нагрева этот эффект интенсифицирует зажигание и последующее горение топлива. Установлено [99], что интенсивность «микровзрывов» капли суспензии значительно уменьшалась при относительной массовой концентрации керосина менее 6 % и более 20 %. В работе [97] при исследовании горения в высокотемпературном (1123–1273 К) потоке окислителя смесей на основе каменного угля, тяжелой нефти, воды или/и метанола установлено, что интенсивность «микровзрывов» капли топлива с добавлением воды значительно больше, чем в случае использования метанола. К аналогичному выводу пришли авторы [96], исследовавшие зажигание ОВУТ на основе смеси угля (40 %), мазута, этанола и воды (до 20 % по массе). Кроме этого, согласно [99,100] появлению эффекта «взрывного» горения способствует использование в составе ВУТ углей с развитой

пористой структурой, в то время как каменные угли (особенно спекающиеся) в составе ВУТ усиливают агломерирование [102] капли в процессе ее нагрева.

Анализ работ [91, 92, 93, 98, 100] по зажиганию одиночных капель ВУТ, закрепленных на спале термопары показал, что изменение температуры в центре капли в процессе ее нагрева имеет одинаковый характер для суспензий с разными компонентами. Например, кривые, представленные на рисунках 1.2 и 1.3, получены для топлив, существенно отличающихся по составу. В тоже время их вид хорошо коррелирует для разных компонентных составов ВУТ.

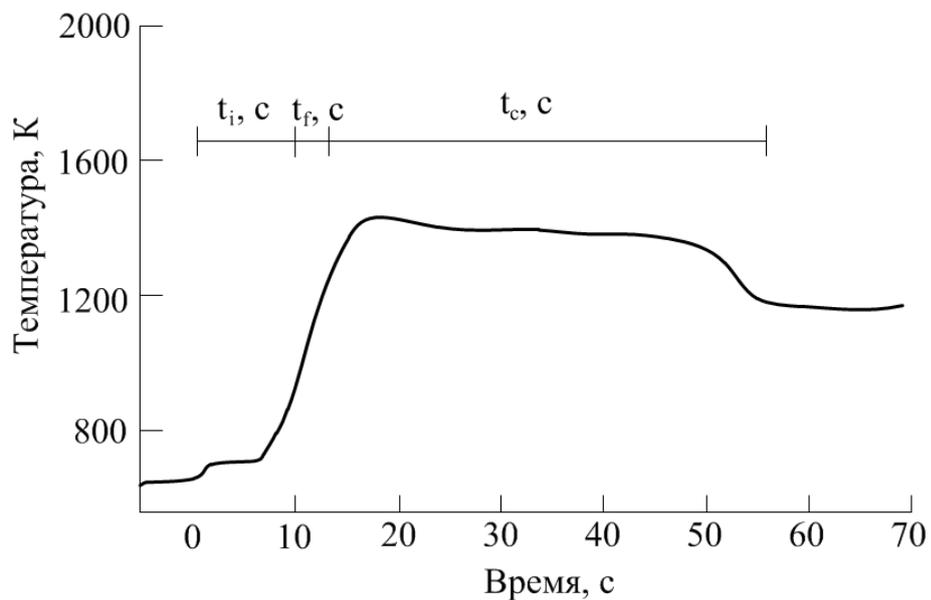


Рисунок 1.2. Изменение температуры в центре капли ВУТ на основе бурого угля (температура окислителя 1123 К, диаметр капли 1,49 мм) [93]:  $t_i$  – время задержки зажигания,  $t_f$  – время пламенного горения,  $t_c$  – время горения коксового остатка

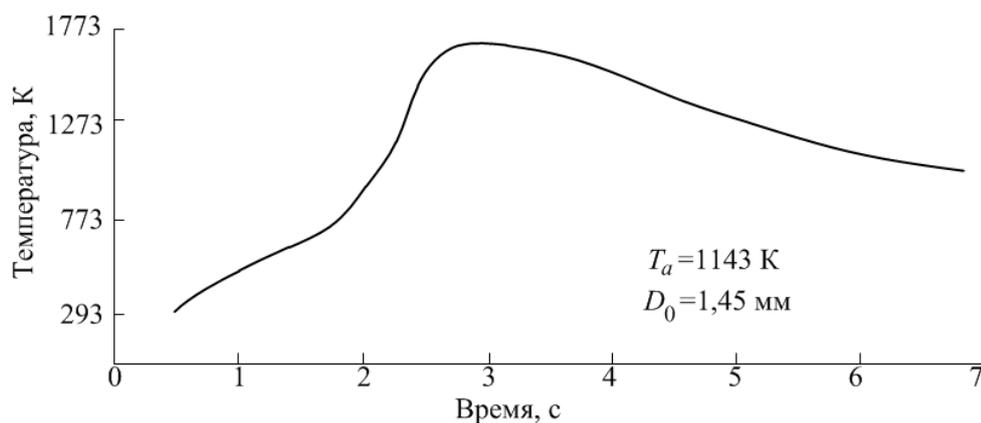


Рисунок 1.3. Изменение температуры в центре капли ОВУТ (50 % уголь, 46 % топочный мазут, 4 % вода) (температура окислителя 1143 К, диаметр капли 1,45 мм) [92]

При взаимодействии капли с разогретым окислителем её температура повышается. Подводимое тепло затрачивается на испарение воды и жидкого горючего компонента (в случае ОВУТ) из приповерхностного слоя, а также газификацию органической массы угля. При достижении концентрации горючих веществ в окрестности капли критических значений происходит их зажигание. Теплота, выделяющаяся при газофазном горении парогазовой смеси прогревает коксовый остаток, его температура повышается, происходит гетерогенное зажигание углерода. Данный процесс протекает с выделением тепла. Как следствие, температура капли возрастает (рисунки 1.2, 1.3). Процесс выгорания углерода является наиболее длительной стадией. В частности, в работе [88] установлено, что эта стадия может занимать до 90 % от общего времени жизни капли. Завершение горения характеризуется падением температуры в центре капли до значения, соответствующего температуре окружающей среды (рисунки 1.2, 1.3). Но, несмотря на общую природу механизма зажигания, длительности отдельных стадий могут значительно отличаться для суспензий разных компонентных составов (особенно при добавлении горючих жидкостей). Эти процессы особенно важны для ОВУТ.

Влияние температуры внешней газовой среды на инерционность зажигания и горения топливных суспензий на основе угля, а также нефтепродуктов исследовалось в [100]. Авторы [100] получили достаточно ожидаемый результат – при увеличении температуры в топке от 900 К до 1300 К времена задержки зажигания ВУТ нелинейно снижались, причем используемый в ВУТ уголь (исследовались составы на основе антрацита и каменных углей разных марок) оказывал влияние на данную характеристику (определяющее значение имеет содержание летучих в угле – чем их больше, тем меньше время задержки зажигания капли ВУТ [100]).

К сожалению, на сегодняшний день экспериментальных данных о предельных температурах газовой среды, достаточных для устойчивого зажигания различных составов ВУТ, и, тем более, ОВУТ, крайне мало. Можно выделить лишь работы [30, 96]. Авторы [96], использовавшие методику термогравиметрического анализа навески топлива, установили, что температура зажигания мазута составляла около 523 К. Такая же температура соответствовала зажиганию суспензии на основе смеси угля (40 %), мазута, этанола и воды (от 0 до 20 % по массе). При увеличении массовой доли воды в составе топлива не наблюдалось [96] значительного изменения температуры зажигания. Дополнительные исследования, проведенные в работе [96], позволили установить зависимость температуры воспламенения от скорости нагрева. Показано [96], что при скоростях нагрева образца, равных 10 К/мин, 25 К/мин, 45 К/мин и 60 К/мин, температура воспламенения составила 663 К, 528 К, 523 К и 483 К, соответственно. При проведении экспериментов [30] показано, что минимальные температуры зажигания возрастают при уменьшении начального размера капли топливной суспензии, что обусловлено снижением потока массы вдуваемых с поверхности капли продуктов термического разложения и испарения горючей и негорючей жидких компонент. Это приводит к увеличению концентрации горючих газов в малом приповерхностном слое капли ОВУТ. Можно отметить, что для капель ОВУТ зависимость предельных температур

зажигания от размера частиц имеет более выраженный характер, чем для ВУТ: с увеличением размера капель уменьшение минимальной температуры зажигания для капель ОБУТ может быть более чем на 80–100 К ниже, чем для капли ВУТ при одинаковом содержании воды. В целом, для капель ВУТ и ОБУТ с радиусами 0,5–1,5 мм устойчивое зажигание регистрировалось [30] в диапазоне температур окислителя 720–850 К. Результаты [30, 96] иллюстрируют перспективу «низкотемпературного» зажигания различных составов композиционных жидких топлив.

Влияние размера капель водоугольных суспензий на характеристики их зажигания экспериментально исследовались в [91–93, 98]. Авторы [92] установили, что для всех исследуемых топливных составов ОБУТ (4 % вода, 50 % уголь, 46 % топочный мазут) существует линейная зависимость между квадратом начального диаметра капли и временем газофазного горения, а также временем полного сгорания. Для одиночных капель ВУТ показана [91] практически линейная зависимость между диаметром капли и временем ее горения. Согласно заключениям [93, 98] времена испарения, задержки зажигания, существования пламени, горения коксового остатка линейно возрастают при увеличении диаметра капли, варьируемом в диапазоне 0,9–1,5 мм.

Одной из важнейших характеристик топлива как энергетического ресурса является инерционность зажигания. Известно, что вода в составе ВУТ значительно увеличивает длительность инициирования горения по сравнению с исходным («необводненным») углем. Результаты экспериментов [93] позволили установить, что увеличение массовой доли воды в диапазоне 35–48 % в составе ВУТ (в качестве горючего компонента использовался бурый уголь) приводит к линейному увеличению времени испарения на 37–45 % и длительности инициирования горения на 21–34 %. Данная зависимость определена [93] для капли ВУТ диаметром 1,15 мм при температурах в топке 1073 К и 1113 К. Авторы [93] количественно охарактеризовали снижение времен задержки зажигания при увеличении

содержания летучих веществ. Эксперименты показали, что увеличение концентрации летучих с 22 % до 35 % приводило к уменьшению длительности инициирования горения примерно на 22 %. Также установлено, что время пламенного горения летучих исследуемых ВУТ на основе бурых углей возрастало при варьировании температуры 1010–1170 К. По результатам экспериментов, изменение общего содержания влаги оказало более сильное влияние на инерционность зажигания, нежели изменение количества летучих. Исходя из этого, авторы [93] подчеркивают, что содержание влаги в угле является такой же важной характеристикой, как, например, содержание летучих или теплота сгорания, поскольку общая влажность суспензии определяется не только массовой долей воды, используемой при приготовлении ВУТ, но также и исходной влажностью самого угля. Следует отметить, что, несмотря на кажущуюся очевидность влияния воды на процесс зажигания и горения водоугольной суспензии, в работе [91] удалось установить, что эффективная массовая скорость горения выше для капли ВУТ, чем для «обезвоженной» частицы ВУТ. Данный эффект, по мнению авторов [91], связан, скорее всего, с реакцией водяных паров и углерода, а также с явлением «микровзрывов» капли на этапе испарения влаги и выхода летучих, благодаря которому значительно увеличивается площадь поверхности окисления.

Идеи о том, что добавление жидких горючих компонентов может интенсифицировать зажигание водоугольной суспензии, развивались в ряде работ, например, [97, 99, 103]. Перечень используемых в исследованиях жидких горючих компонентов включал керосин [99], мазут [89, 92, 96, 103], тяжелую нефть [97], метанол [97], рапсовое масло [104], этанол [96], отработанное масло [89]. Добавление керосина (в диапазоне массовых концентраций 8–25 %) в работе [99] рассматривается как способ интенсификации зажигания ВУТ на основе бурых и каменного углей. В течение 1–2 с с момента помещения капли в высокотемпературную (около 1023 К) среду наблюдалось интенсивное пламенное горение в окрестности

капли. Авторы предполагают, что парогазовая смесь состояла не только из летучих угля, но также и горючих паров керосина. Частицы угля в процессе горения сильно диспергировали. Часто капля полностью разрушалась. Согласно полученным результатам [99] скорость протекания процессов зажигания и горения капли топлива с добавлением керосина значительно выше, чем без него. Экспериментальное исследование [97] показало, что добавление метанола в состав топлива на основе угля, воды и тяжелой нефти также снижало инерционность зажигания в потоке воздуха при температурах 1123–1273 К. В работе [89] рассматривались смеси «уголь–мазут–вода» и «уголь–отработанное масло–вода», предварительно обработанные в кавитаторе. Образцы массой 1 г помещались в предварительно нагретую печь. Установлено, что для смеси «уголь–мазут–вода» при температурах до 1073 К требуется значительное время для ее воспламенения. При этом, смесь «уголь–мазут–вода» является более реакционноспособной, чем смесь на основе отработанного масла. В обоих случаях показано [89], что необходимые температуры для обеспечения эффективного сжигания данных топлив должны превышать 1073 К. В работе [103] исследовано влияние концентрации мазута в ОВУТ на процессы его воспламенения и горения. Концентрация мазута изменялась от 0 % до 25 % по массе, доля воды для всех проб составляла порядка 50 %. При проведении исследований [103] навеску массой 1 г помещали в муфельную печь, разогретую до 1070 К. Установлено [103], что образцы, содержащие мазут, воспламеняются с меньшей инерционностью, и время полного сгорания значительно уменьшается. При этом увеличение концентрации мазута приводит к снижению времени задержки зажигания. Однако условия экспериментов [89, 97, 99, 103] довольно далеки от топочных процессов. К тому же не рассмотрены в качестве компонентов типичные отходы углепереработки (например, фильтр-кеки).

Сведений о влиянии технологии приготовления ОВУТ на характеристики зажигания на настоящий момент достаточно немного. Это

можно связать с тем, что и технологий приготовления водоугольных суспензий не так много (для некоторых государств и регионов вообще нет альтернатив). В частности, в работе [99] рассматривались суспензии на основе воды, бурого или каменного угля и керосина. Авторы подчеркивают, что технология подготовки ОБУТ влияла на процесс зажигания капли топлива. При предварительном смешении угля и керосина и последующем добавлении воды эффекты «микровзрывов» и диспергирования частиц угля были слабыми. В случае, когда методика приготовления включала сначала приготовление эмульсии керосина и воды, а затем добавлении к ней угля, зажигание и горение интенсифицировалось. К сожалению, в своем исследовании [99] авторы не представили количественные характеристики зажигания исследуемых составов ОБУТ. В работе [103] показано, что изменение длительности процесса приготовления ВУТ на кавитаторе даже на несколько минут может существенно влиять на инерционность процессов зажигания. Относительно водоугольных суспензий установлено [103], что имеется оптимальное (с точки зрения минимизации инерционности зажигания) время приготовления ВУТ. Зависимость времени задержки зажигания образца при постоянной температуре в муфельной печи 1070 К от времени кавитационной обработки топлива показана на рисунке 1.4.

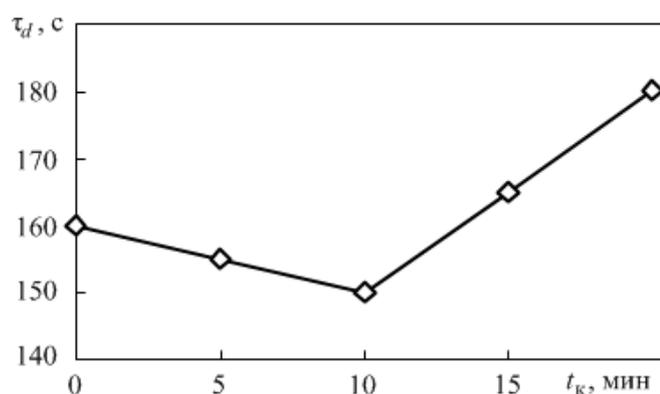


Рисунок 1.4. Зависимость времени задержки зажигания топливной композиции от времени кавитационной обработки [103]

Свойства твердого горючего компонента в составе топливной суспензии оказывают существенное влияние на ее зажигание и горение.

Особенный интерес для развития технологий эффективного сжигания водоугольных суспензий представляют результаты экспериментов [91] по зажиганию лазером капли ВУТ, закрепленной на спаяе термопары в диапазоне температур 873–1673 К. Авторы [91] установили, что при использовании в составе ВУТ углей разной степени метаморфизма (использовались антрацит и бурый уголь) время горения капли ВУТ (диаметр 1,5 мм) изменяется. Другими словами, характеристики зажигания и горения возможно варьировать путем сочетания в составе ВУТ угля высокой степени метаморфизма и низкокачественного высокорекреационного угля. Важно эти идеи развить для суспензий ОВУТ.

Как показали эксперименты [100], на этапе инициирования горения содержание летучих в угле во многом определяет инерционность зажигания топлива. По этой причине капли ВУТ на основе бурых углей зажигались быстрее, чем ВУТ на основе каменного угля или антрацита [100]. Авторы [100] также установили, что времена задержки зажигания суспензии, в состав которой входит уголь разной тонины помола (половина угля с размером частиц 36 мкм, оставшаяся часть – 95 мкм) характеризуется меньшими (примерно на 18 %) длительностями инициирования горения по сравнению с ВУТ, в состав которого входит уголь с тониной помола 36 мкм и 95 мкм. Согласно результатам исследований [24, 27, 70]. При определенных размерах угольных частиц может происходить как формирование единого агломерата, так и его диспергирование. Установлено [70], что времена задержки зажигания летучих компонент для двух частиц ВУТ одинаковых размеров, приготовленных из частиц размерами 4 мкм и 40 мкм, удовлетворительно коррелировали между собой и возрастали от 20 мс до 120 мс при изменении размера капли от 200 мкм до 500 мкм.

На основании анализа результатов рассмотренных исследований можно сделать вывод о значительных перспективах утилизации широкого класса отходов угле- и нефтепереработки в составе органоводоугольных топливных композиций. Большинство исследований выполнено в достаточно

узком диапазоне изменения температуры внешней газовой среды (как правило, 900–1300 К). Имеющиеся данные о предельных температурах зажигания, характеристиках зажигания и горения представлены для достаточно узкого набора составов ОВУТ. Очевидна необходимость установления предельных температур зажигания составов ОВУТ на основе различных отходов угле- и нефтепереработки, а также определения влияния свойств и широкого диапазона концентраций компонентов (воды, твердой и жидкой горючей фазы) на характеристики и условия зажигания в низкотемпературном режиме. Этот режим является перспективным вследствие значительной экономии ресурсов (время, расход топлива и окислителя, температура окислителя и др.) при розжиге котельных установок, работающих на композиционных жидких топливах.

## ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 2.1. Характеристики компонентов органоводоугольных топлив

В состав органоводоугольных топлив входят четыре основных компонента [27–31]: твердый (измельченный уголь, горючий отход переработки угля), жидкий (масло, мазут, нефтешлам и др.), пластификатор (смачиватель), вода. Составы ОВУТ, исследуемые в настоящей работе, отличаются от рассмотренных ранее [89, 92, 96, 97, 99, 103, 104] бóльшим разнообразием компонентов, включающих расширенный перечень отходов как угольного, так и нефтяного происхождения.

В качестве твердого компонента ОВУТ могут использоваться угли различной степени метаморфизма, а также продукты их переработки [17–20]. Размер частиц угольной пыли варьируется от десятков до сотен микрометров [17–20]. Одним из перспективных направлений в ближайшем будущем является применение в качестве твердого горючего компонента углеродного остатка, образующегося при пиролизе автомобильных покрышек. Также возможно использование отхода углеобогачительных фабрик (фильтр-кек), представляющего смесь мелкодисперсного угля (размер частиц до 100 мкм) и воды. Применяемые в исследованиях фильтр-кеки получены при флотации каменного угля. В соответствии с этим методом обогащения реализуется промывание угольной породы водой с применением поверхностно-активных веществ, а также дальнейшая классификация углей на грохотах с целью разделения по фракциям. Вода, использованная для промывки породы, подается для осветления в специальные емкости, в которых происходит осаждение частиц угля. Суспензия откачивается и направляется в ленточные пресс-фильтры, в которых происходит ее фильтрация через специальную мембрану (фильтровальную ткань) – реализуется отжим. Образующийся в результате этого процесса влажный остаток угольных частиц является фильтр-кеком.

В качестве жидкого горючего компонента топливной композиции могут использоваться отходы продукции нефтяного происхождения (нефтяные шламы и нефтяные отложения, образующиеся при очистке нефтепроводов и резервуаров), отработанные масла энергоустановок (турбин, насосов, двигателей внутреннего сгорания и др.), а также механизмов (редукторов, гидроприводов, трансмиссий и др.). Жидкие пластификаторы служат для предотвращения расслоения компонентов топливных композиций.

Ниже приведены перечни компонентов, используемых в диссертационном исследовании для приготовления ОБУТ, а также результаты анализа их свойств (таблицы 2.1–2.5).

Угли и фильтр-кеки:

1. Фильтр-кек (сухой) каменного угля марки К, обогатительная фабрика «Северная» Кемеровской области.
2. Фильтр-кек (сухой) каменного угля марки Д, обогатительная фабрика «Листвянская» Новосибирской области.
3. Фильтр-кек (сухой) каменного угля марки Г, обогатительная фабрика шахты им. Кирова, Кемеровской области.
4. Фильтр-кек (сухой) каменного угля марки СС, обогатительная фабрика «Черниговская-Коксовая» Кемеровской области.
5. Фильтр-кек (сухой) каменного угля марки Т, обогатительная фабрика «Калтанская-Энергетическая» Кемеровской области.
6. Бурый уголь марки Б1, Таловское месторождение Томской области.
7. Бурый уголь марки Б2, разрез «Бородинский» Красноярского края.
8. Бурый уголь марки Б3, разрез «Балахтинский» Красноярского края.
9. Каменный уголь марки К, шахта «Березовская» Кемеровской области.
10. Каменный уголь марки Д, Листвянское месторождение Новосибирской области.
11. Каменный уголь марки Д, шахта «Грамотеинская» Кемеровской области.
12. Каменный уголь марки Г, ОФ шахты им. Кирова, Кемеровской области.

13. Каменный уголь марки СС, разрез «Черниговец» Кемеровской области.
14. Каменный уголь марки Т, разрез «Калтанский» Кемеровской области.
15. Углеродный остаток низкотемпературного пиролиза автомобильных покрышек.

Таблица 2.1. Результаты технического анализа угольных компонентов ОБУТ

Образец	W <sup>a</sup> , %	A <sup>d</sup> , %	V <sup>daf</sup> , %	Q <sup>a</sup> <sub>s,v</sub> , МДж/кг
1	–	26,46	23,08	24,83
2	–	36,99	41,47	19,24
3	–	33,82	43,11	22,16
4	–	50,89	30,16	15,23
5	–	21,20	16,09	26,92
6	10,15	22,84	61,47	17,30
7	14,11	4,12	47,63	22,91
8	15,52	3,85	46,62	23,36
9	2,05	14,65	27,03	29,76
10	10,09	8,52	40,19	24,82
11	5,17	13,9	41,59	25,79
12	0,76	17,8	41,36	27,82
13	2,76	21,68	27,40	26,23
14	2,89	18,07	15,07	27,65
15	1,39	13,10	20,14	30,11

Таблица 2.2. Результаты анализа элементного состава угольных компонентов ОБУТ

Образец	C <sup>daf</sup> , %	H <sup>daf</sup> , %	N <sup>daf</sup> , %	S <sup>t d</sup> , %	O <sup>daf</sup> , %
1	87,20	5,090	2,05	1,022	4,46
2	73,27	4,904	0,02	0,218	21,59
3	75,12	4,638	0,02	0,226	19,99
4	87,47	5,039	2,15	0,444	4,77
5	90,13	4,255	2,31	0,441	2,77
6	64,86	6,896	0,62	0,384	27,13
7	73,25	6,516	0,79	0,435	18,99
8	74,52	7,201	0,71	0,304	17,25
9	79,79	4,486	1,84	0,868	12,70
10	77,46	6,253	2,27	0,347	13,64
11	77,11	5,767	2,62	0,398	14,11
12	79,31	5,340	0,01	0,414	14,93
13	77,30	4,783	1,93	0,326	15,32
14	87,97	4,104	2,23	0,526	5,03

15	91,47	2,422	0,37	2,438	2,93
----	-------	-------	------	-------	------

Таблица 2.3. Результаты анализа характеристик образцов КЕКов в исходном состоянии

Образец	Массовая доля сухого угля, %	$Q_{s,v}^a$ , МДж/кг
1 (влажный) К	56,5	14,03
2 (влажный) Д	43,2	8,3
3 (влажный) Г	47,0	10,4
4 (влажный) СС	62,1	9,46
5 (влажный) Т	60,9	16,4

Жидкие горючие компоненты:

1. Автомобильное масло Total 9000 отработанное.
2. Автомобильное масло Total 9000.
3. Турбинное масло отработанное ГРЭС-2 (марка Тп-22с по ТУ 38.101.821-2001).
4. Турбинное масло (марка Тп-22с по ТУ 38.101.821-2001).
5. Трансформаторное масло отработанное (марка ТСП по ГОСТ-76).
6. Мазут.
7. Касторовое масло.
8. Тяжелая нефть, Герасимовское месторождение Томской области.
9. Компрессорное масло.
10. Водонефтяная эмульсия.

Таблица 2.4. Результаты анализа характеристик жидких горючих нефтепродуктов

Образец	плотность при 293 К, кг/м <sup>3</sup>	W <sup>a</sup> , %	A <sup>d</sup> , %	T <sub>f</sub> , К	T <sub>ign</sub> , К	$Q_{s,v}^a$ , МДж/кг
1	871	0,28	0,78	405	491	44
2	850	—	0,84	478	505	45,64
3	868	—	0,03	448	466	44,99
4	868	—	—	478	503	46,06
5	877	—	—	421	442	44,98
6	1000	6,12	4,06	438	513	39,4
7	961	0,08	0,013	558	586	36,73

8	869	0,05	–	327	351	43,24
9	887	–	0,023	458	502	45,2
10	794	0,04	0,006	313	330	45,55

Пластифицирующая добавка – смачиватель «Неолас», добавляемый в ВУТ или ОВУТ для замедления процесса его расслоения в течение периода хранения. Диапазон массовых концентраций пластификатора в топливной суспензии составляет 0,5–1 %.

Таблица 2.5. Основные характеристики пластификатора

Показатель	Значение
Внешний вид	Бесцветная жидкость
Содержание ПАВ, % масс	25
pH раствора	6,5
Плотность при 293 К, кг/м <sup>3</sup>	954

## 2.2. Методика приготовления топливных композиций

Для приготовления ОВУТ в качестве основных компонентов использованы: угольная пыль, фильтр-кеки, вода, отработанные масла или другие горючие жидкости, пластификатор (глава 2, п. 2.1.).

Приготовление составов ОВУТ осуществлялось в лабораторных условиях при температуре 293 К, давлении 101,3 кПа и влажности 80 %. Методика приготовления топливной композиции включала следующие этапы:

1. Измельчение твердого горючего компонента до состояния пыли. Для измельчения угля использовалась быстроходная роторная мельница Pulverisette 14 (скорость вращения ротора 6000–20000 об/мин). Затем при помощи рассева лабораторного РЛ-1 и набора сит (ГОСТ Р 51568-99) отбиралась проба со средним размером частиц около 80 мкм (для влияния тонины помола выделенный размер увеличивался до 200 мкм).

Помимо угля, в качестве твердого горючего компонента применялись влажные (таблица 2.3) остатки обогащения угля – фильтр-кеки (таблицы 2.1, 2.2). Данные компоненты, получаемые с углеобогатительных фабрик,

содержат частицы угля, размер которых составляет 60–80 мкм. Поэтому предварительная обработка (в частности, измельчение) используемых фильтр-кеков не проводилась.

2. Подготовка навесок компонентов смеси при помощи аналитических весов ViBRA HT 84RCE (дискретность измерения –  $10^{-5}$  г), исходя из расчета массы готового состава и соответствующих массовых долей компонентов.

3. Перемешивание компонентов осуществлялось в 2 этапа гомогенизатором ИКА Т 18 (также применялся гомогенизатор MPW-324) с диспергирующей насадкой в металлической емкости объемом 0,5 л (также использовались емкости объемом от 0,1 л до 1 л). Первоначально в емкость добавлялись жидкие компоненты (вода, масло, пластификатор) и перемешивались в течение 3 минут (жидкие компоненты добавлялись в состав в исходном состоянии). Затем в водомасляную эмульсию вводился угольный компонент. Длительность перемешивания компонентов составляла 10 минут.

Следует отметить, что для проведения лабораторных экспериментальных исследований существуют две основные технологии приготовления ОВУТ – кавитационная и гомогенизационная. Кавитационная технология приготовления ОВУТ основана на измельчении угля в водной среде, деструкции молекул и активации частиц, в ходе протекания которых нарушается структура твердого компонента (как природной «горной» массы). Уголь при этом распадается на отдельные органические составляющие, но уже с активной поверхностью частиц и большим количеством свободных органических радикалов. Шаровая барабанная мельница по принципу действия аналогична лабораторному кавитатору. В ее состав входит двухлитровый керамический барабан, мелющие шары того же материала и специализированные валки. Основным отличием методики приготовления ОВУТ с применением шаровой барабанной мельницы от гомогенизатора является механическое воздействие «измельчителей» (мелющих шаров) на

образцы, что приводило к изменению их реологических свойств и характеристик зажигания (в связи с уменьшением размера частиц).

В настоящей работе с целью выбора оптимальной технологии приготовления использованы оба способа смешивания компонентов ОВУТ. По ряду причин (лучшая стабильность (глава 2, раздел 2.3.), оптимальное соотношение характеристик зажигания и длительности приготовления (глава 3, раздел 3.9) в качестве основной выбрана гомогенизационная технология приготовления составов ОВУТ.

Анализ свойств проводился не только для отдельных компонентов ОВУТ (таблицы 2.1–2.5), но также и для готовых топливных композиций на основе фильтр-кеков и типичных отработанных нефтепродуктов. Результаты анализа приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6. Характеристики исследованных составов ОВУТ

Концентрации компонентов ОВУТ	Плотность при 20 °С, кг/м <sup>3</sup>	Влажность, %	Зольность, %	Вязкость, мПа·с	Стабильность, количество суток	Теплота сгорания $Q_{s,v}^r$ , ккал/кг
89,5 % КЕК К, 10 % автомобильное масло, 0,5 % пластификатор	1220	43,87	12,29	96	9	3786
89,5 % КЕК К, 10 % трансформаторное масло, 0,5 % пластификатор	1215	44,08	12,15	71	7,5	3797
89,5 % КЕК К, 10 % турбинное масло, 0,5 % пластификатор	1200	44,08	12,15	82	7	3798
89,5 % КЕК К, 10 % замасленная и замазученная смесь, 0,5 % пластификатор	1190	43,07	12,42	72	8	3812
89,5 % КЕК К, 10 % водонефтяная эмульсия, 0,5 % пластификатор	1200	45,39	11,80	45	6,5	3678
–	–	–	–	–	–	–

89,5 % КЕК СС, 10 % автомобильное масло, 0,5 % пластификатор	1210	32,65	29,27	660	8,5	3137
89,5 % КЕК СС, 10 % трансформаторно е масло, 0,5 % пластификатор	1180	37,19	26,88	232	7,5	2996
89,5 % КЕК СС, 10 % турбинное масло, 0,5 % пластификатор	1200	36,13	27,41	270	6,5	3034
89,5 % КЕК СС, 10 % замасленная и замазученная смесь, 0,5 % пластификатор	1215	37,24	26,85	289	7	2948
89,5 % КЕК СС, 10 % водонефтяная эмульсия, 0,5 % пластификатор	1215	34,79	28,10	449	6,5	3041
–	–	–	–	–	–	–
89,5 % КЕК Т, 10 % автомобильное масло, 0,5 % пластификатор	1217	36,53	11,42	106	8	4489
89,5 % КЕК Т, 10 % трансформаторно е масло, 0,5 % пластификатор	1212	40,03	10,59	40	7,5	4287
89,5 % КЕК Т, 10 % турбинное масло, 0,5 % пластификатор	1184	38,81	10,85	166	7	4366
89,5 % КЕК Т, 10 % замасленная и замазученная смесь, 0,5 % пластификатор	1223	38,93	10,83	63	6,5	4313
89,5 % КЕК Т, 10 % водонефтяная эмульсия, 0,5 % пластификатор	1201	39,80	10,64	38	5	4261

### 2.3. Оценка стабильности органоводоугольных топливных композиций

Важной характеристикой топливной суспензии на основе измельченных углей является её структурная (сегментарная или седиментационная) стабильность [17, 37, 48]. Топливо принято называть стабильным [17, 37, 48], если оно сохраняет гомогенность, не расслаивается на фазы в течение заданного временного интервала. Выпадение твердых частиц в осадок (седиментация), расслоение структуры суспензии на водную, масляную фазы является нежелательным явлением, поскольку создает неблагоприятные условия для трубопроводного транспорта суспензии, а также её длительного хранения и последующего сжигания.

В настоящее время к числу наиболее известных способов оценки стабильности ВУТ и ОВУТ можно отнести метод расслоения [105–108], метод проникновения стеклянного стержня [109–111] и метод просвечивания [112,113].

Оценка сегментарной стабильности топливной суспензии, определяемая методом расслоения [105–108], заключается в измерении объема слоя отделившейся от основной массы связки при хранении топливной суспензии. При этом вычисляется один из следующих показателей:

1) показатель устойчивости [105,106]:

$$Y_1 = \frac{V_c}{V_0},$$

где  $V_0$ ,  $V_c$ , соответственно, объем залитого в цилиндр состава и объем отделившейся со временем связки.

2) массовая доля [107]:

$$\gamma = \frac{w_2 - w_0}{w_1 - w_0},$$

где  $w_1$  – начальная масса образца вместе с мерным цилиндром;  $w_2$  – масса твердой (более темной) связки вместе с мерным цилиндром;  $w_0$  – масса мерного цилиндра.

3) средняя скорость сегментации [108]:

$$r = \frac{\alpha_1 \cdot (c_0 - c_1)}{t \cdot \alpha_0 (100 - c_0)} \cdot 100 \%,$$

где  $\alpha_0$  – начальная масса образца;  $\alpha_1$  – масса жидкой связки;  $c_0$  – начальная концентрации угля;  $c_1$  – концентрация угля в жидкой связке;  $t$  – время выдержки образцов.

Еще одним часто используемым в экспериментальных исследованиях методом оценки устойчивости водоугольных суспензий является метод с использованием стеклянного (либо металлического) стержня (диаметром  $d=4-5$  мм, весом  $m=20$  г) [109–111]. Данная методика заключается в том, что испытуемый образец заливается в мерный цилиндр и выдерживается в течение 72 часов, после чего стеклянному стержню дают самопроизвольно опуститься с поверхности суспензии на дно цилиндра. В суспензиях с хорошей стабильностью расслоения не происходит, и стержень легко может достигнуть дна цилиндра. Чем хуже стабильность суспензии, тем хуже проникновение стержня в твердый слой осадка. При этом рассчитывается коэффициент проникновения:

$$\gamma = \frac{d}{d_t} \cdot 100 \%,$$

где  $d$  – расстояние, на которое переместился стержень;  $d_t$  – максимальное расстояние, на которое может переместиться стержень. Данный показатель изменяется в пределах от 0 до 100 % [109, 110].

В основе метода просвечивания лежит анализ интенсивности прошедшего света по всей длине сосуда [112]. При этом спектр пропускания света может быть снят непрерывно как вдоль всего образца, так и в одной его точке. При реализации метода просвечивания, как правило, используется

анализатор дисперсии стабильности, предоставляющий объективную классификацию и количественную характеристику процесса расслоения, определяющий стабильность суспензий и время хранения.

Среди описанных выше методов оценки стабильности ВУТ и ОВУТ наиболее подходящим для проведения экспериментов является метод расслоения, так как рассматриваемые в исследованиях составы обладают малой вязкостью. В случае применения метода стального стержня затруднительно адекватно оценить стабильность суспензий исходя из того, что стержень полностью опускается на дно цилиндра для всех рассматриваемых составов. Основным недостатком метода просвечивания является необходимость в приобретении специализированного дорогостоящего оборудования (анализатора дисперсии стабильности).

Проводимая в исследовании оценка стабильности топливных композиций основывалась на измерении высоты отделившейся от основной массы топлива прозрачного слоя (рисунок 2.3.1). Использовались мерные цилиндры емкостью 50 мл с ценой деления 1 мл, заполняемые анализируемым составом ОВУТ. Проводилось изменение объема слоя отделившегося жидкого компонента от основной массы топлива. Каждый час выполнялись замеры высоты слоя отделившегося более прозрачного жидкого компонента (рисунок 2.1). Показатель устойчивости ( $Y_1$ ) вычисляли по формуле  $Y_1 = H_c / H_0$ , где  $H_0$  и  $H_c$ , – высоты слоёв исходного образца и отделившейся водяной связки, соответственно (рисунок 2.3.1). В течение 15 суток значения показателя устойчивости, как правило, варьировались в диапазоне 0,01–0,02.

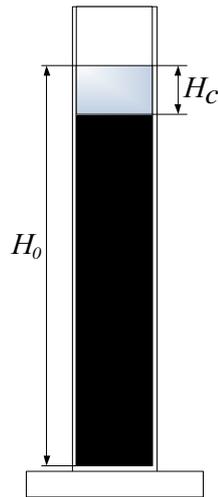


Рисунок 2.3.1. Схема определения показателя устойчивости органоводоугольной топливной композиции

Вязкость топливных композиций определялась с использованием ротационного вискозиметра ЭАК-1М. Значения эффективной вязкости, как правило, варьировались в диапазоне 0,18–0,25 Па·с.

Как показали наблюдения, топлива, приготовленные при помощи гомогенизатора, характеризуются лучшей стабильностью по сравнению с топливами, смешивание компонентов которых осуществлялось по кавитационной технологии с применением шаровой барабанной мельницы (рисунок 2.3.2).

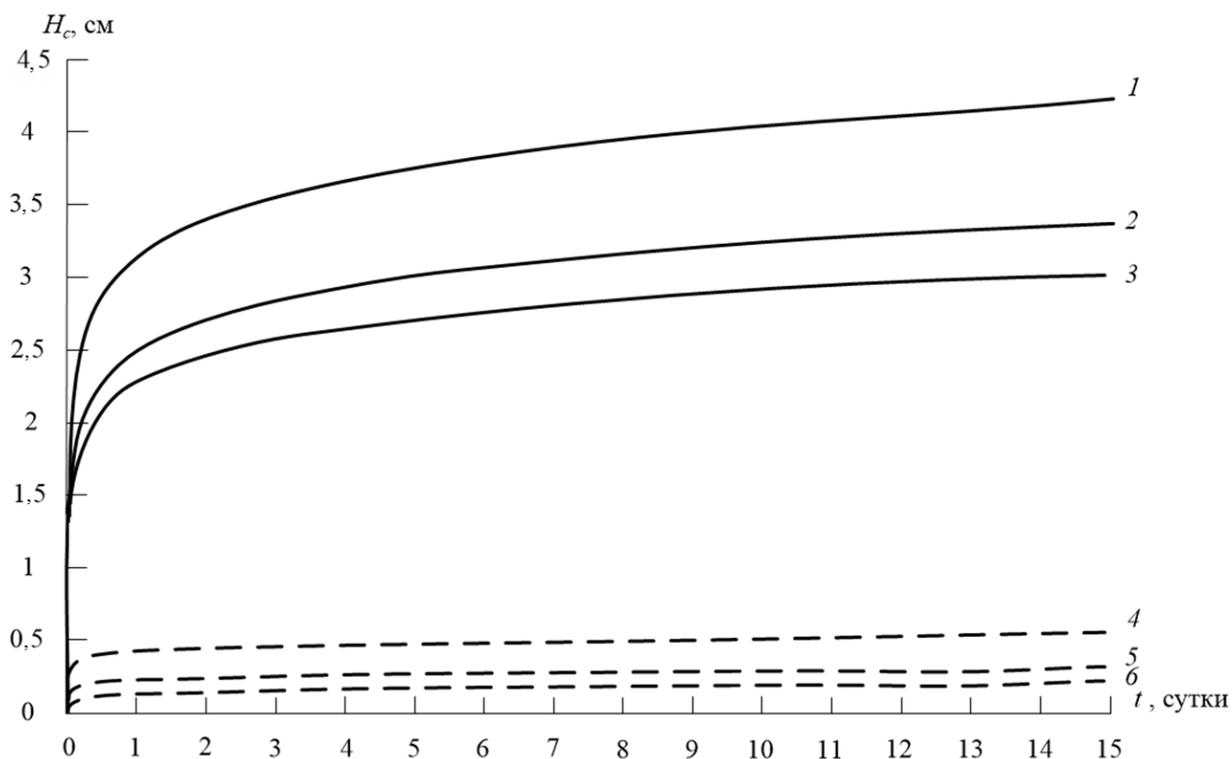


Рисунок 2.3.2. Экспериментальные значения толщины расслоения для разных составов ОВУТ: 1 – 90 % КЕК К (влажный), 10 % отработанное трансформаторное масло (шаровая барабанная мельница); 2 – 90 % КЕК К (влажный), 10 % отработанное турбинное масло (шаровая барабанная мельница); 3 – 90 % КЕК К (влажный), 10 % отработанное автомобильное масло (шаровая барабанная мельница); 4 – 90 % КЕК К (влажный), 10 % отработанное трансформаторное масло (гомогенизатор); 5 – 90 % КЕК К (влажный), 10 % отработанное турбинное масло (гомогенизатор); 6 – 90 % КЕК К (влажный), 10 % отработанное автомобильное масло (гомогенизатор)

Оценивая сегментарные, агрегативные и реологические свойства композиций ОВУТ, полученных с применением шаровой барабанной мельницы, можно отметить следующее. Заметное расслоение топлив начиналось через сутки после приготовления. Составы расслаивались в течение 3–5 суток, образуя водяную связку на поверхности ВУТ. Суспензии, приготовленные с применением гомогенизатора и добавлением отработанных автомобильного, трансформаторного, турбинного масел, были более стабильными, агрегативно устойчивыми (толщина образовавшейся

связки значительно ниже, чем в выше описанном методе приготовления, и не превышала 0,5 мм).

Вязкость и стабильность водоугольных суспензий – важные свойства ОВУТ и ВУТ, обеспечивающие оптимальные условия их транспортировки и сжигания. В работах [115, 116] исследовались реологические свойства водоугольных суспензий с добавлением разных пластификаторов: мазута, гумата натрия, карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ) и лигносульфонатов (ЛСТ). Установлено, что стабильность суспензий с добавками ЛСТ и КМЦ не превышает 20 суток, мазута – не более 10 суток. Применение гумата натрия, как реагента-пластификатора, позволило создать водоугольные суспензии с пространственной сетчатой структурой, не расслаивающейся в течение 30 суток. Сопоставление данных проведенных экспериментальных исследований с результатами [115, 116] позволяет сделать вывод о том, что удовлетворительные показатели сегментарной стабильности топливных композиций могут быть обеспечены с применением широко распространенных (и более экономичных по расходу энергии) гомогенизаторов.

#### **2.4. Экспериментальный стенд и методика исследования процессов зажигания и горения капель органоводоугольных топлив**

На рисунке 2.4.1 представлена схема стенда, используемого для исследования процессов низкотемпературного (максимальная температура окислителя – 1000 К) зажигания и горения одиночных капель ОВУТ потоке окислителя.

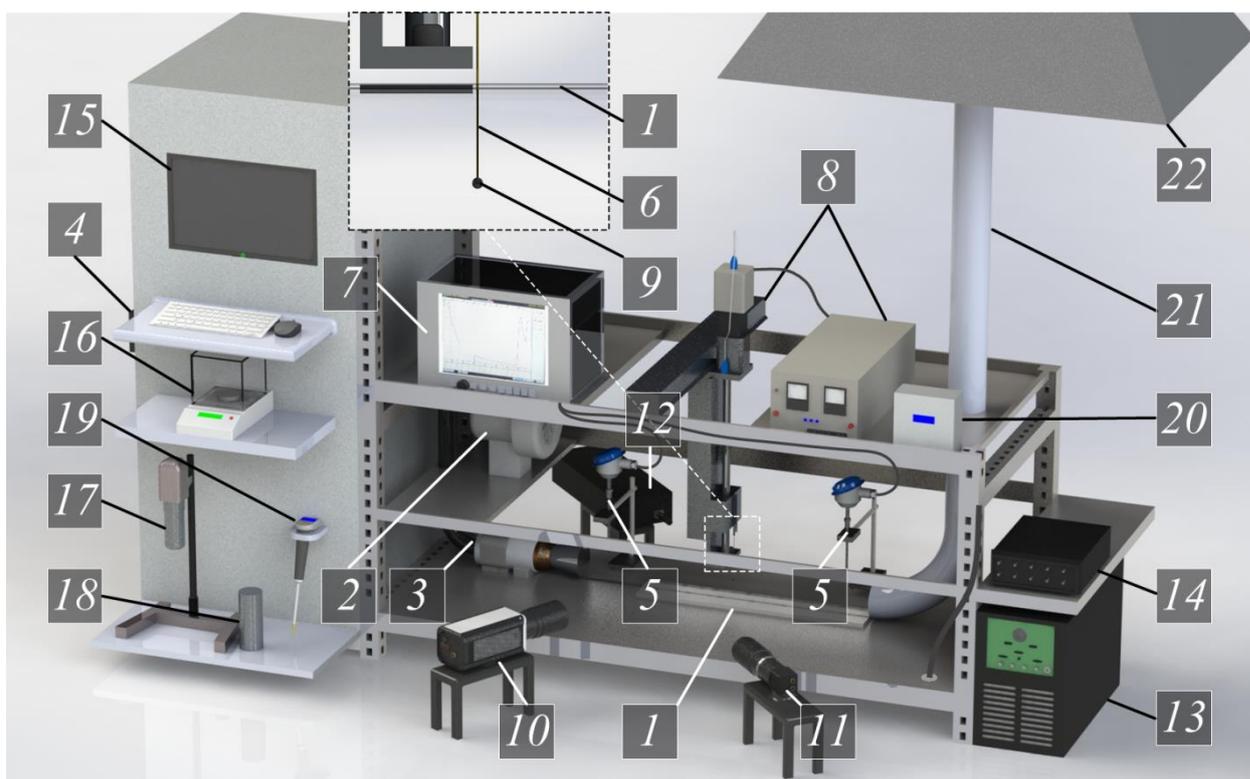


Рисунок 2.4.1. Схема экспериментального стенда: 1 – цилиндрический канал из кварцевого стекла; 2 – нагнетатель; 3 – воздушнонагреватель; 4 – пульт управления; 5 – термопары; 6 – держатель (или малоинерционная термопара); 7 – регистратор температуры; 8 – координатный механизм; 9 – капля ОБУТ; 10 – высокоскоростная видеокамера; 11 – кросскорреляционная видеокамера; 12 – лазер; 13 – генератор лазерного излучения; 14 – синхронизатор лазера и кросскорреляционной видеокамеры; 15 – персональный компьютер; 16 – аналитические весы; 17 – гомогенизатор; 18 – емкость с приготовленной топливной композицией; 19 – электронный дозатор; 20 – газоанализатор; 21 – воздуховод; 22 – вытяжная вентиляция

В экспериментальном стенде (рисунок 2.4.1) можно выделить несколько характерных блоков и узлов: для формирования потока разогретого окислителя, генерации капель ОБУТ, помещения капли топлива в камеру сгорания и контроля интегральных характеристик процессов зажигания и горения.

**Формирование потока разогретого окислителя.** Внутри полого стеклянного цилиндра 1 (внутренний диаметр 0,1 м, длина 1 м),

выполненного из жаропрочного кварцевого стекла, формировался поток разогретого воздуха при помощи нагнетателя воздуха 2 (частота 50 Гц, мощность 0,25 кВт, расход воздуха не более 1200 л/мин, статическое давление 10,8 кПа) и нагревателя 3 (напряжение 3х400 В, мощность 11 кВт, максимальная температура воздуха на выходе 1300 К, максимальная температура воздуха на входе 338 К, регулятор температуры воздуха на выходе, устройство плавной регулировки мощности нагрева, минимальный расход воздуха 1000 л/мин). Параметры воздушного потока (температура и скорость движения) на выходе нагревателя задавались при помощи пульта управления 4.

**Генерация капель ОБУТ.** Формирование одиночной капли топлива заданного размера осуществлялось при помощи электронного дозатора Finnpipette Novus (минимальный и максимальный дозируемые объемы – 1 мкл и 10 мкл, шаг варьирования – 0,1 мкл) с использованием различных насадок.

**Помещение капли топлива в камеру сгорания.** В проведенных экспериментах камерой сгорания являлся полый стеклянный цилиндр (рисунок 2.4.1, позиция 1), внутри которого формировался поток разогретого окислителя. В стенке цилиндра 1 вдоль оси его симметрии выполнены 3 технологических отверстия (диаметром 10 мм). Два крайних отверстия использовались для установки в потоке окислителя термопар 5. Центральное отверстие предназначалось для помещения одиночной капли ОБУТ в поток разогретого окислителя.

До взаимодействия с потоком сгенерированная капля ОБУТ (рисунок 2.4.2) подвешивалась на спай малоинерционной термопары 6 (номинальная статическая характеристика – платинородий-платина, диапазон измеряемых температур 273–1873 К, систематическая погрешность  $\pm 1$  К, инерционность не более 1 с, диаметр спаия 0,1 мм).

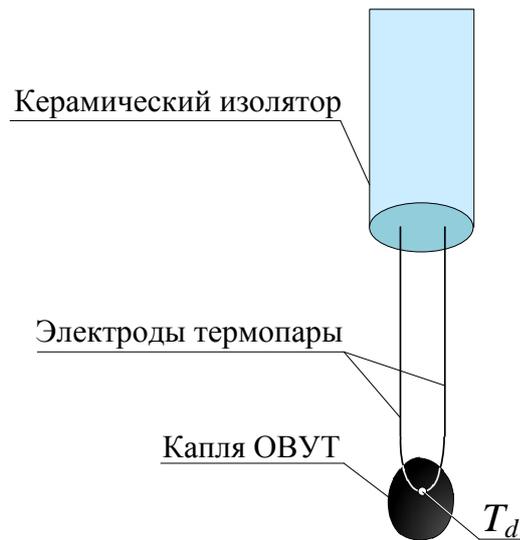


Рисунок 2.4.2. Капля ОВУТ на спае термопары

Термопара *б* с подвешенным образцом (рисунок 2.4.2) устанавливалась в моторизированный координатный механизм, который затем опускал каплю ОВУТ в поток окислителя и фиксировал ее на оси симметрии цилиндра *1* (рисунок 2.4.3). Скорость перемещения координатного механизма составляла 0,15–0,2 м/с. Выбранный диапазон скорости оптимален для сохранения целостности капли в процессе ее помещения в камеру сгорания.

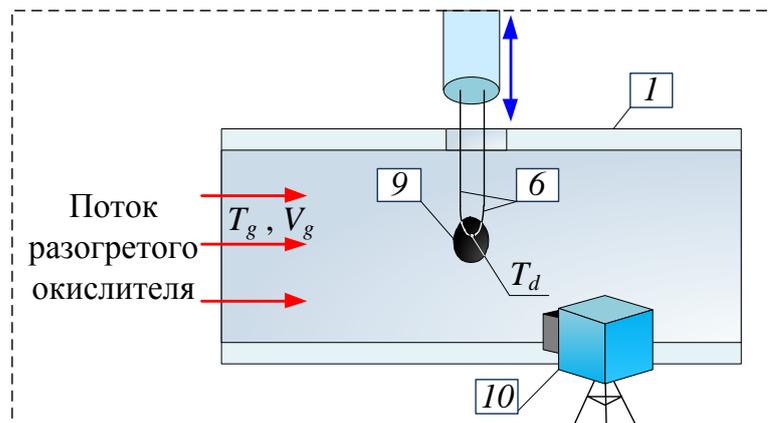


Рисунок 2.4.3. Капля ОВУТ в камере сгорания: *1* – цилиндрический канал из кварцевого стекла; *б* – держатель (или малоинерционная термопара); *9* – капля ОВУТ; *10* – высокоскоростная видеокамера

Ниже приведен перечень физических величин, характеризующих исследуемый процесс, и сведения о средствах и методах для их измерения.

**Температура окислителя ( $T_g$ )** измерялась термоэлектрическими преобразователями 5 (рисунок 2.4.1) со следующими характеристиками: номинальная статическая характеристика – хромель-алюмель, диапазон измеряемых температур 273–1373 К, систематическая погрешность  $\pm 3$  К, инерционность не более 10 с. Для установки термоэлектрических преобразователей в потоке окислителя использовались два технологических отверстия (диаметр 10 мм) в стенке цилиндра 1 (рисунок 2.4.1). Датчики 5 (рисунок 2.4.1) устанавливались таким образом, чтобы их чувствительные элементы находились на оси симметрии цилиндра 1 (рисунок 2.4.1).

**Скорость движения потока окислителя ( $V_g$ )** измерялась анемометром UnionTest AN110 (погрешность  $\pm 3$  %, дискретность измерения 0,1 м/с) при  $T_g \approx 300$  К. Значение  $V_g$  варьировалось в диапазоне 0,5–5 м/с.

**Объемная концентрация кислорода воздуха** (после прохождения нагревателя) определялась при помощи газоанализатора Testo 340 (погрешность  $\pm 0,2$  %, дискретность измерения 0,01 %). В широких диапазонах варьирования значений скорости движения и температуры потока воздуха концентрация окислителя составляла около 20,5 % (наиболее типичная концентрация кислорода для энергетических установок).

**Масса одиночной капли ОБУТ ( $m_d$ )** определялась при помощи аналитических лабораторных весов ViBRA HT 84RCE (дискретность измерения –  $10^{-5}$  г).

**Размер одиночной капли ОБУТ.** Радиус ( $R_d$ ) капель ОБУТ измерялся с использованием высокоскоростной камеры 10 (рисунок 2.4.1) Phantom Miro M310 (скорость съемки более 3000 кадров в секунду при разрешении 1280x800 пикселей) и программного обеспечения Tema Automotive. По начальным изображениям капель (до взаимодействия с потоком разогретого воздуха) вычислялись четыре размера в различных сечениях (рисунок 2.4.4). По среднему значению определялся радиус капли  $R_d$ . Систематическая погрешность определения  $R_d$  с соответствующими разрешениями видеокамер не превышала 4 %.

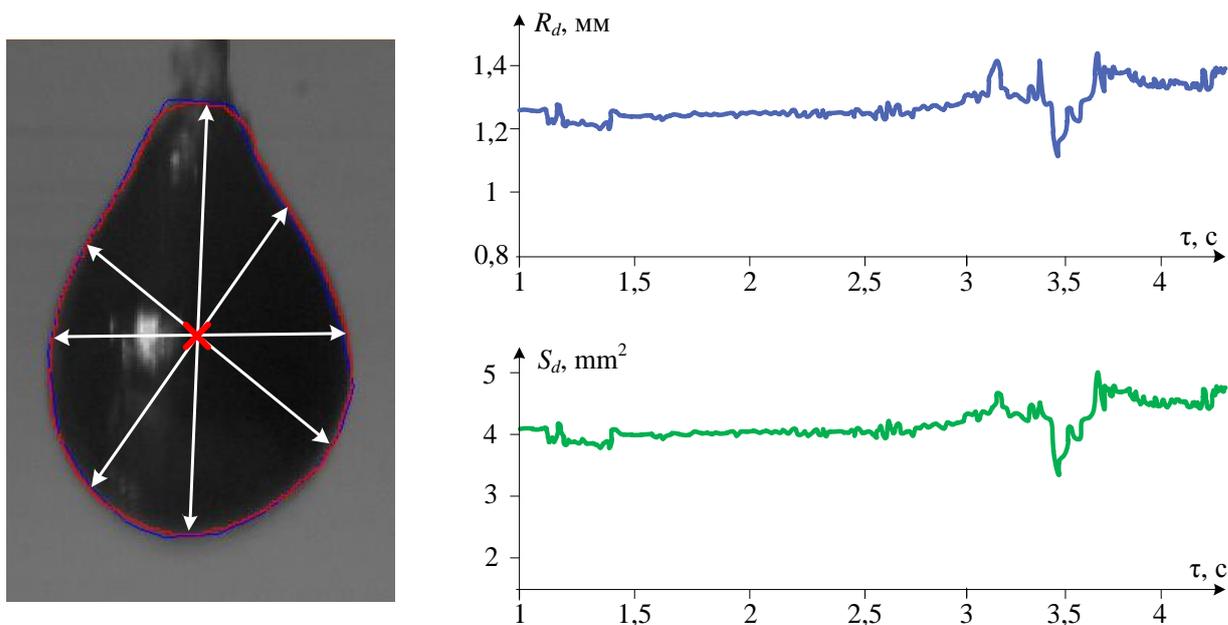


Рисунок 2.4.4. Внешний вид капли топлива (на начальной стадии нагрева в потоке окислителя) после обработки видеogramмы программным обеспечением Tema Automotive с иллюстрацией процедуры контроля размера (условного среднего радиуса)  $R_d$  и площади поверхности  $S_d$

**Температура в центре одиночной капли ОБУТ ( $T_d$ )** измерялась при помощи платина-платинородиевой термопары (диапазон измеряемых температур 273–1873 К, систематическая погрешность  $\pm 1$  К, инерционность не более 1 с) (рисунок 2.4.1, позиция б). Измерялось значение  $T_d$  на границе «спай термопары – капля ОБУТ». В первом приближении значение  $T_d$  можно считать температурой в центре капли. В каждом эксперименте контролировался процесс обволакивания спая термопары б пленкой ОБУТ. Допускаемое отклонение по толщине пленки относительно среднего значения принималось не более 10 %.

**Характеристики процессов зажигания и горения одиночной капли ОБУТ и их определение с использование программного параметра Threshold.** В качестве параметров, характеризующих исследуемые процессы зажигания и горения одиночных капель ОБУТ, выбраны: **время задержки зажигания одиночной капли ОБУТ ( $\tau_d$ ); время полного сгорания капли ОБУТ ( $\tau_c$ ).** Используемый в исследовании подход, основанный на

размещении одиночной капли топливной суспензии, закрепленной на спае малоинерционной платина-платинородиевой термопары (диапазон измеряемых температур 273–1273 К, систематическая погрешность  $\pm 10$  К, инерционность 1 с, диаметр спае 0,1 мм), позволяет регистрировать изменение температуры на границе «спай термопары – топливо». В первом приближении данный параметр ( $T_d$ ) можно считать температурой в центре капли. Времена задержки зажигания и полного сгорания капли определялись по зависимости  $T_d$  от времени (типичный пример такого тренда приведен на рисунке 2.4.5).

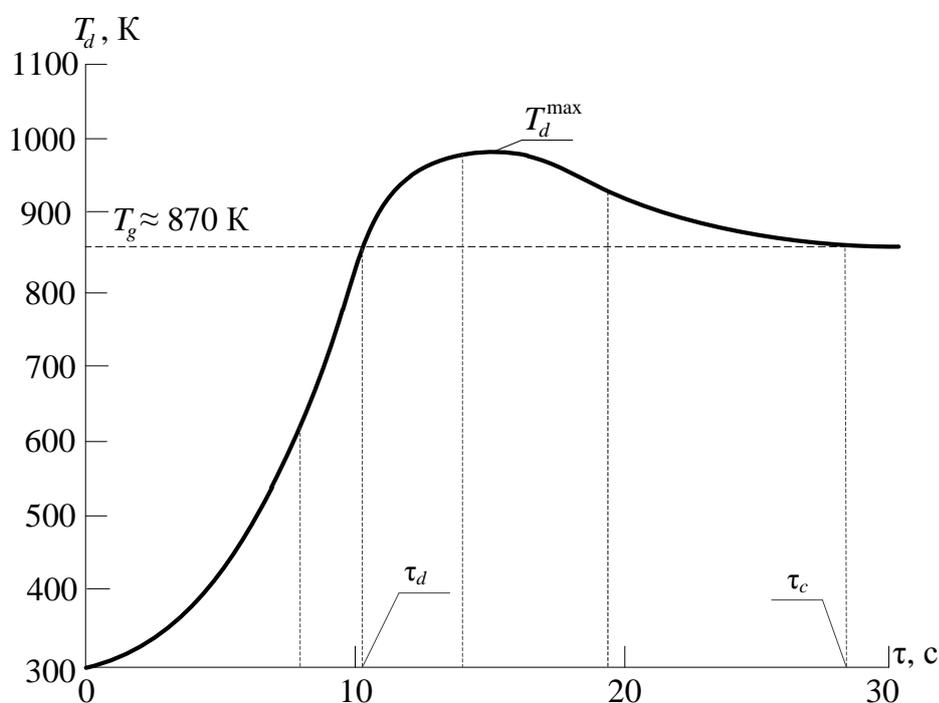


Рисунок 2.4.5. Изменение температуры в центре капли ОБУТ (90 % КЕК Т, 10 % отработанное компрессорное масло) в процессе ее взаимодействия с потоком разогретого окислителя

Под временем задержки зажигания  $\tau_d$  принимался интервал от момента ввода капли ОБУТ в поток окислителя до момента выполнения критерия зажигания, заключающегося в одновременном удовлетворении условий:  $T_d \geq T_g$  и  $dT_d/d\tau \geq 10$  К/с. Параметр  $\tau_c$  – интервал от момента начала взаимодействия капли ОБУТ с разогретым потоком окислителя до полного

выгорания образца, которое характеризовалось отклонением  $T_d$  относительно установившегося значения (при  $\tau \rightarrow \infty$ ) не более чем на  $0.05T_d^{\max}$  ( $T_d^{\max}$  – максимальная температура капли в течение процесса горения).

Следует отметить, что помимо малоинерционной термопары, в качестве держателя для капли ОБУТ использовались керамический стержень и металлическая проволочка. В этих случаях регистрация изменения температуры в центре капли, и соответственно, использование описанных выше критериев зажигания не представлялись возможными. Задача определения времени задержки зажигания и полного сгорания в этом случае решалась с применением специализированных алгоритмов программного обеспечения Tema Automotive, позволяющего отслеживать интенсивность свечения капли ОБУТ. Для этого использовался программный параметр Threshold, позволяющий выставлять в регистрационной области градиент цветопередачи цветовой модели RGB. В соответствии с этой цветовой моделью значение градиента 255 соответствует белому цвету, значение градиента 0 – черному. Принималось, что горению образца соответствовал диапазон RGB 220–255. Временем задержки зажигания  $\tau_d$  считался интервал от момента начала взаимодействия капли ОБУТ с потоком разогретого окислителя до достижения параметра Threshold значения 220 в любой точке поверхности образца топлива. Характерный параметр  $\tau_c$  представлял время от момента начала взаимодействия капли ОБУТ с разогретым потоком окислителя до момента окончания горения (т.е. при достижении параметра Threshold значения менее 220 по всей поверхности капли ОБУТ). Рисунок 2.4.6 иллюстрирует использование цветовой модели RGB программного пакета Tema Automotive для регистрации зажигания.

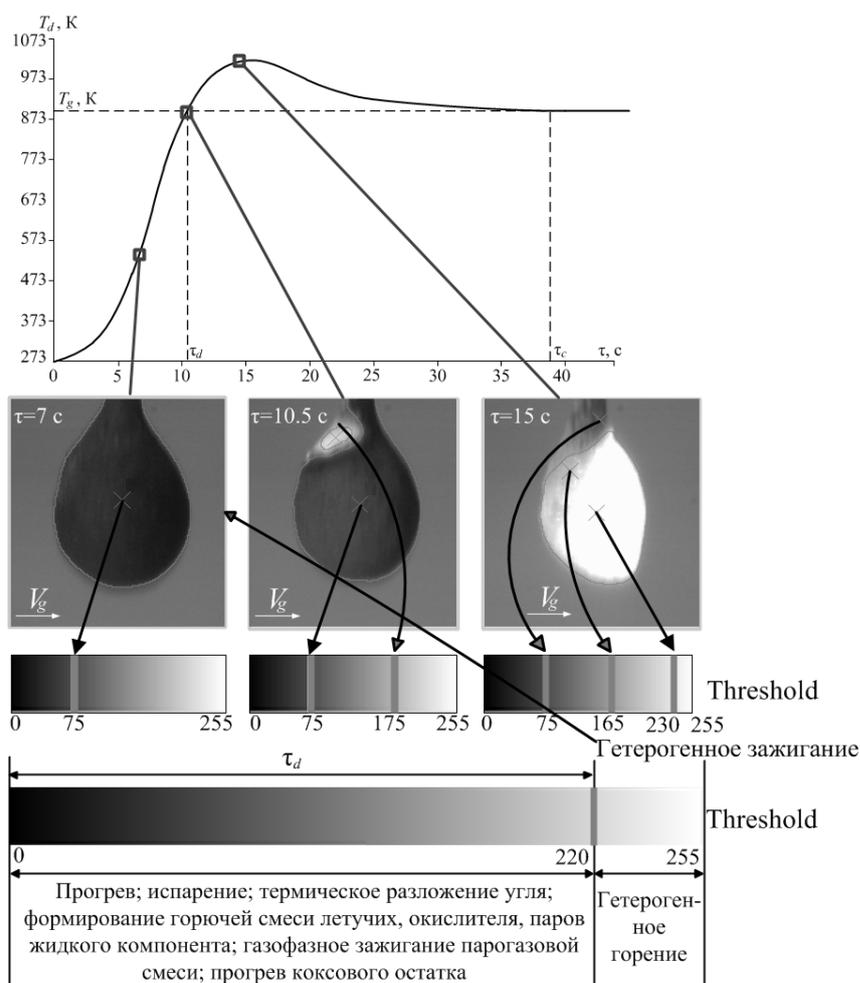


Рисунок 2.4.6. Изменение температуры в центре капли ОБУТ с иллюстрацией использования цветовой модели RGB для регистрации зажигания

Проведена серия экспериментов при идентичных условиях по определению времен  $\tau_d$  и  $\tau_c$  двумя описанными методами: (1) по интенсивности свечения капли ОБУТ с использованием параметра Threshold; (2) по изменению температуры в центре капли с использованием критериев  $T_d \geq T_g$  и  $dT_d/d\tau \geq 10$  K/c. На основании этого сравнения сделано заключение о правомерности определения времени задержки зажигания и полного сгорания капли ОБУТ с помощью параметра Threshold программного комплекса Tema Automotive.

Систематические погрешности определения времен  $\tau_d$  и  $\tau_c$  не превышали 3%. Случайные погрешности для серий проведенных экспериментов ограничивались в диссертационных исследованиях также 3%.

При превышении этого отклонения результаты таких экспериментов исключались из рассмотрения и последующего анализа.

Для установления особенностей **обтекания потоком окислителя капли ОБУТ и вычисления скорости потока окислителя ( $V_g$ )** применялись импульсный лазер *12* с генератором лазерного излучения *13*, кросскорреляционная видеокамера *11*, синхронизатор *14*, персональный компьютер *15*, а также специализированное программное обеспечение Actual Flow с методами Particle Image Velocimetry (PIV) и Stereo PIV. Для этого на вход канала *1* подавались специализированные трассирующие частицы (порошок диоксида титана) размерами 80–100 нм. Трассеры с потоком воздуха двигались в полости канала *1*. В процессе движения трассеры совместно с потоком воздуха обтекали каплю ОБУТ *9*, подвешенную на термопаре *6*. Напротив обтекаемой потоком капли под углом  $90^\circ$  относительно друг друга устанавливались кросскорреляционная камера *11* и твердотельный лазер *12*.

Измерение мгновенного поля скорости потока окислителя в окрестности капли ОБУТ основано на регистрации перемещения трассирующих частиц за фиксированный интервал времени. Трассирующие частицы многократно освещались лазером. Образы частиц регистрировались на цифровую кросскорреляционную высокоскоростную видеокамеру. Последующая обработка изображений позволяла рассчитать смещения частиц за время между вспышками источника света и скорости трассеров, соответствующие скорости потока воздуха.

PIV метод применялся для установления специфических особенностей обтекания потоком окислителя отличающихся по форме капель ОБУТ (рисунок 2.4.7).

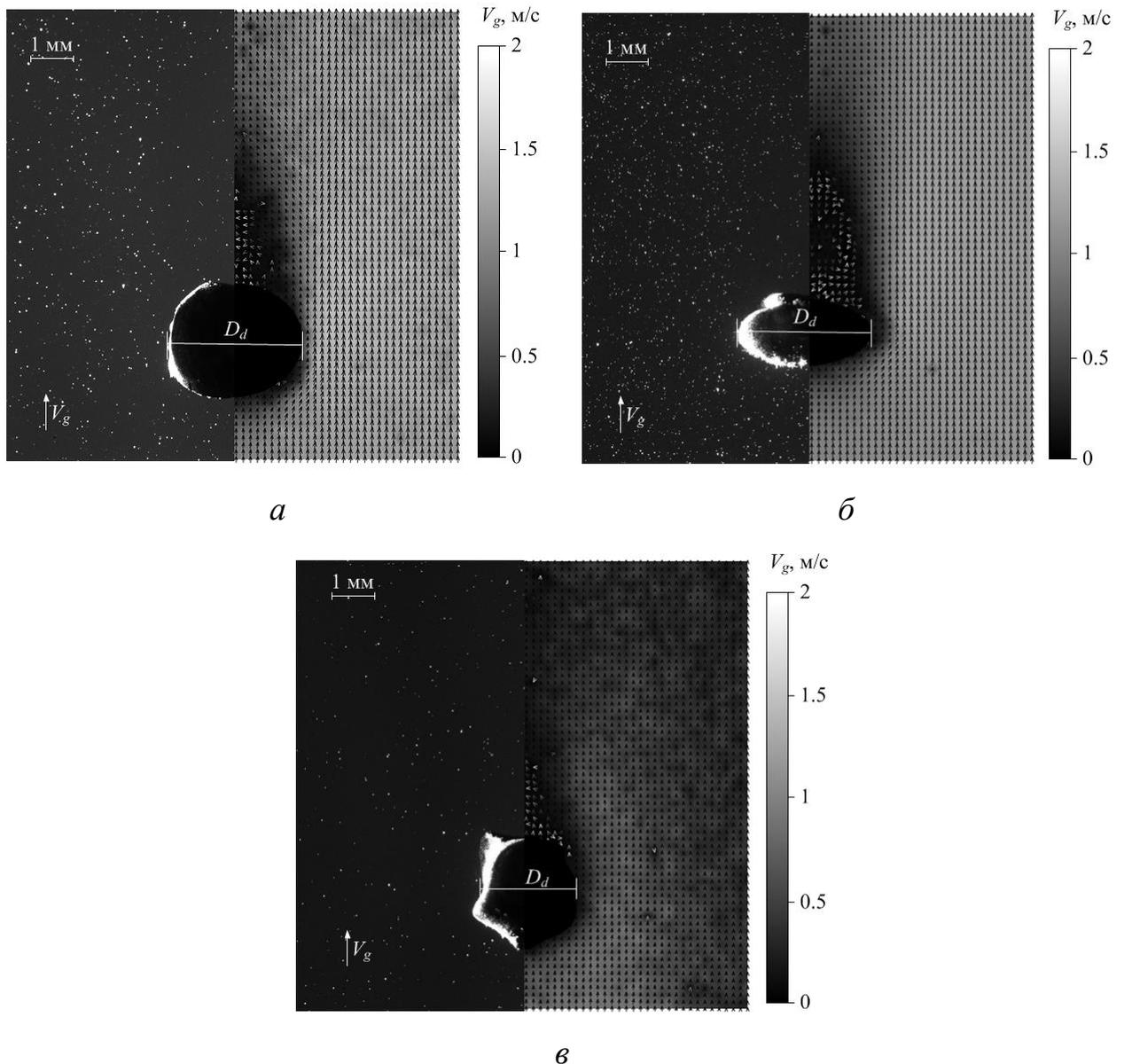


Рисунок 2.4.7. Внешний вид частицы ОБУТ (левая часть) и распределение скорости потока воздуха (правая часть) в окрестности частицы ОБУТ (95 % КЕК (влажный) на основе каменного угля марки К, 5 % трансформаторное масло отработанное) в форме: *a* – сферы, *б* – эллипсоида, *в* – неправильного многогранника

Как видно из рисунка 2.4.7, распределение скоростей потока в окрестности капли ОБУТ различается в зависимости от конфигурации поверхности последней. В случае сфер и эллипсоидов поток окислителя обтекал частицу практически без образования вихрей в торцевой части. За частицей такие вихри формировались регулярно. В случае частиц

неправильной формы (многогранника) процесс взаимодействия с окислителем более сложный. Поток окислителя при натекании на соответствующие выступы с поверхности частицы (вершины многогранника) разделяется существенно неравномерно.

Проведенные эксперименты с каплями ОВУТ разных форм (сфера, эллипсоид, неправильный многогранник) показали, что конфигурация их поверхности влияет на времена задержки зажигания капли (рисунок 2.4.8). По этой причине в диссертационном исследовании выдерживались сферические формы капель ОВУТ.

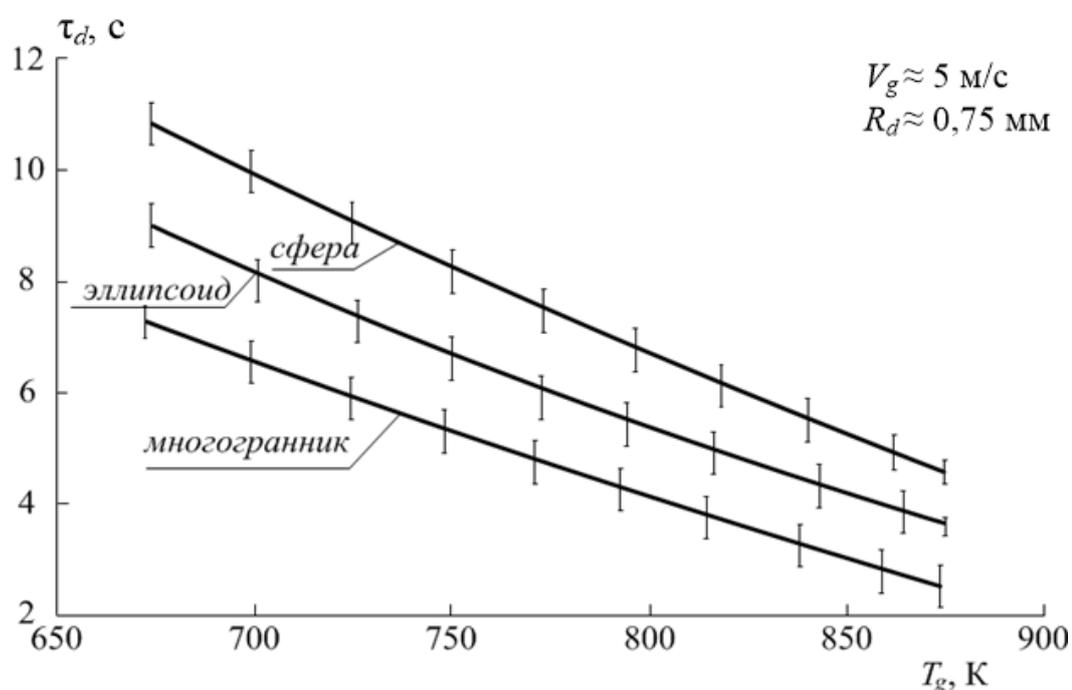


Рисунок 2.4.8. Зависимость времени задержки зажигания частицы ОВУТ (95 % КЕК (влажный) на основе каменного угля марки К, 5 % автомобильное масло отработанное) от температуры окислителя

Для контроля скоростей движения потока окислителя также применялся метод Stereo PIV. Этот метод является расширением метода PIV и позволяет измерять трехкомпонентные поля скорости трассеров. Его реализация отличается от метода PIV более продолжительной и сложной процедурой настройки и калибровки измерительной системы. Для этих целей использовалась калибровочная мишень. Кронштейн для перемещения

последней имел шаг около 0,02 мм. При реализации метода Stereo PIV одновременно использовались две кросскорреляционные камеры, расположенные под углом от 30 до 60 градусов к плоскости светового ножа лазера. Использовались кросскорреляционные алгоритмы обработки данных. Применение метода Stereo PIV позволило установить практически идентичные профили скорости трассеров в нескольких продольных сечениях канала *I*. Как следствие, для достоверного определения скорости  $V_g$  достаточно применение метода PIV, реализующего измерение скорости газа или жидкости в плоских сечениях регистрационной области. Аналогичные эксперименты проводились при помещении каплей ОБУТ в поток окислителя на керамической нити или металлической проволочке (вместо малоинерционной термопары). Таким образом, разработанный стенд отличается от известных [90, 91, 94–1] возможностями определения особенностей обтекания капли топлива потоком окислителя, а также контроля скорости потока разогретого до 600–1000 К воздуха. Кроме того, предложенная методика позволяет регистрировать моменты зажигания и завершения горения капли топливной суспензии с применением цветовой модели RGB по видеозаписи эксперимента.

### **Выводы по второй главе**

1. Разработана схема и смонтирован экспериментальный стенд для исследования процессов зажигания и горения одиночной капли органоводоугольной топливной композиции, закрепленной в потоке разогретого воздуха с использованием средств высокоскоростной видеорегистрации и панорамного оптического метода Particle Image Velocimetry.

2. Разработана и обоснована новая методика регистрации времени задержки зажигания и полного сгорания одиночной капли ОБУТ по видеозаписи эксперимента с использованием программного обеспечения Tema Automotive и цветовой модели RGB.

3. Разработанный программно-аппаратный комплекс позволял регистрировать и вычислять большую группу определяющих параметров: температура и скорость потока окислителя, размеры капель топлива, их времена задержки зажигания и полного сгорания, температуры в центре и на поверхности капли топлива и др.

4. Погрешности определения интегральных характеристик зажигания ОВУТ в настоящей работе существенно меньше, чем в известных работах других авторов. Предложенный в диссертации подход регистрации характеристик зажигания ОВУТ используется коллективами других авторов (за последние 2 года опубликованы несколько статей в высокорейтинговых журналах со ссылками на публикации автора диссертации).

5. Экспериментальный стенд и методику исследований можно считать унифицированными по отношению к разным компонентным составам ОВУТ, материалу держателя капли топлива и условиям нагрева.

### ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ЗАЖИГАНИЯ КАПЕЛЬ ОРГАНОВОДОУГОЛЬНЫХ ТОПЛИВНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

#### 3.1. Стадии зажигания и последующего горения капель органоводоугольных топлив

Процессы зажигания и последующего горения одиночной капли ОВУТ характеризуются наличием нескольких последовательных (но в тоже время взаимосвязанных между собой) стадий [117]. Значительное влияние на их протекание оказывают многокомпонентность состава ОВУТ и, соответственно, отличие свойств (например, теплоты парообразования, температуры кипения и зажигания и др.) жидких горючих и негорючих компонентов. Следует отметить, что процессы зажигания капель различных ОВУТ имеют характеристики, свойственные тому или иному компоненту топлива или их комбинации (например, длительность индукционного периода, максимальная температура горения, время полного сгорания). Однако механизм зажигания капли ОВУТ и взаимосвязь отдельных его стадий являются общими для всех топливных композиций.

Для определения механизма зажигания одиночной капли композиционного жидкого топлива в потоке окислителя исследованы [117–119] несколько составов на основе фильтр-кеков (влажных) и бурого угля (таблица 3.1.1). Кроме того, для сравнения механизма зажигания одиночных капель ОВУТ и ВУТ исследования проведены также для нескольких составов ВУТ (таблица 3.1.1). Характеристики используемых в топливах компонентов приведены в таблицах 2.1.1–2.1.5.

Таблица 3.1.1. Компонентный состав исследованных ВУТ и ОВУТ

№ состава	Относительные массовые концентрации компонентов
1	40 % бурый уголь марки Б1, 60 % вода
2	50 % бурый уголь марки Б2, 50 % вода

3	50 % каменный уголь марки Д, 50 % вода
4	94,5 % КЕК каменного угля марки К, 5 % отработанное автомобильное масло марки Total, 0,5 % пластификатор
5	79 % КЕК каменного угля марки Т, 20 % автомобильное масло отработанное, 1 % пластификатор
6	50 % бурый уголь марки Б2, 39 % вода, 10 % автомобильное масло отработанное, 1 % пластификатор
7	50 % бурый уголь марки Б1, 50 % вода
8	45 % бурый уголь марки Б1, 45 % вода, 10 % нефть

Проведенные эксперименты [117–119] позволили установить типичные стадии зажигания капель для исследованных топливных композиций (таблица 3.1.1). Выделенные в [117–119] закономерности хорошо соответствуют основным стадиям зажигания капель ВУТ [24, 39]. На рисунках 3.1.1–3.1.4 приведены типичные тренды изменения температуры  $T_d$  для капель исследованных составов ВУТ и ОВУТ в процессе их инертного прогрева, зажигания и горения. Также представлены кадры видеogramм, иллюстрирующие установленные стадии реализации этих процессов (приведены соответствующие значения времени от момента начала нагрева капли для возможности сопоставления тренда изменения  $T_d$  и внешнего вида капли топливной композиции).

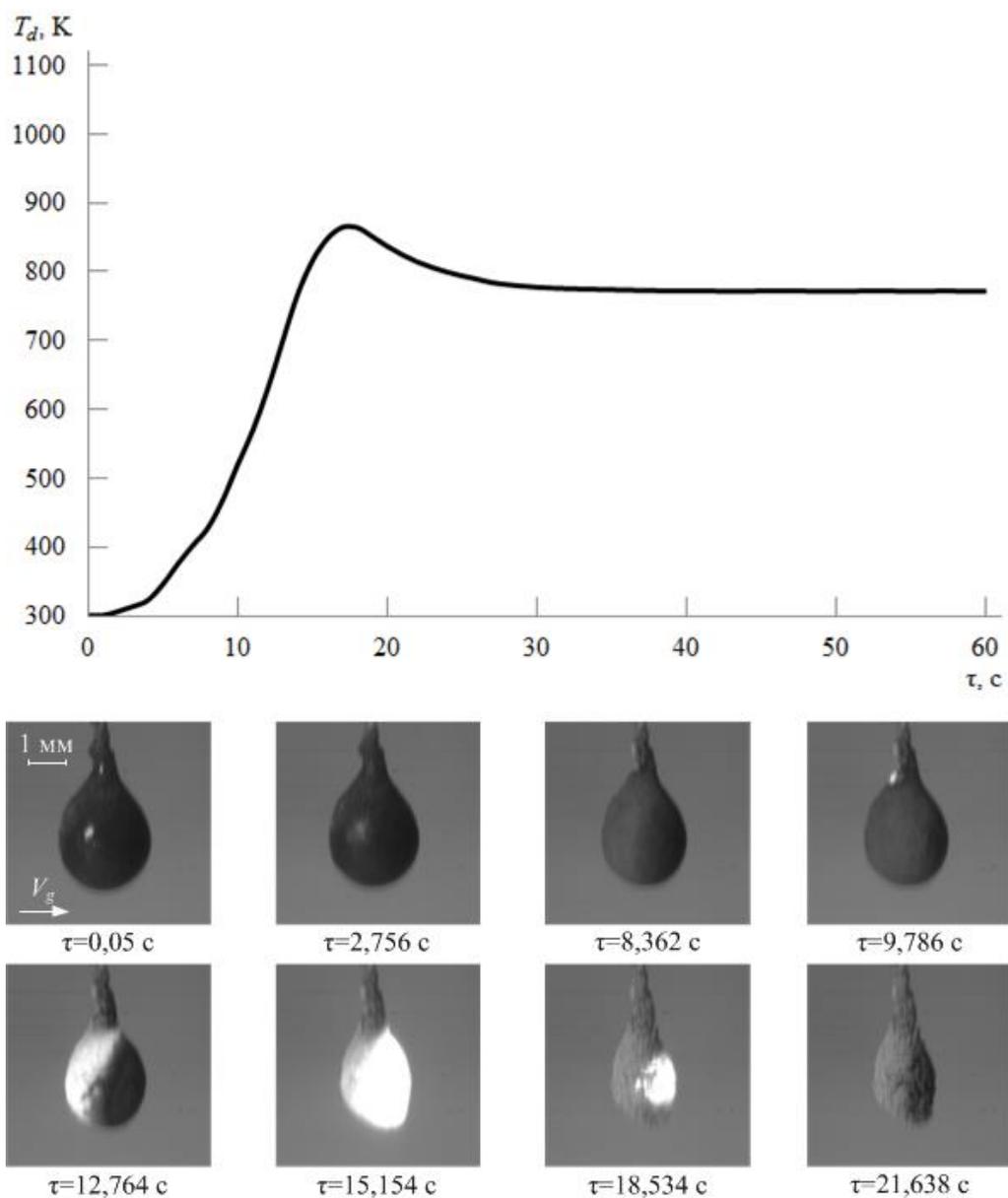


Рисунок 3.1.1. Изменение температуры в капле ВУТ № 1 (таблица 3.1.1) в процессе нагрева при условиях  $R_d \approx 1,25$  мм,  $T_g \approx 750$  К,  $V_g \approx 5$  м/с (с характерными кадрами видеogramм)

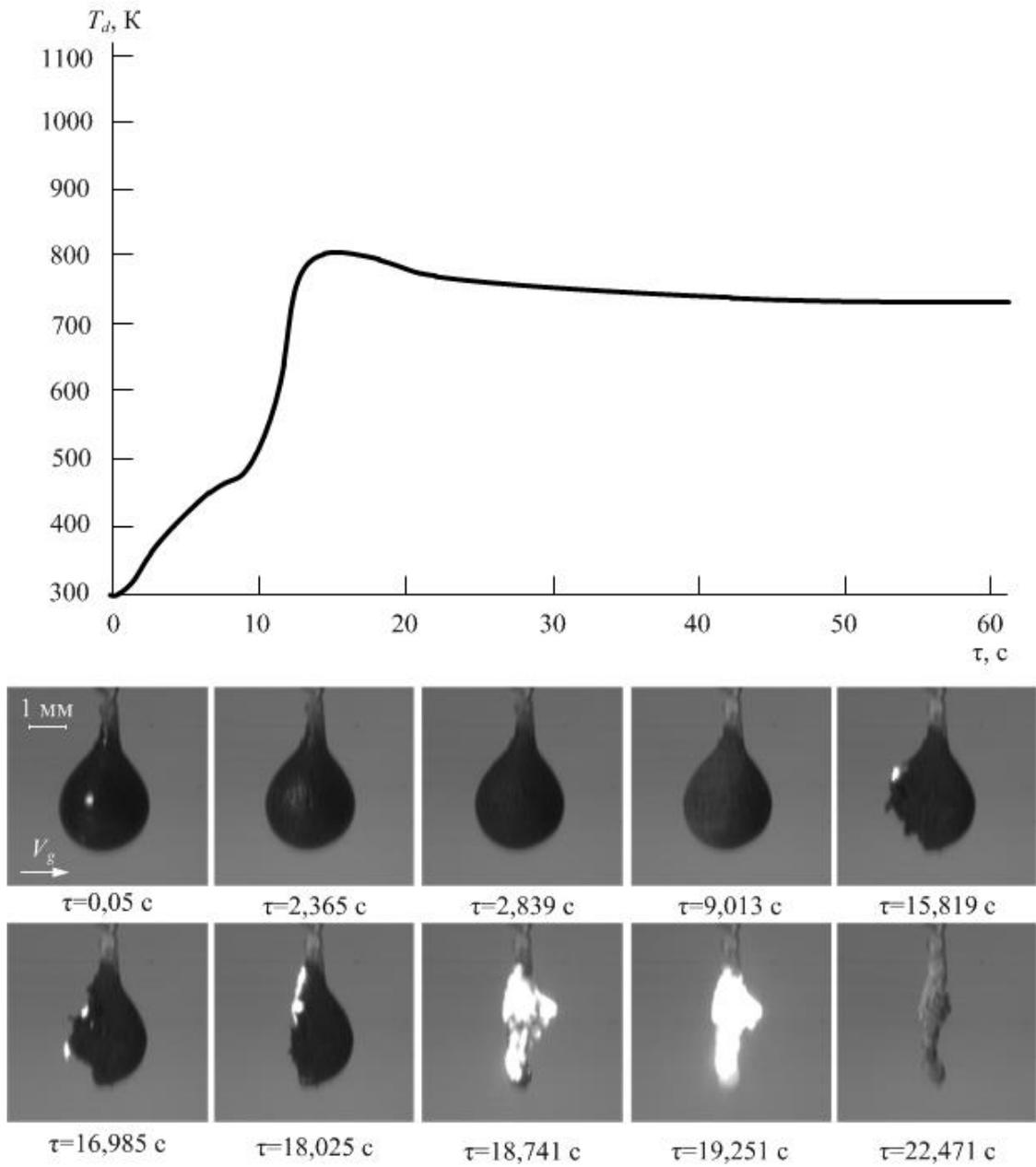


Рисунок 3.1.2. Изменение температуры в капле ВУТ № 2 (таблица 3.1.1) в процессе нагрева при условиях  $R_d \approx 1,25$  мм,  $T_g \approx 750$  К,  $V_g \approx 5$  м/с (с характерными кадрами видеозаписи)

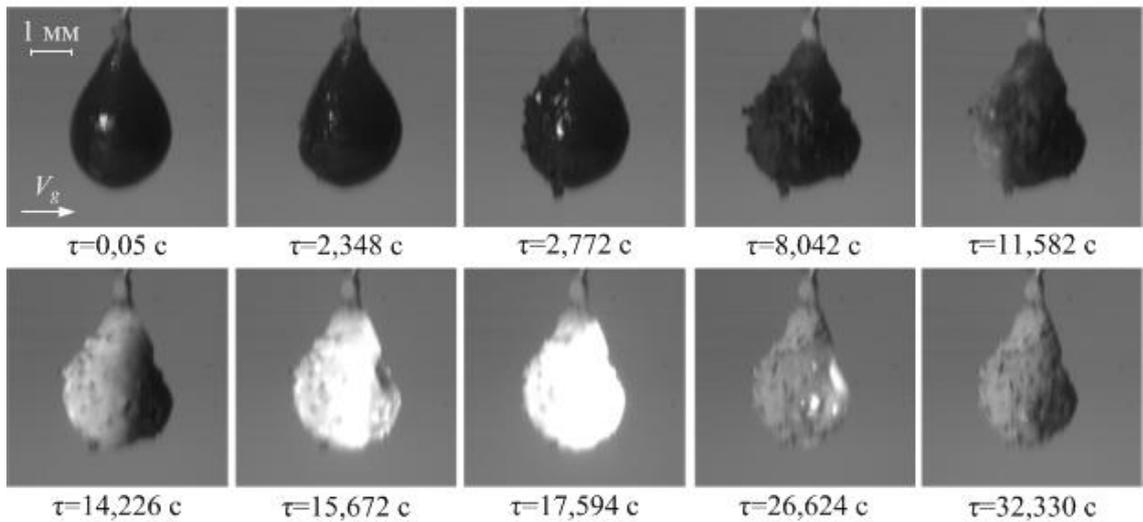
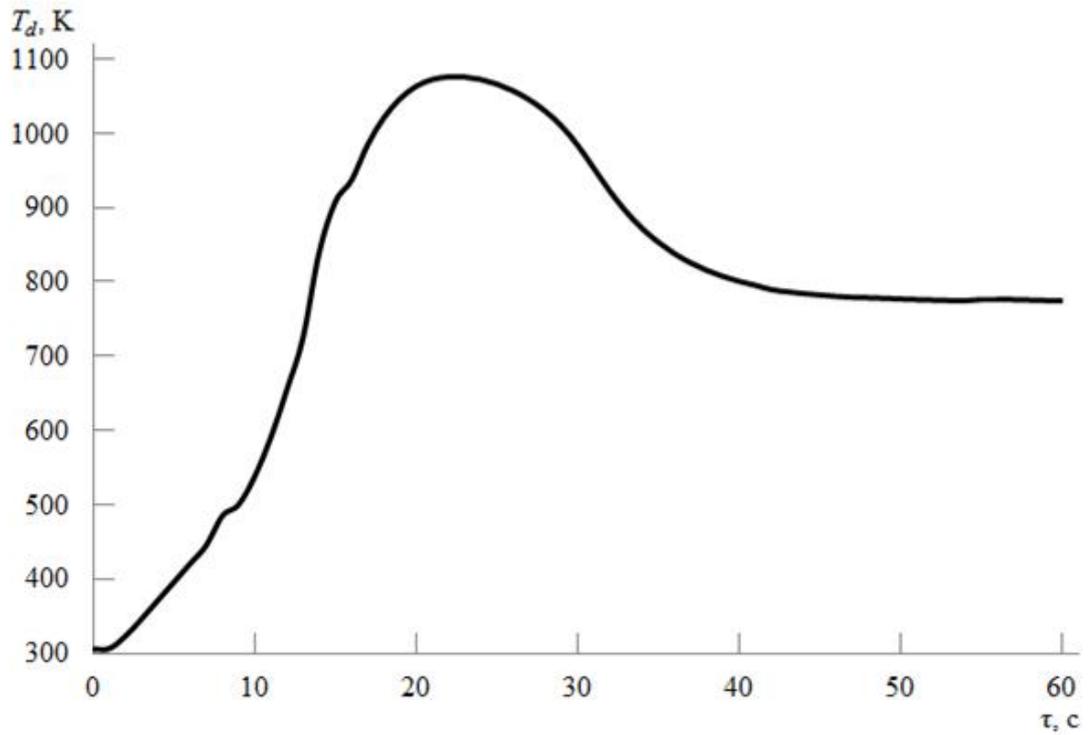


Рисунок 3.1.3. Изменение температуры в капле ВУТ № 3 (таблица 3.1.1) в процессе нагрева при условиях  $R_d \approx 1,25$  мм,  $T_g \approx 750$  К,  $V_g \approx 5$  м/с (с характерными кадрами видеозаписи)

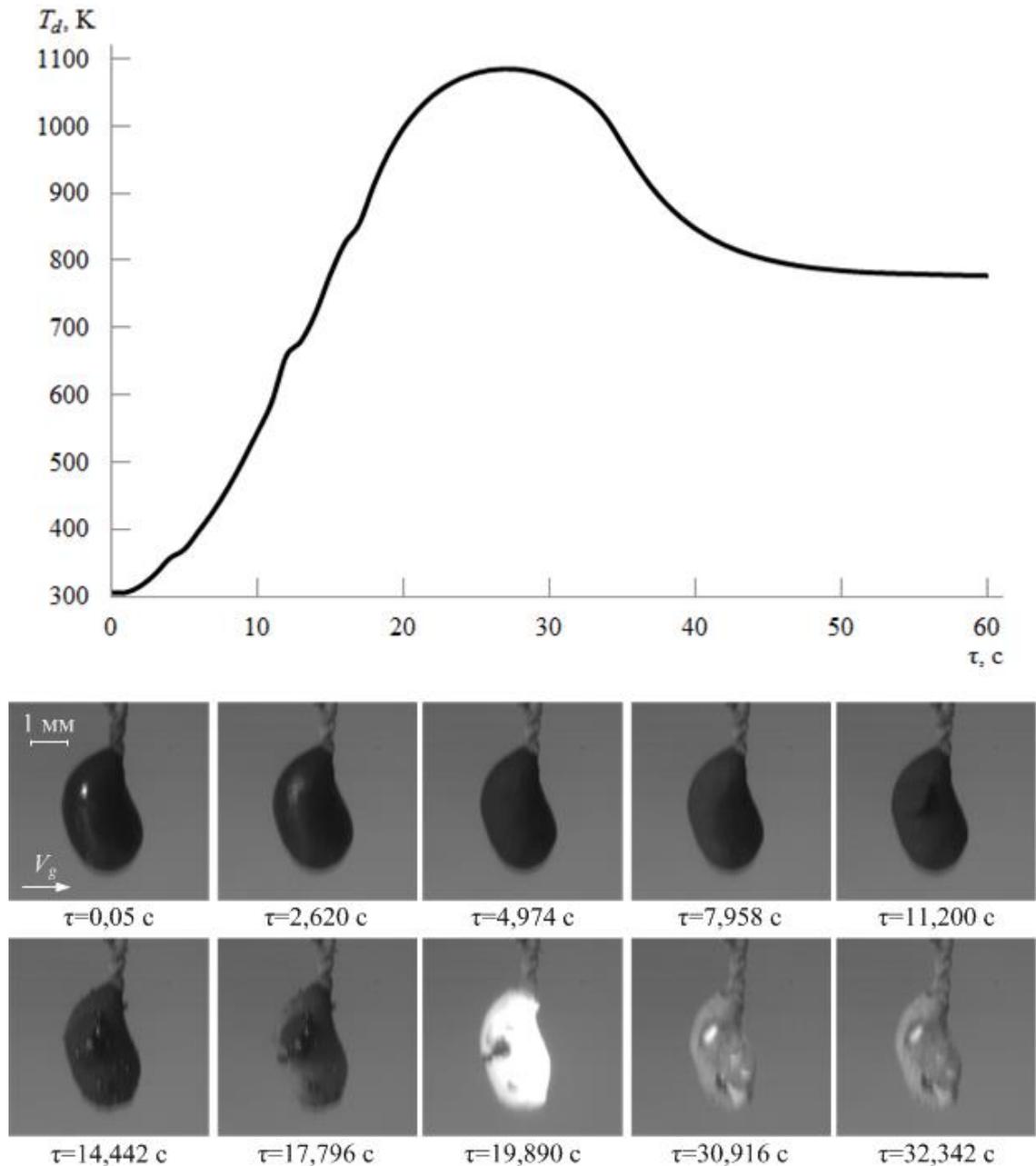


Рисунок 3.1.4. Изменение температуры в капле ОБУТ № 4 (таблица 3.1.1) в процессе нагрева при условиях  $R_d \approx 1,25$  мм,  $T_g \approx 750$  К,  $V_g \approx 5$  м/с (с характерными кадрами видеogramм)

Для первого состава ВУТ по результатам анализа полученных кадров видеogramм и тренда изменения  $T_d$  во времени (рисунок 3.1.1) выделены характерные стадии: инертного прогрева приповерхностного слоя капли; испарения жидкой компоненты (характеризуется изменением внешнего вида поверхности с «глянцевого» на «матовый» и уменьшением размера капли на 8–13 %); выхода летучих; их зажигания; формирования локальных зон

зажигания коксового остатка на поверхности капли и его сгорания. При этом каждую из стадий во всех экспериментах регулярно регистрировали при соответствующих характерных временах (они отличались при идентичных начальных условиях реализации исследуемого процесса и темпах нагрева не более чем на 8 % от времени сгорания капли  $\tau_c$ ).

Тренд изменения  $T_d$  на рисунке 3.1.1 показывает, что максимальное тепловыделение имеет место на стадии горения коксового остатка. При этом эндотермическое фазовое превращение (испарение жидкой компоненты) не приводит к значительному замедлению роста температуры  $T_d$  или даже ее уменьшению (виден достаточно монотонный рост  $T_d$  на начальном участке). Это обусловлено (одновременно с испарением) термическим разложением, интенсивным прогревом летучих и их газофазным зажиганием. Выполненные оценки показали, что характерные времена инертного прогрева частиц угля в несколько раз меньше аналогичного параметра для пленки воды, сопоставимой по размерам. Теплота парообразования воды более чем в 10 раз превышает теплоту термического разложения угля. Как следствие, скорости прогрева и термического разложения угля в приповерхностном слое капли ВУТ в несколько раз превышают скорости испарения воды.

Выход температуры  $T_d$  (рисунок 3.1.1) на постоянное значение (около 750 К) иллюстрирует завершение горения коксового остатка ВУТ и соответственно отсутствие протекания каких-либо физико-химических процессов, характеризующихся изменением теплового баланса. Именно выход этой температуры на значение, отличающееся менее чем на  $\pm 1$  % от установившегося, принимался в качестве дополнительного критерия для определения времен полного сгорания  $\tau_c$ . На рисунках 3.1.1–3.1.4 тренды  $T_d$  представлены для равных временных интервалов (60 с) с целью обеспечения возможности сопоставления динамики исследуемых процессов разных составов ВУТ и ОВУТ.

Для ВУТ № 2 (таблица 3.1.1) установлены аналогичные стадии реализации исследуемого процесса инициирования горения (рисунок 3.1.2). Тренд температуры  $T_d$  хорошо соответствуют представленному на рисунке 3.1.1. Однако можно выделить несколько заметных немонотонных участков в процессе роста  $T_d$ . Они обусловлены диспергированием капли ВУТ (в виде фрагментов неправильной формы) в результате испарения жидкости в приповерхностном слое 0,1–0,3 мм. Этот эффект можно объяснить существенным изменением внешней поверхности капли данного состава ВУТ (по сравнению с составом ВУТ № 1 – таблица 3.1.1). В процессе испарения формируются каверны на поверхности капли, и последняя представляет структурно-неоднородную среду. В таком случае ее можно считать частицей, а не каплей. Появление каверн увеличивает аэродинамическое сопротивление частицы ВУТ и рост сил трения (вызванных набегающим потоком воздуха). Между кавернами формируются трещины. Последние выступают, как правило, гранями отрывающихся фрагментов от основной части ВУТ. Такой эффект приводит к изменению толщины пленки жидкой компоненты ВУТ вокруг спая термопары в процессе инертного нагрева, зажигания и горения (рисунок 3.1.2). Как следствие, меняются характерные тепловые потоки на границе «спай термопары – ВУТ» и соответственно значения  $T_d$ . Этим же фактором, скорее всего, обусловлено несколько меньшее значение максимальной температуры  $T_d$  на тренде для второго состава ВУТ (таблица 3.1.1, рисунок 3.1.2) по сравнению с первым (таблица 3.1.1, рисунок 3.1.1). Также можно выделить формирование, как правило, только одного очага горения ВУТ № 2 (таблица 3.1.1, рисунок 3.1.2) в отличие от ВУТ № 1 (таблица 3.1.1, рисунок 3.1.1). После формирования этого очага пламя распространяется со стороны набегающего потока окислителя по всей поверхности частицы.

Следует отметить, что отрывающиеся фрагменты капли (после испарения жидкой компоненты в приповерхностном слое ее можно считать частицей) ВУТ при движении в воздушном потоке регулярно зажигались

(характерные времена  $\tau_d$  и  $\tau_b$  при этом были в несколько раз меньше, чем для основного, удерживающегося на спае фрагмента частицы). Несмотря на отрыв фрагментов, можно считать механизмы зажигания и горения ВУТ № 1 и 2 (на основе бурого угля) достаточно близкими.

Представленные на рисунке 3.1.3 кадры видеogramмы горения капли ВУТ № 3 (на основе каменного угля) аналогичны полученным для ВУТ на основе бурого угля (рисунки 3.1.1 и 3.1.2). Однако можно отметить существенно большее (на 200 К) максимальное значение  $T_d$  на рисунке 3.1.3 по сравнению с рисунками 3.1.1 и 3.1.2. Этот эффект обусловлен более высокой теплотой сгорания каменного угля по сравнению с бурым. Для ВУТ на основе каменного угля в проведенных экспериментах установлено зажигание практически по всей площади поверхности, т.е. без явно выраженного очага (рисунок 3.1.3), как, например, для первого и второго составов ВУТ на основе бурого угля (рисунки 3.1.1 и 3.1.2).

Установлены достаточно близкие по временам и температурам  $T_d$  стадии инертного прогрева, зажигания и горения капель ВУТ № 3 (таблица 3.1.1, рисунок 3.1.3) и ОВУТ (состав № 4, таблица 3.1.1, рисунок 3.1.4). Однако хорошее соответствие зарегистрировано лишь при небольшом (до 5 %) массовом содержании отработанного масла в ОВУТ. При росте концентрации этой компоненты до 15 % установлено, что процесс горения продуктов термического разложения угля сопровождается зажиганием продуктов испарения масла. Как следствие, в малой окрестности приповерхностного слоя капли ОВУТ регистрировалось пламенное горение (рисунок 3.1.5). Это приводило к интенсификации прогрева коксового остатка и его горения. Времена  $\tau_d$  и  $\tau_b$  уменьшались на 14–17 % при росте концентрации масла от 0 до 15 % при идентичных условиях теплообмена. Однако следует отметить, что повышение концентрации жидкой горючей компоненты в составе ОВУТ приводило к довольно значительному ограничению размеров исследуемых капель. Это связано с понижением вязкости суспензии и поверхностного натяжения капли. Как следствие, с

увеличением концентрация отработанного масла уменьшался размер капли, удерживавшейся на спае термопары в течение индукционного периода. Например, при концентрации рассматриваемой жидкой горючей компоненты 15 % максимальный размер капли, удерживавшейся на спае термопары при  $V_g \approx 5$  м/с и  $T_g \approx 900$  К, составил  $R_d \approx 0,6$  мм.

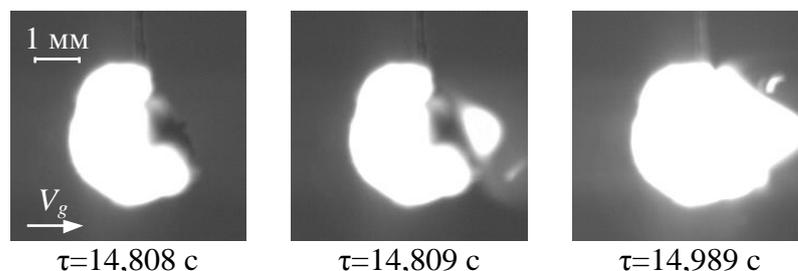


Рисунок 3.1.5. Типичные кадры видеोगраммы с иллюстрацией стадии горения продуктов испарения масла и летучих ОБУТ № 4 (таблица 3.1.1)

На рисунке 3.1.6 приведены тренды температуры ( $T_d$ ) капель ОБУТ № 5 и 6 (таблица 3.1.1) и кадры высокоскоростной видеосъемки, соответствующие основным стадиям исследуемого процесса. Установлено, что для капель ОБУТ в условиях нагрева потоком окислителя характерны следующие стадии: инертный прогрев; испарение воды и жидкого горючего компонента; термическое разложение органической части угля (выход летучих); формирование парогазовой смеси и ее воспламенение; прогрев коксового остатка и его гетерогенное зажигание.

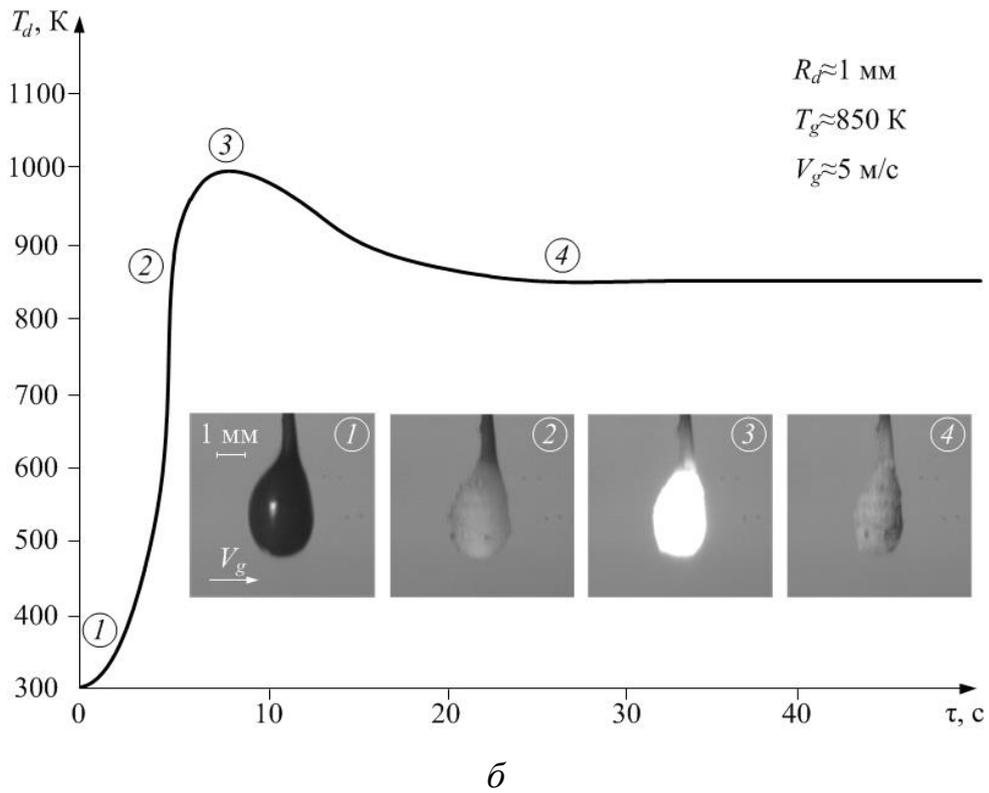
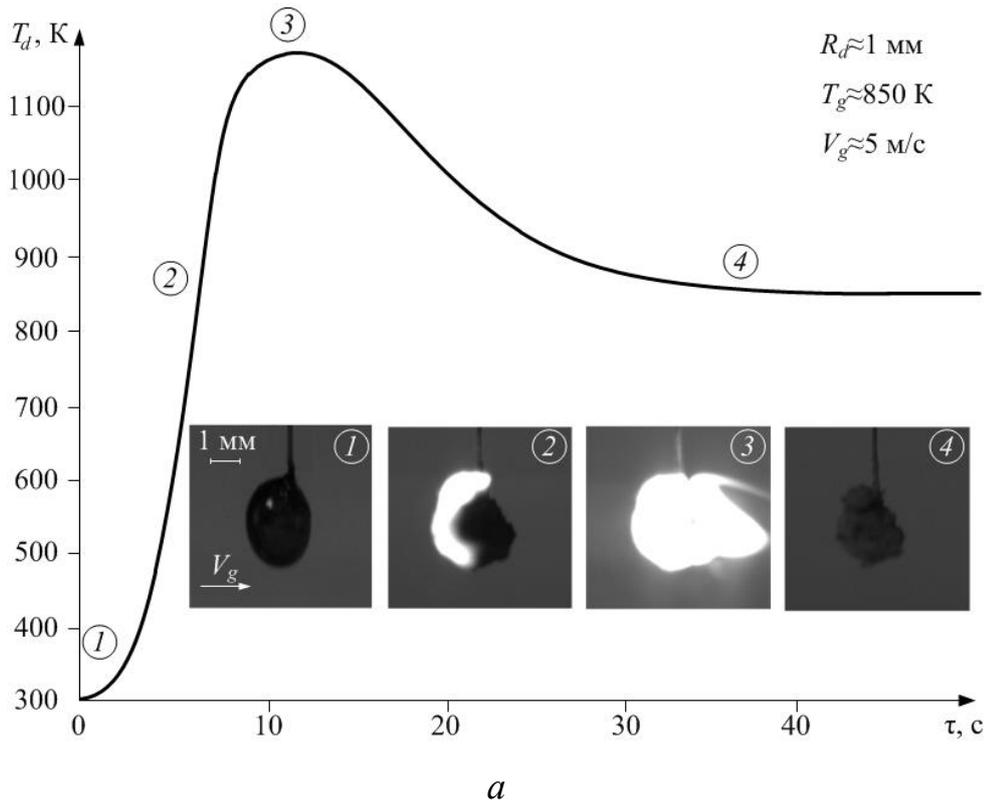


Рисунок 3.1.6. Изменение температуры в капле ОБУТ № 5 (а) и ОБУТ № 6 (б) при взаимодействии с потоком разогретого воздуха (номера составов соответствуют таблице 3.1.1)

Последовательность выделенных стадий аналогична для всех проведенных экспериментов. Длительности же отдельных стадий отличались в зависимости от компонентного состава ОБУТ, условий нагрева, размера капель и других менее значимых параметров. В частности, выявлено, что повышение концентрации жидкого горючего компонента ведет к увеличению длительности стадии инертного прогрева капли и испарения влаги. Это обусловлено тем, что при росте концентрации горючей жидкости снижается вязкость и теплопроводность ОБУТ. Как следствие, возрастает длительность прогрева капли. Однако за счет повышения концентрации жидкого горючего компонента снижается доля воды. Так как тепловой эффект испарения воды существенно выше по сравнению с аналогичными характеристиками горючих жидкостей, то концентрация паров последних в приповерхностном слое капли ОБУТ растет быстрее. Скорость окисления газовой смеси пропорциональна (как правило, по степенному закону) концентрации горючего компонента и окислителя. Поэтому она возрастет с увеличением концентрации продуктов испарения. Как следствие, интенсивность последующих стадий возрастает для ОБУТ с большей концентрацией жидкого горючего компонента. При концентрации горючей жидкости более 15 % на стадии зажигания газовой смеси регулярно формировалось пламя в окрестности капли ОБУТ (рисунок 3.1.6а). Как следствие, интенсифицировался прогрев коксового остатка и его гетерогенное зажигание. Этот процесс начинался с появления локального очага горения, формирующегося со стороны набегающего потока окислителя (рисунок 3.1.6), и развивался при распространении фронта горения по поверхности капли в направлении, соответствующем направлению движения потока разогретого воздуха. Такая особенность реализации гетерогенного зажигания обусловлена максимальной температурой и концентрацией окислителя со стороны набегающего потока. Как следствие, в этой области максимальна интенсивность теплообмена на границе «капля – окислитель». После локального инициирования горения кокса выделяется энергия. Часть тепла

расходуется на дополнительный прогрев не реагирующего вещества. Это ведет к распространению фронта горения как по поверхности, так и вглубь капли. Такое развитие процесса объясняет особенность завершения выгорания кокса. Вследствие интенсивного теплообмена на границе «капля – окислитель» экзотермический процесс в окрестности приповерхностного слоя капли заканчивается раньше полного выгорания кокса в глубинных слоях (рисунок 3.1.6).

Длительность отдельных стадий и всего процесса в целом зависит не только от условий теплообмена, но и компонентного состава ОВУТ. Содержание влаги и летучих веществ достаточно существенно влияет на условия прогрева, фазовых превращений и интенсивность газофазного окисления смеси продуктов испарения горючей жидкости и продуктов термического разложения угля.

На рисунке 3.1.7 приведены кадры (типичные для рассмотренных условий) с изображением капли топлива в процессе ее инертного нагрева, зажигания и полного сгорания в потоке окислителя. Установлено, что при разной массовой концентрации нефти механизм зажигания капли топлива имеет отличительные особенности (не только по длительности соответствующих стадий, но и по условиям тепловыделения). В частности, за счет повышения массовой доли нефти с большей теплотой сгорания, чем используемые отходы переработки угля, существенно растет тепловыделение в зоне реакции летучих и паров жидкой компоненты в среде окислителя. Это приводит к интенсификации прогрева коксового остатка угля и его химического реагирования. С увеличением массовой доли нефти в капле искусственного композиционного жидкого топлива данный эффект проявляется более значительно.

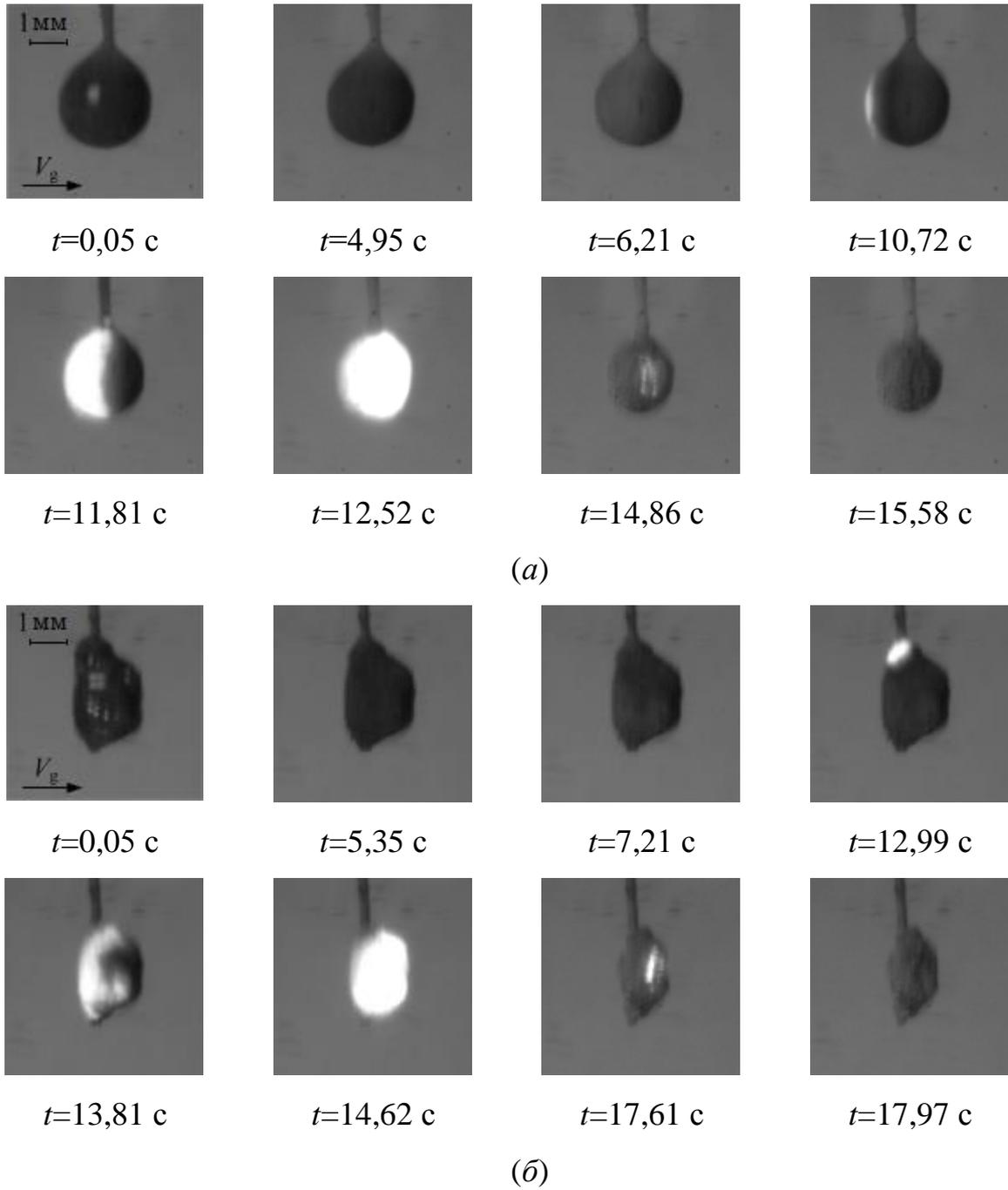


Рисунок 3.1.7. Кадры с зажиганием и полным сгоранием ОВУТ № 7 (а) и № 8 (б) при  $R_d \approx 1$  мм,  $T_g \approx 800$  К,  $V_g \approx 5$  м/с (номера составов соответствуют таблице 3.1.1)

Таким образом, результаты экспериментальных исследований позволили установить механизм зажигания одиночной капли ОВУТ. Важным фактором, влияющим на зажигание органоводоугольной топливной композиции является процесс испарения воды и жидкого горючего компонента. Для оценки минимальных (пороговых) условий газофазного

зажигания обезвоженных частиц угля разработана математическая модель [120].

При разработке математической модели принята следующая схема исследуемого процесса. В начальный момент времени одиночная частица угля сферической формы радиусом  $r_p$  вводится в среду окислителя (воздух) с температурой превышающей начальную температуру частицы ( $T_g > T_0$ ). Предполагалось, что за счет механизмов кондуктивного и радиационного теплообмена на границе частицы с внешней газовой средой происходит подвод теплоты к твердому топливу. В результате инертного прогрева частицы температура приповерхностного слоя достигает значения начала термического разложения органической части. Выделяющиеся газообразные продукты (летучие) смешиваются с окружающим воздухом за счет диффузии. Формируется горючая смесь. При повышении концентрации летучих и температуры газовой смеси в окрестности частицы ускоряются процессы окисления. Происходит газофазное зажигание.

Процессы тепломассопереноса и экзотермического реагирования в области решения задачи аналогично математическим моделям зажигания твердых [121], жидких [122] и гелеобразных [123] конденсированных веществ описываются дифференциальными уравнениями в частных производных.

Уравнение баланса энергии для частицы угля с учетом термического разложения органической составляющей:

$$\rho_1 C_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r^2 \frac{\partial T_1}{\partial r} \right] - Q_1 W_1. \quad (1)$$

Уравнение баланса энергии для газовой смеси воздуха и продуктов термического разложения угля с учетом экзотермического реагирования:

$$\rho_2 C_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r^2 \frac{\partial T_2}{\partial r} \right] + Q_2 W_2. \quad (2)$$

Уравнение диффузии летучих в среде окислителя:

$$\rho_2 \frac{\partial C_g}{\partial t} = \rho_2 D_2 \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r^2 \frac{\partial C_g}{\partial r} \right] - W_2. \quad (3)$$

Уравнение баланса концентраций компонентов газовой смеси:

$$C_g + C_o = 1. \quad (4)$$

Обозначения:  $r$  – сферическая координата, м;  $t$  – время, с;  $T$  – температура, К;  $T_0$  – начальная температура частицы, К;  $T_g$  – температура воздуха, К;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $C$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $D_2$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $Q_1$  – тепловой эффект термического разложения частицы, Дж/кг;  $W_1$  – массовая скорость термического разложения частицы, кг/(м<sup>3</sup>·с);  $Q_2$  – тепловой эффект реакции окисления летучих, Дж/кг;  $W_2$  – массовая скорость реакции окисления летучих, кг/(м<sup>3</sup>·с);  $C_g$ ,  $C_o$  – концентрации летучих и воздуха; индексы: 1 – частица, 2 – газовая смесь.

В качестве начальных условий задавалось равномерное распределение температуры в частице угля  $T_1=T_0$  и воздухе  $T_2=T_g$ , а также доля органической составляющей топлива, подверженной термическому разложению  $\varphi_1=\varphi_0$ . Считалось, что в начальный момент времени в области решения задачи отсутствуют горючие газы  $C_g=0$  (при этом концентрация воздуха  $C_o=1$ ). На границе «частица – газ» принимались условия идеального теплового контакта при учете лучистого теплообмена, а также термического разложения приповерхностного слоя частицы угля:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} + (T_2^4 - T_1^4) \varepsilon \sigma - Q_1 W_{1\Sigma}; \quad \rho_2 D_2 \frac{\partial C_g}{\partial r} = W_{1\Sigma}.$$

Обозначения:  $\varepsilon$  – степень черноты частицы;  $\sigma$  – постоянная Стефана–Больцмана, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $W_{1\Sigma}$  – скорость оттока летучих веществ с поверхности частицы, кг/(м<sup>2</sup>·с).

Массовые скорости термического разложения угля, оттока летучих и их окисления в воздухе вычислялись по выражениям [124]:

$$W_1 = \varphi_1 \rho_1 k_1^0 \exp\left(-\frac{E_1}{R_i T_1}\right),$$

$$W_{1\Sigma} = \int_{r=0}^{r=r_1} \varphi_1 \rho_1 k_1^0 \exp\left(-\frac{E_1}{R_i T_1}\right) dr,$$

$$W_2 = C_g C_o \rho_2 k_2^0 \exp\left(-\frac{E_2}{R_i T_2}\right),$$

где  $k_i^0$  – предэкспонент,  $\text{с}^{-1}$ ;  $E_i$  – энергия активации, Дж/моль;  $R_i$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К).

Изменение объемной доли органической части угля в частице описывалось уравнением [124]:

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = \varphi_1 \rho_1 k_1^0 \exp\left(-\frac{E_1}{R_i T_1}\right).$$

При разработке алгоритма численного решения задачи газофазного зажигания использованы метод конечных разностей, локально-одномерный метод, метод итераций. Расчеты выполнены сквозной прогонкой на равномерной пространственной сетке (с числом узлов 500) при использовании неявной четырехточечной разностной схемы. Шаг по времени составлял  $10^{-4}$  с. Для оценки достоверности результатов численного исследования разработан алгоритм (аналогично используемому в [125]) проверки консервативности применяемых разностных схем.

Численные исследования выполнены при следующих значениях параметров [126, 127]: начальная температура частицы угля  $T_0=300$  К; температура окислителя (воздуха)  $T_g=350-500$  К; начальная доля органической составляющей топлива  $\varphi_0=0,1$ ; степень черноты частицы угля  $\varepsilon=0,81$ ; кинетические параметры процесса термического разложения угля  $k_1^0=2,82 \cdot 10^6$   $\text{с}^{-1}$ ,  $E_1=80 \cdot 10^3$  Дж/моль,  $Q_1=187,6 \cdot 10^3$  Дж/кг; кинетические параметры реакции окисления газообразных продуктов термического разложения угля  $k_2^0=1,964 \cdot 10^{12}$   $\text{с}^{-1}$ ,  $E_2=103,5 \cdot 10^3$  Дж/моль,  $Q_2=47,3 \cdot 10^6$  Дж/кг; размеры частицы угля  $r_p=0,05-0,5$  мм; теплофизические характеристики угля  $\lambda_1=0,149$  Вт/(м·К),  $C_1=2130$  Дж/(кг·К),  $\rho_1=1500$  кг/м<sup>3</sup>; газообразных продуктов термического разложения угля –  $\lambda_{21}=0,031$  Вт/(м·К),  $C_{21}=1131,5$  Дж/(кг·К),

$\rho_{21}=0,449 \text{ кг/м}^3$ ,  $D_{21}=9,694 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ; воздуха –  $\lambda_{22}=0,026 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ,  $C_{22}=1190 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ,  $\rho_{22}=1,161 \text{ кг/м}^3$ ,  $D_{22}=0,561 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

На рисунке 3.1.8 приведены зависимости минимальной температуры среды окислителя, необходимой для газофазного зажигания продуктов термического разложения одиночной частицы угля, и времени задержки зажигания летучих при варьировании размера частицы в достаточно широком диапазоне  $r_p=0,05-0,5 \text{ мм}$ . Установлены соответствующие аппроксимационные выражения:

$$T_g^{\min} = 169,7r_p^2 - 192,24r_p + 459,13;$$

$$t_d = 64,091r_p^2 + 0,774r_p + 4,318.$$

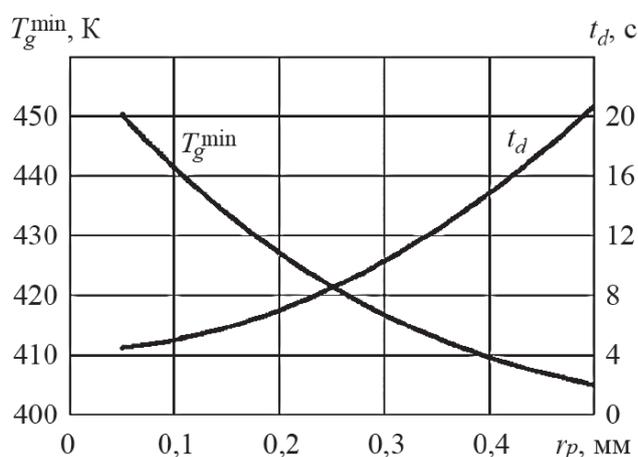


Рисунок 3.1.8. Минимальные температуры среды окислителя и времени задержки зажигания (при  $T_g=450 \text{ К}$ ) газообразных продуктов термического разложения одиночных частиц угля различных размеров

Видно (рисунок 3.1.8), что с увеличением  $r_p$  предельная (минимальная) температура  $T_g^{\min}$  воспламенения горючей газовой смеси нелинейно уменьшается. Это можно объяснить существенным влиянием массовой скорости процесса термического разложения угля на условия протекания реакции окисления в окрестности частицы. Приповерхностный слой относительно малых по размерам ( $r_p \rightarrow 0,05 \text{ мм}$ ) частиц угля прогревается до температуры начала термического разложения за короткий интервал времени ( $t < 1 \text{ с}$ ). Однако вследствие небольших размеров и, соответственно, массы

частиц концентрация горючих газов в среде окислителя существенно возрастает лишь при более высоких значениях температуры последней (по сравнению со случаем  $r_p \rightarrow 0,5$  мм).

Также установлено (рисунок 3.1.8), что длительность индукционного периода  $t_d \approx 20$  с относительно больших ( $r_p \rightarrow 0,5$  мм) частиц угля существенно превышает времена задержки зажигания  $t_d \approx 5$  с одиночных частиц размерами  $r_p \rightarrow 0,05$  мм. Вследствие эндотермичности процесса выхода летучих существенно снижается температура (на 50–150 К) газовой смеси в окрестности частицы. Большие изменения температуры характерны для относительно крупных частиц угля. С ростом концентрации продуктов термического разложения энерговыделение возрастает в результате ускорения реакции окисления. Это ведет к увеличению температуры на границе «частица – газ» и ускорению прогрева глубинных слоев частицы. Устойчивое зажигание происходит при достижении критических значений как температуры, так и концентрации летучих в среде окислителя.

В рамках диссертационных исследований разработаны математические модели [128–133] для прогноза газофазного зажигания угольных частиц. Результаты математического моделирования показали, что минимальные температуры зажигания частиц угля существенно ниже, чем значения аналогичного параметра для одиночных капель ВУТ и ОВУТ (более 600 К).

### **3.2. Влияние температуры окислителя на характеристики зажигания органоводоугольных топлив**

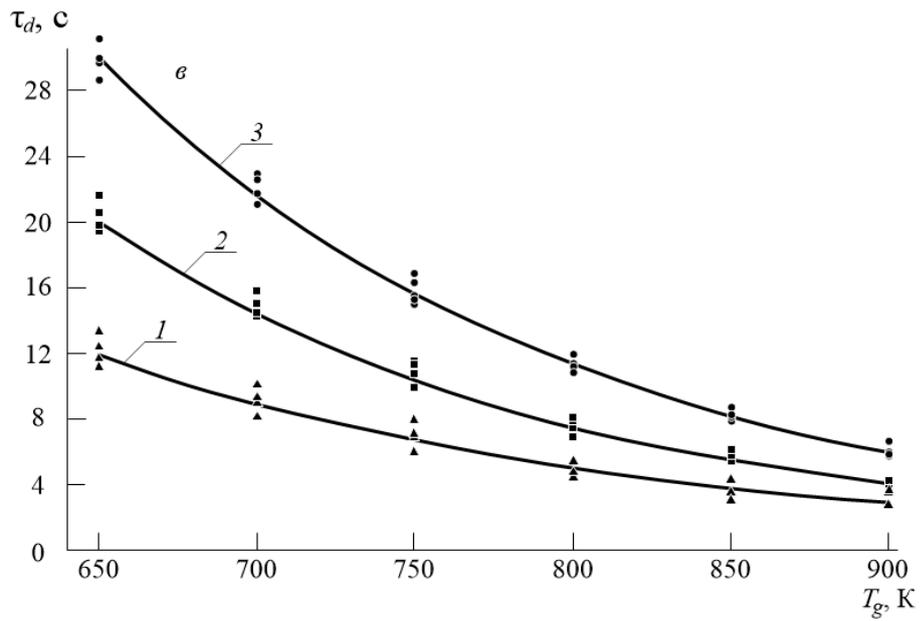
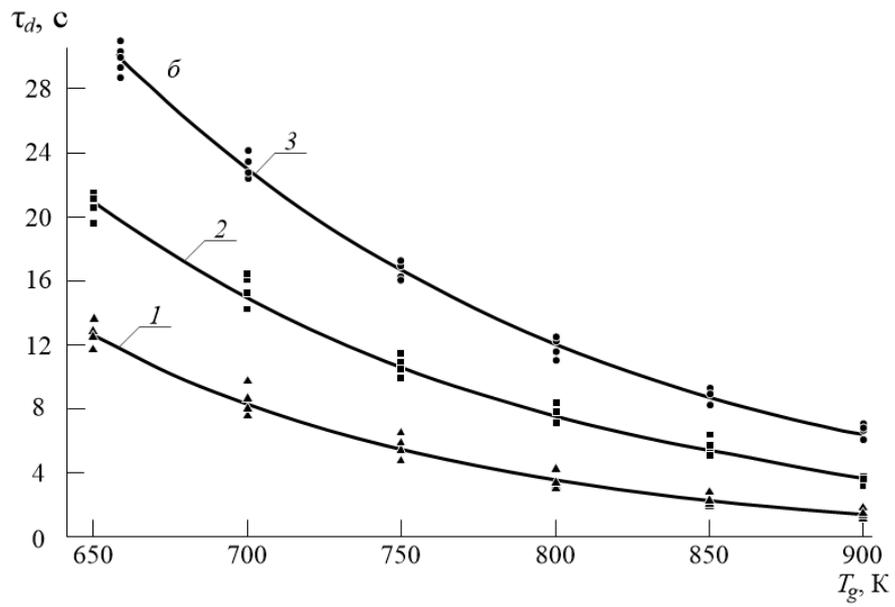
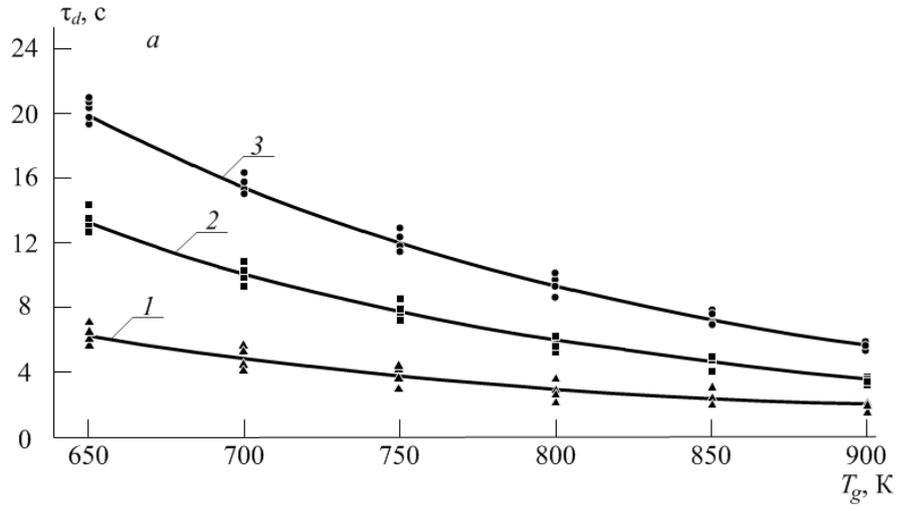
Температура окислителя ( $T_g$ ) является одним из ключевых параметров, влияющих на процессы зажигания и горения одиночной капли ОВУТ любого состава. Как показали эксперименты, рост температуры окислителя приводил к снижению длительности всех стадий зажигания и последующего горения одиночных капель ОВУТ, поскольку с увеличением  $T_g$  увеличивается количество теплоты, подводимой к поверхности капли ОВУТ в единицу времени.

Влияние температуры окислителя на характеристики зажигания одиночных капель топливных композиций исследовано [117–119] для нескольких топливных композиций (таблица 3.2.1). Характеристики используемых в топливах компонентов приведены в таблицах 2.1.1–2.1.5.

Таблица 3.2.1. Компонентный состав исследованных ВУТ и ОВУТ

№ состава	Относительные массовые концентрации компонентов
1	40 % бурый уголь марки Б1, 60 % вода
2	50 % бурый уголь марки Б2, 50 % вода
3	50 % каменный уголь марки Д, 50 % вода
4	94,5 % КЕК К (влажный), 5 % отработанное автомобильное масло марки Total, 0,5 % пластификатор
5	47 % бурый уголь марки Б1, 47 % вода, 5 % жидкий горючий компонент, 1 % пластификатор
6	47 % бурый уголь марки Б2, 47 % вода, 5 % жидкий горючий компонент, 1 % пластификатор
7	94 % КЕК К (влажный), 5 % жидкий горючий компонент, 1 % пластификатор

На рисунке 3.2.1 приведены зависимости времен задержки зажигания капель четырех составов ВУТ и ОВУТ (таблица 3.2.1) от температуры окислителя. Можно выделить различия  $\tau_d$  для капель с тремя характерными размерами  $R_d$  (мм): 0,75; 1,25; 1,75. Следует отметить, что максимальные значения  $\tau_d$  для каждой из кривых  $\tau_d=f(T_g)$  на рисунке 3.2.1 иллюстрируют предельные температуры  $T_g$ , при которых в экспериментах устойчиво реализовывались стадии, выделенные на рисунках 3.1.1–3.1.4, и завершались полным сгоранием капель.



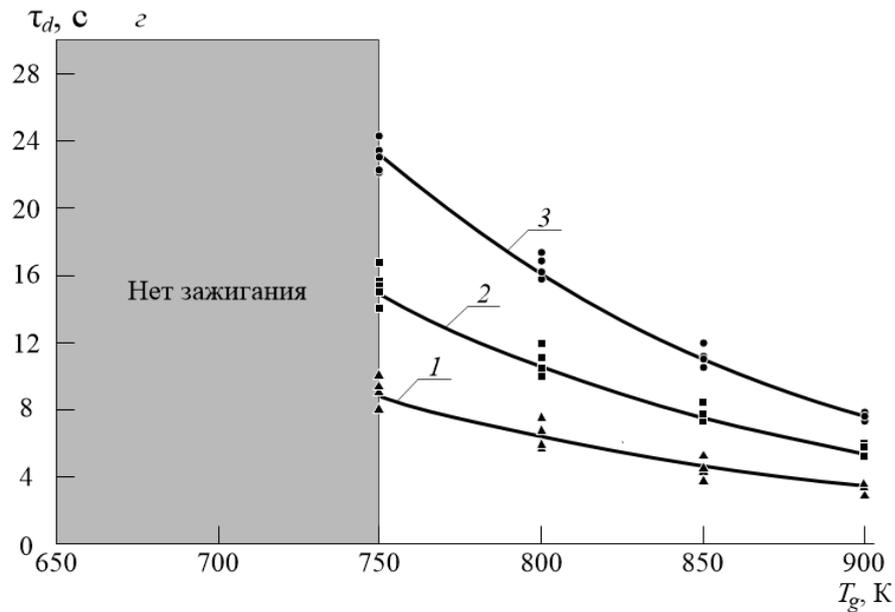


Рисунок 3.2.1. Времена задержки зажигания капле ВУТ № 1 (а); ВУТ № 2 (б); ВУТ № 3 (в) и ОВУТ № 4 (г) в зависимости от температуры окислителя при разных начальных размерах  $R_d$ : 1 – 0,75 мм; 2 – 1,25 мм; 3 – 1,75 мм (номера составов соответствуют таблице 3.2.1)

На рисунке 3.2.2а хорошо видно, что минимальные значения  $\tau_d$  соответствуют составам ВУТ на основе бурого угля. При этом наклон кривых на рисунке 3.2.1 для капле разных размеров иллюстрирует общность сформулированного заключения. Это обусловлено более низкими значениями характерных температур зажигания, а также теплоты сгорания бурых углей по сравнению с каменными [134, 135].

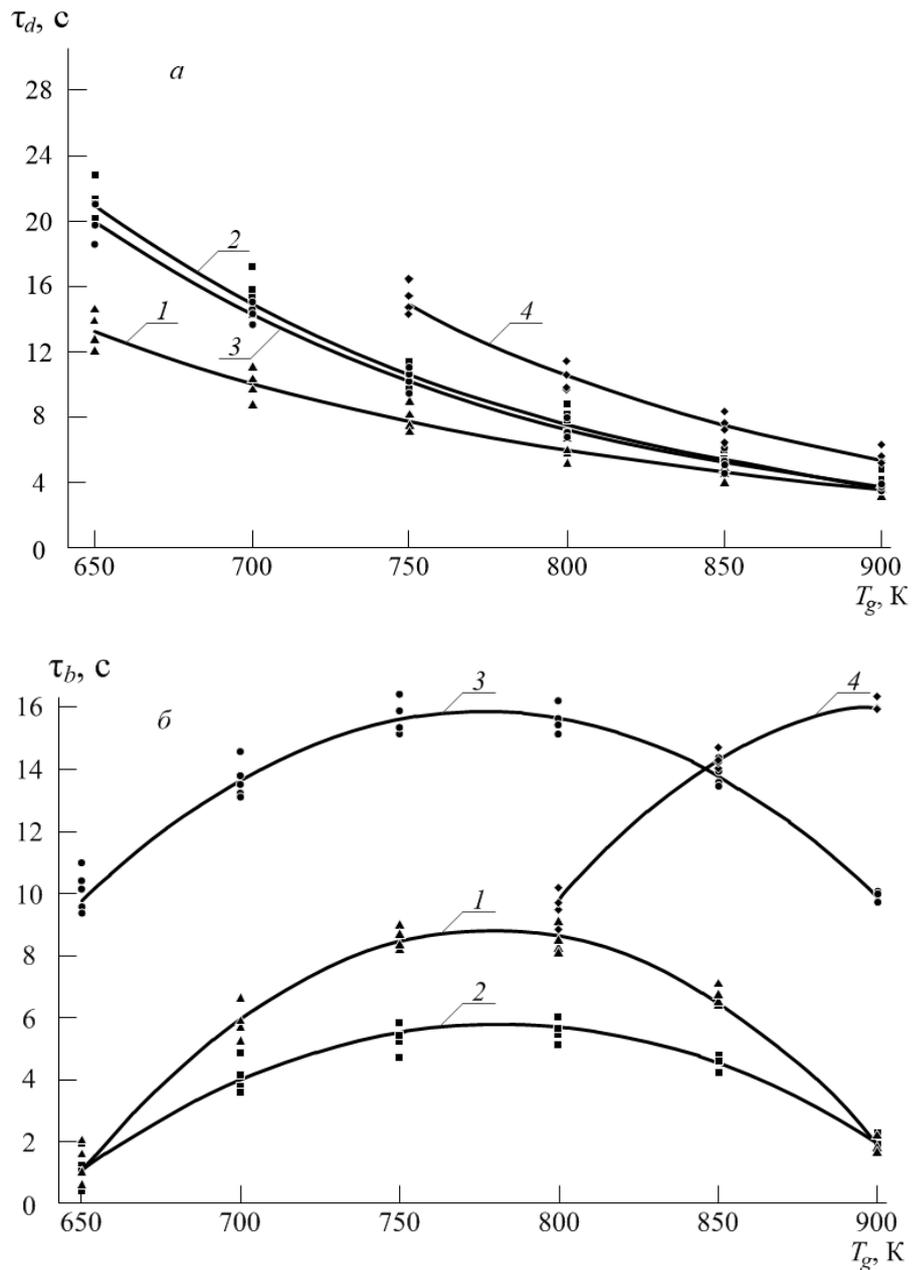


Рисунок 3.2.2. Времена задержки зажигания (*a*) и горения (*б*) капель радиусами 1,25 мм: 1 – ВУТ № 1; 2 – ВУТ № 2; 3 – ВУТ № 3; 4 – ОВУТ № 4 (компонентные составы см. в таблице 3.2.1)

Представленные на рисунке 3.2.2*б* времена горения капель рассмотренных составов топливных композиций иллюстрируют бóльшие (в несколько раз) длительности процессов горения ВУТ на основе каменных углей при идентичных условиях теплообмена по сравнению с бурыми. Этот результат хорошо соответствует основным заключениям [134, 135] по характеристикам пылевидного сжигания углей. Для ОВУТ № 4 (таблица

3.2.1) установлены более высокие температуры  $T_g$ , необходимые для полного сгорания (рисунок 3.2.1*а*). Однако и времена  $\tau_b$  максимальны для такого состава топливной композиции (рисунок 3.2.2*б*). Эти особенности можно объяснить влиянием компонентного состава ОВУТ № 4 (таблица 3.2.1).

Бурый уголь содержит меньшее количество углерода и повышенное кислорода по сравнению с каменным [134, 135]. Как следствие, инициирование горения происходит при больших концентрациях кислорода, но меньших температурах воздуха. Если сравнивать процессы зажигания каменного и бурого углей при идентичных темпах нагрева, то, очевидно, что за счет более высокой концентрации кислорода времена задержки зажигания ВУТ ( $\tau_d$ ) на основе бурого угля будут ниже, чем каменного (рисунок 3.2.2*а*). С другой стороны, меньшее содержание углерода в ВУТ на основе бурого угля и определяет существенное снижение длительности процесса горения ( $\tau_b$ ) по сравнению с каменным (рисунок 3.2.2*б*). Возможно, по этой же причине максимальные значения  $\tau_d$  и  $\tau_b$  соответствуют ОВУТ (рисунок 3.2.2). В отходах переработки угля (КЕК) содержание кислорода минимально. Этот эффект позволяет его транспортировать, перерабатывать, подсушивать при более высоких температурах по сравнению с исходным углем, поэтому для зажигания требуются большие тепловые потоки и темпы нагрева. Добавление отработанного масла в состав топливной композиции приводило в экспериментах к интенсификации прогрева КЕКа за счет меньших затрат энергии на газификацию (испарение) масла по сравнению с углем [134, 135]. Структура ОВУТ отличается от исходного КЕКа присутствием жидкой горючей компоненты. Последнее приводит к росту необходимой для прогрева приповерхностного слоя капли и испарения жидкости энергии, поэтому времена  $\tau_d$  максимальны для ОВУТ на рисунке 3.2.2*а*. В то же время добавление масла с высоким содержанием органических горючих компонентов приводит к росту длительности горения ОВУТ по сравнению со всеми рассмотренными ВУТ (рисунок 3.2.2*б*).

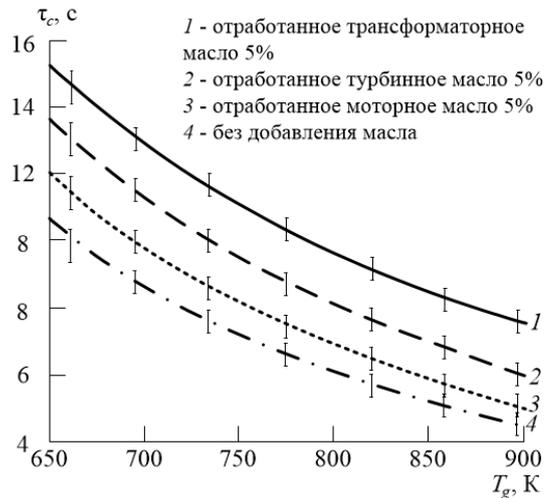
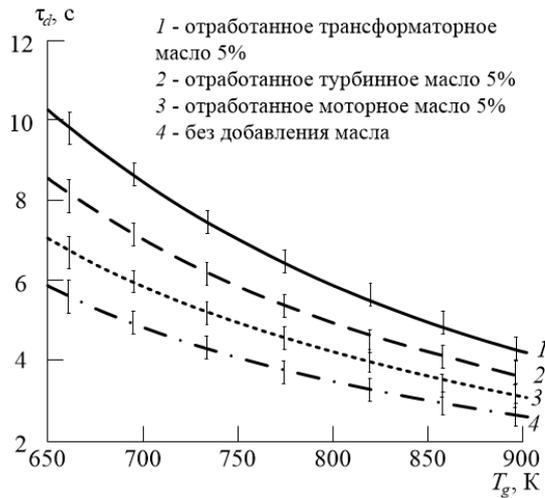
Экстремумы зависимостей  $\tau_b=f(T_g)$  для составов ВУТ № 1–3 (таблица 3.2.1) на рисунке 3.2.2б можно объяснить с использованием полученных видеogramм проведенных экспериментов. В частности, на рисунке 3.2.2б хорошо видно, что времена горения каплей при температуре газов 750–800 К максимальны для составов ВУТ № 1–3 (с идентичными начальными размерами  $R_d$ ). При уменьшении или увеличении температуры  $T_g$  времена  $\tau_b$  снижаются. Это связано, скорее всего, с нестационарным аккумулярованием энергии в капле ВУТ в процессе ее прогрева, соответствующим разогревом и зажиганием летучих. Для ОВУТ № 4 (таблица 3.2.1) зависимость  $\tau_b=f(T_g)$  не имеет экстремума на рисунке 3.2.2б вследствие отличающегося механизма зажигания, описанного выше.

Для ВУТ № 1–3 (таблица 3.2.1) характерны процессы зарождения очага горения. Для ВУТ № 2 (таблица 3.2.1) этот очаг существует в течение довольно короткого интервала времени вследствие отрыва фрагментов. Видеogramмы проведенных экспериментов показали, что при относительно малых температурах окислителя (от 650 К до 750 К) зона зажигания (соответствующая очагу горения) формировалась довольно длительное время (вследствие инерционного прогрева кокса и аккумулярования в нем энергии). Летучие относительно медленно диффундировали к поверхности, зажигались и сгорали в малом приповерхностном слое капли. Это приводило к длительным временам  $\tau_d$ , но достаточно малым временам  $\tau_b$  (рисунок 3.2.2).

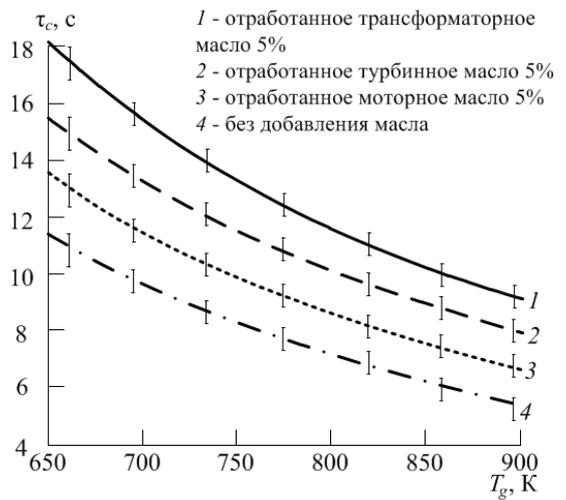
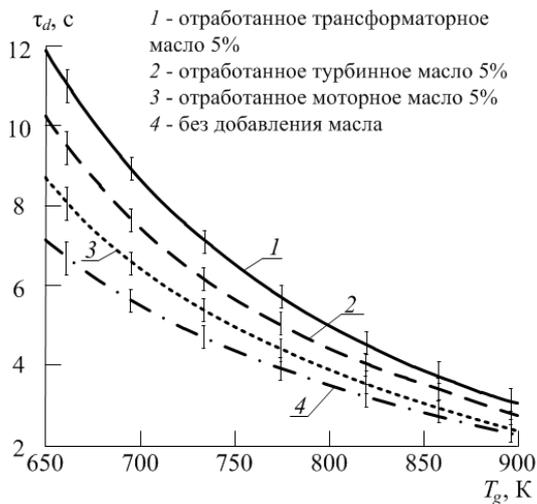
Эксперименты показали, что при температурах окислителя от 800 К до 900 К суммарные длительности инертного прогрева капли до ее зажигания сопоставимы с временами горения. Как следствие, времена  $\tau_d$  снижаются практически до значений  $\tau_b$  (рисунок 3.2.2) при таких условиях нагрева. Времена  $\tau_d$  уменьшаются существенно с ростом  $T_g$ . Однако это снижение ограничивает длительность процесса аккумулярования энергии в капле. Выполненные теоретические оценки показали, что запасы этой энергии сопоставимы при длительном нагреве в условиях  $T_g=650-750$  К и более быстром подводе тепла при  $T_g=800-900$  К. Как следствие, времена  $\tau_d$  для

диапазонов температур окислителя 650–750 К и 800–900 К различаются существенно, а времена горения изменяются довольно незначительно (рисунок 3.2.2), поэтому для диапазона  $T_g=750\text{--}800$  К в проведенных экспериментах времена  $\tau_b$  максимальны для составов ВУТ № 1–3 (таблица 3.2.1). Выделенная особенность установлена для широкого диапазона размеров капель ( $R_d=0,75\text{--}1,75$  мм).

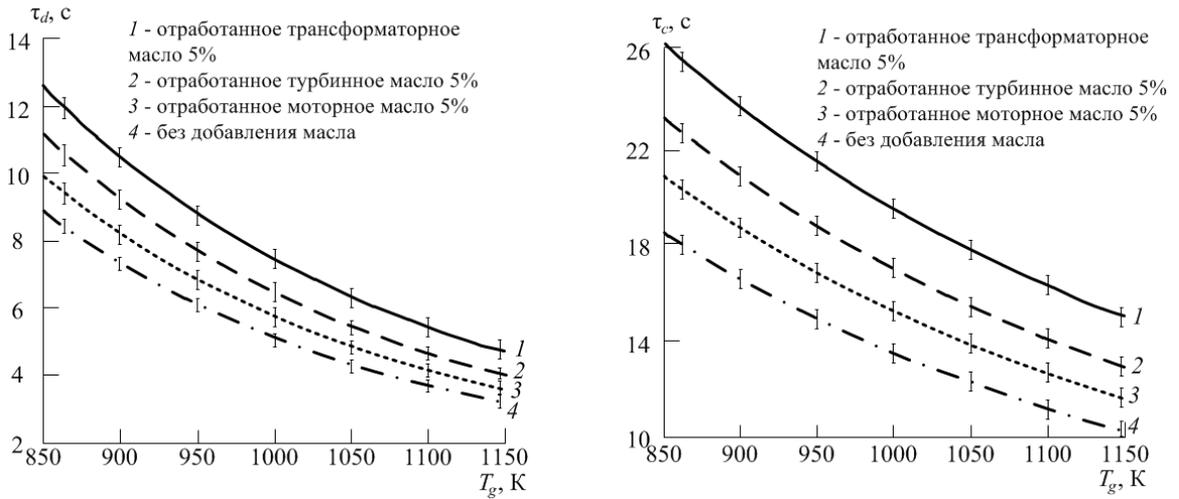
На рисунке 3.2.3 представлены значения времен задержки зажигания капель топливных композиций № 5–7 (таблица 3.2.1) при варьировании температуры окислителя от относительно низких (около 600 К) до значений (как правило, не менее 900 К), соответствующих камерам сгорания энергетических установок.



*a*



*б*



в

Рисунок 3.2.3. Времена задержки зажигания и полного сгорания ОВУТ № 5 (а), № 6 (б), № 7 (в) в зависимости от температуры окислителя при использовании разных жидких горючих компонентов ( $R_d \approx 1$  мм,  $V_g \approx 3,5$  м/с) (номера составов соответствуют таблице 3.2.1)

Видно, что зависимости на рисунке 3.2.3 имеют нелинейный вид. Это обусловлено несколькими причинами: нелинейной зависимостью скоростей испарения горючего (нефтепродукт) и негорючего (вода) компонентов, термического разложения органической части угля, газофазного воспламенения летучих и гетерогенного зажигания коксового остатка от температуры; степенной зависимостью выделенных скоростей окисления от относительной концентрации компонентов; нелинейными скоростями инертного прогрева компонентного топлива вследствие разнородного состава и изменения структуры капли в течение испарения влаги.

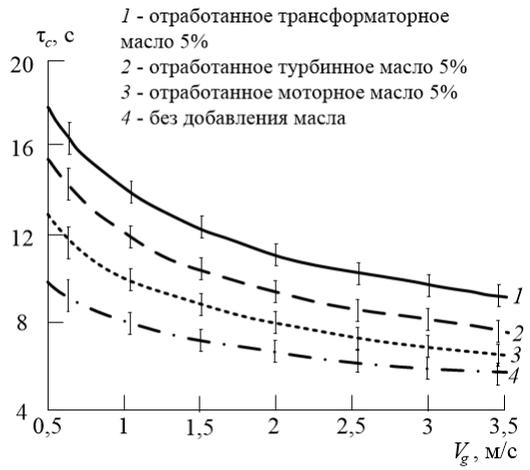
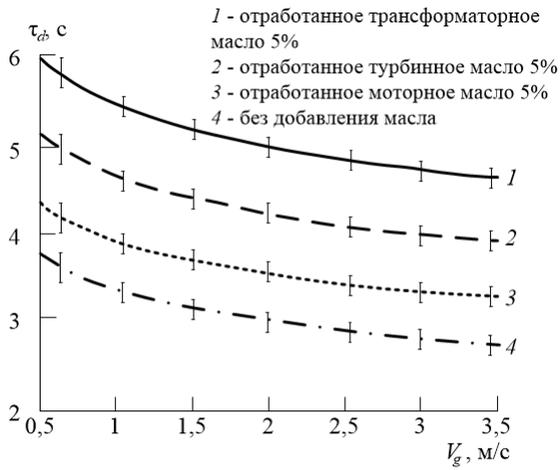
Значения времен задержки зажигания  $\tau_d$  на рисунке 3.2.3 иллюстрируют достаточно широкий диапазон (от нескольких единиц до десятков секунд) возможного изменения этого параметра. Хорошо видно (рисунок 3.2.3), что для ОВУТ на основе бурого угля (составы № 5 и № 6) характерны минимальные значения  $\tau_d$ . Это фактор был определяющим при выявлении минимальной (предельной) температуры окислителя, достаточной для зажигания.

При сравнении времен задержки зажигания ОБУТ с добавлением разных жидких горючих компонентов (рисунок 3.2.3) можно сделать вывод о том, что нефтепродукт может приводить как к росту, так и уменьшению  $\tau_d$ . Это обусловлено соответствующими свойствами жидких горючих компонентов. При использовании этих компонентов с минимальной вязкостью, влажностью, температурой воспламенения и теплотой парообразования длительность инертного прогрева ОБУТ, фазовых превращений и химического реагирования существенно меньше (как следствие, времена  $\tau_d$  минимальны). В случае использования жидких горючих компонентов с высокой зольностью и влажностью, теплотой парообразования, а также высокими температурами воспламенения (таблица 2.1.4) времена  $\tau_d$  могут возрастать.

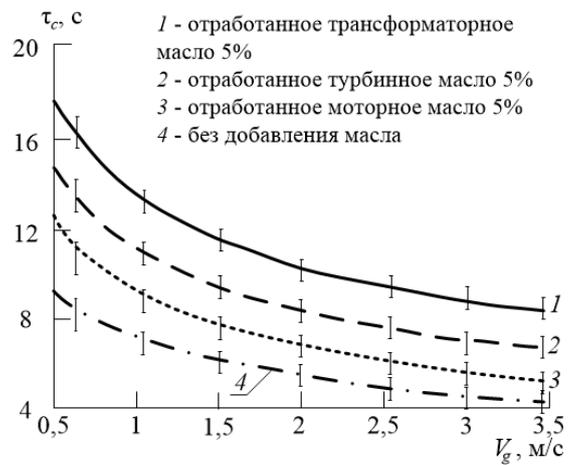
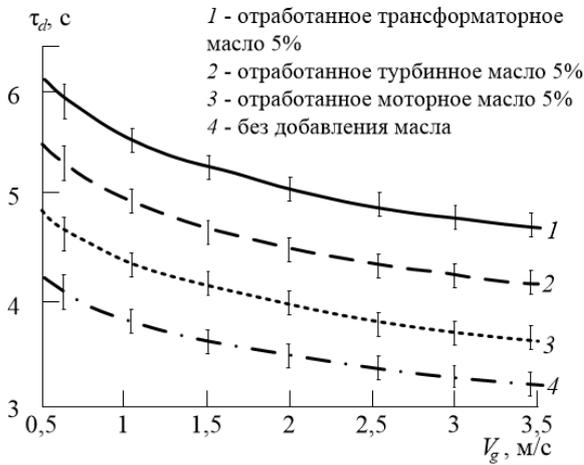
Анализ основных характеристик (таблица 2.1.4) исследованных горючих жидкостей показал, что основное влияние на инерционность процесса зажигания капель ОБУТ оказывает температура воспламенения и влажность. При повышении относительной доли воды в составе ОБУТ существенно снижается температура в капле в процессе зажигания за счет эндотермических фазовых превращений. Это обусловлено увеличением доли энергии разогретого окислителя, расходуемой на испарение воды из приповерхностного слоя капли. Так как тепловые эффекты испарения горючих жидких компонентов в несколько раз меньше аналогичных параметров для воды, то они испаряются быстрее. Продукты испарения таких компонентов смешиваются с продуктами термического разложения органической части угля. Формируется горючая парогазовая смесь. Однако за счет расходования довольно большой доли энергии газов на испарение воды для интенсивного окисления парогазовой смеси энергии окислителя недостаточно. Поэтому времена задержки зажигания нелинейно возрастают с увеличением влажности топливной композиции.

### 3.3. Определение характеристик зажигания органоугольных топлив при варьировании скорости потока окислителя

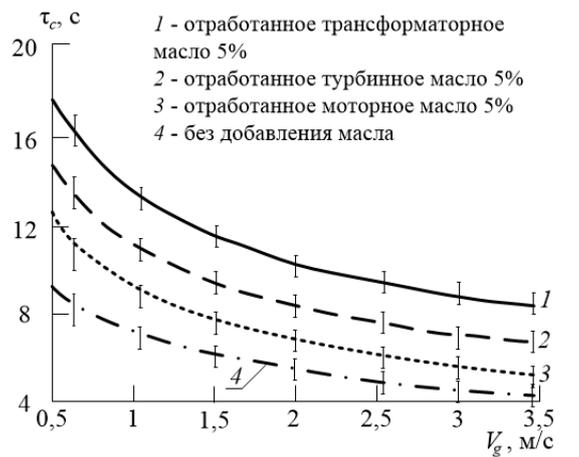
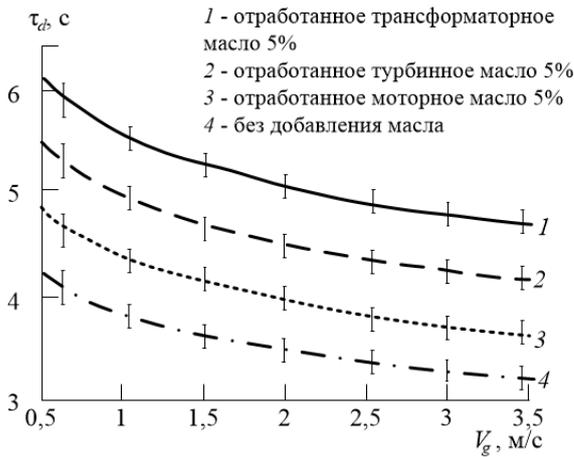
Выполненные эксперименты показали [117, 134], что помимо температуры окислителя значительное влияние на инерционность основных стадий зажигания ОВУТ оказывает скорость движения потока разогретого воздуха (рисунок 3.3.1). Особенно заметно влияние этого параметра при уменьшении температуры окислителя. Выделенная особенность обусловлена тем, что в рассматриваемых условиях доминируют радиационный и конвективный теплообмен на границе «капля – окислитель». При повышении температуры воздуха радиационный (лучистый) поток к поверхности капли существенно быстрее увеличивается (как правило, в несколько раз превышает) по сравнению с конвективным. В таких условиях изменение скорости движения потока окислителя достаточно умеренно влияет на времена  $\tau_d$ . Например, для топливных композиций № 1–4 (таблица 3.2.1) при росте  $V_g$  от 0,5 м/с до 5 м/с и  $T_g \approx 900$  К времена  $\tau_d$  и  $\tau_b$  снижались менее чем на 9–12 % [117]. Это обусловлено доминирующим вкладом радиационного теплообмена по сравнению с конвективным (радиационный тепловой поток ( $q_r$ ) к поверхности капли превышает конвективный ( $q_c$ ) в несколько раз). В частности, теоретические оценки показали, что при температуре газов около 600 К выполняется соотношение  $q_r/q_c \approx 3$ , а при 1000 К значение  $q_r/q_c$  достигает 8. Так как стабильное зажигание капель ВУТ и ОВУТ (таблица 3.2.1, составы № 1–4) происходило только при температуре газов более 650 К, этот эффект определял довольно ограниченное влияние  $V_g$  на интегральные характеристики исследованных процессов.



a



б

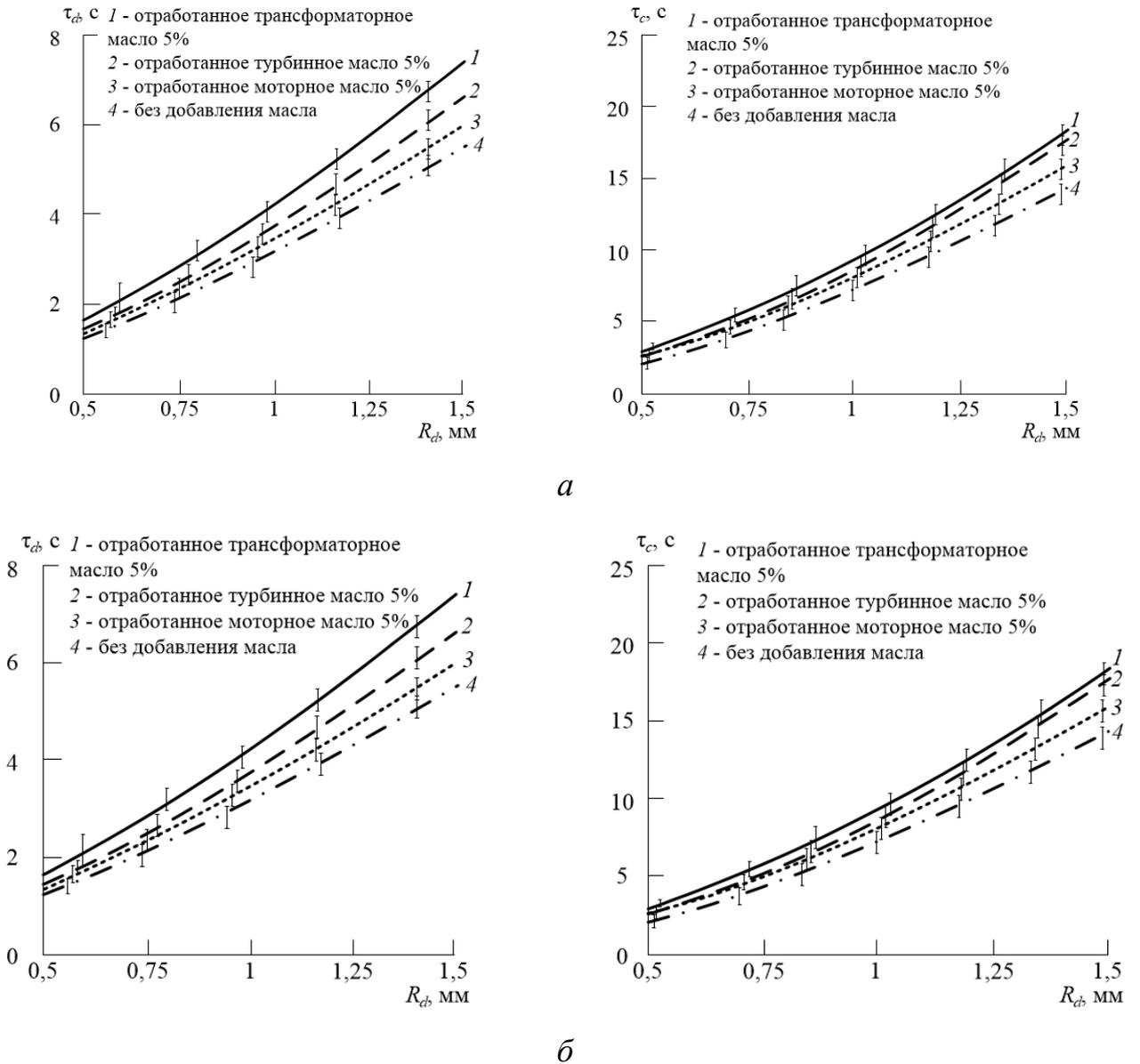


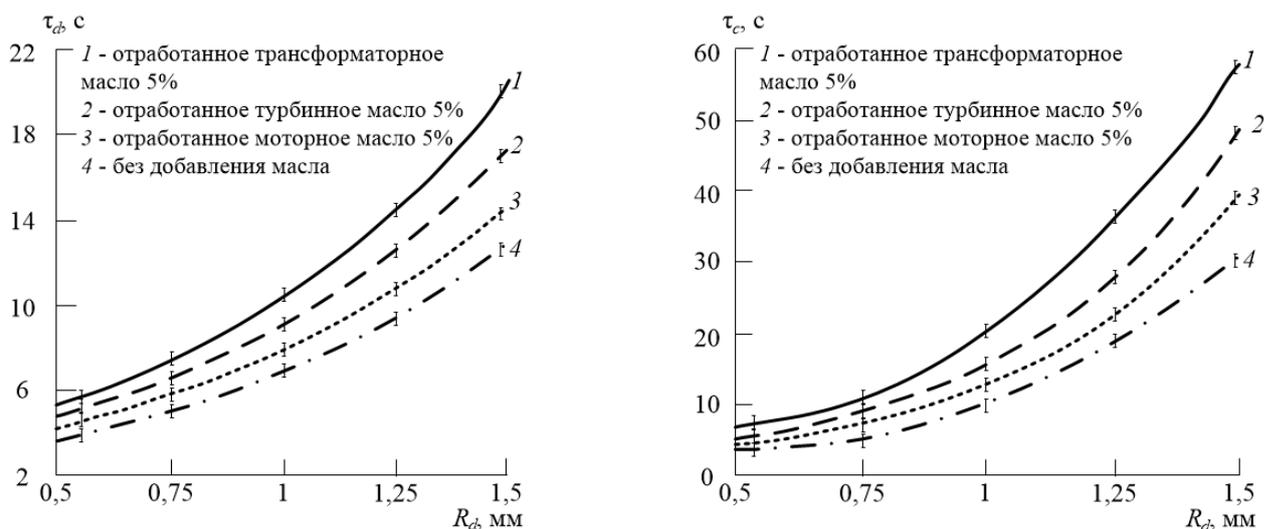
в

Рисунок 3.3.1. Времена задержки зажигания и полного сгорания ОВУТ № 5 (a), № 6 (б), № 7 (в) в зависимости от скорости потока окислителя и при использовании разных жидких горючих компонентов ( $R_d \approx 1$  мм,  $T_g \approx 850$  К) (номера составов соответствуют таблице 3.2.1)

### 3.4. Зажигание капель органоводоугольных топлив при разных начальных размерах

Зависимости на рисунке 3.4.1 позволяют сделать вывод о том, что инерционность процесса зажигания увеличивается практически пропорционально с изменением размера капли. Скорее всего, это обусловлено доминированием во времени задержки зажигания составляющей, характеризующей инертный прогрев топливной композиции.





в

Рисунок 3.4.1. Времена задержки зажигания и полного сгорания ОВУТ № 5 (а), № 6 (б), № 7 (в) при разных значениях начального размера капли и использовании разных жидких горючих компонентов ( $T_g \approx 850$  К,  $V_g \approx 3,5$  м/с) (номера составов соответствуют таблице 3.2.1)

Следует также отметить, что при увеличении размера капли ОВУТ влияние скорости движения потока окислителя на инерционность процессов зажигания возрастает. Это обусловлено несколькими факторами. Во-первых, вследствие увеличения размеров капли повышается площадь поверхности, с которой испаряется влага. Это приводит к росту расхода энергии на парообразование в приповерхностном слое капли. Как следствие, снижается температура окислителя в окрестности капли. Во-вторых, формирующиеся у поверхности капли ОВУТ пары воды создают буферный слой между потоком окислителя и каплей. Чем больше размеры капли, тем существеннее характерные размеры этого слоя. За счет меньшей теплопроводности этого слоя снижается тепловой поток к поверхности капли. Это также приводит к росту времен  $\tau_d$ . В-третьих, при увеличении размеров капли ОВУТ усиливается эффект стока тепла от поверхности к ее центру. Это приводит к уменьшению скорости роста температуры поверхности капли топливной композиции в процессе прогрева.

Проведенные эксперименты [118] показали, что уменьшение размера капли ( $R_d$ ) приводит к росту минимальных температур окислителя ( $T_g^{\min}$ ), необходимых и достаточных для зажигания ОВУТ. Их значения для исследованных составов ОВУТ изменялись в диапазоне от 650 К до 800 К. При увеличении  $R_d$  возрастает концентрация вдуваемых с поверхности капли в окружающую среду продуктов термического разложения и испарения жидких горючих и негорючих компонентов. В результате, скорость реакции окисления парогазовой смеси возрастает относительно аналогичных значений для капель меньшего размера. Этим можно объяснить тем, что предельные температуры окислителя  $T_g^{\min}$  на 80–110 К ниже при  $R_d \approx 1,5$  мм относительно  $R_d \approx 0,5$  мм.

Варьирование размеров частицы топлива существенно влияет на тренды температуры в центре последних в процессе нагрева, зажигания и горения и, соответственно, максимальные значения  $T_d$ . В частности, на рисунке 3.4.2 показано, что увеличение характерного начального размера капли от 1 мм до 3 мм приводит к существенному росту тепловыделения в частице и подъему максимальных значений  $T_d$  на 50–90 К. В ряде экспериментов регистрировался рост даже на 110–120 К. При этом для больших капель ОВУТ характерны меньшие температуры окислителя, достаточные для устойчивого зажигания топлива. В частности, установлено, что для частиц размерами 1 мм и 3 мм отличие минимальных достаточных температур воздуха составляло 60–80 К.

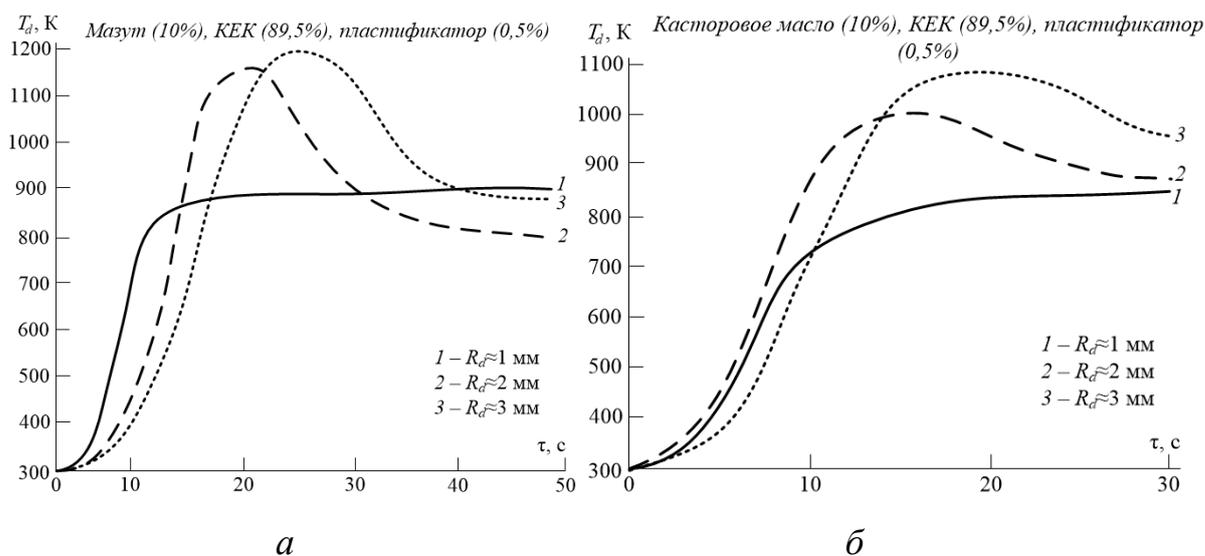


Рисунок 3.4.2. Изменение во времени температуры в центре капли ОБУТ (89,5 % КЕК К (влажный), 0,5 % пластификатор, 10 % жидкий горючий компонент) при варьировании ее размеров и использовании разных жидких горючих компонентов: *а* – мазут, *б* – отработанное касторовое масло

При сравнении времен задержки зажигания и полного сгорания для капель ОБУТ с разными размерами установлены [118] вполне очевидные закономерности. С ростом размеров капель значения  $\tau_d$  и  $\tau_c$  нелинейно увеличивались. Основной причиной, скорее всего, является, как и в случае частиц угольной пыли или водоугольных суспензий усиление роли инертного прогрева. Чем больше размер капли ОБУТ, тем больше времени требуется для ее прогрева до достижения условий зажигания. Во всех экспериментах инициирование горения происходило только после практически полного испарения влаги из приповерхностного слоя капли топливной композиции (процесс характеризуется изменением внешнего вида поверхности капли – она становится шероховатой). Поэтому можно сделать вывод, что при поиске оптимальных параметров сжигания ОБУТ целесообразно установление соответствия между размерами капель, температурами окислителя, а также свойствами и концентрациями основных компонентов.

### 3.5. Влияние концентрации воды на характеристики зажигания органоводоугольных топлив

На рисунке 3.5.1 представлены времена задержки зажигания каплей ОВУТ ( $\tau_d$ ) при варьировании массовой доли воды ( $\varphi_w$ ). В случае увеличения концентрации воды усиливается влияние эндотермических фазовых переходов на интенсивность физико-химических процессов. Это связано с относительно высоким значением теплоты фазового перехода (около 2 МДж/кг). При испарении воды расходуется большая часть энергии, аккумулированной каплей ОВУТ в течение инертного нагрева.

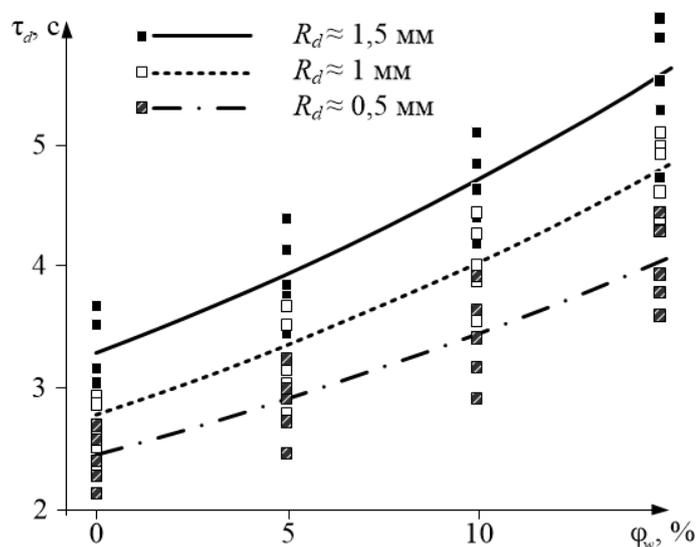


Рисунок 3.5.1. Времена задержки зажигания капли в зависимости от массовой доли воды в составе ОВУТ ((79–94) % КЕК К (влажный), (0–15) % вода, 5 % трансформаторное масло отработанное, 1 % пластификатор) при  $T_g \approx 850$  К и  $V_g \approx 5$  м/с

Нелинейное изменение времени задержки зажигания на 30–40 % с ростом массовой доли воды  $0 \leq \varphi_w \leq 15$  % в капле ОВУТ при  $0,5 \leq R_d \leq 1,5$  мм достаточно очевидно. Это обусловлено соответствующим изменением концентрации вдуваемых с поверхности капли ОВУТ в окружающую среду паров горючей жидкости и воды, а также газообразных продуктов термического разложения органической части угля. При этом доля паров воды возрастала относительно концентрации других компонентов. В тоже

время можно отметить, что при повышении температуры окислителя влияние фактора повышения концентрации воды в составе ОБУТ на длительность инициирования зажигания ослабевала. Эту особенность можно объяснить тем, что скорости газофазного и гетерогенного экзотермических процессов при зажигании капли ОБУТ возрастают по экспоненциальной зависимости при увеличении температуры источника нагрева (в соответствии с законом Аррениуса). В свою очередь зависимость этих параметров от концентрации компонентов парогазовой смеси являются степенными. Поэтому при увеличении температуры окислителя изменение концентрации компонентов горючей смеси влияет менее значительно на характеристики зажигания капли ОБУТ.

Для группы составов ОБУТ (таблица 3.5.1) на основе отходов переработки и обогащения углей энергетических марок (КЕКов в исходном (влажном) состоянии) и отработанных масел проведены экспериментальные исследования [138] для определения влияния концентраций компонентов на характеристики зажигания одиночных капель ОБУТ.

Таблица 3.5.1. Относительные массовые концентрации компонентов ОБУТ

№ состава	Относительные массовые концентрации компонентов
1	55 % вода, 45 % антрацит, 10 % отработанное автомобильное масло, 1 % пластификатор
2	89 % КЕК Т, 10 % отработанное турбинное масло, 1 % пластификатор
3	89 % КЕК Т, 10 % отработанное трансформаторное масло, 1 % пластификатор
4	89 % КЕК Т, 10 % отработанное автомобильное масло, 1 % пластификатор
5	89 % КЕК К, 10 % отработанное трансформаторное масло, 1 % пластификатор
6	89 % КЕК К, 10 % отработанное турбинное масло, 1 % пластификатор

	пластификатор
7	89 % КЕК К, 10 % отработанное автомобильное масло, 1 % пластификатор
8	39 % вода, 50 % уголь марки Д, 10 % отработанное турбинное масло, 1 % пластификатор
9	39 % вода, 50 % уголь марки Д, 10 % отработанное автомобильное масло, 1 % пластификатор
10	39 % вода, 51 % уголь марки Д, 10 % отработанное трансформаторное масло, 1 % пластификатор
11	48 % вода, 41 % уголь марки Б2, 10 % отработанное турбинное масло, 1 % пластификатор
12	48 % вода, 41 % уголь марки Б2, 10 % отработанное автомобильное масло, 1 % пластификатор
13	48 % вода, 41 % уголь марки Б2, 10 % отработанное трансформаторное масло, 1 % пластификатор

Для каждого исследованного состава ОВУТ установлено снижение минимальной (предельной или пороговой) температуры зажигания при увеличении относительной массовой концентрации воды в топливной композиции (таблица 3.5.2). Для интерпретации этого явления целесообразно рассмотреть стадию испарения влаги из приповерхностного слоя капли ОВУТ. Подвод тепла к капле со стороны потока разогретого воздуха вызывает интенсивное парообразование сначала на поверхности, а затем и в глубине капли ОВУТ. Последняя, имея развитую пористую структуру, несколько увеличивается в размерах под давлением образующихся паров воды [91, 139]. Таким образом, расширяется «внутрипоровое» [91] пространство и увеличивается площадь реакционной поверхности капли. Взаимодействие паров воды с углеродом приводит к активизации реакции горения [91, 139] при более низких температурах  $T_g$ . Необходимо отметить,

что увеличение пористости капли играет немаловажную роль в последующем развитии процесса зажигания капли ОБУТ. Подвод тепла к капле, помимо испарения влаги, инициирует термическое разложение угля, сопровождающееся интенсивным выходом летучих. Определенная доля летучих, а также паров горючей жидкости (например, отработанного масла) уносятся потоком окислителя. Оставшаяся их часть успевает воспламениться во «внутрипоровом» [65, 91] объеме образца. За счет теплоты, выделяющейся при газофазном горении масла и продуктов термического разложения, температура поверхности капли (частицы) резко возрастает до значений, достаточных для зажигания углеродного остатка. Выделенные аспекты о влиянии содержания воды на предельные (минимальные) температуры окислителя, достаточные для устойчивого зажигания ОБУТ, довольно хорошо соответствуют известным заключениям об аналогичных эффектах для ВУТ (например, [65, 91, 139]).

Таблица 3.5.2. Влияние концентрации дополнительной воды на минимальные температуры зажигания капель ( $R_d \approx 1$  мм) ОБУТ

№	Исходные компонентные составы ОБУТ	Концентрация дополнительной воды, %			
		0	5	10	15
		Минимальная температура зажигания, К			
1	55% вода, 45% антрацит, 10% отработанное автомобильное масло, 1% пластификатор	880	873	866	862
2	89% КЕК Т, 10% отработанное турбинное масло, 1% пластификатор	874	865	852	846
3	89% КЕК Т, 10% отработанное трансформаторное масло, 1% пластификатор	876	854	845	838
4	89% КЕК Т, 10% отработанное автомобильное масло, 1% пластификатор	875	851	838	820
5	89% КЕК К, 10% отработанное трансформаторное масло, 1% пластификатор	775	759	754	751
6	89% КЕК К, 10% отработанное турбинное масло, 1% пластификатор	763	751	747	740
7	89% КЕК К, 10% отработанное автомобильное масло, 1% пластификатор	758	746	728	722

8	39% вода, 50% уголь марки Д, 10% отработанное турбинное масло, 1% пластификатор	645	631	624	617
9	39% вода, 50% уголь марки Д, 10% отработанное автомобильное масло, 1% пластификатор	628	615	602	596
10	39% вода, 51% уголь марки Д, 10% отработанное трансформаторное масло, 1% пластификатор	610	587	579	576
11	48% вода, 41% уголь марки Б2, 10% отработанное турбинное масло, 1% пластификатор	628	615	602	596
12	48% вода, 41% уголь марки Б2, 10% отработанное автомобильное масло, 1% пластификатор	620	615	600	580
13	48% вода, 41% уголь марки Б2, 10% отработанное трансформаторное масло, 1% пластификатор	592	587	579	575

Следует отметить, что в проведенных экспериментах повышение концентрации воды в исследованных органоводоугольных топливных суспензиях влияло на изменение  $T_g^{\min}$  с разными масштабами. В целом, при добавлении дополнительных (относительно ОБУТ, приведенных в таблице 3.5.1) 15 % воды в составы ОБУТ № 8–13 (таблицы 3.5.1, 3.5.2) на основе угольной пыли установлено менее значительное (не более 3,2 %) падение  $T_g^{\min}$  по сравнению с составами № 2–7 (таблицы 3.5.1, 3.5.2) на основе КЕКов, для которых снижение  $T_g^{\min}$  составило от 2,6 % (состав № 6, таблица 3.5.2) до 5,8 % (состав № 4, таблица 3.5.2). Полученный результат обусловлен тем, что в КЕКах содержится существенно меньше органической части по сравнению с исследованными углями. Как следствие, композиции ОБУТ на основе КЕКов более чувствительны к изменению температуры окислителя. Дальнейшее увеличение концентрации дополнительной воды (выше 15 %) в топливной композиции не проводилось с целью сохранения реологических свойств топлив.

Из таблицы 3.5.2 видно, что инициирование горения капель ОБУТ на основе угольной пыли (составы № 8–13, таблица 3.5.2) происходило при более низких  $T_g^{\min}$  (по сравнению с остальными составами). Данное отличие

может быть связано с тем, что исследованные угли, в отличие от КЕКов, обладая низкой зольностью и большим количеством горючего углерода, повышают реакционную способность капли ОВУТ при достаточно низких  $T_g$  (не более 650 К), в то время как негорючий минеральный балласт (зола) КЕКа снижает реакционную способность ОВУТ. Поэтому для активизации стабильного горения составов ОВУТ на основе КЕКов (№ 2–7, таблица 3.5.2) требовались более высокие значения  $T_g$ . Следует также отметить, что составы ОВУТ на основе КЕКа Т (№ 2–4, таблица 3.5.2) устойчиво зажигались при более высоких температурах по сравнению с составами на основе КЕКа К (№ 5–7, таблица 3.5.2). В этом случае определяющим фактором, скорее всего, являлась не зольность отходов, а различное содержание в них летучих. КЕК К обладает более высоким (по сравнению с КЕКом Т) содержанием легко воспламеняющихся летучих (их концентрации достаточно для зажигания при более низких  $T_g$  и дальнейшего инициирования горения углерода).

Для инициирования горения ОВУТ на основе антрацита (состав № 1, таблица 3.5.2) требовались наибольшие температуры  $T_g$ . Антрацит является углем наивысшей степени метаморфизма (углефикации) и обладает самой высокой среди углей температурой воспламенения (в среднем 960–980 К [140–142]). Несмотря на это, эксперименты показали, что топливная суспензия на основе антрацита, воды и отработанного масла устойчиво зажигается при температуре окислителя 870–890 К.

В экспериментах применялись три типа отработанных масел: трансформаторное, турбинное, автомобильное. Температуры воспламенения этих масел (таблица 2.4) в среднем составляют: 442 К, 466 К и 491 К, соответственно. Можно предположить, что капля ОВУТ будет воспламеняться при более низких  $T_g^{\min}$ , если горючей жидкостью является отработанное трансформаторное масло (в сравнении с каплей ОВУТ с добавлением турбинного или автомобильного масла). Однако данную зависимость иллюстрируют только составы ОВУТ на основе угля марки Б2

(№ 11–13, таблица 3.5.2). Бурые угли имеют минимальные (из рассмотренных углей) предельные температуры зажигания и характеризуются высоким содержанием летучих. Как следствие, интегральные характеристики устойчивого зажигания таких топлив, в первую очередь, зависят от интенсивности протекания газофазного зажигания летучих. В случае добавления в состав ОВУТ масел с относительно небольшой температурой воспламенения (соответствующей температуре зажигания угля) повышается концентрация горючих компонентов в приповерхностном слое капли ОВУТ. Как следствие, предельные температуры зажигания снижаются относительно составов без масел и зависят от концентрации последних в топливе. В случае составов ОВУТ на основе каменных углей, антрацита и КЕКов влияние жидкого горючего компонента на предельную температуру зажигания ослабевает (возможно незначительное повышение или снижение), так как определяющую роль играет достаточно длительный прогрев коксового остатка перед инициированием гетерогенного горения.

Рост концентрации воды в составе ОВУТ, как и ожидалось, приводит к существенному снижению максимальной температуры горения (рисунок 3.5.2). Это обусловлено значительным расходом энергии на эндотермический фазовый переход при парообразовании (около 2 МДж/кг). По этой же причине существенно возрастает инерционность прогрева и зажигания ОВУТ. Зарегистрировано, что рост концентрации воды приводит к снижению минимальной температуры зажигания топлива. Установлено, что при одной и той же температуре коксового остатка массовая скорость горения капли выше при большей концентрации воды. Данный факт обусловлен термохимическим взаимодействием углерода кокса с водяными парами, в результате которого образуются низкорекреационные комплексы, ускоряющие зажигание углеродного остатка.

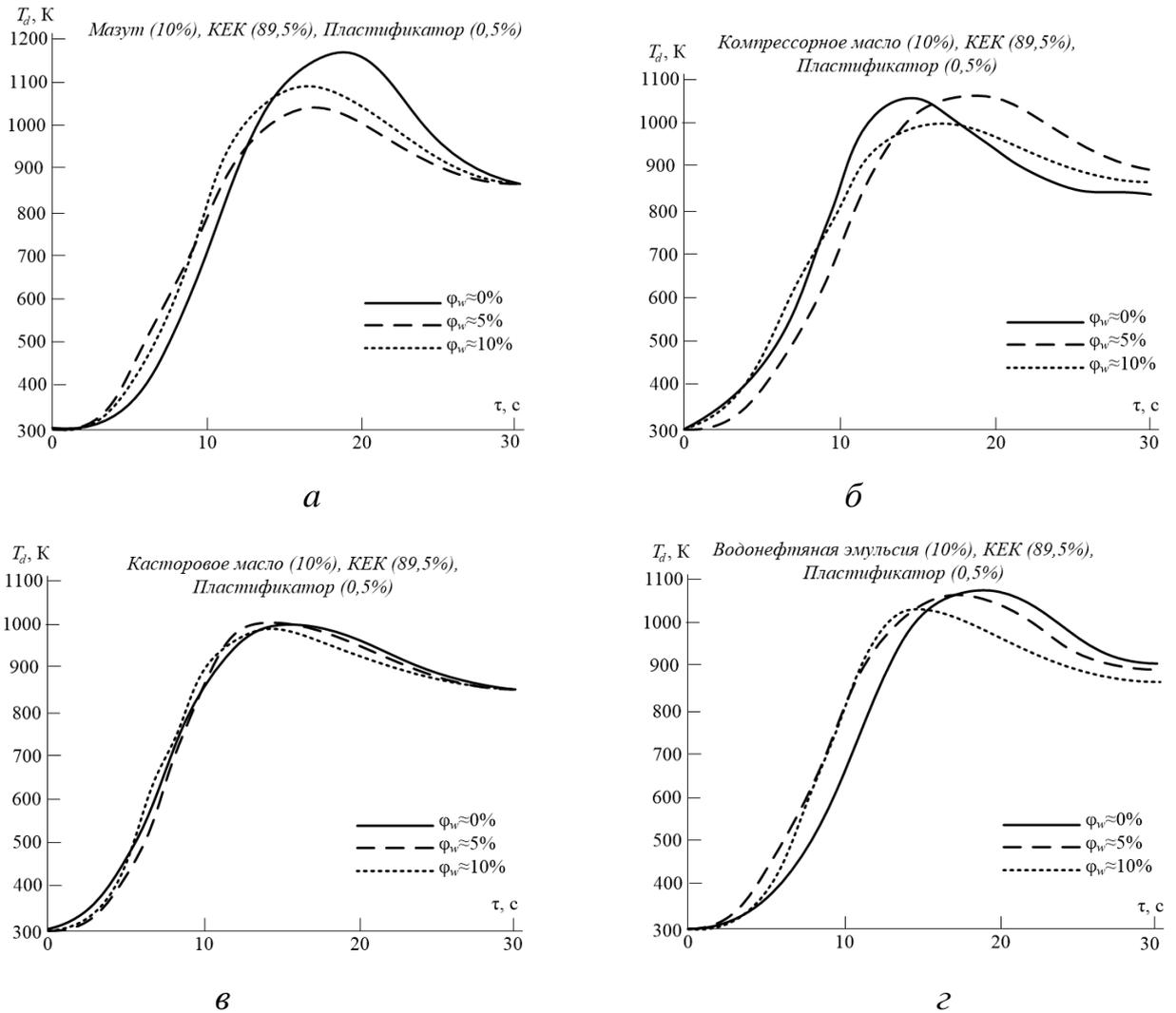


Рисунок 3.5.2. Тренды во времени температуры в центре капли ОБУТ (89,5 % КЕК К (влажный), 0,5 % пластификатор, 10 % жидкий горючий компонент) при варьировании концентрации воды и использовании разных жидких горючих компонентов: а – мазут, б – отработанное компрессорное масло, в – отработанное касторовое масло, г – водонефтяная эмульсия

### 3.6. Закономерности зажигания органоводоугольных топлив при варьировании концентрации твердого горючего компонента

Эксперименты [118] позволили установить, что увеличение массовой доли обогащенного угля в ОБУТ приводит к снижению инерционности процессов его зажигания. Анализ этой особенности наиболее интересен для составов, приготовленных на основе отходов обогащения угля. Повышение концентрации угольной пыли приводит к изменению вязкости смеси и

теплопроводности. Как следствие, уменьшается время инертного прогрева капли ОВУТ и возрастает скорость протекания всех последующих стадий зажигания. На рисунке 3.6.1 представлены времена задержки зажигания капель ОВУТ при варьировании массовой доли обогащенного угля ( $\varphi_c$ ).

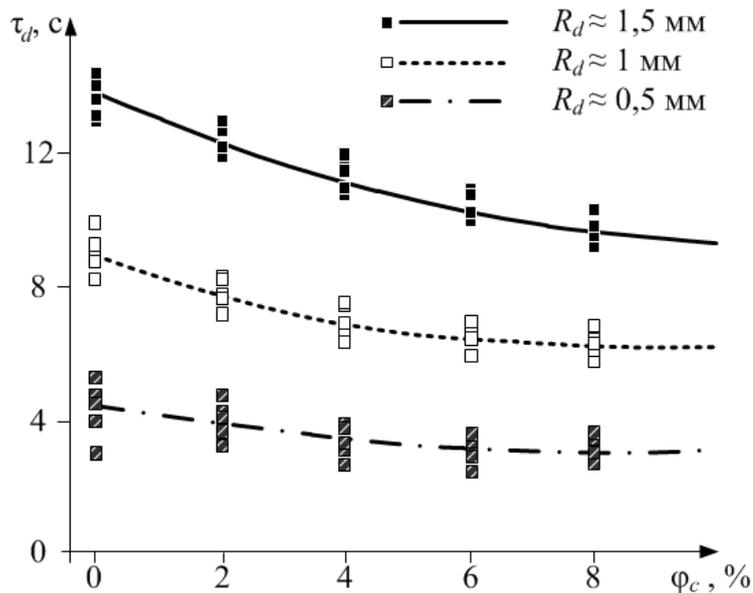


Рисунок 3.6.1. Времена задержки зажигания капли в зависимости от массовой доли обогащенного угля в составе ОВУТ ((79–89) % КЕК К (влажный), (0–10) % каменный уголь марки К, 10 % автомобильное масло отработанное, 1 % пластификатор) при  $T_g \approx 850$  К и  $V_g \approx 5$  м/с

Установленные зависимости (рисунок 3.6.1) можно объяснить влиянием соотношения тепловых эффектов фазовых переходов и реакций окисления при изменении концентрации компонентов ОВУТ. Теплота эндотермического фазового перехода (испарения) более чем в десять раз превышает аналогичный параметр для термического разложения органической части угля. Как следствие, с ростом концентрации обогащенного угля расходуется меньше энергии, аккумулированной каплей ОВУТ в течение инертного нагрева, на инициирование процесса горения. Наряду с этим возрастает концентрация летучих в окрестности капли ОВУТ, что ведет к ускорению зажигания газовой смеси. Дополнительный эффект на уменьшение  $\tau_d$  оказывает изменение оптических характеристик капли ОВУТ при добавлении угольной пыли. В этом случае увеличивается коэффициент

поглощения внешнего излучения. Радиационный теплообмен на границе «капля – окислитель» интенсифицируется. Совокупность этих факторов ведет к уменьшению времен задержки зажигания на 20–30 % при  $0 \leq \varphi_c \leq 10$  % и  $0,5 \leq R_d \leq 1,5$  мм (рисунок 3.6.1).

Рисунок 3.6.2 иллюстрирует влияние размеров частиц угольной пыли (тонины помола) в составе ОБУТ на инерционность процесса зажигания.

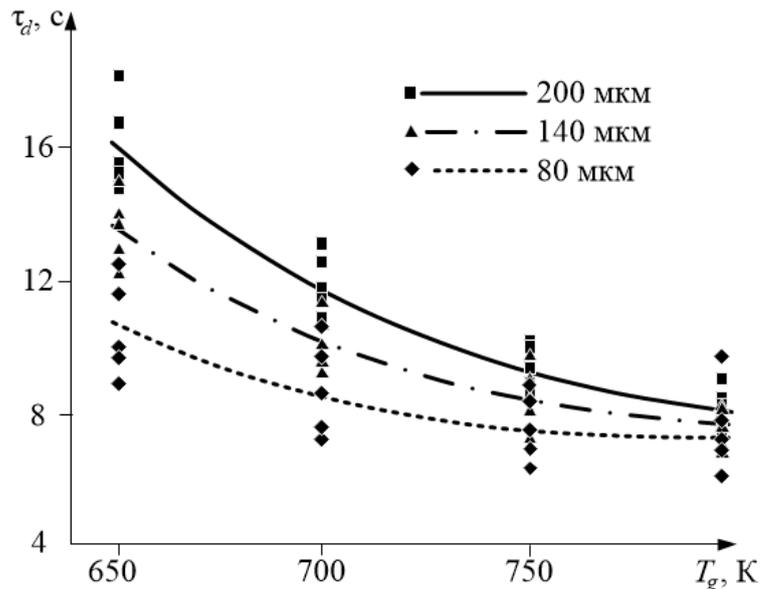
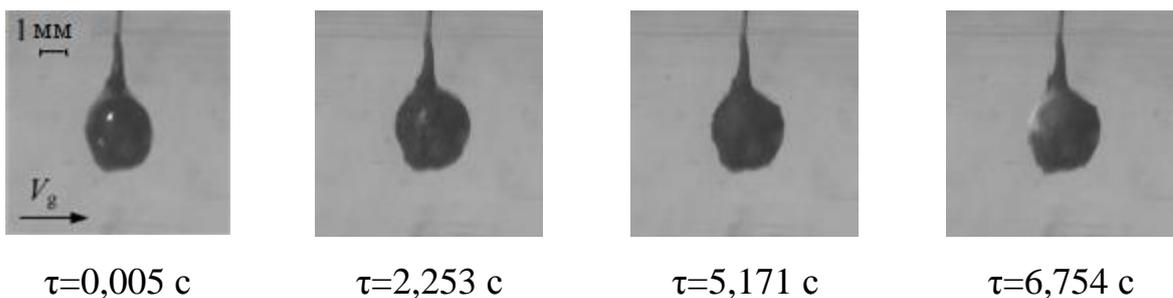


Рисунок 3.6.2. Времена задержки зажигания капли при различных размерах частиц угольной пыли (49 % каменный уголь марки К, 45 % вода, 5 % автомобильное масло отработанное, 1 % пластификатор) при  $R_d \approx 1$  мм и  $V_g \approx 5$  м/с

Установленные зависимости (рисунок 3.6.2) времен задержки зажигания капли ОБУТ от температуры окислителя при варьировании размеров частиц угольной пыли хорошо соответствуют современным представлениям теории горения твердых топлив. Полученные данные коррелируют с теоретическими следствиями численного исследования [52], где в результате математического моделирования зажигания одиночных частиц угля в условиях конвективного нагрева установлено существенное влияние их размеров на условия и характеристики процесса. Показано [52], что длительность процесса нагрева  $\tau_d \approx 20$  с относительно больших ( $R_d \rightarrow 0,5$  мм) частиц угля существенно превышает времена задержки зажигания  $\tau_d \approx 5$  с

частиц размерами  $R_d \rightarrow 0,05$  мм. Вследствие эндотермичности процесса выхода летучих существенно снижается температура (на 50–150 К) газовой смеси в окрестности частицы. Большие изменения температуры характерны для относительно крупных частиц угля. С ростом концентрации продуктов термического разложения энергосодержание возрастает в результате ускорения реакции окисления. Это ведет к увеличению температуры на границе «частица – окислитель» и ускорению прогрева глубинных слоев частицы. Устойчивое зажигание происходит при достижении критических значений как температуры, так и концентрации летучих в среде окислителя. Аналогичные эффекты влияют на времена задержки зажигания составов ОВУТ, содержащих частицы угля.

На рисунках 3.6.3 и 3.6.4 приведены типичные кадры с изображением капель ОВУТ в процессе нагрева, зажигания и полного сгорания в потоке разогретого воздуха. При увеличении массовой доли обогащенного угля в составе ОВУТ можно отметить ряд макроскопических закономерностей. Во-первых, существенно ускоряется стадия инертного прогрева капли ОВУТ. Это обусловлено тем, что снижается относительная концентрация жидкой компоненты (в первую очередь, воды) в капле. Теплота эндотермического фазового превращения (испарения) более чем в десять раз превышает энергию термического разложения органической части угля. Как следствие, с ростом концентрации высококачественного угля меньше энергии внешней газовой среды требуется для прогрева капли ОВУТ.



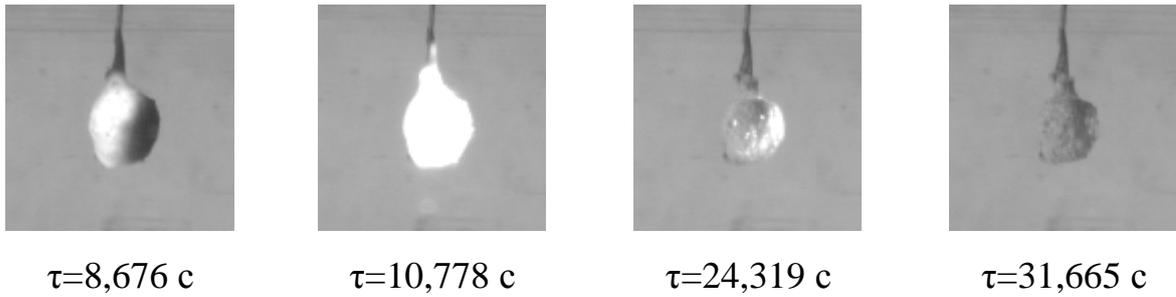


Рисунок 3.6.3. Типичные кадры зажигания и горения ОВУТ (85% КЕК К (влажный), 10 % отработанное автомобильное масло, 5 % уголь марки К) при  $R_d \approx 1$  мм,  $T_g \approx 870$  К,  $V_g \approx 5$  м/с

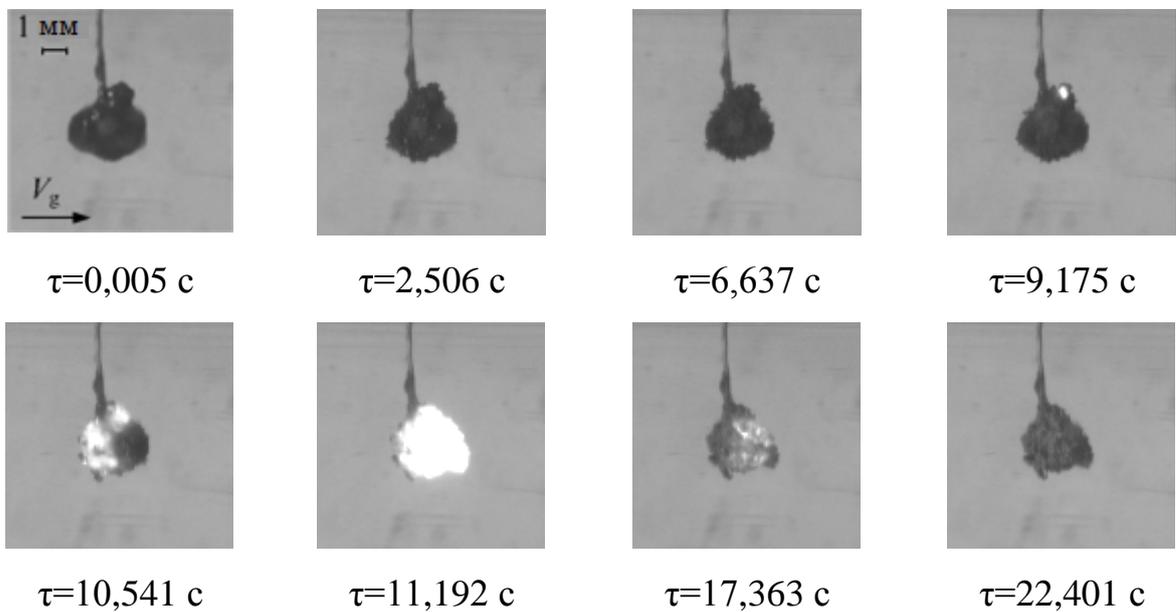


Рисунок 3.6.4. Типичные кадры зажигания и горения ОВУТ (85 % КЕК Т (влажный), 10 % отработанное автомобильное масло, 5 % уголь марки Т) при  $R_d \approx 1$  мм,  $T_g \approx 870$  К,  $V_g \approx 5$  м/с

Во-вторых, температура зажигания угля марок К и Т существенно ниже аналогичного параметра для КЕКов (отходов переработки и фильтрации данных углей). Теплота сгорания же, наоборот, значительно выше. Как следствие, повышение массовой доли высококачественного угля приводит к росту концентрации летучих в малой окрестности капли ОВУТ. В-третьих, введение частиц угля в состав ОВУТ увеличивает теплопроводность, температуропроводность, плотность и вязкость топливной композиции. В-четвертых, рассматриваемое изменение состава ОВУТ приводит к

увеличению коэффициента поглощения излучения (за счет высоких значений для частиц угля). Этот эффект существенно интенсифицирует радиационный теплообмен на границе «капля ОВУТ – газовая среда». Повышение вязкости, плотности, теплопроводности и температуропроводности ОВУТ увеличивает вклад кондуктивного теплопереноса. При этом конвективная составляющая имеет минимальное значение. Выделенные изменения роли механизмов теплопереноса позволяют объяснить причины уменьшения времени задержки зажигания ( $\tau_d$ ) и времени полного сгорания ( $\tau_c$ ) капли ОВУТ с повышением концентрации добавляемого угля (таблица 3.6.1).

Таблица 3.6.1. Времена зажигания и полного сгорания капель ОВУТ при  $R_d \approx 1$  мм,  $T_g \approx 870$  К,  $V_g \approx 5$  м/с

Состав	(90–80 %) КЕК К (влажный), 10 % отработанное автомобильное масло, (0–10 %) уголь марки К			(90–80 %) КЕК Т (влажный), 10 % отработанное автомобильное масло, (0–10 %) уголь марки Т		
	0	5	10	0	5	10
Содержание угля, % масс						
$\tau_d$ , с	8,884	6,760	6,171	10,940	9,242	8,345
$\tau_c$ , с	22,733	16,881	14,934	19,718	15,761	13,863

Данные таблицы 3.6.1 иллюстрируют значительное снижение длительности процесса горения капли ОВУТ ( $\tau_c$ ). Этот эффект иллюстрирует, что даже небольшое добавление обогащенного угля (до 5 % по массовой концентрации) в ОВУТ на основе отходов углерепереработки увеличивает содержание углерода и снижает зольность топливной композиции. Установленные эффекты зарегистрированы в проведенных экспериментах для капель ОВУТ с разными размерами (рисунок 3.6.5).

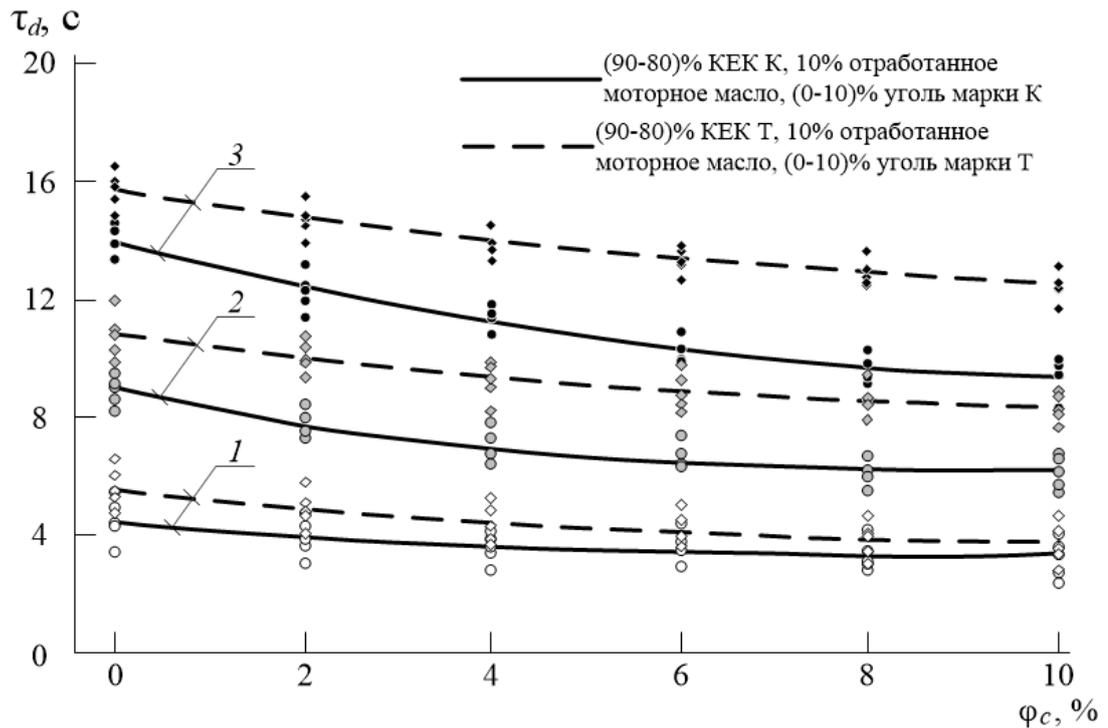


Рисунок 3.6.5. Времена задержки зажигания каплей (радиусы 1 – 0,5 мм, 2 – 1 мм, 3 – 1,5 мм) ОВУТ при разных массовых концентрациях обогащенного угля

Приведенные на рисунке 3.6.5 результаты характеризуют также существенную зависимость времени задержки зажигания от размера капли ОВУТ. Это можно объяснить соответствующими зависимостями от температуры скорости испарения масла и воды, термического разложения органической части угля и окисления продуктов фазовых превращений. Чем меньше размер капли, тем быстрее она прогревается, интенсивнее реализуются фазовые превращения. Однако проведенные эксперименты также показали, что при радиусах каплей менее 0,5 мм зажигание каплей ОВУТ проходило нестабильно от эксперимента к эксперименту. Это обусловлено, скорее всего, тем, что недостаточно летучих выделяется в приповерхностном слое капли для разогрева и зажигания коксового остатка.

В то же время следует отметить, что для всех составов ОВУТ установлены температуры окислителя, необходимые и достаточные для устойчивого зажигания, которые существенно ниже традиционно

принимаемых в топках энергетических установок (более 1000 К). В частности, выявлено, что для зажигания рассматриваемых ОБУТ (таблица 3.6.1) достаточна температура  $T_g$  от 750 К до 800 К. Повышение концентрации обогащенного угля до 15 % в составе ОБУТ приводит к уменьшению необходимых значений  $T_g$  для устойчивого зажигания на 30–40 К.

Таблица 3.6.2 иллюстрирует изменение минимальной температуры устойчивого зажигания капли при варьировании концентрации обогащенного угля в различных ОБУТ. Добавкой к топливным составам на основе исходных (влажных) КЕКов Т и К являлась угольная пыль одноименных марок. Для всех исследованных составов ОБУТ установлено снижение  $T_g^{\min}$  при увеличении концентрации угольной пыли. Эксперименты также показали, что увеличение  $\varphi_c$  приводит к более резкому росту температуры  $T_d$  (за счет дополнительного тепловыделения от сгорания горючих компонентов) за более короткий временной интервал (рисунок 3.6.6).

Таблица 3.6.2. Влияние концентрации дополнительного обогащенного угля на минимальные температуры зажигания капель ( $R_d \approx 1$  мм) ОБУТ на основе КЕКов и углей разных марок

№	Исходные компонентные составы ОБУТ	Массовая доля дополнительного угля, %			
		0	5	10	15
		Минимальная температура зажигания, К			
2	89% КЕК Т, 10% отработанное турбинное масло, 1% пластификатор	874	860	849	838
3	89% КЕК Т, 10% отработанное трансформаторное масло, 1% пластификатор	865	850	840	835
4	89% КЕК Т, 10% отработанное автомобильное масло, 1% пластификатор	858	840	824	815
5	89% КЕК К, 10% отработанное трансформаторное масло, 1% пластификатор	775	764	755	749
6	89% КЕК К, 10% отработанное турбинное масло, 1% пластификатор	763	750	745	740
7	89% КЕК К, 10% отработанное автомобильное масло, 1% пластификатор	755	740	732	726

8	39% вода, 50% уголь марки Д, 10% отработанное турбинное масло, 1% пластификатор	635	618	600	595
9	39% вода, 50% уголь марки Д, 10% отработанное автомобильное масло, 1% пластификатор	610	600	585	575
10	39% вода, 51% уголь марки Д, 10% отработанное трансформаторное масло, 1% пластификатор	595	580	565	560
11	48% вода, 41% уголь марки Б2, 10% отработанное турбинное масло, 1% пластификатор	625	608	595	580
12	48% вода, 41% уголь марки Б2, 10% отработанное автомобильное масло, 1% пластификатор	605	585	578	570
13	48% вода, 41% уголь марки Б2, 10% отработанное трансформаторное масло, 1% пластификатор	585	570	558	552

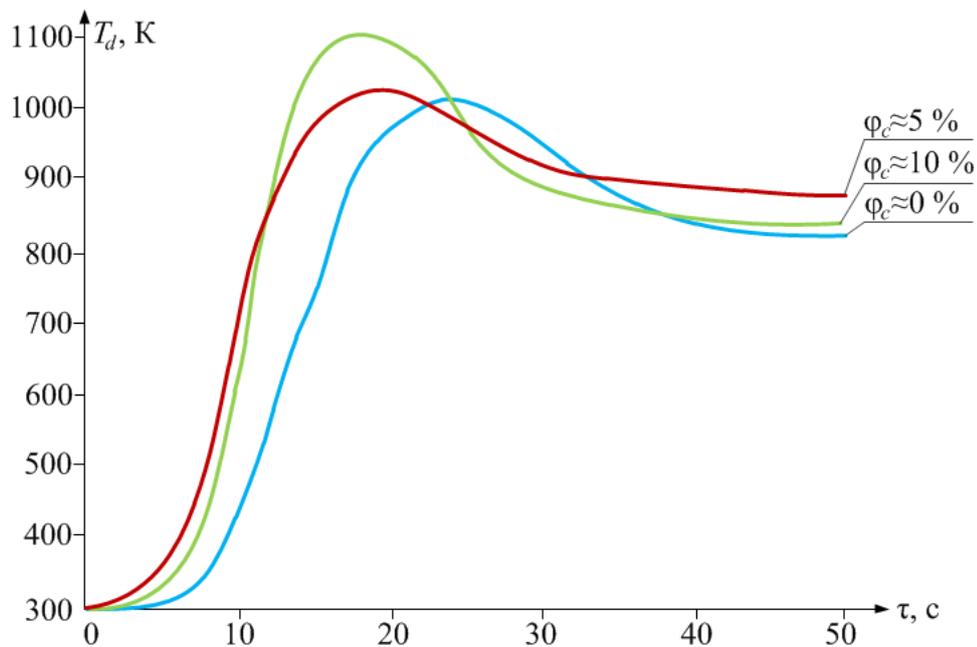


Рисунок 3.6.6. Изменение во времени температуры в центре капли ОВУТ (89 % КЕК К (влажный), 10 % отработанное турбинное масло, 1 % пластификатор) в процессе нагрева потоком разогретого воздуха ( $T_g \approx 1073$  К,  $V_g \approx 3,5$  м/с,  $R_d \approx 1$  мм)

С ростом концентрации угля в составе ОВУТ увеличиваются максимальные значения  $T_d$  (длительность сохранения высоких температур  $T_d$  зависит от скорости выгорания и существенно отличается для углей разной

степени метаморфизма). Полученный результат обусловлен тем, что значения  $T_d$  максимальны на стадии горения коксового остатка. Как следствие, чем больше концентрация последнего в частице топлива, тем выше  $T_d$ . Повышение же концентрации воды в составе ОВУТ может приводить к кратковременному росту  $T_d$  вследствие дополнительного притока энергии (реагирования паров воды во «внутрипоровом» [91, 116] пространстве). Однако выделяемая при этом энергия существенно меньше, чем при горении коксового остатка. Поэтому с ростом концентрации воды регистрировались условия, при которых максимальные температуры  $T_d$  изменялись немонотонно.

На рисунке 3.6.7 приведены тренды температуры в центре капель ОВУТ на основе разных КЕКов. Видно, что характер зависимостей  $T_d(\tau)$  для всех исследованных отходов переработки каменных углей достаточно близок. Но вследствие разных теплоты сгорания и влажности КЕКов (таблицы 2.1–2.3) максимальные температуры ОВУТ отличаются (рисунок 3.6.7).

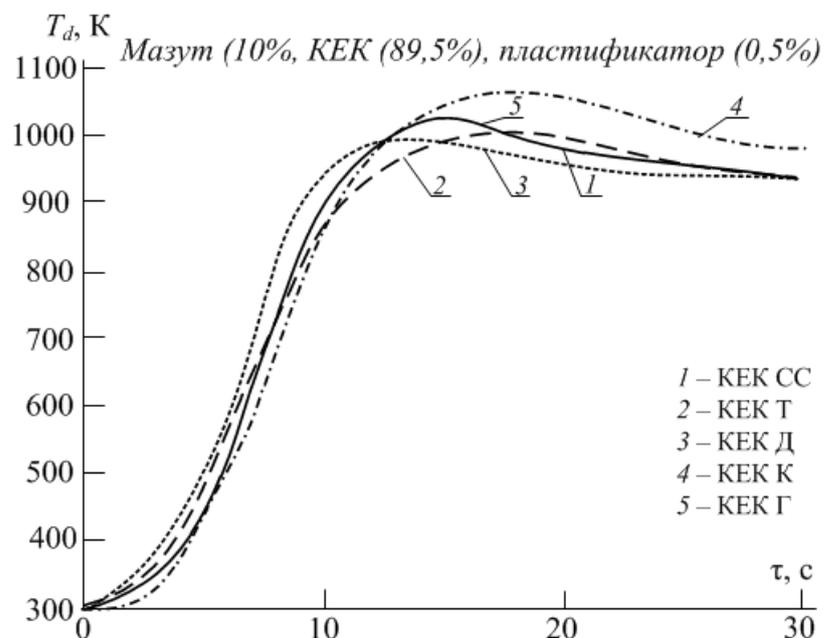


Рисунок 3.6.7. Тренды во времени температуры в центре капли ОВУТ на основе разных КЕКов

### 3.7. Изучение роли жидкого горючего компонента органоводоугольных топлив при их зажигании в потоке окислителя

Повышение концентрации жидкого горючего компонента в ОБУТ может приводить как к снижению (для составов на основе КЕКов), так и к росту (для составов на основе угольной пыли) времен задержки зажигания. Влияние этого эффекта возрастает при увеличении размеров капель (рисунок 3.7.1). Например, для капель с  $R_d \approx 0,5$  мм уменьшение времени задержки зажигания не превышает 15 % при  $0 \leq \varphi_l \leq 15$  %, а для капель с  $R_d \approx 1,5$  мм изменение  $\tau_d$  может достигать 30 % при идентичных условиях.

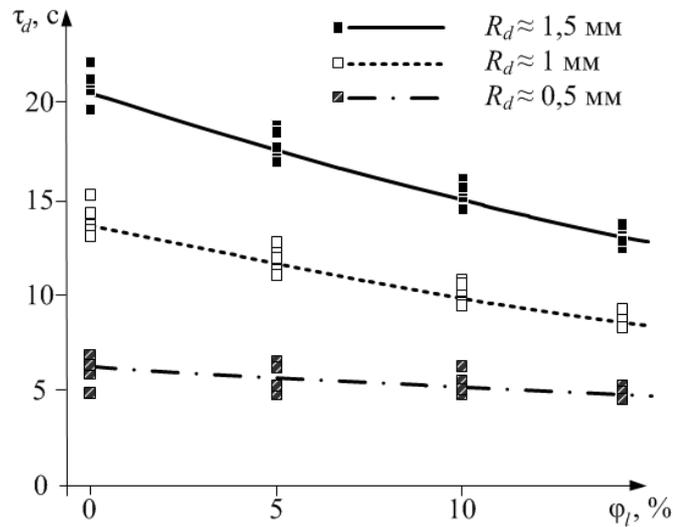


Рисунок 3.7.1. Времена задержки зажигания капли в зависимости от массовой доли жидкого горючего компонента в составе ОБУТ ((84–99) % КЕК К (влажный), (0–15) % турбинное масло отработанное, 1 % пластификатор) при  $T_g \approx 850$  К,  $V_g \approx 5$  м/с

В экспериментах с водонефтяными эмульсиями, характеризующимися высокими значениями теплоты парообразования по сравнению с отработанными маслами, установлены меньшие температуры  $T_d$  и более длительная продолжительность процесса инициирования горения. В частности, установлено [118], что времена задержки зажигания таких составов возрастали на 15–25 % по сравнению с составами ОБУТ на основе отработанных масел при идентичных условиях нагрева.

Известные модели зажигания твердых, жидких и гелеобразных топлив при локальном нагреве [144–148] позволили сделать заключения, что определяющую роль в процессе инициирования горения играет теплоперенос и фазовые превращения на границе «топливо – источник нагрева». По результатам обработки экспериментальных данных установлено, что в проведенных опытах также основными выступали стадии испарения компонентов ОБУТ, их термического разложения, теплопереноса в буферных и приповерхностных слоях. Так, например, на рисунке 3.7.2 приведены типичные кадры видеogramм при инициировании горения капли ВУТ начальным радиусом  $R_d \approx 1$  мм, а на рисунке 3.7.3 – капли ОБУТ при аналогичных условиях.

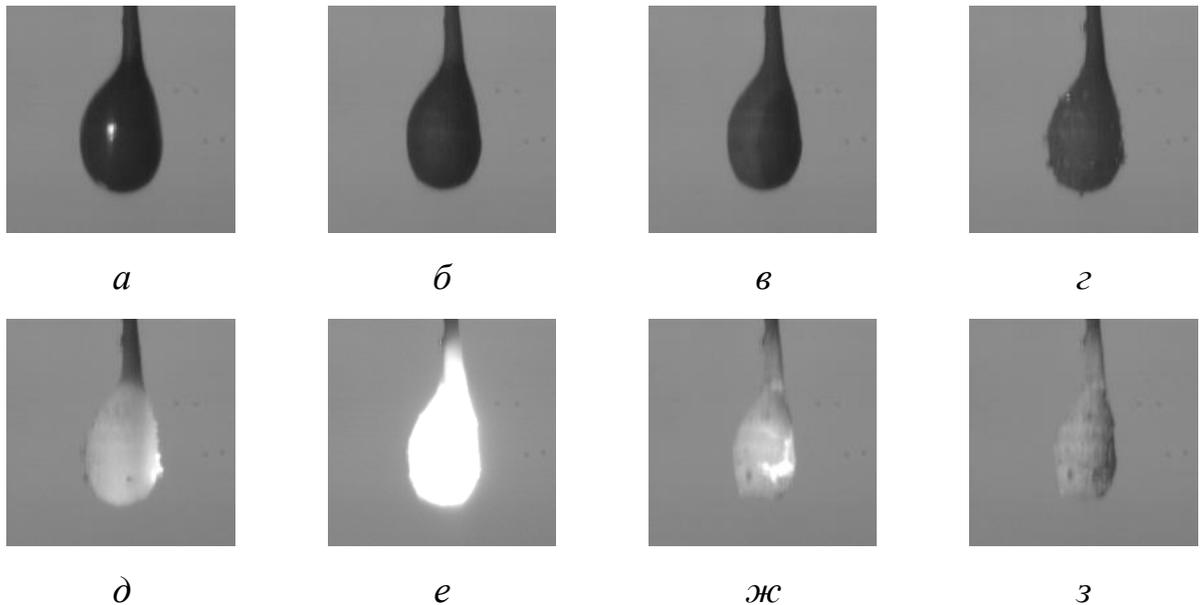


Рисунок 3.7.2. Типичные кадры со стадиями зажигания капли ВУТ (90 % КЕК К (влажный), 10 % вода) при  $R_d \approx 1$  мм,  $T_g \approx 850$  К,  $V_g \approx 5$  м/с: *a* – инертный прогрев, *б* – испарение влаги, *в* – термическое разложение и выход летучих в приповерхностном слое, *г* – интенсивное термическое разложение и фильтрация летучих к поверхности, *д* – зажигание углерода, *е* – горение углерода, *ж* – выгорание углерода, *з* – формирование неорганического остатка

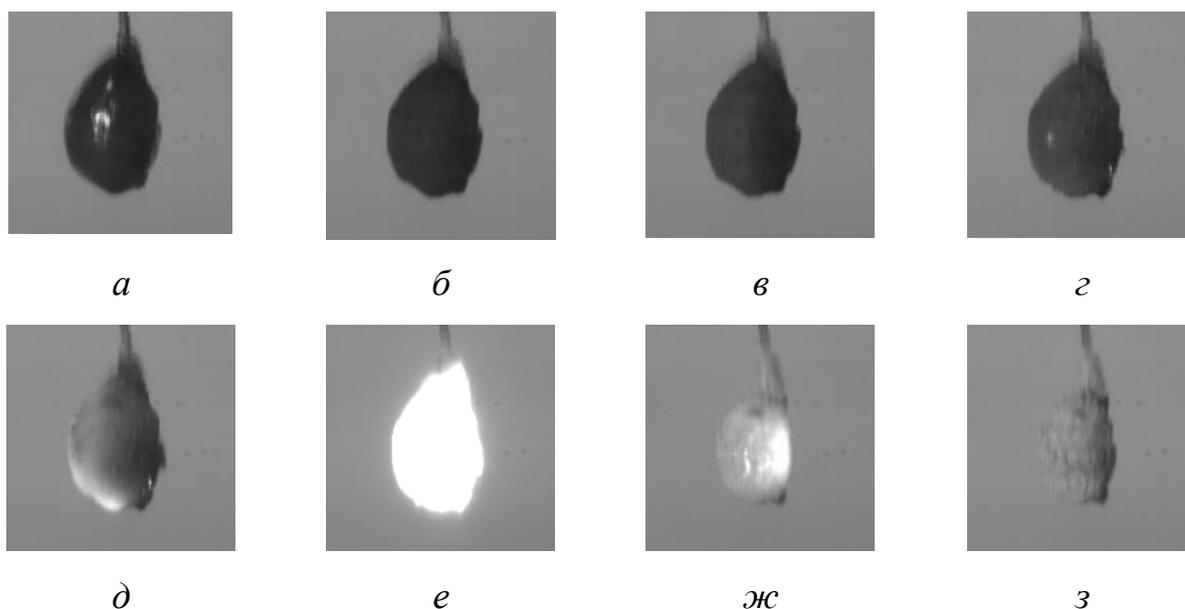


Рисунок 3.7.3. Типичные кадры со стадиями зажигания капли ОБУТ (90 % КЕК К (влажный), 10 % отработанное автомобильное масло) при  $R_d \approx 1$  мм,  $T_g \approx 850$  К,  $V_g \approx 5$  м/с: *а* – инертный прогрев, *б* – испарение влаги, *в* – термическое разложение и выход летучих в приповерхностном слое, *г* – интенсивное термическое разложение и фильтрация летучих к поверхности, *д* – зажигание углерода, *е* – горение углерода, *ж* – выгорание углерода, *з* – формирование неорганического остатка

Процесс зажигания капель ВУТ и ОБУТ условно можно разделить на аналогичные стадии, выделенные на рисунках 3.7.2 и 3.7.3. Начальные стадии (рисунок 3.7.2, *а–г* и рисунок 3.7.3, *а–г*) являются наиболее длительными. Это обусловлено в основном инерционностью прогрева приповерхностного слоя капли, расходом энергии на испарение жидких компонентов и термическое разложение частиц угля. Эти эндотермические фазовые превращения играют определяющую роль. Причем с увеличением концентрации жидкого горючего компонента в составе ОБУТ длительность стадий изменяется, о чем свидетельствует уменьшение значений времен задержки зажигания (таблица 3.7.1).

Таблица 3.7.1. Времена задержки зажигания ( $\tau_d$ , с) каплей ОВУТ на основе КЕКа К при разных массовых долях отработанного масла и размерах капли

Жидкий горючий компонент	Отработанное масло турбинное				Отработанное масло автомобильное			
	0 %	5 %	10 %	15 %	0 %	5 %	10 %	15 %
Массовая доля в составе ОВУТ								
$R_d \approx 0,5$ мм	5,49	4,84	4,62	4,45	5,49	5,61	5,50	5,24
$R_d \approx 1$ мм	14,76	10,52	9,25	8,94	14,76	10,58	10,43	9,69
$R_d \approx 1,5$ мм	22,03	15,25	15,15	13,27	22,03	16,04	15,94	14,35

Можно отметить довольно близкие значения длительностей стадий инертного прогрева для ОВУТ с разным содержанием жидкого горючего компонента (таблица 3.7.1). Стадии же термического разложения и выхода летучих существенно отличаются вследствие низкой температуры вспышки органического отхода – масла по сравнению с углем. Именно этим можно объяснить выделенные на рисунке 3.7.4 отличия времен  $\tau_d$  для капель рассмотренных составов ОВУТ.

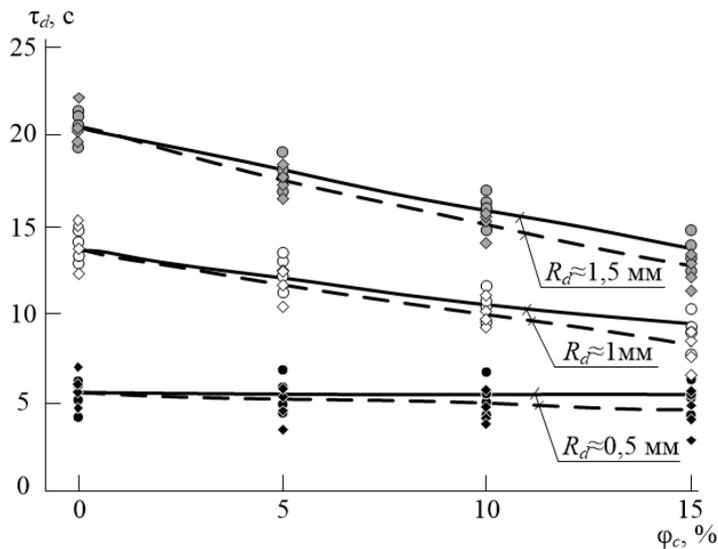


Рисунок 3.7.4. Времена задержки зажигания каплей ОВУТ на основе КЕКа К в зависимости от массовой доли жидкого горючего компонента: — — — отработанное масло турбинное; — отработанное масло автомобильное

Установленное в экспериментах [149] немонотонное влияние (на рисунке 3.7.4 можно выделить участки со снижением или повышением времен  $\tau_d$  для ОБУТ с разными концентрациями  $\varphi_c$ ) органических отходов на интенсификацию горения капель ОБУТ обусловлено группой факторов. Во-первых, при сжигании частиц угля, капель ВУТ и ОБУТ определяющую роль играют процессы термического разложения угля. Важна скорость вдува в приповерхностный слой продуктов термического разложения. При увеличении концентрации масел в ОБУТ снижается доля способного к термическому разложению угля. Увеличивается доля энергии, расходуемая на прогрев и испарение добавляемого компонента. Времена прогрева капель и, соответственно, значения  $\tau_d$  должны расти при увеличении  $\varphi_c$ . Во-вторых, за счет меньшей температуры вспышки добавляемых масел снижается этот параметр для ОБУТ. Это приводит к уменьшению значений  $\tau_d$ . В-третьих, конвективные течения частиц угля в капле значительно интенсифицировались в случае повышения концентрации органической компоненты. Однако теплопроводность и температуропроводность ОБУТ снижается.

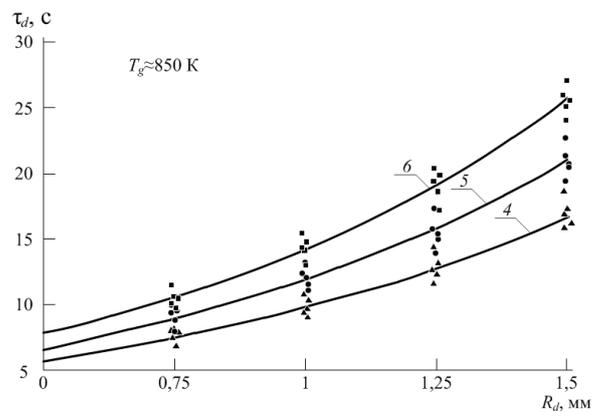
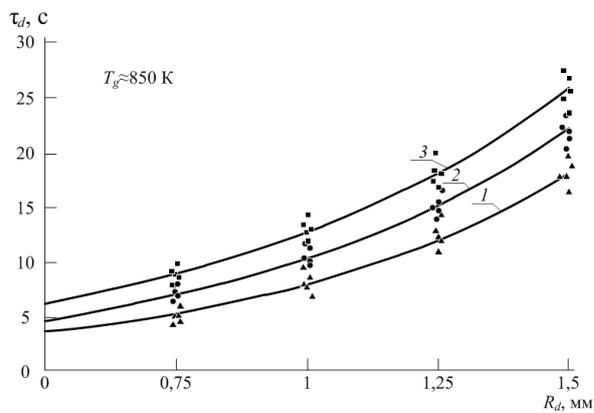
Из рисунка 3.7.4 видно, что с увеличением массовой доли жидкого горючего компонента в составе ОБУТ до 15 % времена задержки зажигания для капель размерами 0,5–1,5 мм снижаются на 20–40 %. Этот эффект характерен для капель относительно большого размера. Для капель меньшего размера изменение  $\tau_d$  не превышает 10 %. Также следует отметить большую длительность индукционного периода для капель ОБУТ на основе отработанного синтетического автомобильного масла по сравнению с составом ОБУТ на основе отработанного турбинного масла (рисунок 3.7.4) при идентичных условиях. Полученный результат объясняется основными характеристиками (таблица 2.4) жидких горючих компонентов.

Исследованы особенности тепломассопереноса, фазовых превращений, химического реагирования при нагреве одиночных капель ОБУТ на основе бурых углей и с различной концентрацией сырой нефти (таблица 3.7.2).

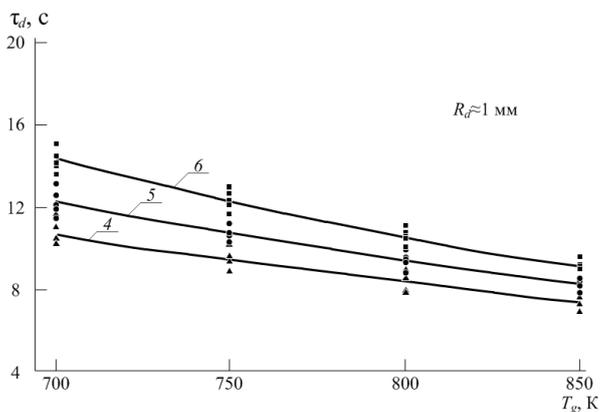
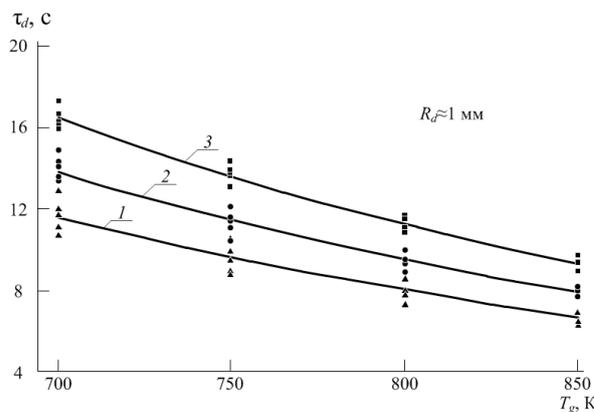
Таблица 3.7.2. Массовые концентрации (%) компонентов ОБУТ

Номер состава ОБУТ	1	2	3	4	5	6
Компонент	Бурый уголь марки Б1			Бурый уголь марки Б2		
Уголь	50	47,5	45	50	47,5	45
Вода	50	47,5	45	50	47,5	45
Сырая нефть	0	5	10	0	5	10

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено увеличение времен задержки зажигания топливных композиций с ростом концентрации нефти (рисунок 3.7.5). Это обусловлено несколькими факторами. Во-первых, температура инициирования горения тяжелой нефти выше аналогичной характеристики для отходов углепереработки (содержащих до 70 % масс легковоспламеняющихся летучих веществ).



a



б

Рисунок 3.7.5. Зависимости времен задержки зажигания при варьировании размеров капель (*a*) и температуры окислителя (*b*) (номера кривых соответствуют составам в таблице 3.7.2)

Во-вторых, при росте концентрации нефти в капле увеличивается эффективная (удельная) теплопроводность. Это ведет к более интенсивному стоку тепла вглубь капли и, следовательно, увеличению времени задержки зажигания до выполнения условий воспламенения. В-третьих, эндотермический фазовый переход (испарение жидкого горючего компонента) существенно влияет на изменение температуры приповерхностного слоя капли.

Можно отметить довольно существенные отличия времен прогрева ( $\tau_h$ ) используемых компонентов топлива. В частности, с использованием формулы  $\tau_h = R_d^2/a$  ( $R_d$  – радиус капли, мм;  $a$  – температуропроводность,  $\text{м}^2/\text{с}$ ) проведены соответствующие оценки значений  $\tau_h$  для соразмерных (например,  $R_d \approx 1$  мм) капель нефти и воды, а также частицы применяемых углей. Установлено, что значения этого параметра составили (при теплофизических параметрах из справочников [127, 150, 151]): нефть – 13,7 с, вода – 7 с, уголь – 21,4 с. Отличием  $\tau_h$  для соответствующих компонентов можно объяснить установленные изменения времен задержки зажигания капель составов № 1–6 (таблица 3.7.2).

На рисунке 3.7.6 представлены времена  $\tau_c$  для рассмотренных составов (таблица 3.7.2) топлив.

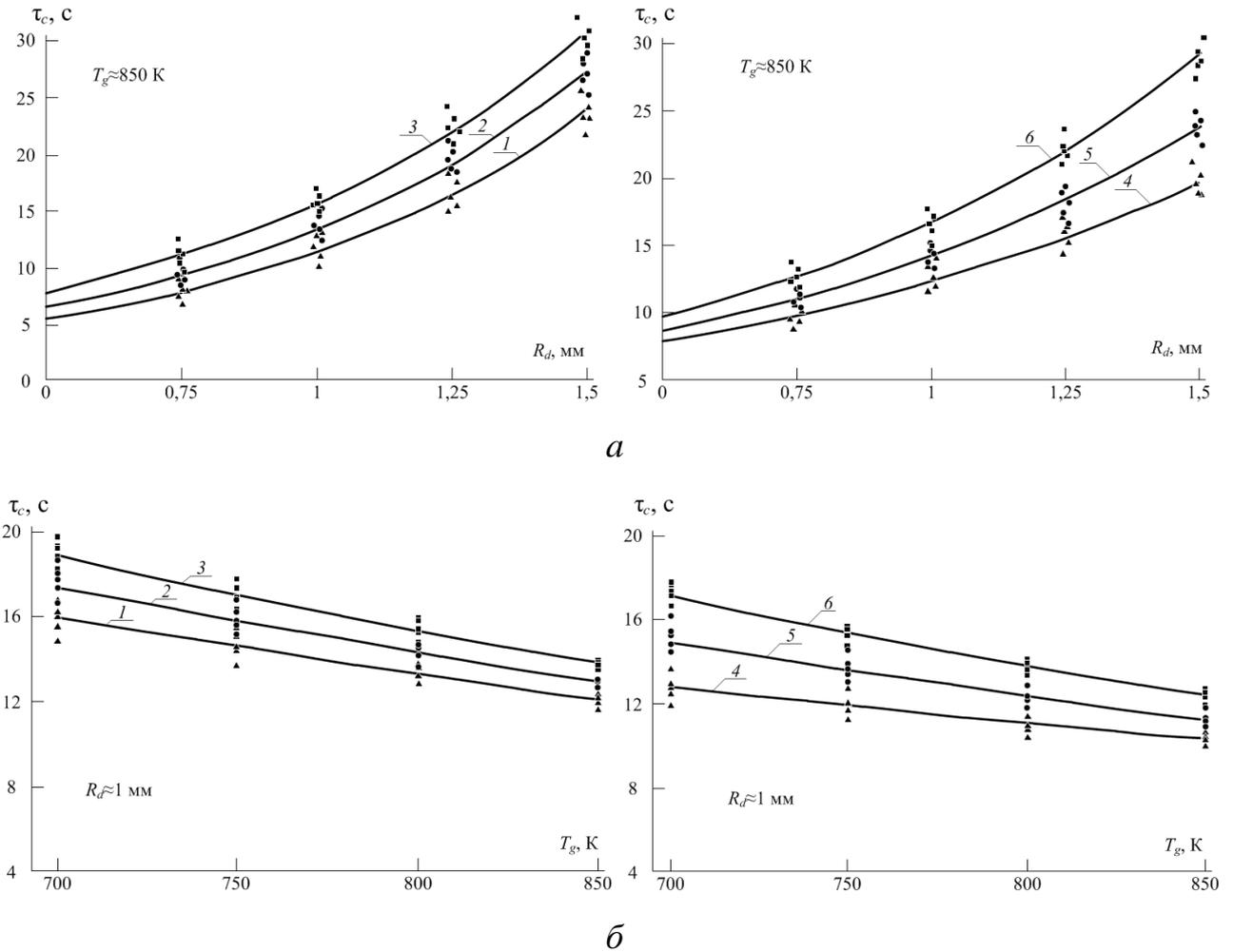


Рисунок 3.7.6. Времена полного сгорания при варьировании размеров капель (а) и температуры окислителя (б) (номера кривых соответствуют составам в таблице 3.7.2)

Установлен рост  $\tau_c$  при увеличении массовой концентрации нефти в капле топлива. Это обусловлено соответствующими отличиями теплоты сгорания и температурных режимов горения компонентов. В частности, для угля значения этих параметров составили около  $20 \cdot 10^3$  Дж/кг и 1300 К, для нефти – около  $40 \cdot 10^3$  Дж/кг и 1500 К. В то же время можно отметить полноту сгорания всех составов топлив. Это иллюстрирует возможности варьирования концентраций компонентов в широких диапазонах. Для всех составов топлив также можно отметить хорошую стабильность (не расслаивались в течение 20–30 суток) и текучесть. Этот результат

характеризует большие перспективы подхода комбинирования между углем и нефтью для создания экологичного и эффективного топлива.

Полученные экспериментальные результаты являются основой для разработки моделей тепломассопереноса при описании особенностей теплопереноса (радиационного, конвективного и кондуктивного), фазовых превращений (испарения, термического разложения) и химического реагирования (окисления) в системе «капля ОВУТ – воздух» на основе уравнений в частных производных (аналогично подходу [149,152,153]).

На рисунке 3.7.7 представлены тренды  $T_d(\tau)$  для разных по компонентному составу суспензий ОВУТ при варьировании температуры окислителя  $T_g$ . Как и следовало ожидать, температура  $T_d$  выше в опытах с большими значениями  $T_g$ . Однако этот рост нельзя считать значительным. Особенно в экспериментах с ОВУТ на основе горючих компонентов с меньшими температурами кипения, воспламенения и вспышки, а также меньшим исходным содержанием влаги. В этом случае максимальные значения  $T_d$  отличались в пределах 20–30 К для опытов, в которых температура окислителя изменялась на 100–200 К. Например, такие заключения можно сделать для ОВУТ на основе отработанного компрессорного масла (рисунок 3.7.7б).

Для ОВУТ на основе отработанного касторового масла, например, на рисунке 3.7.7в видно довольно существенное влияние температуры окислителя на максимальные значения  $T_d$ . Это обусловлено довольно высокой температурой вспышки и воспламенения этого масла. Требуется большой подвод энергии для устойчивого зажигания и реагирования по всей поверхности частицы топлива. Чем больше температура окислителя, тем интенсивнее происходит реагирование ОВУТ с таким маслом. Для ОВУТ на основе мазута и водонефтяной эмульсии (рисунки 3.7.7а, г) сложно сделать какие-либо однозначные выводы, так как максимальные значения  $T_d$  отличаются несущественно при изменении  $T_g$ .

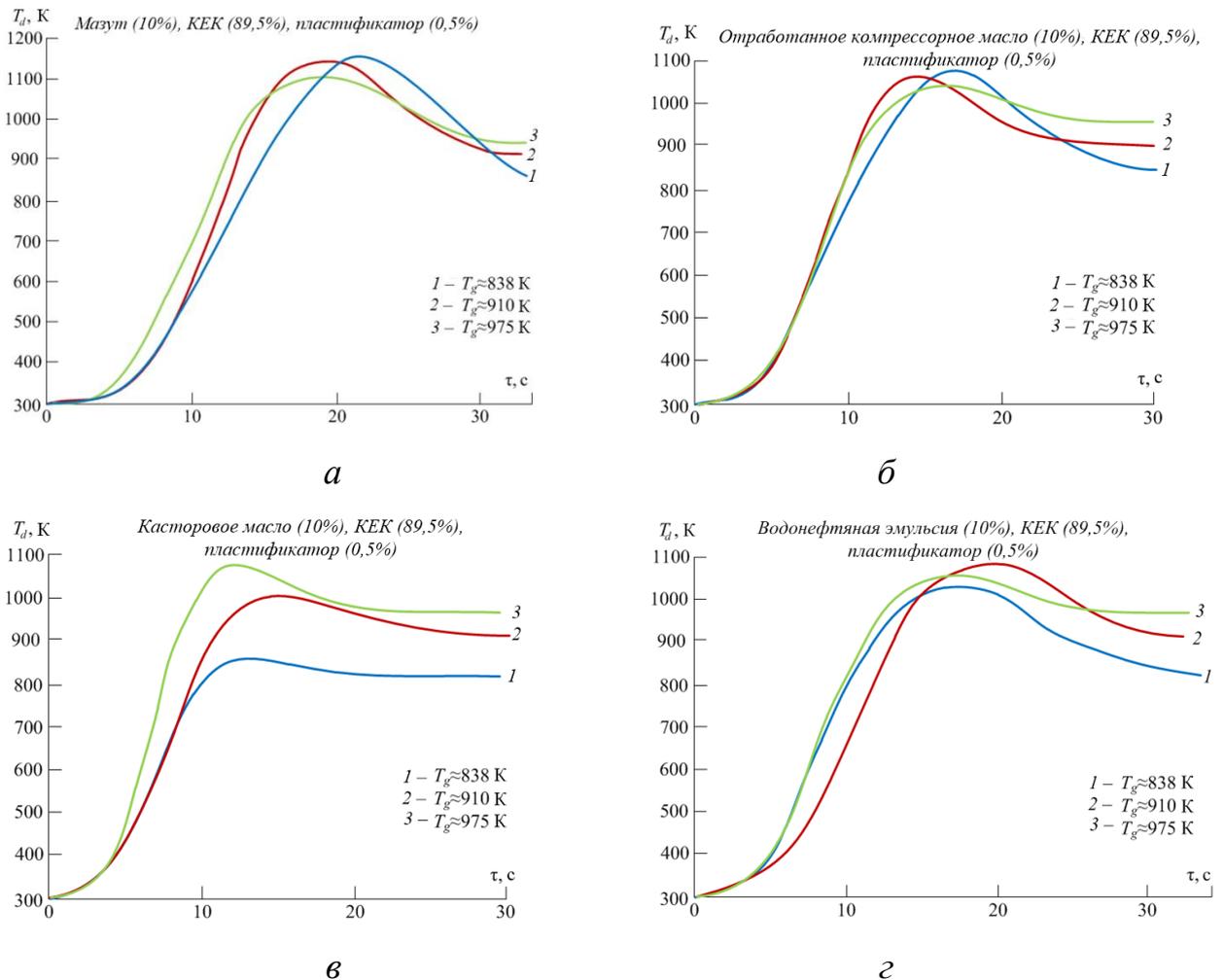


Рисунок 3.7.7. Тренды во времени температуры в центре капли ОБУТ (89,5 % КЕК К (влажный), 0,5 % пластификатор, 10 % жидкий горючий компонент) при варьировании температуры окислителя и использовании разных жидких горючих компонентов: *а* – мазут, *б* – отработанное компрессорное масло, *в* – отработанное касторовое масло, *г* – водонефтяная эмульсия

Добавление жидких горючих компонентов в состав ВУТ может приводить как к росту максимальной температуры  $T_d$ , так и ее снижению (рисунок 3.7.8). В случае высокой теплоты сгорания жидкого горючего компонента (таблица 2.4) рост его концентрации приводил к увеличению максимальных значений  $T_d$ . В случае близких значений высшей теплоты сгорания твердого и жидкого горючего компонента влияние роста концентрации последнего не может быть существенным (рисунок 3.7.8). В этом случае могут отличаться интегральные характеристики зажигания,

например, времена задержки зажигания. Но основными факторами, определяющими эти характеристики, являются характерные температуры кипения и воспламенения жидких горючих компонентов в сравнении с температурами термического разложения органической части угля.

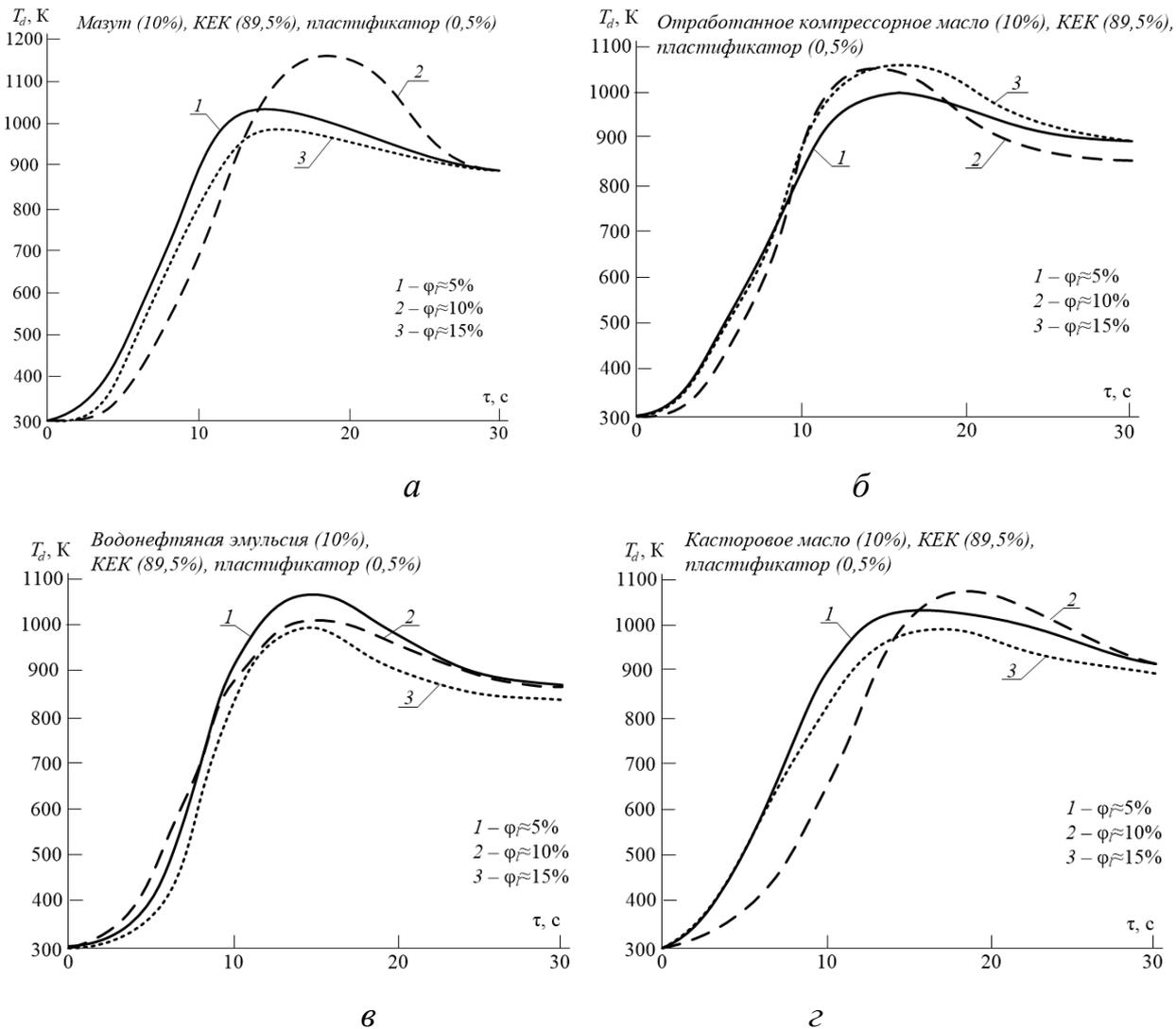


Рисунок 3.7.8. Тренды во времени температуры в центре капли ОВУТ (89,5 % КЕК К (влажный), 0,5 % пластификатор, 10 % жидкий горючий компонент) при варьировании вида и концентрации жидкого горючего компонента: *а* – мазут, *б* – отработанное компрессорное масло, *в* – отработанное касторовое масло, *г* – водонефтяная эмульсия

Жидкие горючие компоненты, несмотря на существенно бóльшую теплоту сгорания по сравнению с КЕКами (таблицы 2.3, 2.4) могут способствовать росту инерционности процессов прогрева (рисунки 3.7.9–

3.7.11). Такие особенности обусловлены изменением длительности стадий прогрева влагосодержащей части топлива, испарения жидких компонентов, формирования смеси паров воды, горючей жидкости и продуктов термического разложения твердого горючего компонента. В частности, высокоскоростная видеорегистрация показала, что рост концентрации масел приводил к разной интенсивности (длительности) выделенных стадий. Например, в случае мазута процессы замедлялись. Для них свойственно довольно медленное формирование пузырьков с парами и летучими на поверхности топлива. В экспериментах, например, с отработанными касторовым и компрессорным маслами эти пузырьки не так заметны (их размеры и количество в разы меньше, чем в опытах с мазутом). Эти особенности иллюстрируют важность при работе с ВУТ и ОВУТ смачивающих и связывающих свойств добавляемых горючих жидкостей. Это важное и самостоятельное научное направление.

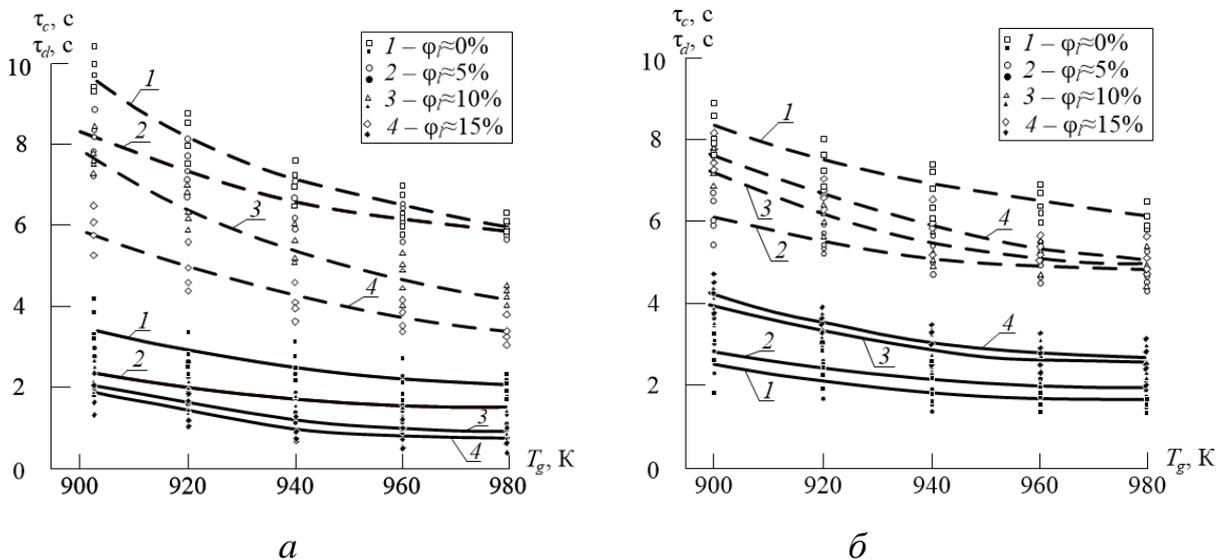


Рисунок 3.7.9. Времена задержки зажигания (сплошная линия) и полного сгорания (пунктирная линия) каплей ОВУТ (состав: 90 % КЕК К (влажный), 10 % масло) с разной концентрацией горючей жидкости (а – мазута; б – отработанного компрессорного масла) в зависимости от температуры окислителя (при  $V_g \approx 3,5$  м/с и  $R_d \approx 1$  мм)

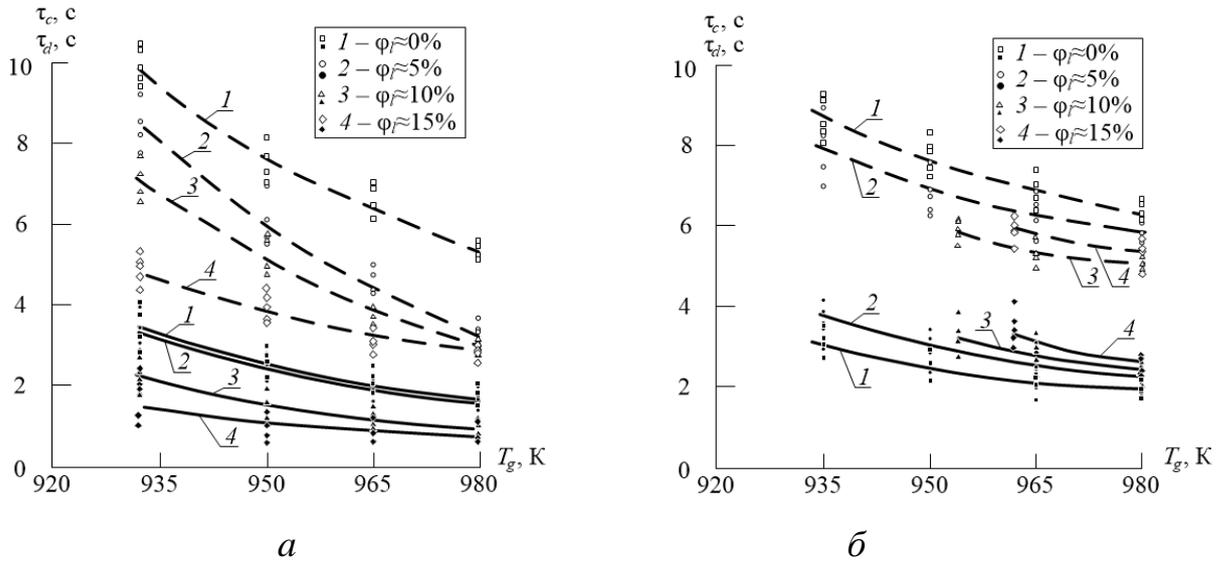


Рисунок 3.7.10. Времена задержки зажигания (сплошная линия) и полного сгорания (пунктирная линия) капель ОВУТ (состав: 90 % КЕК Т (влажный), 10 % масло) с разной концентрацией горючей жидкости (*a* – мазута; *б* – отработанного компрессорного масла) в зависимости от температуры окислителя (при  $V_g \approx 3,5$  м/с и  $R_d \approx 1$  мм)

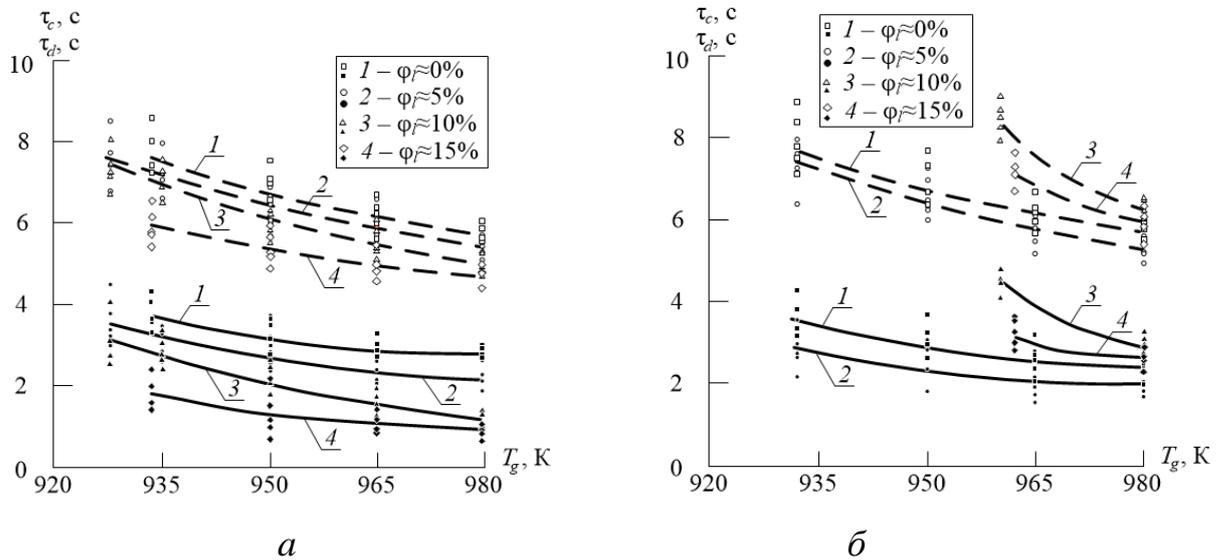


Рисунок 3.7.11. Времена задержки зажигания (сплошная линия) и полного сгорания (пунктирная линия) капель ОВУТ (состав: 90 % КЕК СС (влажный), 10 % масло) с разной концентрацией горючей жидкости (*a* – мазута; *б* – отработанного компрессорного масла) в зависимости от температуры окислителя (при  $V_g \approx 3,5$  м/с и  $R_d \approx 1$  мм)

В таблице 3.7.3 приведены времена задержки зажигания и полного сгорания капель ОБУТ разного компонентного состава. Выделенные значения  $\tau_d$  и  $\tau_c$  позволяют оценить возможные интервалы изменения этих параметров при варьировании массовой доли типичных твердых и жидких компонентов ОБУТ в достаточно широких диапазонах.

Таблица 3.7.3. Времена задержки зажигания и полного сгорания капель ОБУТ при  $R_d \approx 1$  мм,  $T_g \approx 850$  К,  $V_g \approx 5$  м/с

Состав	$\tau_d$ , с	$\tau_c$ , с
КЕК (влажный) каменного угля марки К	19,4	34
95 % КЕК (влажный) каменного угля марки К, 5 % автомобильное масло отработанное	10,5	20,3
95 % КЕК (влажный) каменного угля марки К, 5 % трансформаторное масло отработанное	12,7	27,4
95 % КЕК (влажный) каменного угля марки К, 5 % тяжелая нефть	13,7	29,6
95 % КЕК (влажный) каменного угля марки К, 5 % турбинное масло отработанное	14,6	33,5
95 % КЕК (влажный) каменного угля марки К, 5 % турбинное масло отработанное с механическими примесями и водой	15,8	33,5
100 % КЕК (влажный) каменного угля марки Т	30,8	53,2
95 % КЕК (влажный) каменного угля марки Т, 5 % автомобильное масло отработанное	15,9	27,8
95 % КЕК (влажный) каменного угля марки Т, 5 % трансформаторное масло отработанное	16,5	29,8
95 % КЕК (влажный) каменного угля марки Т, 5 % тяжелая нефть	16,8	28,3
95 % КЕК (влажный) каменного угля марки Т, 5 % турбинное масло отработанное	17,4	29,1

95 % КЕК (влажный) каменного угля марки Т, 5 % турбинное масло отработанное с механическими примесями и водой	18,5	30,5
100 % КЕК (влажный) каменного угля марки СС	15,2	22,7
95 % КЕК (влажный) каменного угля марки СС, 5 % автомобильное масло отработанное	8,4	17,6
95 % КЕК (влажный) каменного угля марки СС, 5 % трансформаторное масло отработанное	8,9	16
95 % КЕК (влажный) каменного угля марки СС, 5 % тяжелая нефть	9,6	16,9
95 % КЕК (влажный) каменного угля марки СС, 5 % турбинное масло отработанное	10,4	18,5
95 % КЕК (влажный) каменного угля марки СС, 5 % турбинное масло отработанное с механическими примесями и водой	12,1	17,6
90 % КЕК (влажный) каменного угля марки К, 10 % автомобильное масло отработанное	5,8	16
90 % КЕК (влажный) каменного угля марки К, 10 % турбинное масло отработанное	8,8	20,7
85 % КЕК (влажный) каменного угля марки К, 15 % турбинное масло отработанное	8,3	20,3
50 % бурый уголь марки Б1, 50 % вода	2,8	5,8
47,5 % бурый уголь марки Б1, 47,5 % вода, 5 % автомобильное масло отработанное	4,1	7,8
47,5 % бурый уголь марки Б1, 47,5 % вода, 5 % трансформаторное масло отработанное	4,8	8
47,5 % бурый уголь марки Б1, 47,5 % вода, 5 % турбинное масло отработанное	5,6	9,4
47,5 % бурый уголь марки Б1, 47,5 % вода, 5 % тяжелая	5,9	14

нефть		
45 % бурый уголь марки Б1, 45 % вода, 10 % тяжелая нефть	3,8	11,8
50 % бурый уголь марки Б2, 50 % вода	2,7	6
47,5 % бурый уголь марки Б2, 47,5 % вода, 5 % автомобильное масло отработанное	2,7	8
47,5 % бурый уголь марки Б2, 47,5 % вода, 5 % трансформаторное масло отработанное	3,1	6
47,5 % бурый уголь марки Б2, 47,5 % вода, 5 % турбинное масло отработанное	3	7,8

На основании данных таблицы 3.7.3 можно сделать несколько заключений. Во-первых, большую часть времени  $\tau_c$  составляют значения  $\tau_d$ . Как следствие, определяющую роль в процессе сжигания ОВУТ играют стадии, предшествующие гетерогенному горению коксового остатка. Для оптимизации процессов сжигания ОВУТ в энергетике и других секторах промышленности целесообразно минимизировать  $\tau_d$  (в том числе и за счет выбора оптимальных концентраций и характеристик компонентов в составе топливной композиции). Во-вторых, изменение концентрации компонентов ОВУТ может совершенно по-разному влиять на длительности стадий зажигания. В частности, рост концентрации высококачественного обогащенного угля в ОВУТ приводит к снижению времен задержки зажигания, а также увеличению времени горения и температуры сгорания. Также уменьшаются минимальные температуры окислителя, достаточные для устойчивого инициирования горения топливных композиций. Поэтому при варьировании концентрации компонентов целесообразно выделять основные цели – минимизацию ресурсов при зажигании топливной композиции или повышение тепловых эффектов процесса горения. В-третьих, определяющими в процессе газофазного горения смеси продуктов испарения жидкого горючего компонента и термического разложения

органической части угля, а также гетерогенного горения коксового остатка являются характеристики твердого компонента ОВУТ (влажность угля и содержание летучих веществ). Последние параметры определяют скорости прогрева композиций и скорости вдува горючих газообразных компонентов в приповерхностный слой капли ОВУТ. Эти параметры играют важнейшую роль при определении скоростей соответствующего химического реагирования (газофазного и гетерогенного).

### **3.8. Минимальные температуры зажигания типичных органоводоугольных топлив**

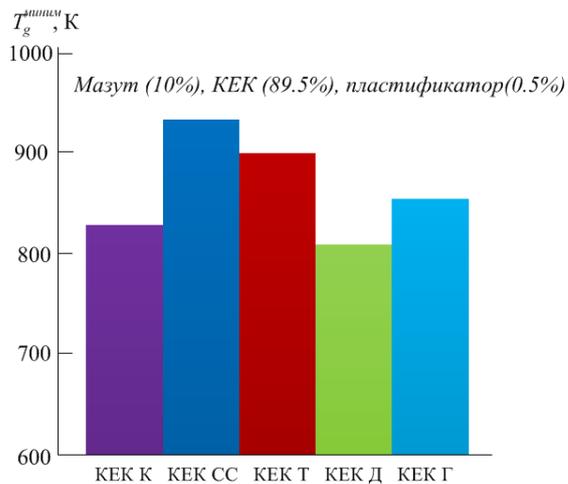
Следует отметить важную закономерность исследуемых процессов зажигания, заключающуюся в том, что для зажигания капель топливных композиций (таблица 3.8.1) с большими размерами достаточны меньшие температуры окислителя по сравнению с малыми каплями. В частности, установлено, что предельные или минимальные температуры  $T_g$  могут быть на 80–110 К ниже при  $R_d \approx 1,5$  мм относительно  $R_d \approx 0,5$  мм. Видеограммы проведенных экспериментов показали, что этот эффект, скорее всего, обусловлен особенностями влияния концентрации компонентов газовой смеси и температуры на скорость их газофазного окисления и гетерогенного горения коксового остатка. При увеличении  $R_d$  возрастает поток вдуваемых с поверхности капли продуктов термического разложения и испарения горючих и негорючих жидких компонентов. Это приводит к увеличению концентрации горючих газов в малом приповерхностном слое капли ОВУТ. Как следствие, скорость реакции их окисления возрастает относительно меньших размеров капель. Для последних характерны малые времена инертного нагрева. Однако концентрации горючих газов при нагреве малых капель недостаточно для устойчивого зажигания.

Таблица 3.8.1. Минимальные температуры окислителя, достаточные для устойчивого зажигания капель ОБУТ (состав: 47 % КЕК (сухой) или уголь, 47 % вода, 5 % жидкий горючий компонент, 1 % пластификатор) при  $V_g \approx 5$  м/с

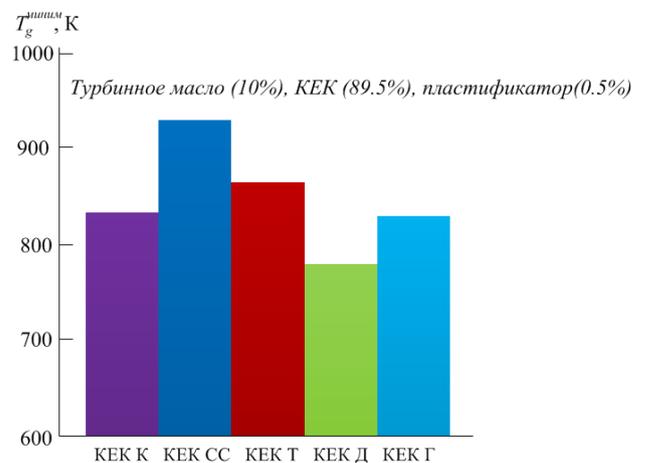
Жидкий горючий компонент	КЕК / уголь							$R_d$ , мм
	КЕК каменноугольный марки К	КЕК каменноугольный марки СС	КЕК каменноугольный марки Т	Бурый уголь марки Б1	Бурый уголь марки Б2	Бурый уголь марки Б3	Каменный уголь марки Д	
Отсутствует	Нет зажигания	≈870 К	≈850 К	≈660 К	≈680 К	≈680 К	770 К	0,5 мм
	≈860 К	≈860 К	≈840 К	≈640 К	≈670 К	≈670 К	≈760 К	1 мм
	≈840 К	≈860 К	≈820 К	≈630 К	≈650 К	≈660 К	≈750 К	1,5 мм
Турбинное масло отработанное с механическим и примесями и водой	Нет зажигания	≈870 К	≈830 К	≈670 К	≈690 К	≈710 К	≈810 К	0,5 мм
	≈860 К	≈850 К	≈790 К	≈650 К	≈680 К	≈700 К	≈790 К	1 мм
	≈830 К	≈850 К	≈720 К	≈630 К	≈670 К	≈680 К	≈770 К	1,5 мм
Трансформаторное масло отработанное	≈870 К	≈870 К	≈850 К	≈680 К	≈680 К	≈700 К	≈780 К	0,5 мм
	≈850 К	≈860 К	≈830 К	≈670 К	≈680 К	≈690 К	≈760 К	1 мм
	≈820 К	≈850 К	≈730 К	≈630 К	≈660 К	≈670 К	≈750 К	1,5 мм
Турбинное масло отработанное	≈870 К	≈870 К	≈810 К	≈660 К	≈680 К	≈690 К	≈770 К	0,5 мм
	≈850 К	≈860 К	≈770 К	≈650 К	≈670 К	≈680 К	≈760 К	1 мм
	≈800 К	≈850 К	≈720 К	≈620 К	≈650 К	≈660 К	≈740 К	1,5 мм
Автомобильно	≈870 К	≈870 К	≈850 К	≈680 К	≈680 К	≈690 К	≈770 К	0,5 мм

е масло отработанное								мм
	≈850 К	≈850 К	≈820 К	≈660 К	≈670 К	≈680 К	≈760 К	1 мм
	≈810 К	≈830 К	≈770 К	≈620 К	≈650 К	≈670 К	≈750 К	1,5 мм
Тяжелая нефть	≈870 К	Нет зажигания	≈850 К	≈680 К	≈700 К	≈710 К	≈800 К	0,5 мм
	≈860 К	≈860 К	≈830 К	≈660 К	≈690 К	≈700 К	≈780 К	1 мм
	≈830 К	≈850 К	≈770 К	≈640 К	≈670 К	≈680 К	≈760 К	1,5 мм

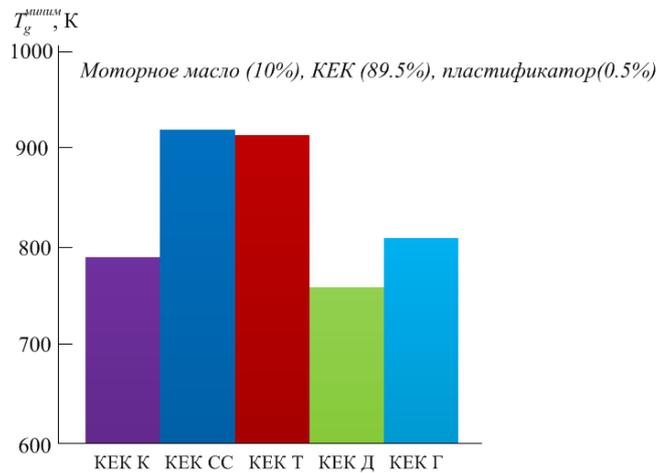
На рисунке 3.8.1 приведены установленные отличия минимальных (предельных) температур окислителя, обеспечивающих устойчивое зажигание ОВУТ на основе разных КЕКов. Минимальные значения  $T_g^{\min}$  для ОВУТ на основе КЕКов К, Д и Г обусловлены максимальным содержанием летучих. Этот фактор является определяющим при прогреве ОВУТ, испарении и газофазном зажигании смеси паров и летучих.



а



б



*в*

Рисунок 3.8.1. Предельные (минимальные) температуры устойчивого зажигания ОВУТ (89,5 % КЕК К (влажный), 0,5 % пластификатор, 10 % жидкий горючий компонент) на основе разных КЕКов и масел: *а* – мазут, *б* – отработанное турбинное масло, *в* – отработанное автомобильное масло

В таблице 3.8.2 представлены времена задержки зажигания и полного сгорания исследованных топливных композиций (таблица 3.8.1) при температурах, нередко используемых при сжигании традиционных твердых топлив в пылевидном состоянии. Аналогичные параметры для частиц соответствующих сортов углей при идентичных условиях нагрева представлены в таблице 3.8.3.

Таблица 3.8.2. Времена задержки зажигания и полного сгорания капель ( $R_d \approx 1$  мм) ОВУТ при максимальных для проведенных экспериментов температурах окислителя ( $T_g \approx 900$  К и  $V_g \approx 3,5$  м/с)

Твердый горючий компонент	Бурый уголь марки Б2		Бурый уголь марки Б1		КЕК каменного угля марки К	
	$\tau_d, c$	$\tau_c, c$	$\tau_d, c$	$\tau_c, c$	$\tau_d, c$	$\tau_c, c$
5 % отработанное трансформаторное	3,1	9,1	4,3	7,6	4,5	15,0

масло						
5 % отработанное турбинное масло	2,9	8,0	3,7	6,0	4,0	13,0
5 % отработанное автомобильное масло	2,5	7,7	3,2	5,0	3,6	11,5
без добавления масла	2,4	5,5	2,7	4,5	3,2	10,5

Таблица 3.8.3. Времена задержки зажигания одиночных частиц ( $R_d \approx 1$  мм) бурого угля марки Б2 при  $V_g \approx 3,5$  м/с

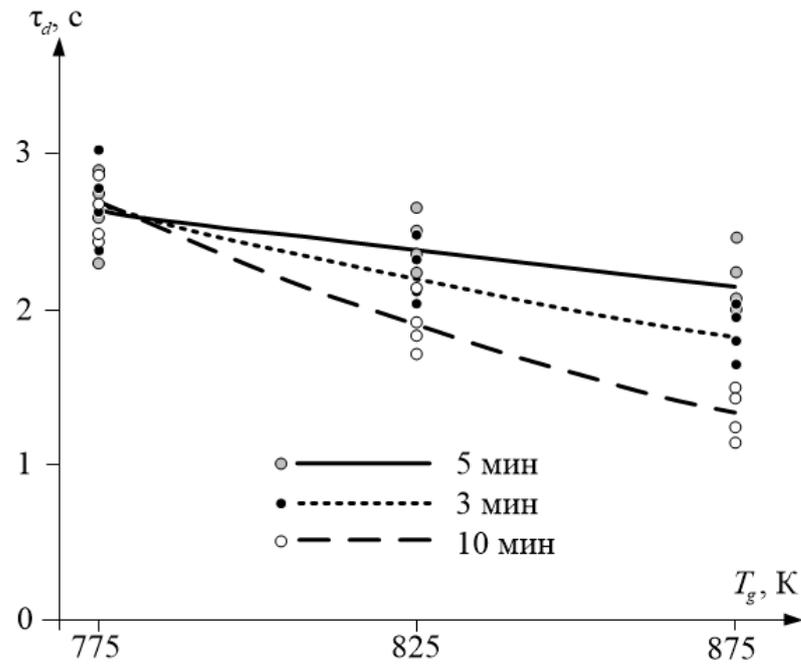
$T_g, K$	700	800	900	1000
$R_d \approx 1$ мм	35,2	12,5	4,1	1,6
$R_d \approx 2$ мм	–	16,2	5,8	1,1

Из анализа данных таблицы 3.8.2 можно сделать несколько заключений. Во-первых, большую часть времени полного сгорания ( $\tau_c$ ) составляет время задержки зажигания ( $\tau_d$ ). Этот результат еще раз иллюстрирует важность вопроса устойчивого зажигания топливной композиции. Во-вторых, при повышении относительной массовой концентрации жидкого горючего компонента вместе со снижением времени задержки зажигания топливной композиции уменьшаются времена полного сгорания. Этот эффект обусловлен тем, что уменьшается массовая концентрация угля в ОВУТ. В тоже время установленные диапазоны снижения  $\tau_c$  можно считать достаточно умеренными и незначительно ограничивающими развитие технологий сжигания ОВУТ. В-третьих, времена задержки зажигания и полного сгорания ОВУТ на основе отходов угле- и нефтепереработки отличаются от аналогичных параметров для частиц бурого угля (таблица 3.8.3) не менее чем на 30 %. При этом с ростом температуры окислителя эти отличия нелинейно уменьшаются. Как следствие, можно

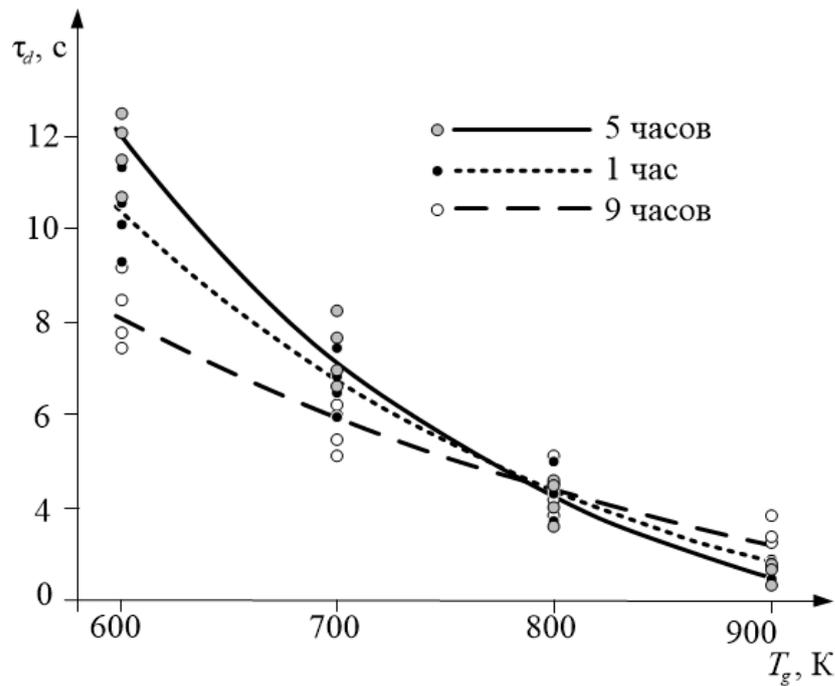
заклучить, что в условиях высоких температур окислителя сжигание ОВУТ позволит в полной мере заменить твердое (уголь) и даже жидкое (мазут) топлива в энергетике. При низкотемпературном режиме инициирования горения параметры сжигания ОВУТ будут ниже по сравнению с традиционными топливами. В-четвертых, процессы инициирования горения ОВУТ характеризуются более монотонным ростом температуры в капле топливной композиции. Это обусловлено некоторой стабилизацией газофазного горения летучих и гетерогенного горения кокса при испарении негорючих компонентов ОВУТ. Как следствие, температуры горения ОВУТ ниже соответствующих углей, а инерционность зажигания выше. В-пятых, при анализе видеogramм с процессами зажигания капель ОВУТ и частицами угля выделены характерные отличия механизмов этих процессов, заключающиеся в доминировании в случае ОВУТ процессов испарения горючей и негорючей жидких компонентов, а при сжигании частиц угля – термического разложения. Также при использовании горючих жидкостей с малыми температурами воспламенения на стадии газофазного окисления возможно формирование пламени в малой окрестности капли. Как правило, такие факелы формируются при относительной концентрации жидкого горючего компонента в ОВУТ не менее 10–15 %.

### **3.9. Влияние технологии и длительности приготовления органоводоугольных топлив на характеристики их зажигания**

На инерционность процесса зажигания капель ОВУТ влияет не только компонентный состав, условия теплообмена, но и длительность приготовления (перемешивания) топливной композиции. Время приготовления составов ОВУТ с использованием современного оборудования (гомогенезаторов, кавитаторов) может влиять на свойства топлив. На рисунке 3.9.1 представлены времена задержки зажигания капель ОВУТ при изменении длительности процесса приготовления от нескольких минут до нескольких часов.



*a*



*б*

Рисунок 3.9.1. Времена задержки зажигания капли ОВУТ в зависимости от температуры окислителя при различной длительности приготовления состава: *a* – несколько минут (94 % КЕК К (влажный), 5 % автомобильное масло отработанное, 1 % пластификатор); *б* – несколько часов (54% каменный уголь марки Т, 40 % вода, 5 % турбинное масло отработанное, 1 % пластификатор) при  $R_d \approx 1$  мм,  $V_g \approx 5$  м/с

Результаты, приведенные на рисунке 3.9.1а, иллюстрируют, что при работе гомогенизатора в течение нескольких минут (от 3 до 10 мин) влияние времени приготовления топливной композиции на время задержки зажигания значительно. Минимальной необходимой и достаточной длительностью исследуемого процесса в соответствии с результатами проведенных экспериментов [118] следует считать продолжительность около 10 минут.

Данные на рисунке 3.9.1б свидетельствуют о том, что существует некоторое оптимальное (с точки зрения требуемых ресурсов на топливоприготовление и характеристик процессов зажигания получаемых топливных композиций) время приготовления ОВУТ. Можно сделать заключение о достаточности длительности работы систем топливоприготовления с ОВУТ не больше 1 часа. Особенно, если топливо планируется сжигать при высоких (не менее 900 К) температурах окислителя.

Для определения основных характеристик процесса зажигания органоводоугольных топлив, приготовленных с применением достаточно типичных (но существенно отличающихся по принципу действия) устройств – гомогенизатора и шаровой барабанной мельницы (см. раздел 2.2) исследовано несколько составов ОВУТ (таблица 3.9.1).

Таблица 3.9.1. Концентрации компонентов в исследованных составах ОВУТ

Номер состава ОВУТ	Компонентный состав
1	89,5 % КЕК К (влажный), 10 % отработанное автомобильное масло, 0,5 % пластификатор
2	89,5 % КЕК К (влажный), 10 % отработанное турбинное масло, 0,5 % пластификатор
3	89,5 % КЕК К (влажный), 10 % отработанное трансформаторное масло, 0,5 % пластификатор

На рисунках 3.9.2–3.9.4 представлены значения времен задержки зажигания ( $\tau_d$ ) и полного сгорания ( $\tau_c$ ) капель ОВУТ (таблица 3.9.1) при

варьировании температуры окислителя (от 800 К до 1100 К) и начальных размеров  $R_d$  (0,3–1 мм). Зависимости  $\tau_d$  и  $\tau_c$  от  $T_g$  приведены для трех составов ОВУТ, приготовленных разными способами (сплошные линии на рисунках соответствуют шаровой барабанной мельнице, а пунктирные – гомогенизатору).

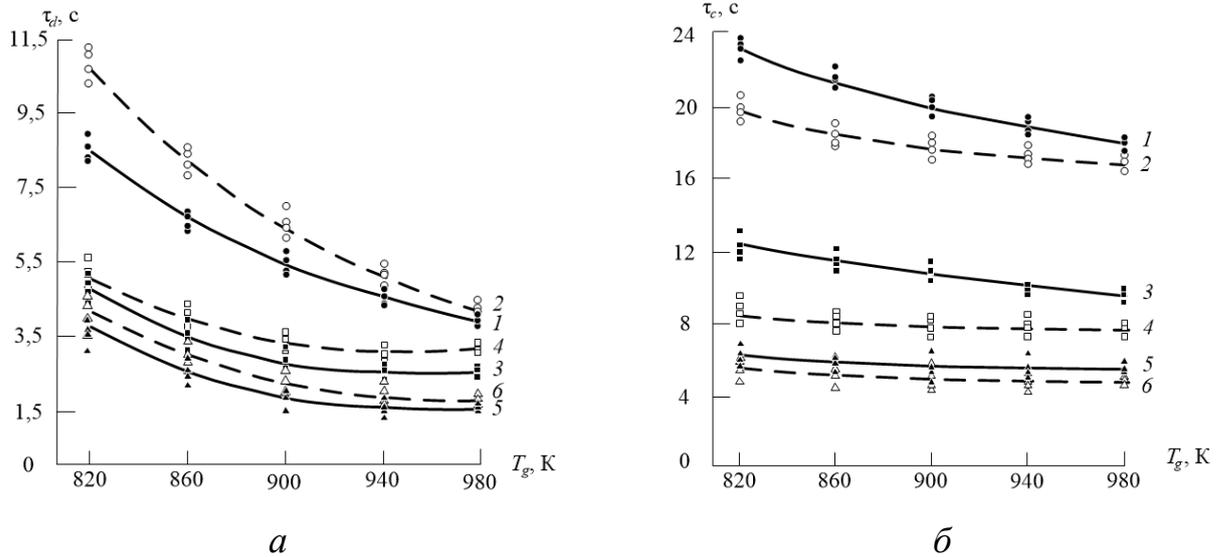


Рисунок 3.9.2. Зависимости времени задержки зажигания (*a*) и полного сгорания (*б*) состава № 1 (таблица 3.9.1) от температуры окислителя для трех начальных размеров частиц ОВУТ: 1, 2 –  $R_d \approx 1$  мм, 3, 4 –  $R_d \approx 0,5$  мм, 5, 6 –  $R_d \approx 0,3$  мм

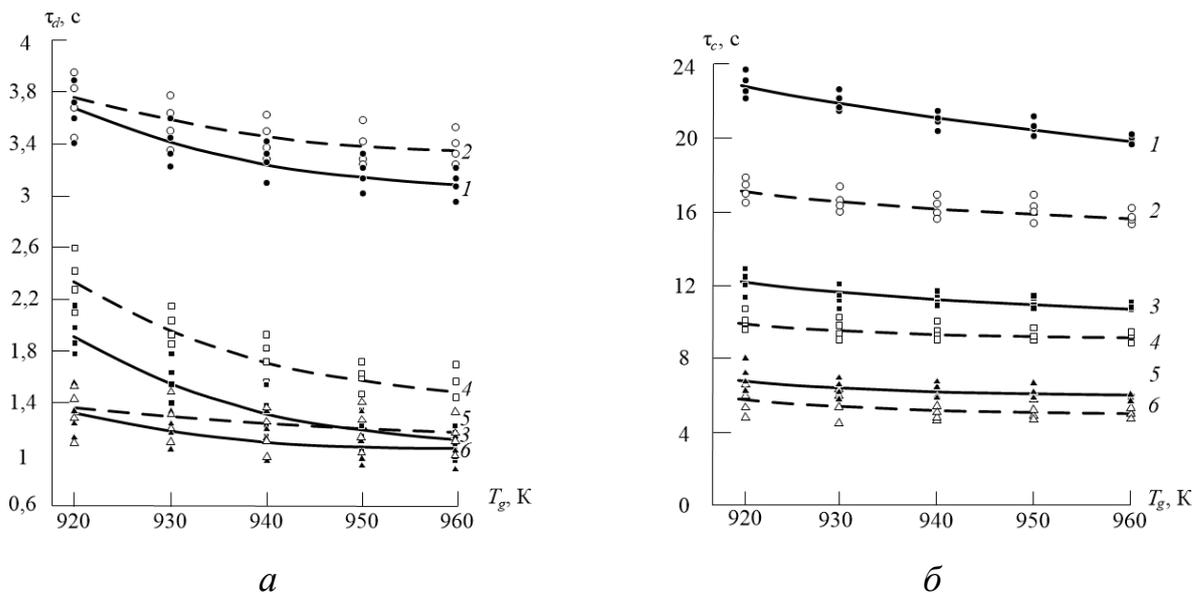


Рисунок 3.9.3. Зависимости времени задержки зажигания (*a*) и полного сгорания (*б*) состава № 2 (таблица 3.9.1) от температуры окислителя для трех

начальных размеров частиц ОВУТ: 1, 2 –  $R_d \approx 1$  мм, 3, 4 –  $R_d \approx 0,5$  мм, 5, 6 –  $R_d \approx 0,3$  мм

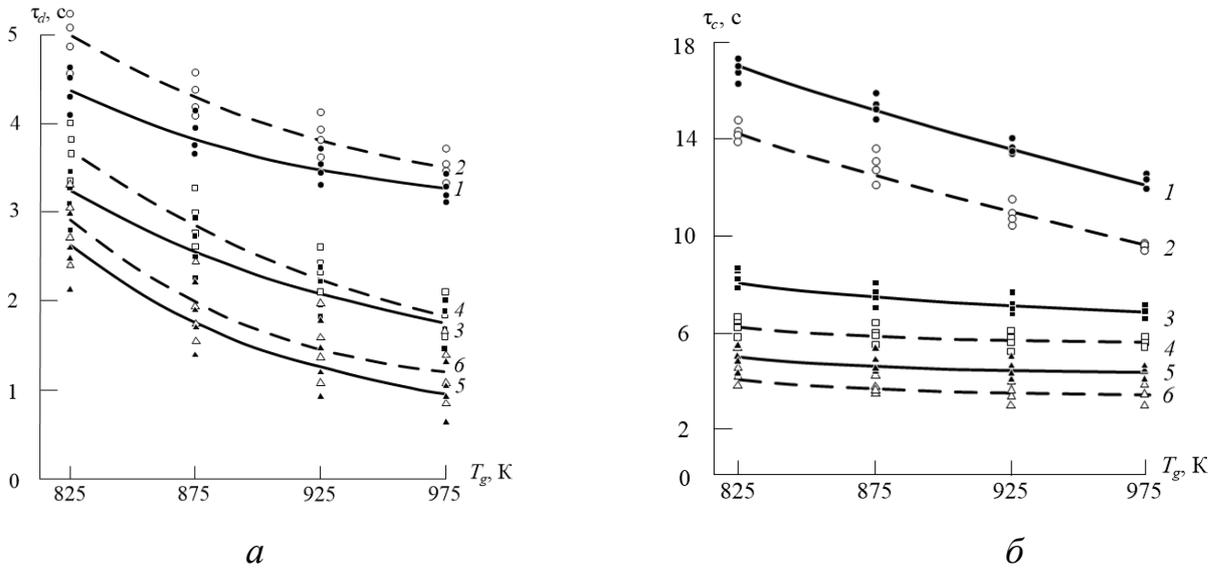


Рисунок 3.9.4. Зависимости времени задержки зажигания (а) и полного сгорания (б) состава № 3 (таблица 3.9.1) от температуры окислителя для трех начальных размеров частиц ОВУТ: 1, 2 –  $R_d \approx 1$  мм, 3, 4 –  $R_d \approx 0,5$  мм, 5, 6 –  $R_d \approx 0,3$  мм

Установлено, что с ростом  $T_g$  влияние начальных размеров  $R_d$  на условия и характеристики зажигания становится менее заметным. Такое изменение времен задержки зажигания и полного сгорания в зависимости от температуры окислителя и размера капли ОВУТ хорошо соответствует современным представлениям общей теории горения. Это обусловлено соответствующими нелинейными (как правило, экспоненциальными) зависимостями скоростей термического разложения органической части угля, испарения жидких горючей и негорючей компонент, газофазного и гетерогенного окисления от температуры. Чем шире диапазон варьирования температуры окислителя и размеров капель ОВУТ, тем существеннее выделенные эффекты.

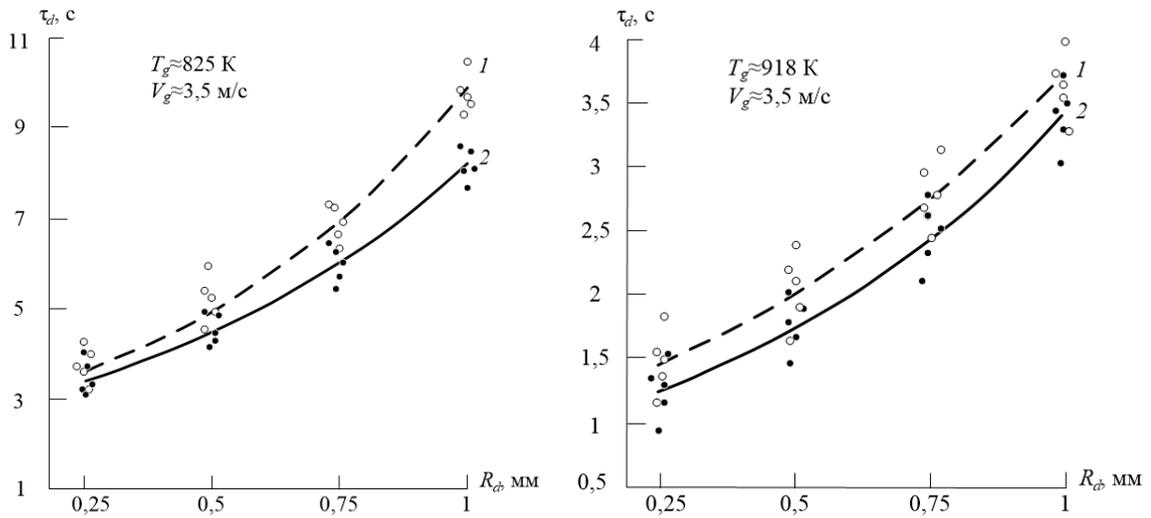
Зависимости времен задержки зажигания и полного сгорания от температуры окислителя для двух способов приготовления ОВУТ отличаются незначительно. Однако, времена задержки зажигания для капель,

приготовленных с использованием шаровой барабанной мельницы немного ниже, чем в случае применения гомогенизатора. Для времен полного сгорания зарегистрирована обратная зависимость (капли композиции ОВУТ, приготовленной с применением гомогенизатора, сгорают быстрее). Это обусловлено, скорее всего, двумя факторами. Во-первых, в случае использования шаровой барабанной мельницы в составе ОВУТ частицы угля измельчены до меньших размеров, чем при работе гомогенизатора. Во-вторых, приготовленные с применением гомогенизатора суспензии характеризовались более высокой вязкостью топлив по сравнению с приготовленными на шаровой барабанной мельнице (разница достигала 0,03 Па·с). Выделенные отличия времен задержки зажигания и полного сгорания (рисунки 3.9.2–3.9.4) можно считать довольно умеренными для учета при промышленном применении ОВУТ. Как следствие, целесообразным (достаточным) представляется использование недорогого и существенно менее продолжительного способа смешения компонентов ОВУТ с применением гомогенизаторов.

По результатам сравнения инерционности процессов зажигания ОВУТ с добавлением разных жидких горючих компонентов можно сделать вывод о том, что наименьшие времена соответствуют составам на основе турбинного масла. Добавление отработанного автомобильного масла может приводить к умеренному (до 5–7 %) снижению инерционности процесса горения. Для трансформаторного масла также установлено снижение инерционности зажигания, но в меньшей степени (до 3–4 %), чем в случае турбинного и автомобильного масел. Это обусловлено соответствующими свойствами жидких горючих компонент. При использовании этих компонентов с минимальной вязкостью, влажностью, зольностью, температурой воспламенения и теплотой парообразования длительность инертного прогрева ОВУТ, фазовых превращений и химического реагирования существенно меньше (как следствие, времена  $\tau_d$  минимальны). В случае использования жидких горючих компонентов с высокой зольностью и

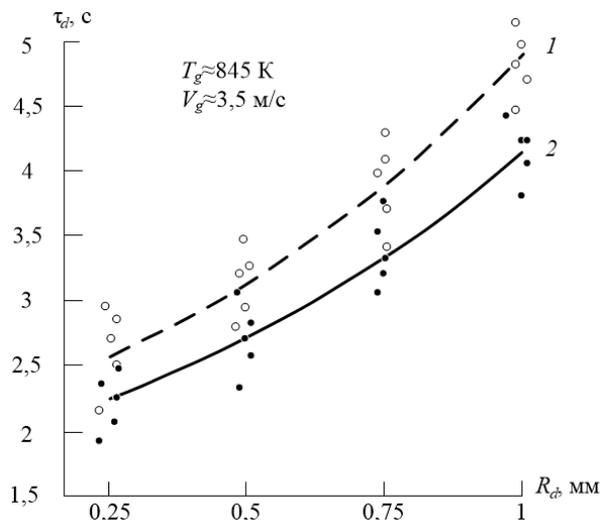
влажностью, теплотой парообразования, а также высокими температурами воспламенения (таблица 2.4) времена  $\tau_d$  могут возрастать [30,118,154]. Эти же параметры позволяют объяснить установленные минимальные (предельные или пороговые) температуры окислителя, достаточные для устойчивого зажигания ( $0,3 \leq R_d \leq 1$  мм): состав № 1 – около 810 К, № 2 – около 890 К, № 3 – около 820 К. Эти значения важны для развития технологий «низкотемпературного» [52–54] зажигания в большой и малой энергетике.

Рисунок 3.9.5 иллюстрирует влияние начальных размеров капель на времена задержки зажигания (сплошные линии – при использовании шаровой барабанной мельницы, пунктирные – соответствуют гомогенизатору).



а

б



в

Рисунок 3.9.5. Зависимости времени задержки зажигания составов ОВУТ (*а* – № 1, *б* – № 2, *в* – № 3) от начальных размеров капель при разных способах приготовления суспензии (сплошные линии – шаровая барабанная мельница, пунктирные – гомогенизатор; номера составов соответствуют таблице 3.9.1)

Из представленных зависимостей (рисунок 3.9.5) видно, что на времена задержки зажигания существенное влияние оказывает начальный размер капли. Его увеличение приводит к повышению инерционности процесса горения. Полученный результат обусловлен тем, что по мере увеличения размера капли растет и площадь поверхности, с которой испаряется влага (требуется больший расход энергии на парообразование). Также для крупных капель толщина буферного слоя (смесь паров воды и жидкого горючего компонента) между каплей и потоком окислителя больше. Этот слой, в свою очередь, существенно снижает тепловой поток к поверхности капли (за счет меньшей теплопроводности) [30, 114, 154].

По результатам проведенных экспериментов можно отметить, что время приготовления топливных композиций с использованием современных гомогенизаторов, кавитаторов или шаровых барабанных мельниц может существенно влиять на свойства топлив. На рисунке 3.9.6 приведена зависимость времени задержки зажигания от температуры окислителя для разных длительностей процессов приготовления ОВУТ.

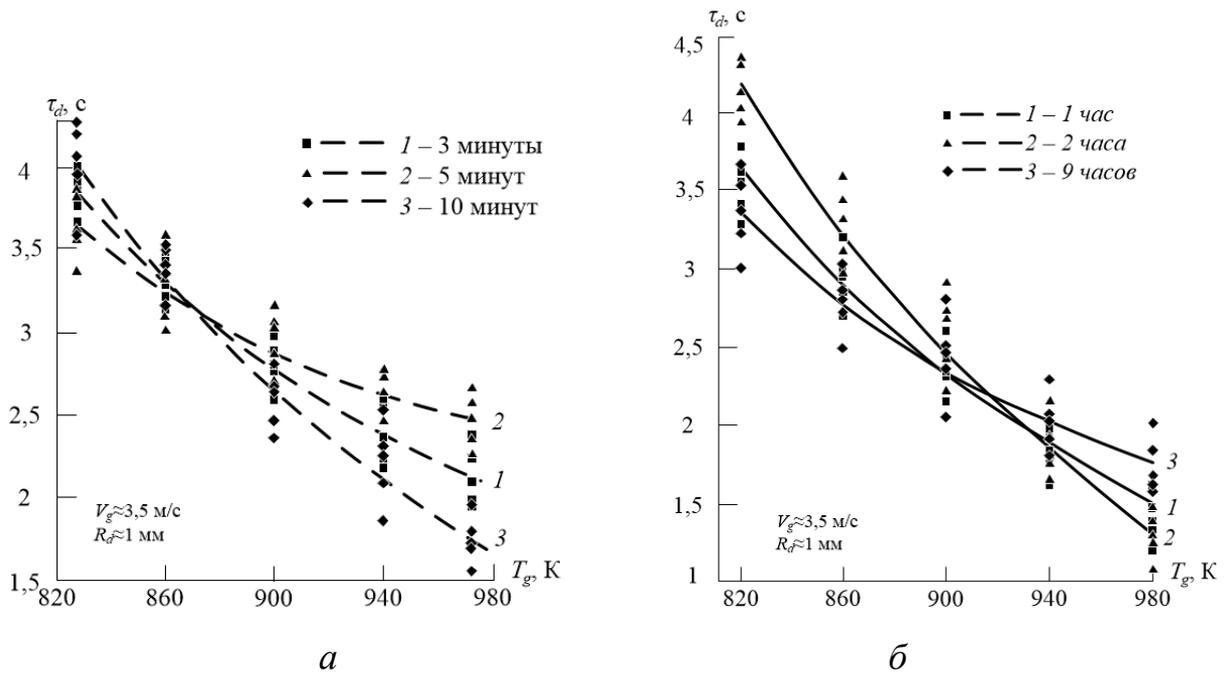


Рисунок 3.9.6. Времена задержки зажигания ОВУТ (состав № 1, таблица 3.9.1) при разных длительностях и технологии приготовления (*а* – с использованием гомогенизатора, *б* – с использованием шаровой барабанной мельницы)

Результаты исследований показали, что изменение длительности процесса приготовления топлива даже на несколько минут может существенно влиять на инерционность зажигания ОВУТ. В обоих случаях можно проследить закономерность: превышение времени приготовления выше некоторого установленного значения приводит к повышению времени задержки зажигания (т.е. для каждого из способов приготовления имеется оптимальная длительность процесса гомогенизации).

### 3.10. Влияние материала держателя капли топлива на характеристики ее зажигания

Для определения степени влияния материала держателя, используемого для закрепления капли в потоке окислителя на характеристики зажигания проведены эксперименты [155], в которых капля ОВУТ (94,5 % КЕК К (влажный), 5 % отработанное турбинное масло, 0,5 % пластификатор)

закреплялась (подвешивалась) при помощи держателей различного вида – спая термопары, металлической проволочки и керамического стержня (рисунок 3.10.1).

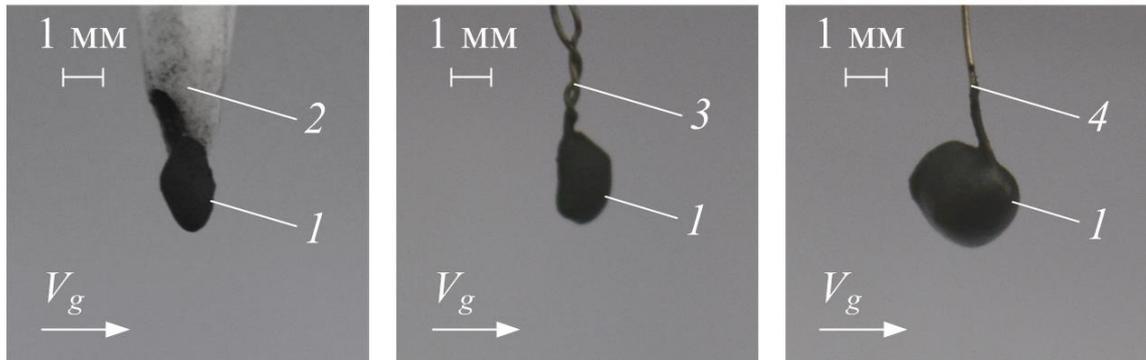


Рисунок 3.10.1. Внешний вид каплей ОБУТ на разных держателях: 1 – капля топлива; 2 – керамический стержень; 3 – спай термопары; 4 – металлическая проволочка

Эксперименты [155] позволили получить ряд зависимостей, поясняющих характер и масштабы влияния материала держателя (рисунок 3.10.1), используемого для подвешивания капли топлива в потоке разогретого окислителя, на характеристики зажигания ОБУТ.

Во всех экспериментах зажигание ОБУТ происходило в соответствии с типичной последовательностью стадий от инертного прогрева и испарения влаги до гетерогенного горения углеродного остатка. На последовательность стадий держатели не оказывали влияние. Однако их длительности отличались существенно при разных материалах держателей. Полностью исключить влияние держателя на характеристики зажигания топливного образца не представляется возможным. Однако эксперименты показали, какой из трех применяемых держателей (спай термопары, металлическая проволочка, керамический стержень) оказался наиболее приемлемым (с минимальной инерционностью процесса) для проведения исследований процессов зажигания и горения одиночных неподвижных капель ОБУТ.

По расположению кривых на рисунке 3.10.2 можно заключить, что наибольшее влияние на процесс теплопереноса в системе «разогретый

окислитель – капля» имеет керамический стержень (регистрировались максимальные времена задержки зажигания). Наименьшие времена задержки зажигания установлены при размещении капли ОВУТ в потоке окислителя на спае термопары. При креплении капли ОВУТ на металлической проволочке зарегистрированы максимальные времена задержки зажигания (по сравнению с экспериментом с использованием термопары). Поэтому соответствующая кривая занимает среднее положение на рисунке 3.10.2.

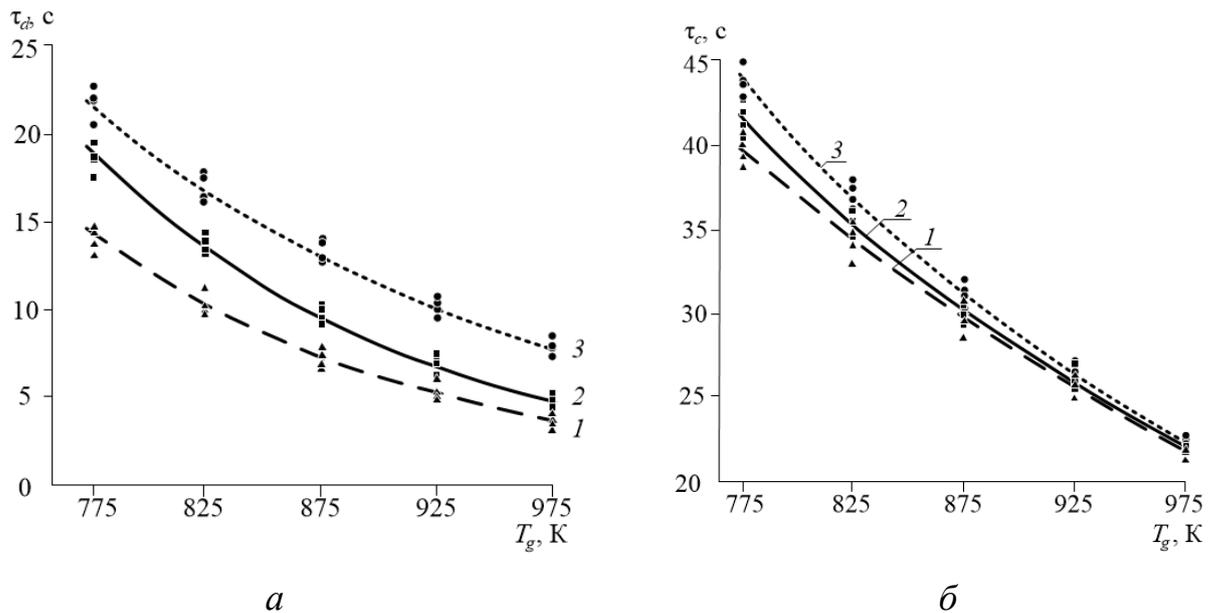


Рисунок 3.10.2. Зависимости времен задержки зажигания (а) и полного сгорания (б) капель ОВУТ от температуры окислителя при применении разных держателей: 1 – спай термопары; 2 – металлическая (сталь) проволочка; 3 – керамический стержень ( $R_d \approx 1$  мм,  $V_g \approx 3$  м/с)

Полученные результаты можно объяснить теплофизическими свойствами материалов соответствующих держателей. В проведенных экспериментах зарегистрирован достаточно значительный сток тепла от поверхности капли к керамическому стержню – времена задержки зажигания в данном случае превышали аналогичную характеристику при использовании спае термопары более, чем на 50 % (рисунок 3.10.2а). Скорее всего, это обусловлено тем, что керамика характеризуется минимальной теплопроводностью (около 0,4 Вт/(мК)) и температуропроводностью (около

$1,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ ), но максимальной теплоемкостью из исследованных материалов держателей. Платинородий-платиновые спаи термопары имеют максимальные температуропроводность (около  $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ ) и теплопроводность (около  $70 \text{ Вт}/(\text{мК})$ ) по сравнению со стальной проволокой и керамическим наконечником. Плотность платинородиевого сплава в несколько раз выше стали и больше, чем в 10 раз, керамики. Как следствие, по спаю термопары после ее прогрева в зону реагирования поступает дополнительная энергия, и частица прогревается снаружи потоком окислителя, а изнутри от держателя. Стальная проволока имеет чуть меньшую (около  $1,3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ ) температуропроводность (по сравнению с платинородий-платиновым спаем). Поэтому времена задержки зажигания ОВУТ больше на рисунке 3.10.2а для кривой 2 по сравнению с кривой 1.

При анализе отличий длительностей стадий зажигания капель ОВУТ с разными материалами держателей установлено, что наибольшее влияние материал держателя оказывает на длительность прогрева топлива и испарение жидких горючих и негорючих компонентов. Это обусловлено тем, что эти две стадии занимают, как правило, не менее 60–70 % от всего времени задержки зажигания. В случаях высоких (более 1000 К) температур окислителя длительности этих стадий становятся чрезвычайно малыми. Соответственно, влияние материала держателя существенно ослабевает (отличия времен  $\tau_d$  для трех материалов держателей становятся малыми).

Значения времени полного сгорания также различаются при использовании разных держателей (рисунок 3.10.2б). Однако анализ рисунка 3.10.2а и рисунка 3.10.2б позволил установить, что время полного сгорания капли ОВУТ (рисунок 3.10.2б) зависит от выбора держателя в меньшей степени, чем время задержки зажигания. Из рисунка 3.10.2а видно, что кривые, соответствующие разным держателям, с ростом  $T_g$  сходятся незначительно, в отличие от кривых, представленных на рисунке 3.10.2б. Данное отличие может быть связано с тем, что этап инертного прогрева образца (включающего испарение влаги, горючей жидкости, термическое

разложение фильтр-кека) протекает с поглощением энергии, поэтому перенос тепла от поверхности капли ОБУТ к держателю или наоборот существенно влияет на длительность этого этапа ( $\tau_d$ ).

Анализ видеogramм проведенных экспериментов позволил заключить, что на начальном этапе прогрев держателя приводит к ускорению процессов нагрева топлива изнутри и, соответственно, испарения компонентов. Но после зажигания наличие держателя в центре капли приводило к оттоку тепла из зоны горения к держателю. Чем больше теплопроводность и температуропроводность материала держателя, тем заметнее эти эффекты. Держатели из материалов с высокими значениями температуропроводности приводят к заметному уменьшению времен задержки зажигания топлива ( $\tau_d$ ) за счет его дополнительного прогрева изнутри. Такие материалы держателя приводят к росту  $\tau_c$  за счет оттока тепла из зоны гетерогенного горения частицы топлива к держателю. Как следствие, несколько снижается температура в зоне горения и скорости выгорания падают. Но влияние материала держателя на времена выгорания не может быть значительным вследствие его малых размеров (как правило, в несколько раз меньше соответствующих размеров капли топлива) и существенного превышения выделяемой при горении энергии по сравнению с теплотой, аккумулированной держателем.

Значение времени  $\tau_c$  характеризует не только инертный прогрев, но и этап горения коксового остатка. Отмечено, что при повышении температуры окислителя влияние материала держателя на значения  $\tau_c$  существенно ослабевает – кривые, соответствующие разным держателям, сходятся (рисунок 3.10.2б), т.к. этап горения углерода сопровождается интенсивным выделением тепла, расход которого на прогрев держателя незначителен. Таким образом, сток теплоты от поверхности капли к держателю оказывает более заметное влияние на этапе инертного прогрева капли.

При повышении характерного размера капли (радиуса  $R_d$ ) зарегистрировано увеличение времени задержки зажигания (рисунок 3.10.3а)

и времени ее полного сгорания (рисунок 3.10.3б). При использовании в экспериментах спая терморпары и металлической проволоочки для размещения капли ОВУТ в потоке окислителя зарегистрированы достаточно близкие значения времен задержки зажигания топливного образца. При подвешивании образца на керамическом стержне наблюдались бóльшие времена задержки зажигания. Так, например, при радиусе  $R_d \approx 1$  мм расхождение времени задержки зажигания при использовании керамического стержня и терморпары составило около 6 с, что в масштабах исследуемого процесса воспламенения достаточно существенно.

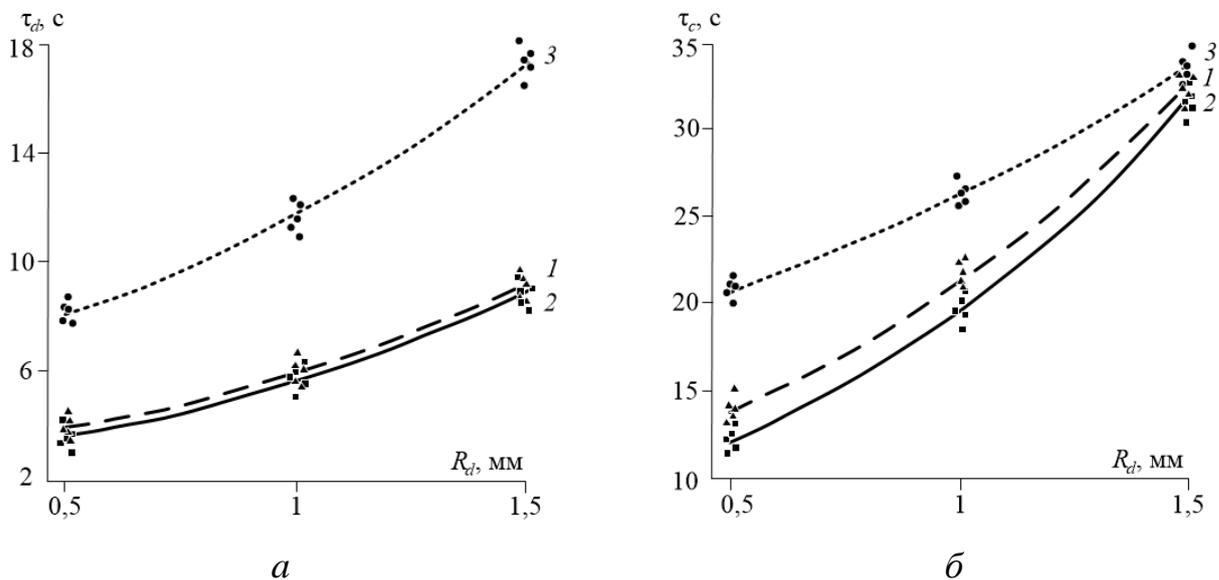


Рисунок 3.10.3. Времена задержки зажигания (а) и полного сгорания (б) капель ОВУТ от начального размера капли при применении разных держателей: 1 – спай терморпары; 2 – металлическая проволоочка; 3 – керамический стержень ( $T_g \approx 920$  К,  $V_g \approx 3$  м/с)

Из рисунка 3.10.3б видно, что с ростом размера капель времена полного сгорания топлива также увеличивались. Следует отметить, что влияние материалы держателя на  $\tau_c$  уменьшалось при увеличении размера капли ОВУТ. Сток тепла к держателю составляет малую часть энергии, выделяющейся при реагировании крупной частицы топлива. Таким образом, при исследованиях воспламенения и горения стационарно закрепленной капли ОВУТ выбор держателя, используемого для размещения капли в

потоке имеет значение при достаточно небольших размерах капли (радиусом менее 1,5 мм) и температурах окислителя менее 975 К.

### **3.11. Зажигание органоводоугольного топлива на основе углей разной степени метаморфизма**

Одним из факторов, ограничивающих применение ВУТ и ОВУТ в промышленных масштабах, является отсутствие универсальной технологии, применимой для сжигания разнообразных топливных композиций в топках энергетических котлов. Кроме этого, существенным недостатком таких топлив является довольно высокая инерционность зажигания, связанная с дополнительными затратами тепла и времени на испарение воды (в сравнении с процессом зажигания исходного – необводненного угольного топлива). Инерционность зажигания увеличивается также при использовании в составе топлива углей высокой степени метаморфизма, обладающих высокой энергетической ценностью, но, в то же время, низкой реакционной способностью (требуется высокие температуры для устойчивого зажигания). Одним из способов снижения инерционности процессов зажигания композиционного жидкого топлива является включение в него высокорекреакционных добавок, например, горючих жидкостей нефтяного происхождения или высокорекреакционных углей (например, бурых). Значительный интерес представляет создание топливной композиции, сочетание компонентов которой будет обеспечивать не только высокую теплотворную способность (за счет калорийного каменного угля или антрацита), но и относительно высокую реакционную способность (за счет добавок горючей жидкости и бурого угля).

Для исследования характеристик зажигания органоводоугольного топлива на основе углей разной степени метаморфизма исследованы [156] несколько составов (таблица 3.11.1).

Таблица 3.11.1. Компонентный состав исследуемых ОБУТ

Компоненты	№ состава ОБУТ						
	1	2	3	4	5	6	7
Вода	47 %	47 %	45 %	45 %	46 %	55 %	48 %
Бурый уголь марки Б2	43 %	–	–	5 %	17 %	–	13 %
Каменный уголь марки Д	–	43 %	–	40 %	17 %	–	13 %
Углеродный остаток низкотемпературного пиролиза автомобильных покрышек	–	–	–	–	–	35 %	8 %
Антрацит	–	–	45 %	–	10 %	–	8 %
Автомобильное масло отработанное	10 %	10 %	10 %	10 %	10 %	10 %	10 %

На рисунке 3.11.1а приведены результаты экспериментов по определению максимальной температуры горения ( $T_d^{\max}$ ) капель ОБУТ различных составов в процессе реагирования. Типичный тренд изменения температуры капли ОБУТ в процессе нагрева, испарения влаги, зажигания летучих и затем углерода приведен на рисунке 3.11.1б.

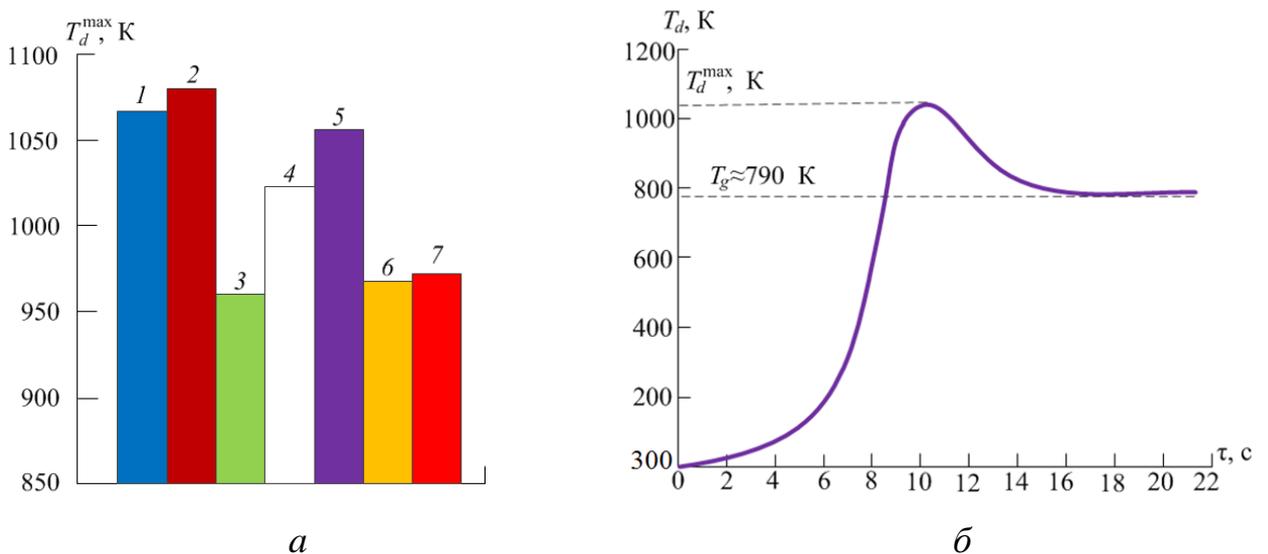


Рисунок 3.11.1. Максимальные температуры горения ОБУТ ( $T_g \approx 790$  К) (а) и типичный тренд изменения температуры капли ОБУТ № 5 (номера столбцов

диаграммы соответствуют составам в таблице 3.11.1) в процессе взаимодействия с потоком разогретого воздуха (б)

Значение температуры окислителя ( $T_g \approx 790$  К) в экспериментах по определению  $T_d^{\max}$  выбрано после проведения серии предварительных опытов. При температуре окислителя около 800 К происходило зажигание большинства исследуемых составов (за исключением состава № 3 (таблица 3.11.1) на основе антрацита). С другой стороны, при температурах окислителя более 800 К процесс горения образцов завершался за время, не существенно отличающееся от времени отклика термопары (тепловая инерционность), используемой для подвешивания капли ОБУТ в потоке разогретого окислителя. В этом случае не представлялось возможным получить достоверный тренд изменения температуры в центре капли, соответствующий процессу от момента воспламенения капли до окончания ее горения, и зарегистрировать значения  $T_d^{\max}$  для исследуемых составов.

В системе «капля ОБУТ – газовая среда» выделены следующие стадии реагирования: инертный прогрев образца, испарение влаги из приповерхностного слоя (вода и жидкий негорючий компонент), термическое разложение органической части угля в приповерхностном слое капли, смешение горючих газов с окислителем, воспламенение парогазовой смеси, прогрев углерода, его гетерогенное зажигание и последующее сгорание.

При горении капли ОБУТ интенсивно выделяется энергия. Поэтому зарегистрированные максимальные температуры (рисунок 3.11.1а) капель ОБУТ превышали температуру окислителя. Эксперименты показали, что значения  $T_d^{\max}$  для разных составов ОБУТ могут существенно отличаться. Наиболее высокие значения  $T_d^{\max}$  (более 1020 К) отмечены для составов ОБУТ № 1, 2, 4, 5 (рисунок 3.11.1, таблица 3.11.1). При горении составов ОБУТ № 3, 6, 7 (таблица 3.11.1) значение  $T_d^{\max}$  не достигало 1000 К, а составляло 950–980 К. Этот результат обусловлен как компонентным составом данных топлив, так и особенностями исследуемых процессов

экзотермического реагирования. Твердая горючая компонента состава № 3 (таблица 3.11.1) представлена антрацитом, характеризующимся самыми высокими температурами зажигания среди углей разной степени метаморфизма. В эксперименте по определению  $T_d^{\max}$  температура окислителя составляла 790 К. С учетом вышесказанного можно предположить, что при нагревании состава ОБУТ № 3 (таблица 3.11.1) горят в основном только пары отработанного автомобильного масла и лишь малая доля антрацита начинает реагировать, что привело к невысокому значению  $T_d^{\max}$ . Для ОБУТ № 6 (таблица 3.11.1) также характерны относительно невысокие  $T_d^{\max}$ . Вероятная причина данного результата заключается в относительно невысокой теплоте сгорания углеродного остатка от пиролиза автомобильных шин, являющегося основой компонентного состава ОБУТ № 6 (таблица 3.11.1).

На рисунке 3.11.2 представлены минимальные (предельные) температуры зажигания ( $T_g^{\min}$ ) исследуемых составов ОБУТ. Как показали эксперименты, для устойчивого зажигания составов ОБУТ № 1, 5, 7 (таблица 3.11.1) достаточны относительно низкие температуры окислителя (около 720 К) среди всех зарегистрированных. Горючая твердая компонента состава ОБУТ № 1 (таблица 3.11.1) представлена бурым углем – наиболее реакционно активным среди используемых в исследовании углей. При нагреве бурого угля выделяется много летучих веществ, которые, перемешиваясь с парами горючей жидкости (отработанное автомобильное масло), образуют реакционноспособную горючую газовую смесь, способную зажигаться при относительно невысоких температурах окислителя. При газофазном горении такой смеси выделяется дополнительная тепловая энергия, разогревающая углеродный остаток бурого угля и интенсифицирующая его гетерогенное зажигание. Горючий твердый компонент состава ОБУТ № 5, 7 (таблица 3.11.1) представлен смесью углей разной степени метаморфизма – от бурого до антрацита. Учитывая относительно невысокие предельные температуры зажигания (около 720 К)

этих составов, можно предположить, что буроугольная добавка может интенсифицировать зажигание и последующее горение каменного угля и антрацита в составе ОВУТ. Кроме того, сравнительный анализ значений  $T_g^{\min}$  для составов ОВУТ № 2 и 4 (таблица 3.11.1) показал, что добавка бурого угля (с массовой концентрацией 5 %) в ОВУТ на основе каменного угля приводит к снижению минимальной температуры зажигания почти на 10 % (рисунок 3.11.2). Наиболее высокие значения  $T_g^{\min}$  (более 1050 К) характерны для ОВУТ № 3 (таблица 3.11.1), что объясняется высокой концентрацией в его антрацита, для инициирования горения которых требуются высокие температуры окислителя.

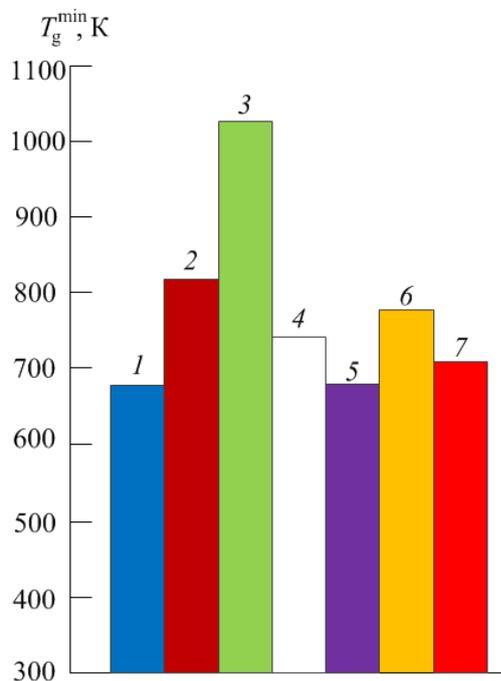


Рисунок 3.11.2. Минимальные температуры зажигания ОВУТ (номера столбцов диаграммы соответствуют составам в таблице 3.11.1)

Сопоставив результаты экспериментов по определению максимальных температур горения (рисунок 3.11.1а) и минимальных температур зажигания (рисунок 3.11.2) различных составов ОВУТ, можно выделить несколько топливных композиций, представляющих интерес с точки зрения повышения эффективности процессов сжигания ОВУТ в энергетических установках. В частности, составы ОВУТ № 1, 2, 4 и 5 (таблица 3.11.1) характеризуются

невысокими предельными температурами зажигания (не более 810 К) и достаточно высокими температурами горения (более 1020 К).

Определены экспериментальные зависимости времен задержки зажигания (рисунок 3.11.3а) и времен полного сгорания (рисунок 3.11.3б) составов ОВУТ от температуры окислителя. Полагаясь на результаты экспериментов по определению  $T_g^{\min}$  (рисунок 3.11.2), значения  $\tau_d$  и  $\tau_c$  определялись в диапазоне температур окислителя 650–1000 К.

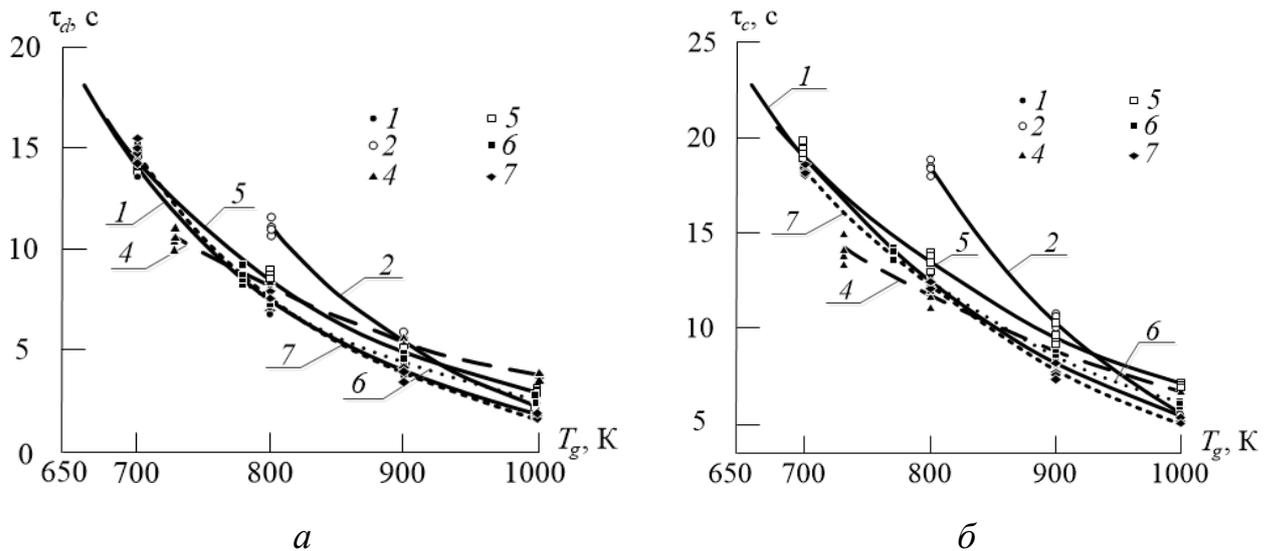


Рисунок 3.11.3. Зависимости времен задержки зажигания (а) и времен полного сгорания (б) ОВУТ от температуры окислителя (номера кривых соответствуют составам в таблице 3.11.1)

На рисунка 3.11.3 видно, что при увеличении температуры окислителя времена задержки зажигания и полного сгорания одиночных капель ОВУТ экспоненциально уменьшаются, т.к. рост теплового потока к поверхности капли ОВУТ интенсифицирует все стадии процесса ее зажигания и горения: испарение влаги и жидкого горючего компонента, термическое разложение угля с выходом летучих, образование горючей парогазовой смеси с ее последующим воспламенением, прогрев коксового остатка, зажигание и горение углерода.

Эксперименты показали, что при росте  $T_g$  за счет интенсификации теплообмена в системе «газовая среда – топливо» влияние состава ОВУТ на

характеристики зажигания существенно снижается (рисунок 3.11.3). Несмотря на это, наибольшее отклонение кривых времен задержки зажигания и полного сгорания относительно аналогичных характеристик остальных составов ОВУТ (рисунок 3.11.3) отмечено для состава № 4 (таблица 3.11.1), что наиболее заметно в диапазоне температур окислителя 650–750 К. Снижение инерционности зажигания (выражено в меньших значениях  $\tau_d$ ) состава ОВУТ № 4 (таблица 3.11.1) в данном температурном диапазоне объясняется, скорее всего, наличием высокореакционной добавки (бурый уголь с массовой долей 5 %). Наблюдаемые же пониженные времена полного сгорания данного состава обусловлены диспергированием бурого угля, а также возможной неполнотой сгорания органической массы каменного угля в диапазоне температур окислителя 600–750 К.

### **3.12. Анализ возможности использования воды разного качества при приготовлении органоводоугольных топлив**

Экспериментальные исследования по определению влияния качества воды на характеристики зажигания водоугольной суспензии проведены [157] для трех составов ВУТ (при разных относительных массовых концентрациях компонентов):

- № 1 (50 % каменный уголь марки Д, 49,5 % вода техническая, 0,5 % пластификатор);
- № 2 (50 % каменный уголь марки Д, 49,5 % вода водопроводная, 0,5 % пластификатор);
- № 3 (50 % каменный уголь марки Д, 49,5 % вода дистиллированная, 0,5 % пластификатор).

Используемая в экспериментах техническая вода получена с ТЭЦ–3 г. Томска. Дистиллированная вода соответствует ГОСТ 6709–72, а водопроводная – нормативным требованиям СанПиН.

Для трех исследуемых составов определены зависимости времен задержки зажигания  $\tau_d$  (основной интегральной характеристики процесса

инициирования горения) от температуры окислителя (рисунок 3.12.1). Следует отметить, что зажигание исследуемых топлив характеризовалось достаточно малой инерционностью – времена задержки зажигания не превышали 6 с при варьировании температуры окислителя в диапазоне 800–1000 К.

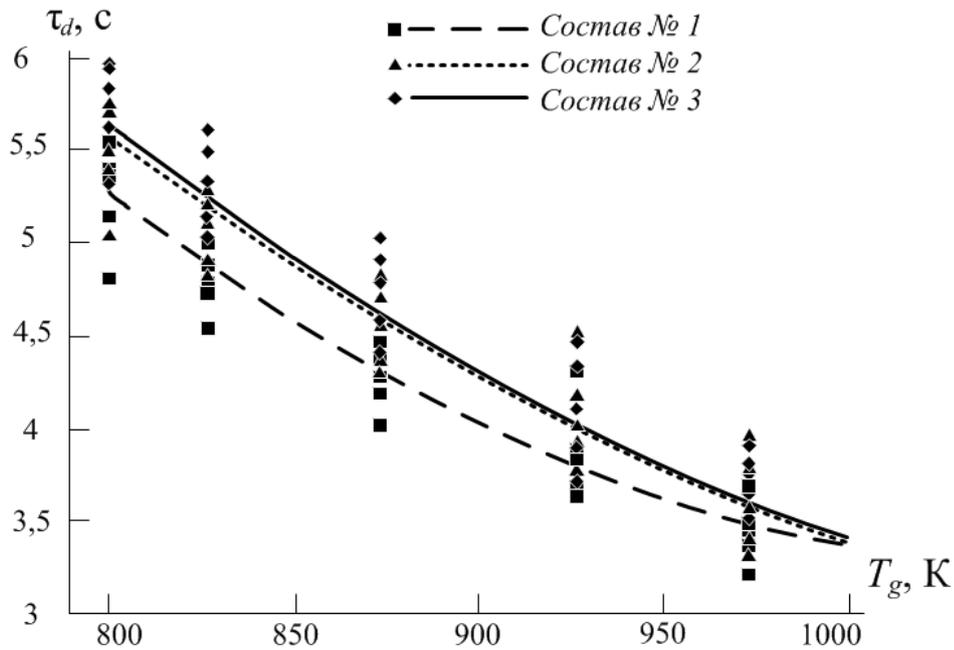


Рисунок 3.12.1. Времена задержки зажигания капле ВУТ в зависимости от температуры окислителя ( $R_d \approx 1$  мм и  $V_g \approx 3,5$  м/с)

Для капле ВУТ на основе технической воды характерны наименьшие значения  $\tau_d$  (рисунок 3.12.1), а также более быстрый рост и бóльшие значения температуры в зоне горения (рисунок 3.12.2) по сравнению с аналогичными характеристиками для ВУТ на основе водопроводной и дистиллированной воды. Данный результат, скорее всего, обусловлен наличием в технической воде характерных большой и малой энергетике горючих примесей и стоков, испарение и горение которых ускоряет прогрев и зажигание коксового остатка. Кроме того, техническая вода содержит ионы металлов, которые, согласно [25], выступают в качестве катализатора для выхода летучих веществ, а также зажигания коксового остатка. В тоже время установленное отличие значений  $\tau_d$  для ВУТ на основе разной по качеству воды составило не более 8 %; отличие значений  $T_d$  – не более 6 %. С учетом возможных

отклонений  $T_d$  в пределах 2–3 % представленные на рисунке 3.12.2 отличия являются незначительными.

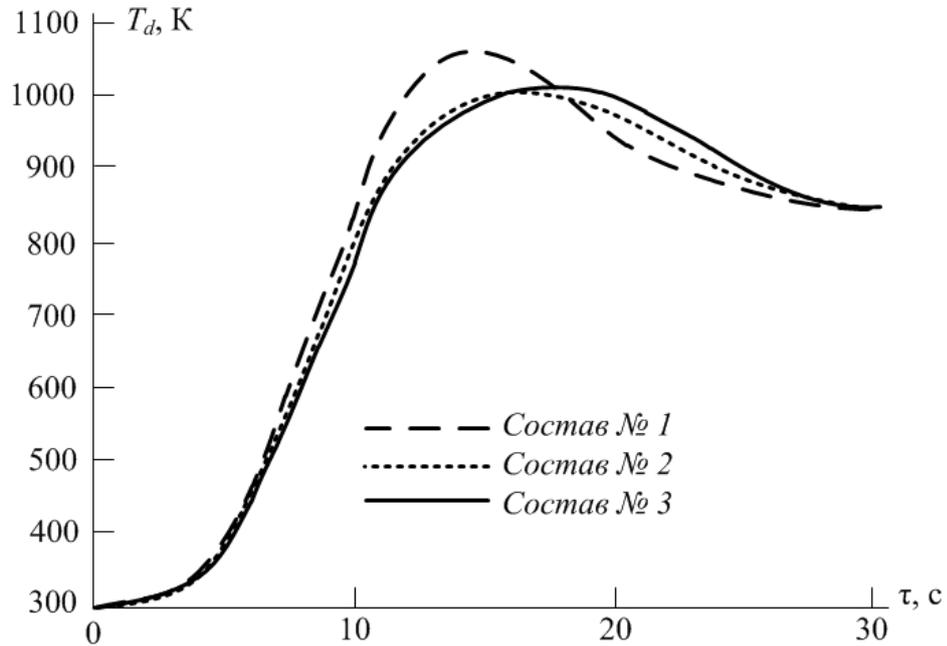


Рисунок 3.12.2. Тренды изменения температуры капли ВУТ ( $T_g \approx 870$  К,  $R_d \approx 1$  мм и  $V_g \approx 3,5$  м/с)

Как показали эксперименты, для крупных капель необходимы более длительные времена инертного прогрева для инициирования устойчивого горения (рисунок 3.12.3). При увеличении начального размера капли ВУТ в 3 раза времена задержки зажигания кратно возрастают (в среднем в 8–10 раз). Можно сделать вывод о существенно нелинейном характере зависимостей  $\tau_d(R_d)$ , обусловленном главным образом соответствующими зависимостями скоростей прогрева капель, испарения компонентов и выхода летучих от площади поверхности капли.

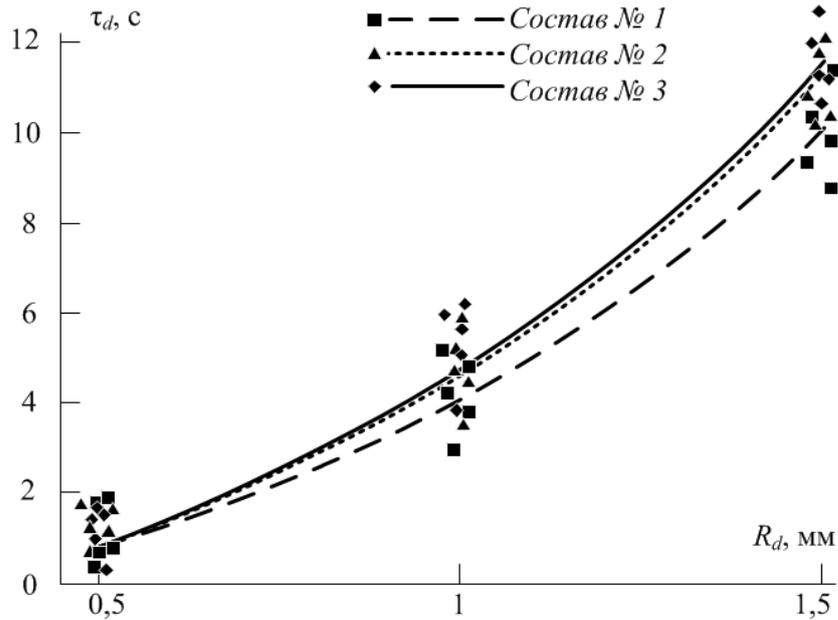


Рисунок 3.12.3. Времена задержки зажигания капель ВУТ в зависимости от размеров капель (при  $T_g \approx 916$  К и  $V_g \approx 3,5$  м/с)

При варьировании начальных размеров капель ВУТ (радиусов  $R_d$ ) на основе технической воды также наблюдались меньшие времена задержки зажигания, чем для ВУТ на основе водопроводной и дистиллированной воды (рисунок 3.12.3). Максимальное отличие значений времен задержки зажигания капель ВУТ при варьировании их начальных размеров для составов на основе воды разного качества не превышало 15 %.

Важно отметить, что влияние фактора качества воды на длительность инициирования процесса горения суспензионного топлива ослабевает и становится малозначимым как при увеличении температуры окислителя (рисунок 3.12.1), так и при уменьшении начального размера капли ВУТ (рисунок 3.12.3). Это обусловлено существенной интенсификацией процессов инициирования горения ВУТ при таких условиях. В энергетике при сжигании распыленного топлива размер капель, формируемых форсунками, в большинстве случаев не превышает 0,5 мм [25,45]. Поэтому специализированная очистка воды выглядит избыточной и нецелесообразной при приготовлении ВУТ и последующем сжигании таких топливных композиций.

Установлено, что повышение массовой концентрации воды в составе ВУТ приводит к значительному росту инерционности зажигания капель исследуемых составов (рисунок 3.12.4). Этот результат вполне очевиден и обусловлен увеличением доли энергии окислителя, расходуемой на парообразование – энергозатратный эндотермический процесс (вследствие высокой теплоты испарения – около 2 МДж/кг). Кроме того, теплопроводность воды ниже, чем угольного компонента. Это также замедляет прогрев топлива и его экзотермическое реагирование. Важно отметить, что для воды разного качества масштабы влияния ее концентрации в составе ВУТ чрезвычайно высоки.

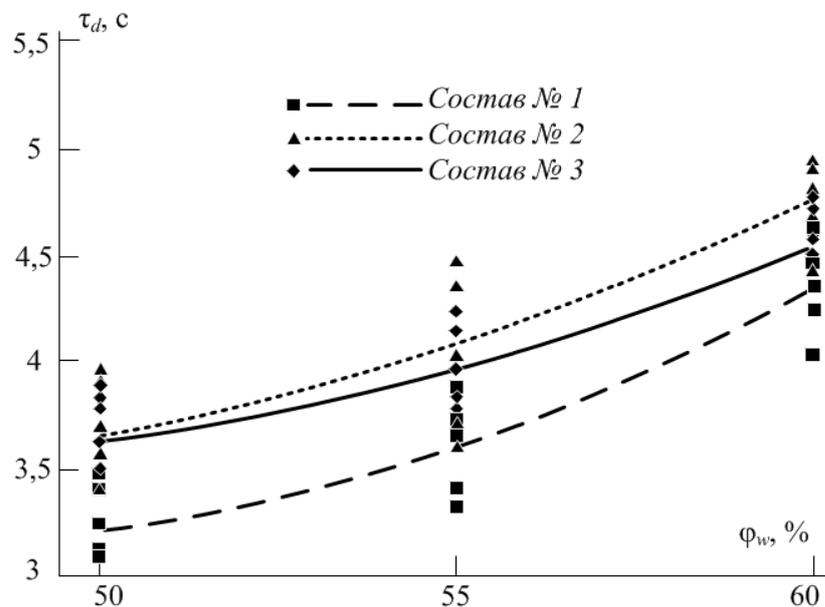


Рисунок 3.12.4. Времена задержки зажигания капель ВУТ в зависимости от процентного содержания воды (при  $T_g \approx 916$  К,  $R_d \approx 1$  мм и  $V_g \approx 3,5$  м/с)

В тоже время аналогично экспериментам [118] в настоящей работе установлено, что рост концентрации воды в составе ВУТ может приводить к снижению минимальной температуры устойчивого зажигания капель топлива. В частности, для выделенного на рисунке 3.12.4 диапазона (относительная массовая концентрация воды 50–60 %) установлено, что минимальные температуры зажигания ВУТ снижаются от 780 К до 750 К. Эти результаты обусловлены, скорее всего, влиянием группы ранее

обоснованных факторов [24, 138], наиболее значимым из которых является термохимическое взаимодействие углерода кокса с водяными парами, в результате которого образуются низкорекционные комплексы, ускоряющие зажигание углеродистого остатка. Эти процессы способствуют [23, 65]: последующей низкотемпературной активизации реакционной поверхности топлива на стадии зажигания; возрастанию удельной реакционной поверхности в основной зоне процесса горения; интенсификации процесса горения за счет реакции углерода топлива с водяным паром, протекающей параллельно основной реакции горения.

Выполненные экспериментальные оценки показали, что возможные отличия компонентного состава воды не могут оказывать существенное влияние на инерционность процессов зажигания (особенно при температурах (более 1000 К) окислителя и размерах (менее 0,5 мм) капель топлива, соответствующих установкам большой и малой энергетики). Анализ результатов настоящей работы и данных опытов [25] позволяет заключить, что, скорее всего, качество воды может оказывать существенно большее влияние на стабильность процессов горения ВУТ, но на начальной стадии не является определяющим фактором. Полученные экспериментальные данные и сделанные на их основе заключения важны для развития современных моделей зажигания и горения ВУТ (в частности, [21, 50, 158]).

### **3.13. Зажигание органоводоугольных топлив с размерами капель, соответствующими форсуночным устройствам котельных установок**

Результаты экспериментов, приведенные в разделах 3.1–3.12 настоящей главы, получены для достаточно крупных ( $0,5 \leq R_d \leq 2$  мм) капель ОВУТ разных составов с целью детализации комплекса взаимосвязанных физико-химических процессов, протекающих при зажигании и горении рассмотренных суспензий. Для определения значений интегральных характеристик зажигания типичных ОВУТ (таблица 3.13.1) с размерами капель, соответствующими форсуночным устройствам котельных установок

проведены дополнительные эксперименты [119]. Основой для приготовления топливных суспензий ОБУТ служили отходы переработки угля (КЕКи), бурый уголь марки Б2, отработанные масла (автомобильное, турбинное), мазут. В экспериментах использовались КЕКи каменного угля марок Г и Д с содержанием влаги 53 % и 56,8 %, соответственно. Компонентные составы приготовленных топлив приведены в таблице 3.13.1.

Таблица 3.13.1. Исследованные составы ОБУТ

№ состава	Относительные массовые концентрации компонентов
1	90 % КЕК Г, 10 % масло автомобильное отработанное
2	90 % КЕК Г, 10 % масло турбинное отработанное
3	90 % КЕК Г, 10 % мазут
4	90 % КЕК Д, 10 % масло автомобильное отработанное
5	90 % КЕК Д, 10 % масло турбинное отработанное
6	90 % КЕК Д, 10 % мазут
7	45 % бурый уголь марки Б2, 45 % вода, 10 % масло автомобильное отработанное
8	45 % бурый уголь марки Б2, 45 % вода, 10 % масло турбинное отработанное
9	45 % бурый уголь марки Б2, 45 % вода, 10 % мазут

В результате выполненных экспериментов получены зависимости, иллюстрирующие влияние температуры окислителя и начального размера капель топливных суспензий на инерционность зажигания составов ОБУТ на основе КЕКов каменных углей марок Г (рисунки 3.13.1, 3.13.2) и Д (рисунки 3.13.3, 3.13.4). Следует отметить, что топливные суспензии, твердая фаза которых представлена бурым углем (таблица 3.13.1, составы № 7–9), в процессе нагрева принимали пористую («рассыпчатую») структуру. Поэтому в процессе взаимодействия капель данных топлив и потока разогретого

окислителя частицы бурого угля активно диспергировали, и капля ОВУТ полностью разрушалась до завершения горения коксового остатка. По этой причине не удавалось регистрировать времена полного сгорания ( $\tau_c$ ) капель ОВУТ на основе бурого угля (таблица 3.13.1, составы № 7–9). Для данных топлив получены лишь зависимости времен задержки зажигания ( $\tau_d$ ) от температуры окислителя (рисунок 3.13.5) и начального размера капли (рисунок 3.13.6).

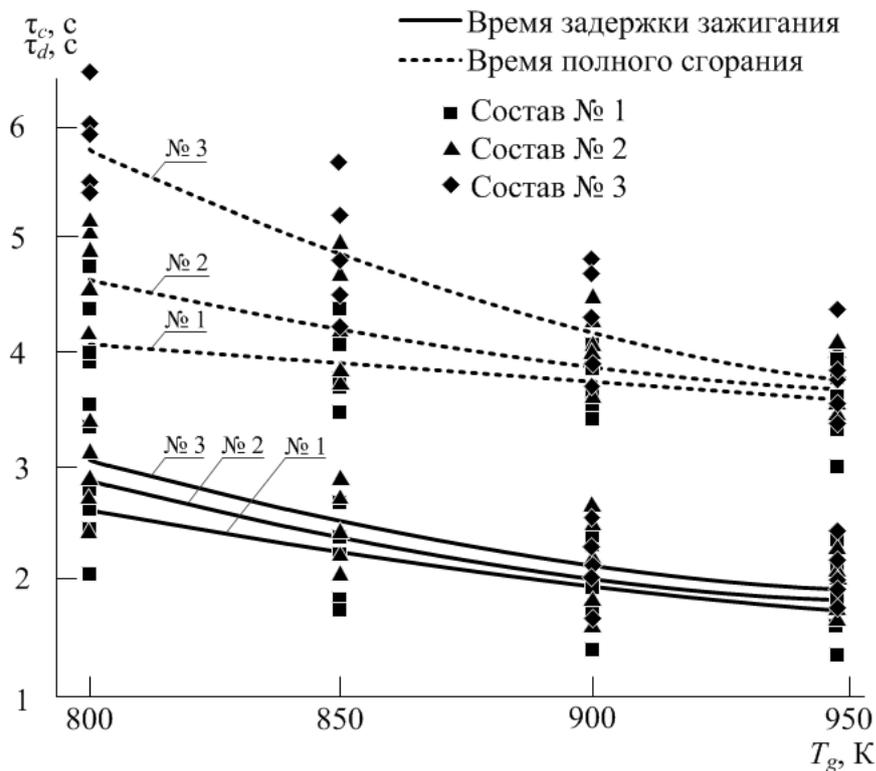


Рисунок 3.13.1. Времена задержки зажигания и полного сгорания капель ОВУТ (номера составов соответствуют таблице 3.13.1) в зависимости от температуры окислителя (при  $V_g \approx 3,5$  м/с и  $R_d \approx 0,35$  мм)

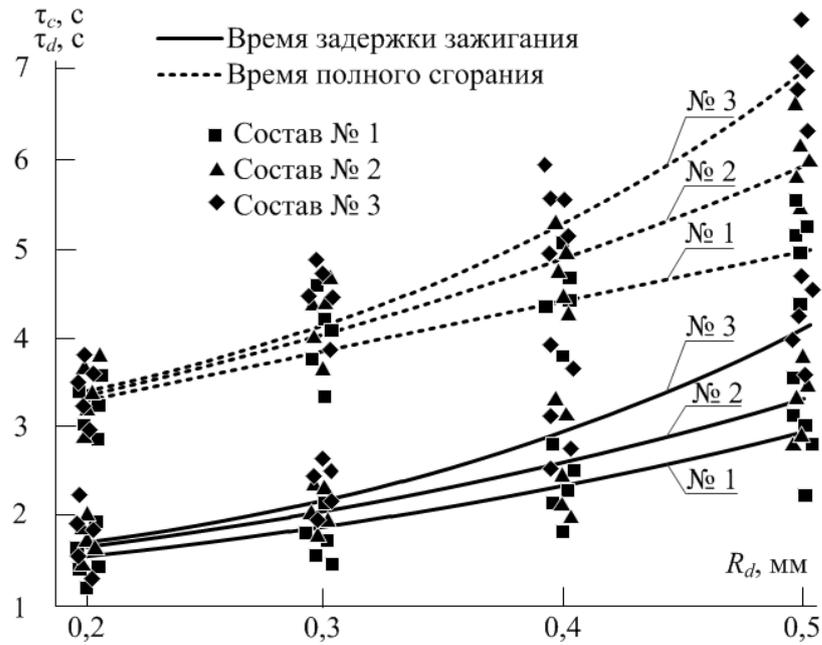


Рисунок 3.13.2. Времена задержки зажигания и полного сгорания капель ОВУТ (номера составов соответствуют таблице 3.13.1) в зависимости от размеров капель (при  $T_g \approx 870$  К и  $V_g \approx 3,5$  м/с)

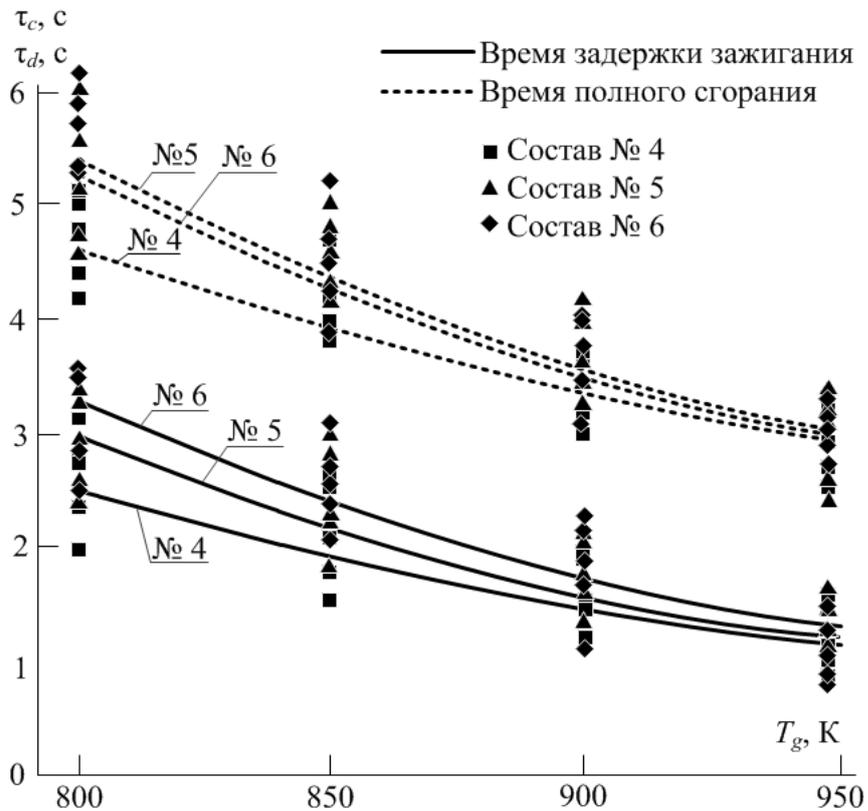


Рисунок 3.13.3. Времена задержки зажигания и полного сгорания капель ОВУТ (номера составов соответствуют таблице 3.13.1) в зависимости от температуры окислителя (при  $V_g \approx 3,5$  м/с и  $R_d \approx 0,35$  мм)

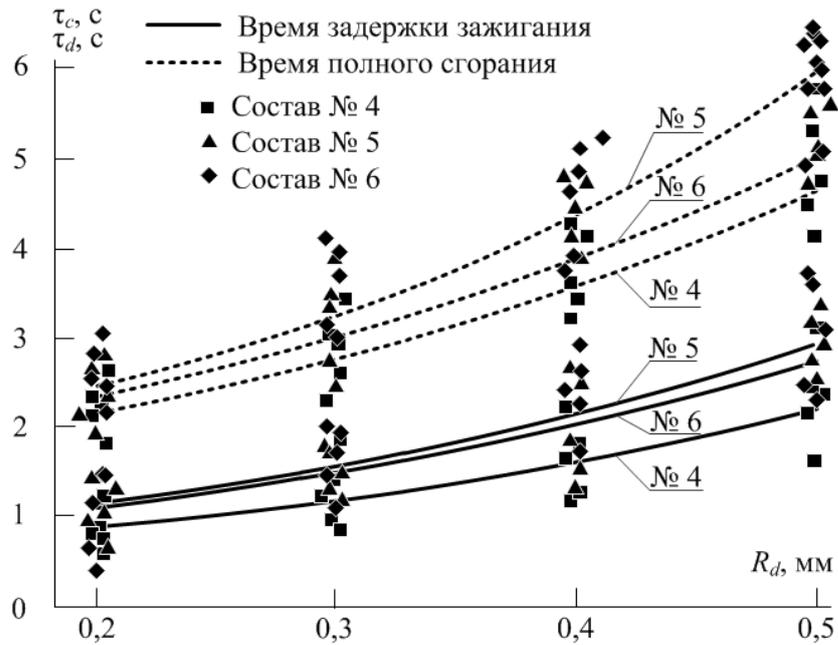


Рисунок 3.13.4. Времена задержки зажигания и полного сгорания капель ОБУТ (номера составов соответствуют таблице 3.13.1) в зависимости от размеров капель (при  $T_g \approx 870$  К и  $V_g \approx 3,5$  м/с)

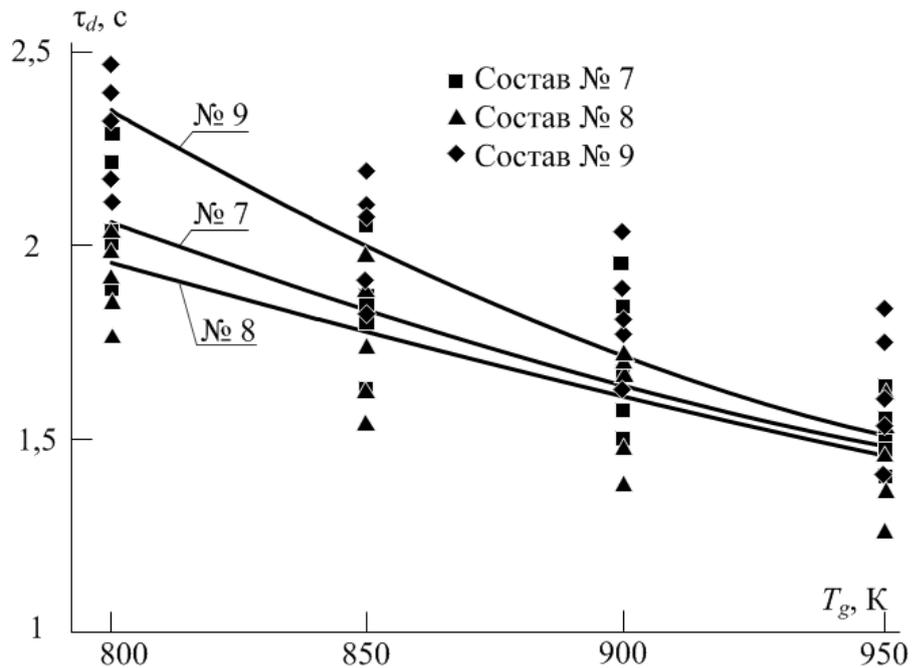


Рисунок 3.13.5. Времена задержки зажигания капель ОБУТ (номера составов соответствуют таблице 3.13.1) в зависимости от температуры окислителя (при  $V_g \approx 3,5$  м/с и  $R_d \approx 0,35$  мм)

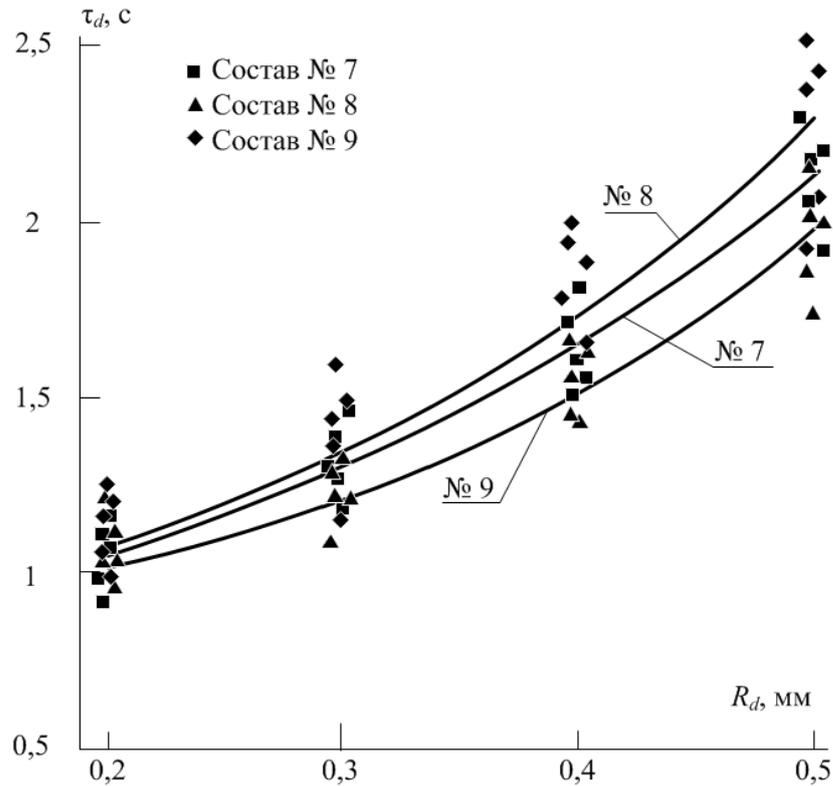


Рисунок 3.13.6. Времена задержки зажигания капель ОВУТ (номера составов соответствуют таблице 3.13.1) в зависимости от размеров капель (при  $T_g \approx 870$  К и  $V_g \approx 3,5$  м/с)

На рисунках 3.13.1–3.13.6 можно видеть удовлетворительное рассогласование (менее 10 %) экспериментальных значений времен задержки зажигания ( $\tau_d$ ) и полного сгорания ( $\tau_c$ ) при идентичных условиях нагревания капель соответствующей топливной суспензии. Для получения удовлетворительной повторяемости результатов опытов проводилось от 6 до 10 экспериментов при идентичных условиях. Опыты с отклонением времен  $\tau_d$  и  $\tau_c$  более, чем на 10 % относительно средних значений, исключались из дальнейшего рассмотрения и теоретического анализа.

Рисунки 3.13.1–3.13.6 иллюстрируют, что времена задержки зажигания и полного сгорания нелинейно уменьшались при росте температуры окислителя (рисунки 3.13.1, 3.13.3, 3.13.5) и уменьшении начального размера капель (рисунки 3.13.2, 3.13.4, 3.13.6). При анализе вида зависимостей времен задержки зажигания от размера капель (рисунки 3.13.2, 3.13.4, 3.13.6)

отмечен квадратичный характер изменения значений  $\tau_d$  при увеличении  $R_d$ . Этот результат, скорее всего, объясняется тем, что длительность инициирования гетерогенного зажигания углеродного остатка (которое, в свою очередь, реализуется на поверхности частицы ОВУТ) во многом определяется временем протекания в приповерхностном слое капли ОВУТ таких стадий как испарение влаги, жидкого горючего компонента, термическое разложение угля (т.е. прослеживается устойчивая связь между временем, затрачиваемым на зажигание капли ОВУТ, и площадью её поверхности).

Установлено, что процессы зажигания и горения всех исследованных составов ОВУТ характеризовались достаточно близкой инерционностью. При варьировании температуры окислителя в диапазоне 800–950 К для составов № 1–9 (таблица 3.13.1) значения  $\tau_d$  не превышали 4 с, значения  $\tau_c$  составляли не более 7 с.

Несмотря на довольно близкие (в первом приближении их можно считать сопоставимыми) характеристики инициирования процесса горения, можно выделить некоторые отличительные особенности для разных компонентных составов ОВУТ:

1) композиции на основе бурого угля характеризуются минимальной инерционностью зажигания (рисунки 3.13.5, 3.13.6) – вследствие высокой реакционной способности, низких температур устойчивого горения, значительного содержания летучих;

2) топливные суспензии на основе отходов углеобогащения более чувствительны к изменению температуры газовой среды. При увеличении  $T_g$  от 800 К до 950 К снижение  $\tau_d$  для составов на основе КЕКа Г составило 30–35 % (рисунок 3.13.1), для составов на основе КЕКа Д – 30–40 %. Снижение  $\tau_d$  при росте температуры окислителя для суспензий на основе бурого угля менее значительное – 15–25 % (рисунок 3.13.5);

3) в проведенных экспериментах с ростом начального размера капли наблюдалось более заметное увеличение времен задержки

зажигания для составов ОБУТ на основе КЕКов, чем для ОБУТ на основе бурого угля. При варьировании начального радиуса капли в диапазоне 0,2–0,5 мм инерционность зажигания составов № 1–3 (таблица 3.13.1) возрастала на 80–135 %; составов № 4–6 (таблица 3.13.1) – на 120–125 %; составов № 7–9 (таблица 3.13.1) на 75–95 %;

4) выбор жидкого горючего компонента также влияет на характеристики зажигания и горения ОБУТ. В проведенном исследовании топливные суспензии с добавлением мазута (таблица 3.13.1, составы № 3, 6, 9) в большинстве случаев характеризовались большими длительностями инертного прогрева и полного сгорания. Скорее всего, данный эффект связан с меньшей теплотой, выделяющейся при сгорании мазута по сравнению с аналогичной характеристикой отработанного автомобильного и турбинного масел. Определяющими являются три основных параметра таких жидкостей [149] – температура кипения, температура воспламенения и теплота сгорания. На инерционность зажигания ОБУТ в основном влияют первые два параметра, а на температуру горения – третий. Полученные в настоящей работе результаты хорошо коррелируют с заключениями [149].

Аналогично экспериментам [117] в настоящей работе установлено, что скорость набегающего потока окислителя  $V_g$  менее интенсивно (по сравнению с  $T_g$ ) влияет на интегральные характеристики зажигания. В частности, для состава № 1 (таблица 3.13.1) при варьировании  $V_g$  в диапазоне от 0,5 м/с до 5 м/с времена задержки зажигания снижались в пределах 20–30 %. Это можно объяснить практически пропорциональной зависимостью скоростей прогрева и химического реагирования от  $V_g$  и существенно нелинейной (экспоненциальной) зависимостью от  $T_g$ .

Помимо приведенных выше особенностей исследуемых процессов, можно отметить значительное снижение влияния компонентного состава на характеристики зажигания и горения капли ОБУТ при росте температур окислителя (рисунки 3.13.1, 3.13.3, 3.13.5) и уменьшении начального размера

$R_d$  (рисунки 3.13.2, 3.13.4, 3.13.6). Это важно для энергетических установок, в частности, котельных агрегатов, настроенных на работу с использованием отходов различных производств.

По результатам проведенных экспериментов можно сделать вывод о сопоставимых интегральных характеристиках зажигания ОБУТ из разных компонентов (с существенно отличающимися свойствами). В первом приближении эти данные можно считать обоснованием возможности унификации режимов работы котельных агрегатов, несмотря на смену компонентов ОБУТ. В частности, в проведенных экспериментах все известные стадии зажигания и горения (инертный прогрев, испарение жидких компонентов, термическое разложение органической части угля, газофазное зажигание смеси паров воды и горючей жидкости, а также летучих, прогрев коксового остатка угля и его гетерогенное зажигание) были идентичны для ОБУТ на основе КЕКов и бурого угля. С ростом температуры окислителя и уменьшением размеров капель топлив длительности соответствующих стадий становятся сопоставимыми для исследованных водоугольных композиций, несмотря на существенное отличие свойств особенно угольных компонентов.

Установленные закономерности важны для понимания физики исследованных процессов и обоснования возможности разработки унифицированных технологий зажигания ОБУТ на основе разных компонентных составов. Они представляют интерес для расширения информационной экспериментальной базы, используемой для развития современных моделей зажигания и горения ВУТ и ОБУТ.

### **3.14. Рекомендации по использованию полученных результатов**

Использование в энергетике любых видов топлива всегда характеризуется экологическим, экономическим и энергетическим аспектами. Следует отметить, что получение идеального соотношения всех характеристик топлива на сегодняшний день недостижимо, поэтому каждое

предприятие выбирает компромиссный вариант в соответствии с собственными приоритетами и внешними условиями.

Главным экономическим преимуществом органоводоугольных топливных суспензий, рассмотренных в настоящей работе, является доступность и низкая стоимость сырья для их приготовления. Согласно результатам проведенных экспериментов, отходы углеобогатительной, нефтеперерабатывающей, транспортной, энергетической и др. отраслей промышленности могут эффективно использоваться в качестве компонентов ОВУТ. Энергетические характеристики сжигания ОВУТ (по причине наличия в составе воды и отходов) не являются преимуществом (в сравнении с угольной пылью). Однако, несмотря на это, за счет существенного снижения температуры окислителя (устойчивое зажигание ОВУТ реализуется в диапазоне 650–900 К) возможно сокращение затрат на инициирование горения, что является положительной стороной применения суспензионных топлив на основе отходов угле- и нефтепереработки. Экологический аспект применения ВУТ и ОВУТ является безусловным преимуществом. Известно [18, 45], что при сжигании водоугольных суспензий образуется существенно меньшее количество токсичных продуктов сгорания (оксидов азота и серы) и летучей золы в сравнении с традиционным сжиганием пылеугольного топлива.

По результатам выполненных экспериментальных исследований сформулирован перечень рекомендаций по практическому применению ОВУТ в большой и малой энергетике:

- 1) в качестве компонентов для приготовления ОВУТ могут использоваться отходы переработки каменных углей (фильтр-кеки) и типичные отработанные масла (в частности, автомобильные, турбинные, трансформаторные, компрессорные);
- 2) устойчивое зажигание капель ОВУТ исследованных составов реализуется в диапазоне температур окислителя 650–900 К (см. раздел

- 3.8); этот интервал температур характеризует значительный потенциал энергетических технологий на этапе прогрева и зажигания топлив;
- 3) уменьшение тонины помола угля в составе ОБУТ приводит к снижению инерционности зажигания; с применением данных, представленных в разделе 3.6, можно выбирать оптимальную тонины помола в соответствии с возможностями предприятий;
  - 4) специализированная очистка воды, используемой для приготовления ОБУТ и ВУТ, от примесей и других загрязнений нецелесообразна. Эксперименты показали, фактор очистки воды не оказывает определяющее влияние на инерционность зажигания капель топлива (см. раздел 3.12), также как и фактор использования в составе ОБУТ свежего или отработанного масла;
  - 5) для интенсификации зажигания ОБУТ при более низких температурах окислителя (менее 800 К) и для снижения времени задержки зажигания предпочтительно использование в составе суспензии углей и отходов углеобогащения с высоким содержанием летучих веществ, а также жидких горючих компонентов с низкими значениями температур вспышки, зажигания, теплоты парообразования и кипения (см. разделы 3.7, 3.8, 3.11);
  - 6) увеличение массовой доли воды в составе ОБУТ приводит к снижению минимальных температур его зажигания, однако значительно увеличивает длительность инициирования горения (см. раздел 3.5); эти эффекты важны для корректного выбора концентраций компонентов ОБУТ в соответствии с требованиями соответствующих энергетических предприятий;
  - 7) значительное снижение инерционности и пороговых температур зажигания капель ОБУТ, приготовленных на основе фильтр-кеков возможно при добавлении в состав даже небольшого количества (5–15 % масс) обогащенного угля (см. раздел 3.6).

### Выводы по третьей главе

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

2. В зависимости от свойств угля в капле ОБУТ могут формироваться несколько зон локального зажигания коксового остатка или единый очаг горения со стороны набегающего потока окислителя.

3. Процесс зажигания коксового остатка в капле ОБУТ может сопровождаться диспергированием, при котором отделившиеся фрагменты горят в режиме, хорошо соответствующем пылевидному угольному топливу.

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

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

6. Необходимые и достаточные для устойчивого зажигания ОБУТ и ВУТ температуры (650–900 К) окислителя (воздуха) существенно ниже традиционно принимаемых (более 1000 К) в энергетических технологиях топливосжигания. Этот результат позволяет сделать вывод о существенном

резерве для большой энергетики в направлении оптимизации расходования ресурсов за счет использования твердых и жидких отходов переработки углей и отработанных нефтепродуктов различных энергоустановок и механизмов.

7. Относительно небольшое (до 10 %) добавление высококачественного обогащенного угля в ОВУТ может приводить к снижению времен  $\tau_d$  на 20–30 %. Этот результат показывает, что для ОВУТ (на основе фильтр-кеков) с худшими интегральными характеристиками зажигания одним из подходов оптимизации процессов горения может выступить добавление небольших объемов высококачественного обогащенного угля.

8. Увеличение концентрации воды в ОВУТ на 5–15 % приводит не только к росту инерционности процесса инициирования горения на 30–40 %, но и уменьшению пороговых (минимальных) температур горения на 10–30 К.

9. Из основных параметров источника нагрева – потока разогретого воздуха доминирующее влияние на времена  $\tau_d$  и  $\tau_c$  оказывает температура. Выполненные оценки показали, что определяющая роль  $T_g$  обусловлена существенным превышением радиационного теплового потока по отношению к конвективному и кондуктивному на границе «капля – окислитель».

10. Независимо от компонентного состава суспензии, ее приготовление при помощи шаровой барабанной мельницы приводило к большему расслоению (отделению водяной связки), тем самым ухудшая ее реологические характеристики. Данное явление можно объяснить дополнительным измельчением угля в случае шаровой барабанной мельницы и понижением вязкости ОВУТ.

11. Приготовление ОВУТ при помощи гомогенизатора позволяет понизить инерционность процесса зажигания практически в 2 раза в сравнении с использованием шаровой барабанной мельницы. Установлено, что независимо от используемых методик подготовки ОВУТ, существует

некоторое оптимальное время приготовления, превышение которого приводит к росту инерционности процессов зажигания.

12. Довольно малые (до 5 %) концентрации высококачественного угля могут существенно улучшить интегральные характеристики зажигания и горения ОБУТ на основе типичных отходов. В частности, установленное уменьшение времени задержки зажигания на 15–25 %, а также длительности процесса горения ОБУТ (около 20 %) позволяют сделать вывод о высокой эффективности этого подхода (к повышению полноты сжигания отходов при минимальных затратах энергии).

13. При стационарном положении капли в потоке разогретого окислителя перенос тепла от ее поверхности к держателю оказывает достаточно существенное влияние на характеристики зажигания. В частности, максимальный сток тепла зарегистрирован при использовании керамического стержня, что выражается в завышенных значениях  $\tau_d$  и  $\tau_c$  (по сравнению с  $\tau_d$  и  $\tau_c$ , полученными при подвешивании капли на спай термопары или металлическую проволочку). Влияние стока тепла к держателю на характеристики зажигания наиболее заметно на этапе инертного прогрева топлива, протекающего с поглощением энергии, чем на этапе гетерогенного горения углерода, сопровождающегося выделением энергии.

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

15. Для приготовления ВУТ и ОБУТ, предназначенных для тонкораспыленного ( $R_d \leq 0,5$  мм) сжигания в высокотемпературной среде (температура окислителя на этапе инициирования горения не менее 1000 К), возможно использование воды достаточно разного качества.

16. Для ВУТ на основе технической воды характерна несколько меньшая инерционность зажигания и большие температуры горения по сравнению с топливами на основе очищенной воды (водопроводной и дистиллированной). Данный эффект особенно заметен при низкотемпературном зажигании ( $T_g \leq 1000$  К) крупных капель ( $R_d \geq 1$  мм) ВУТ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение работы можно сформулировать основные выводы и отметить определяющие результаты работы:

1. В рамках диссертационных исследований разработан программно-аппаратный комплекс, позволяющий регистрировать и вычислять большую группу определяющих параметров зажигания ОБУТ: температура и скорость потока окислителя, размеры капель топлива, их времена задержки зажигания и полного сгорания, температуры в центре и на поверхности капли топлива и др. Разработана и обоснована новая методика регистрации времени задержки зажигания и полного сгорания одиночной капли ОБУТ по видеозаписи эксперимента с использованием программного обеспечения Tema Automotive и цветовой модели RGB. Созданный экспериментальный стенд и методику исследований можно считать унифицированными по отношению к разным компонентным составам ОБУТ, материалу держателя капли топлива и условиям нагрева.

2. Установлено, что механизм зажигания одиночной капли ОБУТ включает следующие стадии: инертный прогрев капли, испарение влаги с ее приповерхностного слоя, испарение жидкого горючего компонента, термическое разложение органической части угля, газофазная реакция окисления летучих и паров жидкого горючего компонента в разогретом воздухе, прогрев и гетерогенное зажигание коксового остатка. Определены особенности этих стадий при низкотемпературном нагреве.

3. Пары жидкого горючего компонента, образующиеся при нагревании капли ОБУТ, способствуют интенсификации процесса зажигания летучих, их более равномерному сгоранию в малой окрестности приповерхностного слоя капли и к выгоранию коксового остатка по всему периметру (практически без явно выраженного локального очага горения).

4. Добавление жидкого горючего компонента в состав топливной суспензии на основе воды и угля приводит к увеличению длительности полного сгорания капли ОБУТ. При этом характерные температуры в центре

капель топливных композиций (ВУТ и ОВУТ) различаются не более чем на 15–25 К.

5. Устойчивое зажигание капель ОВУТ и ВУТ реализуемо при температурах окислителя (воздуха) 650–900 К, что существенно ниже традиционно принимаемых (более 1000 К) в энергетических технологиях топливосжигания. Этот результат позволяет сделать вывод о существенном резерве для большой энергетики в направлении оптимизации расходования ресурсов за счет использования твердых и жидких отходов переработки углей и отработанных нефтепродуктов различных энергоустановок и механизмов.

6. Увеличение массовой доли воды в составе ОВУТ на 5–15 % вызывает как увеличение времени задержки зажигания на 30–40 %, так и снижение пороговых (минимальных) температур горения на 10–30 К.

7. Температура окислителя является ключевым внешним фактором (относящимся к параметрам источника нагрева), оказывающим влияние на инерционность зажигания и горения капли ОВУТ. Выполненные оценки показали, что определяющая роль  $T_g$  обусловлена существенным превышением радиационного теплового потока по отношению к конвективному и кондуктивному на границе «капля – окислитель».

8. Использование гомогенизатора для приготовления ОВУТ позволяет снизить время задержки зажигания практически в 2 раза в сравнении с использованием шаровой барабанной мельницы. Кроме того, независимо от используемых методик подготовки ОВУТ, существует некоторое оптимальное время приготовления, превышение которого приводит к росту инерционности процессов зажигания.

9. Для интенсификации зажигания ОВУТ при более низких температурах газовой среды целесообразно использование в составе топливной суспензии низкосортные угли с высоким содержанием летучих веществ. Установлено, что добавка бурого угля (с массовой концентрацией 5

%) в ОБУТ на основе каменного угля приводит к снижению минимальной температуры зажигания на 7–10 %.

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

## ЛИТЕРАТУРА

1. Coal Information 2012. Luxembourg: International Energy Agency, 2012. 566 p. <http://www.iea.org>
2. International Energy Outlook with projections to 2040. Washington: U.S. Energy Information Administration, 2013. 234 p. <http://www.eia.gov>
3. BP Statistical Review of World Energy. London: BP, 2015. 48 p. <http://www.bp.com>
4. Key World Energy Statistics. 2014. Paris: International Energy Agency, 2014. 81 p. <http://www.iea.org>
5. Kontorovich, A.E. Long-term and medium-term scenarios and factors in world energy perspectives for the 21st century / A.E. Kontorovich, M.I. Erov, L.V. Eder // Russian Geology and Geophysics. – 2014. – V. 55, № 5-6. – P. 534–543.
6. Шпирт, М.Я. Рациональное использование отходов добычи и обогащения углей / М.Я. Шпирт, В.А. Рубан, Ю.В. Иткин. – Москва: Недра, 1990. – 224 с.
7. Панова, В.Ф. Отходы углеобогащения как сырье для получения строительных материалов / В.Ф. Панова, С.А. Панов // Вестник Сибирского государственного федерального университета. – 2015. – № 2 (12). – С. 71–75.
8. OPEC Annul Statistical Bulletin, 2014. 112 p. <http://www.opec.org/>
9. 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. – V. 114. – P. 281–292.
10. 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. – V. 176-177, № 1. – P. 601–617.
11. 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.
12. 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. – V. 261. – P. 470–490.
  13. 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. – V. 11, № 7. – P. 5271–5276.
  14. Boughton, B. Environmental Assessment of Used Oil Management Methods / B. Boughton, A. Horvath // *Environmental Science & Technology*. – 2004. – V. 38, № 2. – P. 353–358.
  15. Ermakov, V.V. Oil sludge depository assessment using multivariate data analysis / V.V. Ermakov, A. Bogomolov, D.E. Bykov // *Journal of Environmental Management*. – 2012. – V. 105. – P. 144–151.
  16. Kapustina, V. System analysis of waste oil management in Finland / V. Kapustina, J. Havukainen, T. Virkki-Hatakka, M. Horttanainen // *Waste Management & Research*. – 2014. – V. 32, № 4. – P. 297–303.
  17. Ходаков, Г.С. Суспензионное угольное топливо / Г.С. Ходаков, Е.Г. Горлов, Г.С. Головин // *Химия твердого топлива*. – 2005. – № 6. – С. 15–32.
  18. 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.
  19. Ходаков, Г.С. Водоугольные суспензии в энергетике / Г.С. Ходаков // *Теплоэнергетика*. – 2007. – № 1. – С. 35–45.
  20. 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.

21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. Kijo-Kleczkowska, A. Combustion of coal-water suspensions / A. Kijo-Kleczkowska // Fuel. – 2011. – V. 90. – P. 865–877.
25. Jianzhong, L. Pilot-scale investigation on slurring, combustion, and slagging characteristics of coal slurry fuel prepared using industrial wasteliquid / L. Jianzhong, W. Ruikun, X. Jianfei, Z. Junhu, C. Kefa // Applied Energy. – 2014. – V. 115. – P. 309–319.
26. 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. – V. 19, № 1. – P. 243–251.
27. Горлов, Е.Г. Композиционные водосодержащие топлива из углей и нефтепродуктов / Е.Г. Горлов // Химия твердого топлива. – 2004. – № 6. – С. 50–61.
28. 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.
29. 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.
30. 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.
  31. 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. – V. 30, № 4. – P. 3441–3450.
  32. Burdukov, A.P. An investigation of the rheology and dynamics of combustion of composite coal-water slurries / A.P. Burdukov, A.A. Emel'yanov, V.I. Popov, S.N. Tarasenko // Thermal Engineering. – 1997. – V. 44, № 6. – P. 492–497.
  33. Ведрученко, В.Р. О динамике преобразований капель в факеле водомазутной эмульсии как топливе для котельных установок / В.Р. Ведрученко // Теплоэнергетика. – 2000. – № 2. – С. 57–60.
  34. 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.
  35. 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.
  36. Сыродой, С.В. Влияние форм частиц на характеристики воспламенения водоугольного топлива / С.В. Сыродой, В.В. Саломатов, Г.В. Кузнецов // Химия твердого топлива. – 2015. – № 6. – С. 28–34.
  37. Баранова М.П. Влияние влажности бурого угля на свойства высококонцентрированных водоугольных суспензий / М.П. Баранова, Б.Н. Кузнецов // Химия твердого топлива. – 2003. – № 6. – С. 20–26.
  38. Ходаков, Г.С. Производство и трубопроводное транспортирование

- суспензионного водоугольного топлива / Г.С. Ходаков, Е.Г. Горлов, Г.С. Головин // Химия твердого топлива. – 2006. – № 4. – С. 22–39.
39. Gajewski, W. Analysis of cyclic combustion of solid fuels / W. Gajewski, A. Kijo-Kleczkowska, J. Leszczynski // Fuel. – 2009. – V. 88, № 2. – P. 221–234.
40. Свищёв, Д.А. Термодинамический анализ режимов газификации водоугольного топлива в потоке / Д.А. Свищёв, А.В. Кейко // Теплоэнергетика. – 2010. – № 6. – С. 33–36.
41. Bo, Y. Combustion characteristics of coal-water slurry in a slag-tap vertical cyclone furnace through digital imaging / Y. Bo, Z. Huang, Q. Huang, Y. Zhang, J. Zhou, K. Cen // Energy & Fuels. – 2013. – V. 27, № 6. – P. 3427–3437.
42. Mukherjee, A. Effect of additives on interfacial interactions for viscosity reduction of carbonaceous solid-water slurries / A. Mukherjee, S.V. Pisupati // Fuel. – 2016. – V. 180. – P. 50–58.
43. Zhou, M. Evaluation of treated black liquor used as dispersant of concentrated coal-water slurry / M. Zhou, Q. Kong, B. Pan, X. Qiu, D. Yang, H. Lou // Fuel. – 2010. – V. 89, № 3. P. 716–723.
44. Gao, Z. Effects of fractal surface on rheological behavior and combustion kinetics of modified brown coal water slurries / Z. Gao, S. Zhu, M. Zheng, Z. Wu, H. Lü, W. Liu // International Journal of Coal Science & Technology. – 2015. – V. 2, № 3. – P. 211–222.
45. Осинцев, К.В. Исследование факельного сжигания водоугольных суспензий в топках энергетических котлов / К.В. Осинцев // Теплоэнергетика. – 2012. – № 6. – С. 21–27.
46. Zhang, Y. Flow behavior of high-temperature flue gas in the heat transfer chamber of a pilot-scale coal-water slurry combustion furnace / Y. Zhang, Y. Bo, Y. Wu, X. Wu, Z. Huang, J. Zhou, K. Cen // Particuology. – 2014. – V. 17. – P. 114–124.
47. Chen, R. Preparation and rheology of biochar, lignite char and coal slurry

- fuels / R. Chen, M. Wilson, Y.K. Leong, P. Bryant, H. Yang, D.K. Zhang // Fuel. – 2011. – V. 90, № 4. – P. 1689–95.
48. 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 Processing Technology. – 2014. – V. 118. – P. 187–191.
49. Wilczyńska-Michalik, W. Composition of coal combustion by-products: The importance of combustion technology / W. Wilczyńska-Michalik, R. Moryl, J. Sobczyk, M. Michalik // Fuel Processing Technology. – 2014. – V. 124–P. 35–43.
50. Tavangar, S. CFD simulation for secondary breakup of coal-water slurry drops using OpenFOAM / S. Tavangar, S.H. Hashemabadi, A. Saberimoghadam // Fuel Processing Technology. – 2015. – V. 132. – P. 153–163.
51. Глушков, Д.О. Органоводоугольное топливо: проблемы и достижения (обзор) / Д.О. Глушков, П.А. Стрижак, М.Ю. Чернецкий // Теплоэнергетика.– 2016. – № 10. – С. 31–41.
52. 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. – V. 49, № 2. – P. 73–79.
53. 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. – 2015. – V. 9, № 2. – P. 242–249.
54. Glushkov, D.O. Numerical research of heat and mass transfer during low-temperature ignition of a coal particle / D.O. Glushkov, G.V. Kuznetsov, O.V. Vysokomornaya // Thermal Science. – 2015. – V. 19, № 1. – P. 285–294.
55. Белов, А.А. Гидравлическое транспортирование обводненного топлива в виде водоугольной суспензии / А.А. Белов // Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий. – М.:

- Наука, 1967. – С. 103–111.
56. Sacks, M.E. Some pumping characteristics of coal char slurries / M.E. Sacks, M.J. Romney, J.F. Jones // *Industrial and Engineering Chemistry*. – 1970. – V. 9, № 1. – P. 148–153.
57. Zandi, I. “Solid pipeline” conserves energy / I. Zandi, K.S. Kim // *Transportation Research*. – 1974. – V. 8, № 4-5. – P. 471–480.
58. Трайнис В.В. Параметры и режимы гидравлического транспортирования угля по трубопроводам / В.В. Трайнис. – Москва: Наука, 1970. – 192 с.
59. Brown, N.A. Coking behaviour of coals recovered from slurry pipelines using a selective agglomeration technique / N.A. Brown, G.R. Rigby, T.G. Callcott // *Fuel processing technology*. – 1980. – V. 3, № 2. – P. 101–114.
60. Penner, S.S. Research needs for coal gasification and coal liquefaction / S.S. Penner, S.B. Alpert, V. Bendanillo, J. Clardy, L.E. Furlong, F. Leder, L. Lees, E. Reichl, J. Ross, R.P. Sieg, A.M. Squires, J. Thomas // *Energy*. – 1980. – V. 5, № 11. – P. 1091–1116.
61. Sastri, V.S. Effect of pipeline corrosion inhibitors on the caking properties of metallurgical coals / V.S. Sastri, G.R. Hoey, B.J.P. Whalley // *Fuel*. – 1980. – V. 59, № 11. – P. 811–812.
62. Делягин, Г.Н. Экспериментальное исследование процесса горения капли водоугольной суспензии из бурого и газового углей / Г.Н. Делягин, А.И. Кулинич, В.И. Кирсанов // *Горение дисперсных топливных систем*. – Москва: Наука, 1969. – С.55-68.
63. Вессельман, С.Г. Циклонная топка для исследования процесса сжигания обводненной каменноугольной мелочи / С.Г. Вессельман, Н.Е. Лугинин, Л.В. Дробышев // *Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий*. – Москва: Наука, 1967. – С. 184–186.
64. Барс, П.А. Исследование работы горелочного устройства с вращающимся распылителем для сжигания водоугольной суспензии /

- П.А. Барс, М.И. Сидоров // Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий. – Москва: Наука, 1967. – С.145–153.
65. Делягин, Г.Н. Исследование процесса воспламенения капли водоугольной суспензии / Г.Н. Делягин, Б.Н. Сметанников // Новые методы сжигания топлив и вопросы теории горения. – Москва: Наука, 1965. – С. 84–90.
66. 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.
67. 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.
68. Mchale, E.T. Combustion of coal water slurry / E.T. Mchale, R.S. Scheffee, N.P. Rossmeissl // Combustion and Flame. – 1982. – V. 45, № C. – P. 121–135.
69. Huang, Z. Theoretical analysis on CWM drop combustion history / Z. Huang, C. Qin, G. Gao // Proceedings of the Eighth International Symposium on Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization. USA, Orlando. – 1986. – P. 343–358.
70. 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. – V. 98, № 4. – P. 326–342.
71. Szekely, G.A. Reaction of carbon black slurry agglomerates in combustion gases / G.A. Szekely, G.M. Faeth // Proceedings of the Nineteenth Symposium (International) on Combustion. – 1982. – V. 19, № 1. – P. 1077–1085.
72. Son, S.Y. Effect of coal particle size on coal-water slurry (CWS)

- atomization / S.Y. Son, K.D. Kihm // *Atomization and Sprays*. – 1998. – V. 8, № 5. – P. 503–519.
73. Mizomoto, M. Combustion of a coal-oil mixture droplet on a hot surface / M. Mizomoto, I. Masuda, S. Ikai // *Combustion and Flame*. – 1986. – V. 63, № 1-2. – P. 289–301.
74. Делягин, Г.Н. Дисперсные топливные системы в энергетике и химической технологии / Г.Н. Делягин // *Химия твердого топлива*. – 1973. – № 1. – С. 127–134.
75. Делягин, Г.Н. О применении топливных суспензий в процессах газификации угля / Г.Н. Делягин // *Химия твердого топлива*. – 1978. – № 5. – С. 82–83.
76. Хидиятов, А.М. Результаты перевода пылеугольного котла паропроизводительностью 89 кг/с на сжигание водоугольной суспензии / А.М. Хидиятов, В.В. Осинцев, С.В. Гордеев // *Теплоэнергетика*. – 1987. – № 1. – С. 5–11.
77. Лерман, Е.Ю. Высококонтрированные водотопливные эмульсии – эффективное средство улучшения экологических показателей легких быстроходных дизелей / Е.Ю. Лерман, О.А. Гладков // *Двигателестроение*. – 1986. – № 10. – С. 35–37.
78. Хидиятов, А.М. Результаты перевода пылеугольного котла паропроизводительностью 89 кг/с на сжигание водоугольной суспензии / А.М. Хидиятов, В.В. Осинцев, С.В. Гордеев и др. // *Теплоэнергетика*. – 1987. – № 1. – С. 5–11.
79. Олофинский, Е.П. Вопросы использования водоугольного топлива на тепловых электростанциях / Е.П. Олофинский // *Теплоэнергетика*. – 1989. – № 12. – С. 64–66.
80. Рукин, Э.И. Исследование свойств водоугольных суспензий из каменных углей в присутствии поверхностно-активных веществ / Рукин Э.И., Горская Т.П., Делягин Г.Н., Исаев В.В. // *Химия и переработка топлив*. – 1975. – Т.30, вып.2. – С. 19–26.

81. Stehr, N. Comparison of Energy Requirements for Conventional and Stirred Ball Milling of Coal-Water Slurries / N. Stehr, R.K. Mehta, J.A. Herbst // *Coal Preparation*. – 1987. – V. 4, № 3-4. – P. 209–226.
82. Dunn-Rankin, D. Combustion of coal-water slurries. Evolution of particle size distribution for coals of different rank / D. Dunn-Rankin, J. Hoornstra, F.A. Gruelich, D.J. Holve // *Fuel*. – 1987. – V. 66, № 8. – P. 1139–1145.
83. Vasil'ev, V.V. Effect of various additives on rheological characteristics of highly concentrated water-coal suspensions / V.V. Vasil'ev, T.D. Degtareno, V.Y. Tretinnik, A.S. Makarov, A.V. Gamera // *Solid Fuel Chemistry*. – 1988. – V. 22, № 2. – P. 116–120.
84. Smith, C.F. Influence of fluid physical properties on coal-water slurry atomization / C.F. Smith, P.E. Sojka, J.M. Thames // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. – 1990. – V. 112, № 1. – P. 15–20.
85. Берг, Б.В. Тепло- и массоперенос в топках с кипящим слоем при сжигании водоугольной смеси / Б.В. Берг, Т.Ф. Богатова // *Инженерно-физический журнал*. – 1996. – Т.69, № 6. – С. 993–999.
86. Бабий, В.И. Интенсификация процесса горения водоугольной суспензии с помощью присадок / Бабий В.И., Кузина Н.И., Вдовченко В.С. // *Электрические станции*. – 1991. – № 11. – С. 6–8.
87. Саломатов, В.В. Теоретическое исследование горения капли водоугольного топлива. Ч. 1. / В.В. Саломатов, И.В. Кравченко // *Горение и плазмохимия*. – 2007. – № 3. – С. 178–188.
88. Liu, G.E. Combustion of coal-water slurry droplets / G.E. Liu, C.K. Law // *Fuel*. – 1986. – V. 65, № 2. – P. 171–176.
89. 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.
90. 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. –

V. 4. – P. 329–339.

91. 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. – V. 81, № 7. – P. 927–933.
92. Sakai, T. Single-droplet combustion of coal slurry fuels / T. Sakai, M. Saito // *Combustion and Flame*. – 1983. – V. 51, № C. – P. 141–154.
93. Yavuz, R. Combustion characteristics of lignite-water slurries / R. Yavuz, S. Küçükbayrak, A. Williams // *Fuel*. – 1998. – V. 77, № 11. – P. 1229–1235.
94. 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. – V. 87, № 12. – P. 2620–2627.
95. Shin, Y.-J. Preparation of coal slurry with organic solvents / Y.-J. Shin, Y.-H. Shen // *Chemosphere*. – 2007. – V. 68, № 2. – P. 389–393.
96. 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. – V. 18, № 1. – P. 59–69.
97. Saito, M. Single droplet combustion of coal-oil/methanol/water mixtures / M. Saito, M. Sadakata, T. Sakai // *Fuel*. – 1983. – V. 62, № 12. – P. 1481–1486.
98. Yao, S. Behavior of suspended coal-water slurry droplets in a combustion environment / S. Yao, L. Liu // *Combustion and Flame*. – 1983. – V. 51, № C. – P. 335–345.
99. Yao, S.C. Burning of suspended coal-water slurry droplet with oil as combustion additive / S.C. Yao, P. Manwani // *Combustion and Flame*. – 1986. – V. 66, № 1. – P. 87–89.
100. Murdoch, P.L., Pourkashanian M., Williams A. The mechanism of combustion of coal-water slurries / P.L. Murdoch, M. Pourkashanian, A. Williams // *20th International Symposium on Combustion*. – 1985. – V. 20, № 1. – P. 1409–1418.
101. Wang, H. Surface morphology and porosity evolution of CWS spheres from

- a bench-scale fluidized bed / H. Wang, S. Guo, L. Yang, Y. Guo, X. Jiang, S. Wu // *Energy & Fuels*. – 2015. – V. 29, № 5. – P. 3428–3437.
102. Miyasaka, K. Combustion and Agglomeration of Coal-Oil Mixtures in Furnace Environments / K. Miyasaka, C.K. Law // *Combustion Science and Technology*. – 1980. – V. 24, № 1-2. – P. 71–82.
103. Архипов, В.А. Исследование физико-химических и энергетических характеристик органоводоугольных топлив / В.А. Архипов, А.М. Сидор, В.Г. Сурков // *Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика*. – 2013. – № 5. – С. 39–47.
104. Svoboda, K. Fluidized bed gasification of coal–oil and coal–water–oil slurries by oxygen–steam and oxygen–CO<sub>2</sub> mixtures / K. Svoboda, M. Pohořelý, M. Jeremiáš, P. Kameníková, M. Hartman, S. Skoblja, M. Šyc // *Fuel Processing Technology*. – 2012. – V. 95. – P. 16–26.
105. 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. – V. 159. – P. 40–44.
106. Usui, H. A thixotropy model for coal-water mixtures / H. Usui // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. – 1995. – V. 60, № 2-3. – P. 259–275.
107. Yi, F. Characterization of coal water slurry prepared for PRB coal / F.Yi, A. Gopan, R. L. Axelbaum // *Journal of Fuel Chemistry and Technology*. – 2014. – V. 42, № 10. – P. 1167–1171.
108. Xu, R. Effect of compound inorganic nano-stabilizer on the stability of high concentration coal water mixtures / R. Xu, B. Hu, Q. He, J. Cai, Y. Pan, J. Shen // *Fuel*. – 2006. – V. 85. – P. 2524–2529.
109. Wang, R. The slurring properties of slurry fuels made of petroleum coke and petrochemical sludge / R. Wang, J. Liu, F. Gao, J. Zhou, K. Cen // *Fuel Processing Technology*. – 2012. – V. 104. – P. 57–66.
110. Zhan, X. Promoted slurryability of petroleum coke–water slurry by using black liquor as an additive / X. Zhan, Z. Zhou, W. Kang, F. Wang, // *Fuel Processing Technology*. – 2010. – V. 91, № 10. – P. 1256–1260.
111. Zhou, M. High-performance dispersant of coal–water slurry synthesized

- from wheat straw alkali lignin / M. Zhou, X. Qiu, D. Yang, H. Lou, X. Ouyang // *Fuel Processing Technology*. – 2007. – V. 88, № 4. – P. 375–382.
112. Li, P. Study on the stability of coal water slurry using dispersion-stability analyzer / P. Li, D. Yang, H. Lou, X. Qiu // *Journal of Fuel Chemistry and Technology*. – 2008. – V. 36, № 5. – P. 524–529.
113. Mengual, O. Characterisation of instability of concentrated dispersions by a new optical analyser: the TURBISCAN MA 1000 / O. Mengual, G. Meunier, I. Cayre, K. Puech, P. Snabre // *Colloids and Surfaces A*. – 1999. – V. 152, № 1. – P. 111–123.
114. Вершинина К.Ю., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Влияние технологии приготовления органоводоугольных топлив на характеристики их зажигания // *Кокс и химия*. – 2016. – № 4. – С. 8–17.
115. 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.
116. Круть, А.А. Совершенствование технологий приготовления водоугольных суспензий (ВУС) / А.А. Круть // *Прикладная гидромеханика*. – 2014. – Т. 16, № 2. – С. 36–47.
117. 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.
118. Vershinina, K.Yu. Influence of organic coal-water fuel composition on the characteristics of sustainable droplet ignition / D.O. Glushkov, D.P. Shabardin, P.A. Strizhak, K.Yu. Vershinina // *Fuel Processing Technology*. – 2016. – V. 143. – P. 60–68.
119. Vershinina, K.Yu. 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. – V. 19, № 1. – P. 157–168.

120. Вершинина, К.Ю. Прогностическое моделирование газофазного зажигания продуктов термического разложения угля / К.Ю. Вершинина, Д.О. Глушков, П.А. Стрижак // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2015. – № 8. – С. 36–39.
121. Глушков, Д.О. Зажигание полимерного материала одиночной, нагретой до высоких температур частицей / Д.О. Глушков, П.А. Стрижак // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – Т. 20, № 9. – С. 3–8.
122. Глушков, Д.О. Зажигание жидкого конденсированного вещества погружающимся источником ограниченной энергоемкости / Д.О. Глушков, А.В. Захаревич, П.А. Стрижак // Химическая физика и мезоскопия. – 2012. – Т. 14, № 4. – С. 483–498.
123. Глушков, Д.О. Математическое моделирование зажигания гелеобразного конденсированного вещества одиночными разогретыми металлическими и неметаллическими частицами / Д.О. Глушков, А.О. Жданова, П.А. Стрижак // Бутлеровские сообщения. – 2013. – Т. 34, № 5. – С. 22–33.
124. Frank-Kamenetsky, D.A. Diffusion and Heat Transfer in Chemical Kinetics / D.A. Frank-Kamenetsky. – New York: Plenum, 1969. – 574 p.
125. Глушков, Д.О. Твердофазное зажигание смесевоего топлива «горячей» частицей при свободно-конвективном теплоотводе во внешнюю среду / Д.О. Глушков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Химическая физика. – 2014. – Т. 33, № 4. – С. 38–47.
126. Агроскин, А.А. Теплофизика твердого топлива / А.А. Агроскин, В.Б. Глейбман – М.: Недра. – 1980. – 256 с.
127. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. – Москва: Старс, 2006. – 720 с.
128. Вершинина, К.Ю. Расчет характеристик зажигания металлизированного высокоэнергетического материала при локальном нагреве в условиях выгорания приповерхностного слоя конденсированного вещества / К.Ю. Вершинина, Д.О. Глушков, П.А.

Стрижак // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015611584. Дата государственной регистрации 30.01.2015 г.

129. Вершинина, К.Ю. Расчет погрешности выполнения закона сохранения энергии в области решения задачи зажигания смесового твердого топлива локальным источником нагрева / К.Ю. Вершинина, Д.О. Глушков, П.А. Стрижак // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015611604. Дата государственной регистрации 02.02.2015 г.
130. Вершинина, К.Ю. Расчет характеристик газофазного воспламенения летучих и гетерогенного зажигания коксового остатка при низкотемпературном нагреве частицы угольного топлива / К.Ю. Вершинина, Д.О. Глушков, П.А. Стрижак // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015611581. Дата государственной регистрации 30.01.2015 г.
131. Вершинина, К.Ю. Расчет характеристик газофазного зажигания летучих и гетерогенного горения коксового остатка при нагреве угля потоком горячих газов / К.Ю. Вершинина, Д.О. Глушков, П.А. Стрижак // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015617830. Дата государственной регистрации 23.07.2015 г.
132. Вершинина, К.Ю. Расчет нестационарного температурного поля при прогреве одиночной частицы угля высокотемпературным потоком воздуха / К.Ю. Вершинина, Д.О. Глушков, П.А. Стрижак // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015618100. Дата государственной регистрации 30.07.2015 г.
133. Вершинина, К.Ю. Расчет характеристик зажигания продуктов термического разложения угля при учете зависимости теплофизических параметров от температуры / К.Ю. Вершинина, Д.О. Глушков, П.А. Стрижак // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015618101. Дата

государственной регистрации 30.07.2015 г.

134. Канторович, Б.В. Основы теории горения и газификации твердого топлива / Б.В. Канторович. – Москва: Изд-во Академии наук СССР, 1958. – 601 с.
135. Гусаченко, Л.К. Моделирование процессов горения твердых топлив / Л.К. Гусаченко, В.Е. Зарко, В.Я. Зарьянов, В.П. Бобрышев. – Новосибирск: Наука, 1985. – 182 с.
136. Vershinina, K.Yu. Minimum temperatures for sustainable ignition of coal water slurry containing petrochemicals / D.O. Glushkov, P.A. Strizhak, K.Yu. Vershinina // Applied Thermal Engineering. – 2016. – V. 96. – P. 534–546.
137. Vershinina, K.Yu. Experimental Investigation of Ignition Characteristics of Composite Liquid Fuels Based on Coals of Different Metamorphism Grade / K.Yu. Vershinina, D.O. Glushkov, P.A. Strizhak // Abstracts book of International Congress “Water, Waste and Energy Management”. – 2016. – P. 181–182.
138. Вершинина, К. Ю. Предельные температуры окислителя для устойчивого зажигания суспензионных органоводоугольных топлив / К.Ю. Вершинина, Д.О. Глушков, П. А. Стрижак // Тезисы докладов XV Минского международного форума по тепло- и масообмену. – Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2016. – С. 55–58.
139. Бурдуков, А.П. Экспериментальное исследование динамики горения капель водоугольных суспензий / А.П. Бурдуков, Е.И. Карпенко, В.И. Попов, В.Н. Разваляев, В.Д. Федосенко // Физика горения и взрыва. – 1996. – Т. 32, № 4. – С. 62–66.
140. Каталымов, А.В. Переработка твердого топлива / А.В. Каталымов, А.И. Кобяков. – Калуга: Издательство Н. Бочкаревой, 2003. – 248 с.
141. Саломатов, В.В. Природоохранные технологии на тепловых и атомных электростанциях / В.В. Саломатов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – 853 с.

142. Шейндлинн А.Е. Проблема новой энергетики / А.Е. Шейндлинн. – Москва: Наука, 2006. – 406 с.
143. Vershinina, K.Yu. 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. – V. 13, № 1. – P. 71–80.
144. Glushkov, D.O. Numerical study of ignition of a metallized condensed substance by a source embedded into the subsurface layer / D.O. Glushkov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // Russian Journal of Physical Chemistry B. – 2013. – V. 7, № 3. – P. 269–275.
145. Kuznetsov, G.V. Computational investigation of heat and mass transfer processes in a gel-like fuel ignited by a limited-capacity source / G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2013. – V. 86. – P. 695–704.
146. Glushkov, D.O. Numerical and experimental research of heat and mass transfer at the heterogeneous system ignition by local energy source with limited heat content / D.O. Glushkov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // Mathematical Problems in Engineering. – 2014. – Article number 281527.
147. Wang, S. Ignition of expandable polystyrene foam by a hot particle: An experimental and numerical study / S. Wang, H. Chen, N. Liu // Journal of Hazardous Materials. – 2015. – V. 283. – P. 536–543.
148. Glushkov, D.O. Ignition of polymeric material with single hot metallic and nonmetallic particles under diffusive-convective heat and mass transfer in an oxidizing medium / G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // Russian Journal of Physical Chemistry B. – 2014. – V. 8. – P. 664–671.
149. Vershinina, K.Yu. The influence of organic waste content on characteristics of inert heating and ignition of composite liquid fuel droplets / D.O. Glushkov, A.G. Kosintsev, P.A. Strizhak, K.Yu. Vershinina // JP Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – V. 13, № 1. – P. 81–92.
150. Kothandaraman, C. Heat and Mass Transfer Data Book / C. Kothandaraman,

- S. Subramanyan. – New Jersey: Halsted Press/Wiley, Hoboken, 1975. – 143 p.
151. Wong, H.Y. Handbook of Essential Formulae and Data on Heat Transfer for Engineers / H.Y. Won. – Longman Group, United Kingdom, 1977. – 248 p.
152. Vysokomornaya, O.V. Heat and mass transfer at ignition of liquid condensed substance film on the substrate heated up to high temperatures / O.V. Vysokomornaya, P.A. Strizhak // JP Journal of Heat and Mass Transfer. – 2015. – V. 11. – P. 197–213.
153. Vysokomornaya, O.V. Determination of minimal density of focused radiation flux sufficient for ignition of typical liquid fuels at limited energy supply / O.V. Vysokomornaya, G.V. Kuznetsov, P. A. Strizhak // Advances and Applications in Fluid Mechanics. – 2015. – V. 17. – P. 265–283.
154. 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. – V. 23. – Article number 01063.
155. 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. – V. 107. – P. 10–20.
156. Vershinina, K.Yu. Ignition Characteristics of Coal–Water Slurry Containing Petrochemicals Based on Coal of Varying Degrees of Metamorphism / K.Yu. Vershinina, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // Energy & Fuels. – 2016. – V. 30, № 8. – P. 6808–6816.
157. Вершинина, К.Ю. Характеристики зажигания водоугольной суспензии при использовании воды разного качества / К.Ю. Вершинина, П.А. Стрижак // Кокс и химия. – 2016. – № 9. – С. 10–19.
158. 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. Hanjalić // Fuel. – 2014. – V. 122. – P. 103–111.