

На правах рукописи

СОРОКИН Иван Викторович

**ЗАЖИГАНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ,
СОДЕРЖАЩИХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ
ЭНЕРГОЕМКИЕ ГОРЮЧИЕ**

1.3.17 – Химическая физика, горение и взрыв,
физика экстремальных состояний вещества

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

**Научный
руководитель**

Коротких Александр Геннадьевич
доктор физико-математических наук, профессор

**Официальные
оппоненты**

Нурмухаметов Денис Рамильевич
доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» Институт углехимии и химического материаловедения, ведущий научный сотрудник

Ягодников Дмитрий Алексеевич
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», кафедра «Ракетные двигатели», заведующий кафедрой

**Ведущая
организация**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук

Защита диссертации состоится «12» октября 2022 г. в 15-00 часов на заседании Диссертационного совета 24.1.150.01 (Д 003.014.02) при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте химической кинетики и горения Сибирского отделения Российской академии наук (ИХКГ СО РАН) по адресу: 630090, Новосибирск, ул. Институтская, д. 3, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИХКГ СО РАН и на сайте <http://kinetics.nsc.ru>. Текст автореферата размещён на сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации по адресу: <http://vak.minobrnauki.gov.ru>.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах просим направлять по адресу: 630090, г. Новосибирск, Институтская, 3, ИХКГ СО РАН, учёному секретарю диссертационного совета 24.1.150.01 (Д 003.014.02); e-mail: ref_dissovet@kinetics.nsc.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат химических наук

И. П. Поздняков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современные высокоэнергетические материалы (ВЭМ), используемые в ракетных двигателях, содержат кристаллы окислителей и нитраминов (перхлорат аммония (ПХА), нитрат аммония (НА), гексоген, октоген), горючие-связующие вещества (ГСВ) на основе бутадиеновых или тетраэольных каучуков, энергоемкое горючее в виде микроразмерных порошков (МП) алюминия, магния, бора и др., массовое содержание которых составляет от 5 до 20 масс.%. Металлические компоненты добавляются в состав ракетных топлив для увеличения температуры и общей теплоты сгорания, что обеспечивает прирост удельного импульса двигателя по сравнению с безметалльными топливами.

Алюминий широко используется в качестве металлического горючего в твердых ракетных топливах. Металл имеет относительно низкую стоимость, достаточно высокую реакционную способность и удельную теплоту сгорания ~ 31 МДж/кг. Как правило, частицы алюминия покрыты оксидным слоем, который снижает реакционную способность и может приводить к неполному сгоранию металла в быстротекающих процессах. Различные покрытия (органические пленки, тонкие слои в виде различных металлов или их оксидов) позволяют снизить образование оксидного слоя Al_2O_3 на поверхности частиц алюминия. Недостатком данного подхода является негативное влияние покрытий на теплоту сгорания алюминия. Перспективным направлением является использование металлов с более высокой реакционной способностью и/или лучшими характеристиками воспламенения и горения (например, медь, никель, церий, бор и др.), которые служат не только промоторами воспламенения и более полного горения частиц алюминия, но и непосредственно горючими компонентами топлива.

Бор часто используется в качестве энергоемкого горючего в специализированных топливных композициях. Удельная теплота сгорания бора составляет 58.1 МДж/кг, что значительно превышает значение теплоты сгорания алюминия. Однако образующийся при нагреве расплавленный оксидный слой на поверхности частиц снижает скорость диффузии окислителя и химических реакций, что приводит к замедлению процесса воспламенения и неполному сгоранию бора. Кроме того, для полного окисления бора требуется в два раза больше кислорода в сравнении с алюминием, и при его горении возможно слипание частиц и образование крупных конгломератов.

В связи с этим практический интерес представляют энергоемкие горючие на основе алюминия (Al-Me, Al-B) в виде сплавов или механосмесей разной дисперсности (от микро- до наноразмерных частиц), которые могут быть использованы в различных компонентных составах

ВЭМ. Анализ известных данных показал, что борсодержащие горючие, в частности бориды алюминия, обладают высокой плотностью и удельной теплотой сгорания (на уровне бора). Частицы боридов алюминия AlB_2 и механосмесей Al и B легче воспламеняются и сгорают с большей полнотой по сравнению с частицами бора. При этом теплота сгорания борсодержащих металлических горючих выше теплоты сгорания алюминия.

Степень разработанности темы исследования. В настоящее время в России и за рубежом проводятся исследования в области горения борсодержащих, биметаллических одиночных частиц и порошковых систем в различных газовых средах и условиях, а также решаются задачи их применения в составе топливных композиций на основе различных окислителей, нитраминов и ГСВ. Известно, что время задержки воспламенения бора выше, чем у большинства металлических горючих. Эффективным методом стимулирования процесса воспламенения бора является использование активных металлов и их оксидов, а также соединений с низкой температурой воспламенения, высокой плотностью энергии и высоким кислородным балансом. В случае горения частиц бора наиболее часто используемыми промоторами являются оксиды меди, железа, висмута, циркония. Предыдущие исследования показали, что оксидный слой на поверхности частиц бора разрушается при контакте с углекислым газом, аммиаком NH_3 или водяным паром, которые образуются при сгорании топливных композиций.

Ряд работ посвящен определению характеристик горения ВЭМ, в которых МП алюминия частично или полностью замещены ультрадисперсным порошком (УДП) алюминия и/или другого металла (например, железа, магния), что позволяет регулировать скорость горения топливной композиции, обеспечить его устойчивое зажигание и увеличить полноту сгорания металла. Кроме того, в последние годы большое внимание уделяется боридам металлов и механосмесям на основе алюминия, титана, магния и бора. Несмотря на возможность получения перспективных результатов, в данной области имеется ограниченное число публикаций, в которых представлены экспериментальные данные по воспламенению и горению одиночных борсодержащих частиц, составам конденсированных продуктов горения.

Характеристики окисления и зажигания металлических горючих и ВЭМ, содержащих металлические горючие, являются определяющими факторами для осуществления устойчивого и полного сгорания топлива, анализа и обеспечения оптимальных режимов работы различных двигательных установок и газогенераторов. Зажигание служит начальной стадией работы газогенерирующего устройства, и в соответствии с техническим регламентом и назначением данного устройства возникают

требования по обеспечению соответствующих характеристик процесса. В частности, для ракетных систем устанавливают требования минимизации массы поджигающего состава, а для других применений важно обеспечить минимальную или, наоборот, увеличенную по времени задержку воспламенения заряда. Такого рода задачи решаются путем детального изучения механизма зажигания конкретным тепловым воздействием на варьлируемый по компонентному составу ВЭМ.

В диссертационной работе представлены результаты систематического экспериментального исследования зажигания составов ВЭМ, выбранных по результатам термодинамических расчетов (путем сравнения величин удельного импульса двигателя, характеристик горения твердого топлива и состава конденсированных продуктов горения (КПГ)), при интенсивном подводе тепла от внешнего источника излучения. Обсуждение результатов проведено с использованием экспериментальных данных по окислению порошков механосмесей бор/металл, боридов алюминия, а также данных по термическому разложению ВЭМ.

Цель работы: установление общих закономерностей зажигания металлизированных высокоэнергетических материалов сложного состава, позволяющих сформулировать физические механизмы и рекомендации по вариации состава топлив, обеспечивающих выполнение специфических требований к процессам зажигания.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Установление с применением термодинамических расчетов закономерностей влияния содержания и природы металлических компонентов на характеристики горения ВЭМ, удельный импульс двигателя и состав КПГ в камере сгорания и на выходе из сопла двигателя. Определение перспективных с точки зрения получения максимального удельного импульса двигателя компонентных составов ВЭМ на основе ПХА, НА, ГСВ и металлического горючего.

2. Изучение основных закономерностей термического окисления порошков металлического горючего и разложения компонентов ВЭМ при постоянной скорости нагрева. Определение характерных температур окисления, скорости тепловыделения при нагреве порошков металлических горючих. Установление влияния компонентного состава и содержания порошков металлов на скорость термического разложения ВЭМ.

3. Исследование количественных закономерностей зажигания ВЭМ, содержащих порошки металлического горючего варьлируемого состава, при нагреве лучистым потоком тепла. Определение макрокинетических параметров экзотермической реакции в конденсированной фазе на основе данных по временам задержки зажигания при вариации компонентного состава и содержания металлического горючего.

4. Изучение с помощью видео и тепловизионных наблюдений

качественной картины образования и эволюции локальных реакционных зон на поверхности металлизированных твердотопливных композиций и разработка уточненных представлений о физических механизмах зажигания ВЭМ с варьируемыми металлсодержащими компонентами.

Научная новизна работы:

1. Методом термоаналитического исследования определены значения температур начала интенсивного окисления, фазовых переходов, скорости тепловыделения экзо- и эндотермических реакций и скорости изменения массы металлических горючих на основе смесей УДП алюминия, железа, никеля, титана с бором при постоянной скорости нагрева $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ в воздухе.

2. Установлено, что введение 2 масс. % УДП железа в состав ВЭМ на основе ПХА, бутадиенового каучука и УДП алюминия интенсифицирует процесс термического разложения компонентов и снижает времена задержки зажигания топлива при лучистом нагреве.

3. Экспериментально определены характеристики зажигания составов ВЭМ, содержащих ПХА, НА, ГСВ и металлическое горючее на основе алюминия, магния, железа, никеля, титана, аморфного бора, а также боридов алюминия, при иницировании CO_2 -лазером в диапазоне плотности теплового потока $q = 60\text{--}200\text{ Вт}/\text{см}^2$.

4. Установлено, что применение порошков боридов алюминия AlB_2 и AlB_{12} в составе ВЭМ, содержащего ПХА, НА и тетраэольный каучук, существенно (~ 2 раза) снижает времена задержки зажигания таких составов по сравнению с ВЭМ, содержащим алюминий.

5. С использованием методов высокоскоростной визуализации и тепловизионной съемки определены особенности локального реагирования и развития пламенных процессов на поверхности металлизированных ВЭМ варьируемого состава в условиях лучистого нагрева, представляющие основу для построения детальных физических механизмов зажигания исследованных топливных композиций.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные результаты экспериментального исследования процессов термического разложения и зажигания ВЭМ, а также окисления энергоемких металлических горючих могут быть использованы для развития теории горения гетерогенных конденсированных систем и для решения ряда практических задач, связанных с оценкой взрывобезопасности, расчетом переходных процессов в энергоустановках различного назначения (ракетно-космические технологии, средства вооружения, пиротехника, газогенераторы, двигатели на твердом и пастообразном топливах) и разработкой лазерных систем иницирования. Установленные закономерности и характеристики окисления металлических горючих, зажигания ВЭМ дают основу для расширения фундаментальных знаний о

горении твердотопливных композиций, содержащих биметаллические порошки, и для решения математических задач, моделирующих нестационарные процессы зажигания и горения конденсированных систем. Установленные зависимости времени задержки зажигания от плотности теплового потока и характерные температуры окисления порошков металлов позволяют определить оптимальные характеристики зажигания.

Степень достоверности результатов, научных положений и выводов, полученных в работе, основана на физическом обосновании проведенных опытов, использовании классических экспериментальных методов термического анализа и измерения времени задержки зажигания, удовлетворительной повторяемости экспериментальных данных, качественном и количественном соответствии с результатами, полученными другими авторами в пересекающихся областях исследований, и использовании классических методов статистического анализа экспериментальных данных. Обработка данных с помощью высокоэффективных вычислительных алгоритмов позволяет получать детальные и точные зависимости, пригодные для их сопоставления с экспериментальными и теоретическими данными других авторов.

Личный вклад автора состоит в постановке цели и задач диссертационной работы; сборе и анализе опубликованных результатов исследования по применению металлических горючих в ВЭМ и исследованию их характеристик зажигания и горения; проведении термоаналитического исследования порошков металлов и экспериментов по зажиганию металлизированных ВЭМ; обработке экспериментальных данных и определении зависимостей; проведении расчетов характеристик зажигания и горения ВЭМ; анализе и обобщении полученных в работе результатов; формулировке защищаемых положений и выводов. Подготовка публикаций по теме диссертации проводилась совместно с научным руководителем и соавторами работ.

Методология и методы исследования. В диссертационной работе при термодинамическом моделировании горения модельных составов ВЭМ в условиях избыточного давления в камере сгорания двигателя применялась программа расчета предельно равновесных состояний произвольных сложных систем «Терра». В проведении экспериментальных исследований процессов окисления порошков металлов, разложения и зажигания ВЭМ были использованы стандартные приборные методы исследования и современное сертифицированное научно-аналитическое оборудование: дифференциальный термический анализ, микроскопия высокого разрешения, система энергодисперсионного микроанализа, метод лазерной дифракции. Определение времени задержки зажигания ВЭМ осуществлялось с использованием измерительного комплекса на основе непрерывного CO₂-лазера (патент РФ № 2569641 от 27.11.2015 г.).

Визуализация процесса зажигания и развития пламенных процессов производилась с помощью высокоскоростной видеокамеры, для динамической регистрации температуры поверхности использовалась тепловизионная камера. Определение кинетических параметров глобальной экзотермической реакции в конденсированной фазе производилось на основе твердофазной модели зажигания.

Положения, выносимые на защиту:

1. Комплексный подход к исследованию процесса зажигания ВЭМ, включающий совокупность экспериментальных методов термоаналитического исследования, измерения времени задержки и температуры зажигания твердотопливных композиций, высокоскоростной визуализации и тепловизионной съемки, определения констант формальной кинетики зажигания конденсированных систем при лучистом нагреве и численного моделирования характеристик процесса.

2. Результаты термоаналитического исследования характеристик окисления порошковых систем металлического горючего на воздухе и разложения металлизированных твердотопливных композиций в аргоне в диапазоне температур 30–1300 °С, демонстрирующие повышенную реакционную способность смеси УДП Alex/B, микроразмерного порошка AlB_{12} и ВЭМ, содержащего ПХА, бутадиеновый каучук и смесь УДП 13.7%Alex/2%Fe.

3. Результаты экспериментального исследования процесса зажигания металлизированных ВЭМ сложного состава (биметаллические горючие) при нагреве CO_2 -лазером в диапазоне плотностей теплового потока 60–220 Вт/см², устанавливающие существенное снижение времени задержки зажигания топливной композиции (на 30–50 %) при замене микроразмерного порошка алюминия μAl на смесь УДП 10.7%Alex/5%B, 13.7%Alex/2%Fe или 10.8%Ti/4.9%B в составе ВЭМ, содержащего ПХА и бутадиеновый каучук, а также при замене порошка μAl на AlB_2 или AlB_{12} в составе ВЭМ, содержащего ПХА, НА и тетраэзольный каучук.

4. Результаты тепловизионных измерений и высокоскоростной визуализации стадий реагирования и развития пламенных процессов на поверхности металлизированных ВЭМ и построенные на их основе экспериментально обоснованные представления о физических механизмах зажигания исследованных металлизированных составов при лучистом нагреве. Замена микроразмерного алюминия на ультрадисперсные порошки алюминия или биметаллического горючего (Me/B) приводит к повышению однородности реагирования на поверхности топлива, снижению времени образования вспышки и формирования зоны видимого пламени, увеличению скоростей окислительно-восстановительных реакций и распространения зоны пламени от поверхности образца.

Апробация результатов исследования. Основные положения и

результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях: XIV Всероссийский семинар, приуроченный к 75-летию академика РАН Фомина В.М., «Динамика многофазных сред», г. Новосибирск, 2015 г.; IX всероссийская научная конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», г. Томск, 2016 г.; IX International Symposium «Combustion and Plasmochemistry», Almaty, 2017; XXIV Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых учёных, г. Томск, 2018 г.; X Всероссийская конференция с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения», г. Новосибирск, 2018, 2021 г.; Седьмая российская национальная конференция по теплообмену, г. Москва, 2018 г.; Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых «Перспективы создания и применения конденсированных высокоэнергетических материалов», г. Бийск, 2016, 2018, 2021 г.; XIV Международная конференция «Высокоэнергетические и специальные материалы: демилитаризация, антитерроризм и гражданское применение», г. Томск, 2018 г.; Международная молодежная научная конференция «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования», г. Томск, 2016, 2018, 2019, 2020, 2021 г.; XXIII Международная научно-практическая конференция, посвященная памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева «Решетневские чтения», г. Красноярск, 2019 г.; 14th International Forum on Strategic Technology, Tomsk, Russia, 2019; 22nd Seminar on New Trends in Research of Energetic Materials, Pardubice, Czech Republic, 2019; Всероссийская конференция «Внутрикамерные процессы и горение в установках на твердом топливе и ствольных системах», г. Москва, 2017 г., г. Ижевск, 2020 г.; International Symposium on Nonequilibrium Processes, Plasma, Combustion, and Atmospheric Phenomena, г. Сочи, 2018, 2020 г.; XV Всероссийский симпозиум по горению и взрыву, г. Москва, 2020 г.; IX Всероссийская научная конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий», г. Томск, 2020 г.; 7th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects, Tomsk, Russia, 2020; V Всероссийская научная конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика», г. Ялта, 2020, г. Севастополь, 2021 г.; X Международная научно-практическая конференция «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине. Российский и международный опыт подготовки кадров», г. Томск, 2020 г.; XVII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», г. Томск, 2020 г.

Публикации по теме диссертации. По теме диссертации опубликовано более 50 работ, в том числе 12 статей в международных

журналах (в том числе с импакт-фактором $IF = 4.57$) и российских журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки РФ для публикации основных научных результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, 1 глава в иностранной монографии; 7 материалов конференций в периодических изданиях, индексируемых базами Scopus и Web of Science, а также 30 публикаций в сборниках материалов международных и всероссийских конференций и семинаров.

Связь работы с научными программами и грантами. Результаты диссертационного исследования получены при выполнении научно-исследовательских работ по проектам РФФИ: № 16-03-00630 «Исследование влияния биметаллических порошков на характеристики зажигания, горения и агломерации высокоэнергетических материалов» (2016–2018 гг.); № 19-33-90015 «Влияние аморфного бора и добавок металлов на характеристики зажигания и горения высокоэнергетических материалов» (2019–2021 гг.); № 20-03-00588 «Исследование процессов окисления, зажигания и горения боридов алюминия и титана в газовых средах» (2020–2022 гг.), а также по проекту РНФ № 16-19-10316 «Исследование процессов зажигания, горения и катализа с участием наноразмерных металлов в энергетических системах» (2016–2017 гг.).

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы. Материалы работы изложены на 197 страницах, включая 52 иллюстрации, 23 таблицы и 4 приложения, библиография включает 139 наименований.

Соответствие специальности 1.3.17 «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества». Диссертационная работа соответствует п. 7. «Закономерности и механизмы распространения, структура, параметры и устойчивость волн горения, детонации, взрывных и ударных волн; связь химической и физической природы веществ и систем с их термохимическими параметрами, характеристиками термического разложения, горения, взрывчатого превращения; термодинамика, термохимия и макрокинетика процессов горения и взрывчатого превращения» паспорта специальности 1.3.17 «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, отражены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, а также степень достоверности и положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведены данные об основных компонентах

современных ВЭМ. Рассмотрены методы получения и пассивации (защиты) порошков металлического горючего от воздействия окислительных сред. Представлен анализ полученных результатов и обзор существующих экспериментальных работ термического окисления порошков металлов и неметаллов, зажигания и горения ВЭМ, содержащих различные биметаллические и энергоемкие горючие.

Во второй главе представлены результаты теоретического исследования влияния одно- и двухкомпонентных металлических горючих на характеристики горения модельных составов ВЭМ. С использованием лицензионной термодинамической программы «Терра» определены основные параметры горения топливных композиций в камере сгорания (при давлении 4 МПа) и на срезе сопла двигателя (0.1 МПа), а также массовая доля и равновесный фазовый состав КПГ для двух модельных составов ВЭМ на основе ПХА и инертного горючего связующего (ИГСВ) и ПХА/НА и активного горючего связующего (АГСВ). В качестве металлического горючего рассматривались порошки алюминия, железа, меди, бора, магния, титана, никеля, а также их смеси.

В ходе расчетов установлены соотношения компонентов энергоемких металлических горючих, используемых в модельных составах ВЭМ, обеспечивающие наибольшее значение удельного импульса двигателя. Показано, что эффективным энергоемким горючим в составе ВЭМ на основе 64.6 масс.% ПХА и 19.7 масс. % бутадиенового каучука СКДМ-80 является смесь алюминия с бором с массовым соотношением элементов $Al/B = 55.5/44.5$, при котором достигается наибольшее значение удельного импульса двигателя $J = 2537$ м/с (на 17 м/с выше значения удельного импульса для ВЭМ с алюминием Alex). Для состава ВЭМ, содержащего 18 масс.% ПХА, 42 масс.% НА, 25 масс.% метилполивинилтетразола (МПВТ) и 15 масс.% металлического горючего на основе алюминия и бора, наибольшее значение удельного импульса двигателя составляет 2679 м/с при соотношении $Al/B = 67/33$, что на 11 и 73 м/с больше значений удельного импульса ВЭМ с алюминием и бором, соответственно. Наименьшая массовая доля КПГ на выходе из сопла при горении ВЭМ составляет 0.08 при соотношении $Al/B = 20/80$ (что соответствует фазовому составу декаборида алюминия AlB_{10}).

В третьей главе представлены методика и результаты экспериментального исследования процессов окисления порошков металла и аморфного бора, термического разложения составов ВЭМ, содержащих энергоемкое металлическое горючее, при постоянной скорости нагрева.

Для используемых порошков металлического горючего представлена методика изготовления механических смесей. С применением измерителя размера частиц Analysette 22 Fritsch, электронных микроскопов Quanta 200

3D, Tescan MIRA 3 LMU со встроенной системой энергодисперсионного (ЭДС) микроанализа определены дисперсные и морфологические характеристики.

С применением синхронного ТГ/ДСК термического анализатора Netzsch STA 449 F3 Jupiter определены характеристики окисления МП алюминия μAl ($d = 29$ мкм), АСД-4 ($d = 10.6$ мкм), боридов алюминия AlB_2 , AlB_{12} и титана TiB_2 , а также УДП алюминия Alex, аморфного бора и механосмесей Al/B , Al/Mg/B , Ni/B , Fe/B и Ti/B с разным соотношением компонентов. На основе полученных данных термогравиметрического анализа (ТГ) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) установлены значения температур начала T_{on} , окончания T_{end} и интенсивного T_{int} окисления порошков металла с бором, а также суммарной удельной теплоты Q_p , выделившейся в результате экзотермических реакций окисления, суммарного изменения массы Δm и максимальной скорости изменения массы v_{ox} (таблица 1), характеризующие реакцию способность порошков металлов при их нагреве.

Таблица 1 – Параметры окисления порошков Me и B при скорости нагрева 10 °С/мин на воздухе

Порошок Me (массовое содержание)	T_{on} , °С	Q_p , кДж/г	Δm , масс. % (400–1200°С)	v_{ox} , масс. %/с (T , °С)
μAl (99.1% Al)	830	1.4	8.7	0.012 (990–1010)
АСД-4 (98.5% Al)	800	3.7	34	0.038 (1008–1023)
Alex (90% Al)	570	4.1	71	0.100 (590–610)
B (99% B)	559	21.5	160	0.126 (655–735)
AlB_2 (55.5/44.5)	876	5.2	108	0.097 (1010–1060)
AlB_{12} (17.2/82.8)	747	20.3	119	0.121 (774–860)
TiB_2 (68.9/31.1)	482	1.6	48	0.018 (750–760; 970–1010)
Al/B (55.5/44.5, AlB_2)	600	18.8	135	0.223 (745–770)
Al/B (17.2/82.8, AlB_{12})	587	19.5	170	0.206 (724–754)
Al/Mg/B (75/25)	575	23.3	103	0.060 (705–750)
Ni/B (84.5/15.5)	486	4.6	54	0.055 (625–645)
Fe/B (83.8/16.2)	179	11.6	56	0.084 (575–600)
Ti/B (68.9/31.1, TiB_2)	498	12.7	98	0.131 (539–579)
Ti/B (76.9/23.1, Ti_3B_4)	168	20.7	86	0.107 (539–584)
Al/B (20/80, AlB_{10})	589	20.7	164	0.193 (721–751)
Примечание: T_{on} – температура начала окисления; Q_p – удельная теплота реакций; Δm – суммарное изменение массы; v_{ox} – максимальная скорость изменения массы; относительная погрешность измерения величин: $\Delta T < 1\%$; $\Delta(\Delta m) < 1\%$; $\Delta Q_p < 8\%$				

Показано, что процесс окисления алюминия осуществляется в две стадии, отличающиеся температурным диапазоном и значением удельной теплоты окисления для УДП Alex, МП μAl и АСД-4. Максимальная

скорость изменения массы указанных порошков алюминия составляет 0.100 масс. %/с (при $T = 590\text{--}610^\circ\text{C}$), 0.012 масс. %/с (при $T = 990\text{--}1010^\circ\text{C}$) и 0.038 масс. %/с (при $T = 1008\text{--}1023^\circ\text{C}$), соответственно. С увеличением среднего диаметра частиц Al температура начала окисления порошка увеличивается с 570 (Alex) до 830°C (μAl), а удельное тепловыделение снижается с 4.1 до 1.4 кДж/г за счет влияния оксидного слоя и снижения реакционной способности.

Окисление порошка аморфного бора протекает одностадийно и начинается при температуре $\sim 560^\circ\text{C}$. Скорость тепловыделения составляет $Q_{\text{max}} = 27.7$ Вт/г при температуре 710°C . В диапазоне температур $560\text{--}800^\circ\text{C}$ масса образца увеличивается в 2.3 раза относительно начальной массы навески. При нагреве бора выше 800°C процесс окисления и рост массы замедляются ($\Delta t \sim 20\%$) за счет снижения скорости диффузии окислителя, существенного роста толщины оксидного слоя B_2O_3 на поверхности частиц, а также образования жидкой оксидной оболочке и ее испарения.

Для смесей УДП Al/B процесс окисления начинается при температуре $590\text{--}600^\circ\text{C}$, что на $20\text{--}40^\circ\text{C}$ выше значений температуры начала окисления УДП Alex или аморфного бора. При содержании бора 82.8 масс.% в смеси Al/B двухстадийный процесс окисления переходит в одностадийный, а суммарное удельное количество выделившегося тепла составляет $Q_p = 19.5$ кДж/г.

Окисление МП боридов алюминия проходит в одну стадию и при более высоких температурах $750\text{--}1100^\circ\text{C}$ в сравнении со смесями УДП Al/B. Отметим, что значения максимальной скорости изменения массы смеси УДП Al/B=55.5/44.5 ($v_{\text{ox}} = 0.223$ масс.%/с) и МП диборида алюминия AlB_2 ($v_{\text{ox}} = 0.097$ масс. %/с) отличаются на 56 %, а смеси УДП Al/B=17.2/82.8 ($v_{\text{ox}} = 0.206$ масс. %/с) и МП AlB_2 ($v_{\text{ox}} = 0.121$ масс. %/с) – на 41 %. При значениях температур 960 и 1010°C для МП AlB_2 присутствуют два экзотермических пика на ДСК-кривой, что свидетельствует о его нестабильности и разложении при температуре выше 900°C с образованием алюминия и других фаз боридов, сплавов Al/B.

В ходе измерения характеристик термического разложения ВЭМ на основе ПХА/ИГСВ, содержащих порошок металлов, установлено, что процесс разложения исследованных составов начинается при температуре $100\text{--}150^\circ\text{C}$ за счет разложения бутадиенового каучука. В диапазоне температур $150\text{--}215^\circ\text{C}$ наблюдается снижение массы на $\sim 10\%$ от начальной массы ВЭМ, что соответствует температуре начала разложения ПХА. Скорость разложения ПХА замедляется при 255°C , благодаря полиморфному превращению кристаллической решетки ПХА при температуре 240°C с поглощением тепла. Интенсивное разложение ИГСВ и окислителя ВЭМ протекает в диапазоне температур $280\text{--}400^\circ\text{C}$ со значительным снижением массы образца на 66–88 масс. % от начальной

массы.

При использовании смеси УДП 13.7%Alx/2%Fe в составе ВЭМ максимальная скорость разложения компонентов увеличивается в 2,9 раза, а температура интенсивного разложения топлива снижается на 48 °С по сравнению с ВЭМ, содержащим 15.7 масс.% УДП алюминия Alx. При введении УДП железа в состав ВЭМ процесс разложения топлива интенсифицируется за счет образования Fe_2O_3 на поверхности частиц и его контакта с кристаллами ПХА. Данный каталитический эффект значительно проявляется для металлических порошковых систем с высокой удельной площадью поверхности и реакционной способностью при нагреве энергетического материала.

В четвертой главе представлены методика измерения и результаты экспериментального исследования процесса зажигания ВЭМ при лучистом нагреве. Зажигание ВЭМ представляет собой многостадийный процесс, включающий инертный прогрев поверхностного слоя топлива с последующим разложением компонентов и взаимодействием окислителя с ГСВ и частицами металла, которое сопровождается интенсивным выделением тепла и появлением свечения (пламени). В определении характеристик зажигания топливных композиций используются экспериментальные методы, которые позволяют получить необходимые зависимости и кинетические параметры для построения математических моделей зажигания и горения топлив, а также установить основные закономерности процессов.

Определение характеристик зажигания ВЭМ, содержащих порошок металлов, осуществлялось на экспериментальном стенде на основе CO_2 -лазера непрерывного действия РЛС-200. С применением системы измерения, включающей фотодиоды, аналого-цифровой преобразователь сигналов L-card E-14-440, установлены времена задержки зажигания ВЭМ (по появлению свечения пламени) в зависимости от плотности теплового потока внешнего источника. Среднее и максимальное значения теплового потока излучения, падающего на поверхность исследуемого образца ВЭМ, измерялись термоэлектрическим датчиком Ophir FL400A. Относительная погрешность измерения времени задержки зажигания t_{ign} составляла 5–12 % при величине доверительной вероятности 0.95.

Расчет формальных кинетических параметров зажигания ВЭМ (энергии активации E , произведения теплового эффекта реакции на частотный фактор $Q \cdot z$) осуществлялся на основе полученных экспериментальных значений времени задержки зажигания от плотности теплового потока. Методика определения кинетических параметров зажигания топлива основана на применении твердофазной модели зажигания ВЭМ, предполагающей развитие экзотермических реакций в реакционном слое конденсированной фазы твердого топлива. При

лучистом нагреве поверхности топлива окружающая среда является относительно холодной и реакции в газовой фазе заторможены. Соответственно, можно предположить, что основные стадии реакций протекают в прогретом слое образца.

Проведены серии опытов по определению временных и температурных характеристик зажигания ВЭМ на основе ПХА/ИГСВ/Ме и ПХА/НА/АГСВ/Ме. Полученные значения времени задержки зажигания составов ВЭМ (экспериментальные точки) и аппроксимационные степенные зависимости $t_{ign}(q)$ (линии) от плотности теплового потока представлены на рисунке 1.

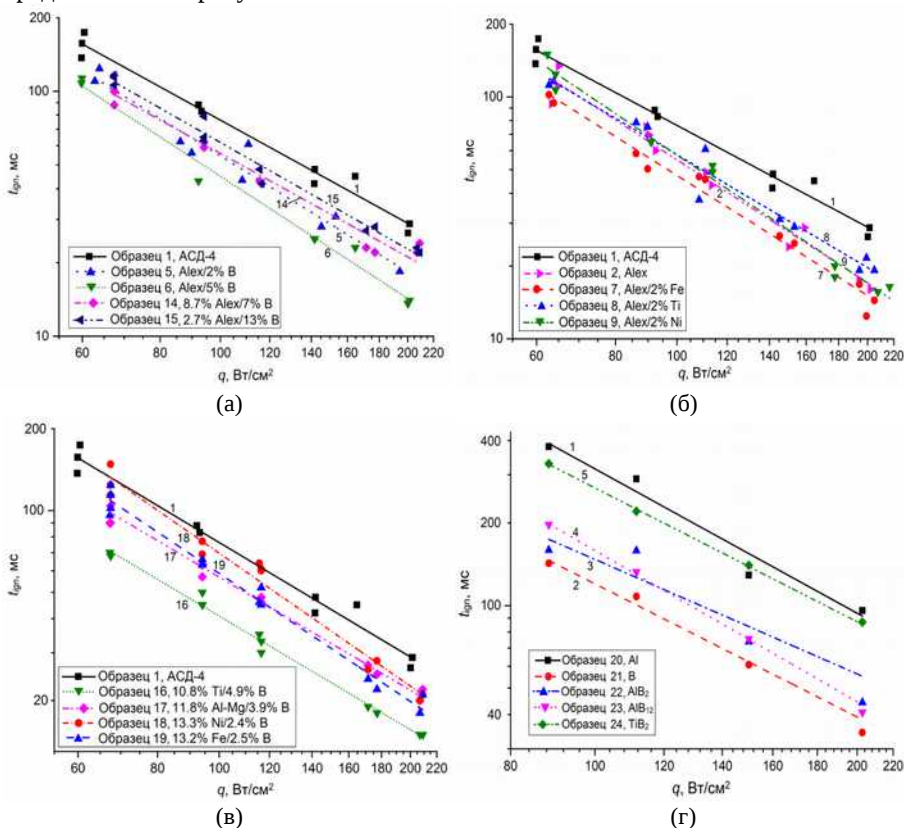


Рисунок 1 – Время задержки зажигания от плотности теплового потока излучения составов ВЭМ, содержащих ПХА, ИГСВ и порошки Ме (а-в), и ВЭМ, содержащих ПХА, НА, АГСВ и порошки Ме (г)

Показано, что полная замена МП алюминия АСД-4 на УДП алюминия Alex в составе ВЭМ на основе ПХА/ИГСВ приводит к снижению t_{ign} в 1.2–

1.7 раза во всем диапазоне плотности теплового потока $q = 60\text{--}220 \text{ Вт/см}^2$, что подтверждает полученные ранее результаты о влиянии дисперсности и удельной площади поверхности частиц алюминия на период формирования реакционного слоя и зоны пламени ВЭМ. Полная замена МП алюминия на УДП аморфного бора в составе ВЭМ снижает времена задержки зажигания в 1.3–1.4 раза.

Получены данные о влиянии массового содержания бора в смеси с металлическим горючим – УДП алюминия Alex на времена задержки зажигания ВЭМ (рисунок 1а). При 5 масс. % содержании бора в смеси с Alex времена задержки зажигания ВЭМ снижаются на 16–20 % по сравнению с ВЭМ, содержащим УДП Alex. При 2 масс. % содержании бора в смеси с Alex в составе ВЭМ времена задержки меняются незначительно и находятся в пределах погрешности измерения. Частичное замещение УДП алюминия Alex на 7 и 13 масс. % бора приводит к снижению t_{ign} в 1.36–1.37 и 1.20–1.27 раза по сравнению с базовым составом 1 ВЭМ, содержащим АСД-4. Повышенное содержание бора в смеси УДП Alex/В (более 5 масс. %) в составе ВЭМ увеличивает время зажигания топлива по сравнению с ВЭМ с УДП Alex за счет снижения реакционной способности комбинированного горючего (Al/В) и уменьшенного выделения тепла в реакционном слое топлива.

Частичная замена 2 масс.% Alex на УДП железа, титана или никеля в составе ВЭМ (см. рисунок 1б) приводит к снижению времени задержки зажигания топлив в 1.4–1.9, 1.2–1.5 и 1.1–1.7 раза, соответственно, относительно базового состава 1 ВЭМ, содержащего МП АСД-4. Кроме того, при использовании смеси УДП Alex/2 масс.% Fe в составе ВЭМ времена задержки зажигания топлива снижаются на 10–16 % по сравнению с составом ВЭМ, содержащим УДП Alex. Наличие оксидного слоя и развитой удельной поверхности частиц УДП железа, как и частиц УДП алюминия, повышает скорость разложения ПХА, что способствует увеличению скорости газофазных химических реакций с продуктами разложения ИГСВ и частицами Me.

Применение смеси УДП титана, никеля, железа и Al/Mg сплава с бором (рисунок 1в) снижает времена прогрева и задержки зажигания на 46–47, 6–23, 16–32 и 24–26 %, соответственно, по сравнению с базовым составом 1 ВЭМ, содержащим МП алюминий АСД-4. Значительное снижение времени зажигания t_{ign} состава ВЭМ с УДП Ti/В связано с высокой реакционной способностью наночастиц титана. Таким образом, применение в качестве биметаллического горючего смесей Alex/5% В, Alex/2% Fe и Ti/4.9% В в составе ВЭМ на основе ПХА/ИГСВ существенно снижает значения времени задержки зажигания топлива и энергии, подводимой от внешнего источника.

Полная замена МП алюминия АСД-4 на аморфный бор в составе ВЭМ

на основе ПХА/НА/АГСВ приводит к снижению времени задержки зажигания в 2.2–2.8 раза в диапазоне плотности теплового потока $q = 90\text{--}200 \text{ Вт/см}^2$ (рисунок 1г). Применение МП боридов AlB_2 и AlB_{12} в ВЭМ снижает времена задержки зажигания в 1.75–2.10 и 1.96–2.11 раза, соответственно, по сравнению с составом ВЭМ, содержащим МП Al, при одинаковых условиях зажигания. Замена МП алюминия на TiB_2 приводит к незначительному снижению времени задержки зажигания (на 5–15 %) в исследуемом диапазоне плотности теплового потока.

С использованием высокоскоростной видео- (1920 кадров/с) и тепловизионной (50 кадров/с) съемки изучены физическая картина реагирования на поверхности и развитие пламенных процессов при зажигании постоянным лучистым потоком ВЭМ с варьируемым составом металлического горючего. На основе обработки совокупной информации получены данные о влиянии компонентного состава и дисперсности металлического горючего на период времени прогрева топлива и интенсивности оттока продуктов газификации с частицами металла от поверхности реакционного слоя, скорость распространения зоны пламени, а также на время задержки зажигания ВЭМ. Установлено, что появление вспышки на поверхности образца ВЭМ происходит в области максимальных значений теплового потока лазерного луча («горячих» точек), после чего зона пламени распространяется по всей торцевой поверхности топлива. В момент появления пламени наблюдается резкий рост температуры на поверхности топлива, происходит ускорение оттока продуктов разложения компонентов ВЭМ и светящихся частиц, увеличение подвода тепла из зоны химических реакций в газовой фазе, в том числе за счет окисления частиц металлического горючего. Замена МП алюминия на УДП Alex, Alex/B, Ti/B, Ni/B и Fe/B приводит к выравниванию реагирования на поверхности топлива, снижению времени образования вспышки и формированию зоны видимого пламени, увеличению скорости химических реакций и распространения зоны пламени от поверхности образца. Применение УДП Alex, Ti, Ni и Fe повышает скорость тепловыделения в реакционном слое ВЭМ, увеличивает скорость оттока газообразных продуктов, частиц металла и снижает размер частиц металлического горючего при отрыве с поверхности горения образца. Определено, что прогрев составов ВЭМ с микронными порошками до температуры $T = 340 \text{ }^\circ\text{C}$ характеризуется длительным периодом времени ($\tau = 80\text{--}100 \text{ мс}$ при $q = 65 \text{ Вт/см}^2$) по сравнению с ВЭМ, которые содержат наноразмерные порошки Me и смеси Me/B ($\tau = 50\text{--}60 \text{ мс}$). При этом значительное влияние на процесс зажигания оказывает реакционная способность используемого энергетического горючего в составе ВЭМ.

С использованием измеренных значений времени задержки зажигания топлив и полученных аппроксимационных зависимостей $t_{\text{ign}}(q)$ рассчитаны

значения констант формальной кинетики: энергии активации, произведения теплового эффекта реакций на предэкспонент, а также температуру зажигания T_{ign} ВЭМ (таблица 2), которые затем использовались в решении численных задач при математическом моделировании зажигания металлизированных топливных композиций.

Таблица 2 – Расчетные значения кинетических констант и температуры зажигания ВЭМ

ВЭМ с Me	E , кДж/моль	Qz , Вт/г	T_{ign} , К	$t_{ign} = A \cdot q^{-B}$
ВЭМ на основе ПХА, ИГСВ (СКДМ-80)				
Alex/5% B	108	$4.24 \cdot 10^{15}$	482–525	$t_{ign} = 9.28 \cdot 10^4 \cdot q^{-1.66}$
Alex/2% Fe	106	$1.86 \cdot 10^{15}$	486–531	$t_{ign} = 9.53 \cdot 10^4 \cdot q^{-1.65}$
10.8%Ti/4.9%B	57	$1.51 \cdot 10^{10}$	461–536	$t_{ign} = 2.46 \cdot 10^4 \cdot q^{-1.39}$
ВЭМ на основе ПХА, НА, АГСВ (МПВТ-АСП)				
B	90	$3.31 \cdot 10^{11}$	625–681	$t_{ign} = 2.02 \cdot 10^5 \cdot q^{-1.61}$
AlB ₂	74	$4.24 \cdot 10^9$	665–742	$t_{ign} = 1.78 \cdot 10^5 \cdot q^{-1.53}$
AlB ₁₂	223	$6.88 \cdot 10^{21}$	680–707	$t_{ign} = 7.39 \cdot 10^5 \cdot q^{-1.83}$
Примечание: E – энергия активации; Q – тепловой эффект реакции; z – предэкспонент; T_{ign} – температура зажигания.				

В математическом моделировании зажигания рассматривался нестационарный процесс нагрева ВЭМ при воздействии внешнего лучистого теплового потока. Предполагалось, что в поверхностном слое образца топлива происходят химические реакции разложения компонентов с тепловыделением по первому порядку, имеющие зависимость скорости от температуры по уравнению Аррениуса. Возможные фазовые переходы, связанные с испарением, плавлением и абляцией, а также выгорание компонентов топлива в период нагрева не учитывались. Теплофизические параметры (плотность, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности) твердотопливной композиции в данной модели приняты постоянными и не зависят от температуры и компонентного состава ВЭМ.

Математическая модель зажигания образца ВЭМ в системе координат, связанной с поверхностью прогретого слоя, имеет следующий вид:

$$c \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Qz \rho \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), 0 < x < L, \quad (1)$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned} \text{при } x = 0: & -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha(T_0 - T) + q, t > 0; \\ \text{при } x = L: & \frac{\partial T}{\partial x} = 0, t > 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Начальные условия:

$$\text{при } t = 0 \text{ с: } T(x, 0) = T_0, \quad 0 \leq x \leq L, \quad (3)$$

где T – температура, К; t – время, с; x – координата, м; L – высота (длина) образца топлива, м; ρ – плотность топлива, кг/м³; c – удельная теплоемкость топлива, Дж/(кг·К); λ – коэффициент теплопроводности топлива Вт/(м·К); T_0 – температура окружающей среды, К; E – энергия активации, Дж/моль; Q – тепловой эффект химических реакций, Дж/кг; z – предэкспоненциальный множитель в законе Аррениуса, 1/с; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); q – плотность теплового потока, Вт/см².

В качестве критерия зажигания принято условие, согласно которому в момент зажигания скорость тепловыделения в реакционном слое топлива становится больше величины падающего на образец теплового потока от внешнего лазерного источника. С учетом малой глубины поглощения излучения на длине волны 10.6 мкм приближенно принято, что излучение полностью поглощается на поверхности образца ВЭМ. Сформулированная задача решалась методом конечных разностей на основе неявной четырехточечной схемы совместно с методом простой итерации. Шаг по времени задавался равным 10⁴ с, а шаг по координате – 10⁻⁶ м. Расчеты проведены с использованием следующих данных: $L = 0.005$ м, $\rho = 1870$ кг/м³, $c = 1240$ Дж/(кг·К), $\lambda = 0.66$ Вт/(м·К), $T_0 = 298$ К, $\alpha = 9.4$ Вт/(м²·К), $R = 8.31$ Дж/(моль·К), $q = 60\text{--}200$ Вт/см². В расчете использовались значения энергии активации E и произведения теплового эффекта реакции на предэкспонент Qz , определенные из обработки экспериментальных данных.

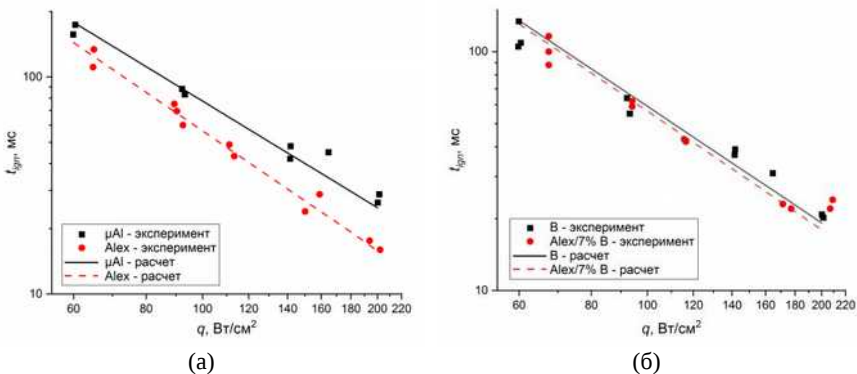


Рисунок 2 – Расчетные зависимости времени задержки зажигания от плотности теплового потока ВЭМ, содержащего μAl и УДП алюминия Alex (а), УДП бора и смесь Alex/7% B (б).

Выполнено сравнение расчетных значений времени задержки

зажигания ВЭМ с экспериментальными значениями t_{ign} (рисунок 2). При минимальном значении плотности теплового потока $q = 60 \text{ Вт/см}^2$ значения абсолютной (относительной) погрешности для расчетных значений t_{ign} составляют: 22 мс (12 %) – для состава ВЭМ с μAl , 13 мс (9 %) – для ВЭМ с Alex, 20 мс (15 %) – для ВЭМ с бором, 16 мс (12 %) – для ВЭМ с УДП Alex/7%В. При более высоких значениях ($q > 70 \text{ Вт/см}^2$) абсолютная и относительная погрешности расчетных данных t_{ign} снижаются.

В заключении изложены основные результаты диссертационного исследования и сформулированы выводы.

1. Выполнен термодинамический расчет характеристик горения модельных составов ВЭМ на основе различных окислителей и горючих-связующих, содержащих биметаллические горючие, при постоянном давлении в камере сгорания 4 МПа и установлены зависимости адиабатической температуры горения топлива, теоретического удельного импульса двигателя, массового и компонентного состава КПГ от содержания бора или металла в алюминиевом горючем. На основе полученных зависимостей определены оптимальные компонентные составы ВЭМ с точки зрения наибольшего удельного импульса и наименьшей массовой доли КПГ на выходе из сопла двигателя. Установлено, что удельный импульс двигателя принимает наибольшее значение при массовом соотношении биметаллического горючего $\text{Al/B} = 55/45$ – $40/60$ и $\text{Al/B}=67/33$ в составе ВЭМ на основе ПХА и бутадиенового каучука, а также ПХА, НА и тетраэзоляного каучука, соответственно.

2. Выполнено термоаналитическое исследование процессов окисления порошковых систем металлического горючего на воздухе и разложения металлизированных ВЭМ в аргоне при нагреве от 30 до 1200 °С. Показано, что применение смеси УДП Alex/2%Fe в составе ВЭМ обеспечивает наибольший эффект на снижение характерной температуры интенсивного разложения (на 48 °С) и увеличение скорости изменения массы ВЭМ при разложении ПХА и бутадиенового каучука.

3. Экспериментально изучено влияние биметаллического горючего на характеристики процесса зажигания топливных композиций. Определены временные задержки зажигания ВЭМ варьируемого состава в зависимости от плотности теплового потока, на основе которых рассчитаны константы формальной кинетики реакции в конденсированной фазе – энергия активации и произведение теплового эффекта на предэкспонент. Показано, что изменение компонентного состава и дисперсности биметаллического горючего позволяет существенно модифицировать характеристики зажигания ВЭМ – время задержки зажигания, температуру зажигания и плотность энергии зажигания внешнего источника.

4. Установлено, что ультрадисперсные биметаллические горючие на

основе Al/B, Al/Fe и Ti/B позволяют значительно (в ~ 1.2 , $1.1-1.2$ и $1.1-1.6$ раза, соответственно) снизить время задержки зажигания составов ВЭМ на основе ПХА и бутадиенового каучука. Для составов ВЭМ на основе ПХА, НА и тетраэольного каучука наиболее эффективными биметаллическими горючими с точки зрения уменьшения времени задержки зажигания являются бориды алюминия AlB_2 и AlB_{12} .

5. С применением высокоскоростной визуализации и тепловизионной съемки изучены физическая картина реагирования и развитие пламенных процессов на поверхности ВЭМ с варьируемым составом металлического горючего при лучистом нагреве. Установлено влияние компонентного состава и дисперсности металлического горючего на период формирования видимого пламени и интенсивность оттока продуктов газификации с частицами металла от поверхности реакционного слоя, определена скорость распространения зоны пламени ВЭМ. Найдено, что замена микроалюминия на биметаллическое горючее (Me/B) в ВЭМ уменьшает период формирования видимого пламени и увеличивает длину зоны пламени. Сформулированы особенности зажигания топливных составов с варьируемым металлическим горючим. Определено, что прогрев топлив до характеристической температуры ($340-370$ °C) определяется в основном теплофизическими свойствами топлива, а скорость нагрева выше этой температуры главным образом зависит от реакционной способности (природы) используемого энергоемкого горючего в составе ВЭМ. В частности, для составов ВЭМ на основе бутадиенового каучука наиболее эффективным (снижающим время задержки зажигания) энергоемким горючим являются смеси УДП $10.7\%Al_{ex}/5\%B$, $13.7\%Al_{ex}/2\%Fe$ и $10.8\%Ti/4.9\%B$, а для состава ВЭМ на основе тетраэольного каучука – бориды алюминия AlB_2 и AlB_{12} .

6. С использованием твердофазной модели и определенных из эксперимента констант формальной кинетики зажигания ВЭМ численно изучено влияние биметаллического горючего на времена задержки и температуру зажигания при варьируемой плотности теплового потока. Получено удовлетворительное согласие экспериментальных и расчетных значений, что обеспечивает возможности использования расчетного метода для определения и прогнозирования требуемых характеристик зажигания топлив в широком диапазоне тепловых потоков.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ

1. Коротких А. Г. Зажигание высокоэнергетического материала, содержащего ультрадисперсный порошок Al/B / А. Г. Коротких, **И. В. Сорокин**, В. А. Архипов // Химическая физика. – 2022. – Т. 41, № 3. – С. 41-48. – 0.36/0.18 а.л. – DOI: 10.31857/S0207401X22030074.

2. Коротких А. Г. Влияние бора на параметры горения ВЭМ и окисление нанопорошков Al/B, Ti/B / А. Г. Коротких, **И. В. Сорокин** // Изв. вузов. Физика. – 2021. – Т. 64, № 4. – С. 3-8. – 0.27/0.15 а.л. – DOI: 10.17223/00213411/64/4/3.

В переводной версии журнала, входящей в Scopus: Korotkikh, A. G. Effect of boron on the combustion parameters of HEM and oxidation of Al/B and Ti/B nanopowders / A. G. Korotkikh, **I. V. Sorokin** // Russian Physics Journal. – 2021. – Vol. 64, No. 4. – P. 567-573. – DOI 10.1007/s11182-021-02387-2.

3. Коротких А. Г. Зажигание борсодержащих высокоэнергетических материалов на основе окислителя и полимерного связующего / А. Г. Коротких, **И. В. Сорокин**, К. В. Слюсарский, В. А. Архипов // Журнал технической физики. 2021. – Т. 91, № 6. – С. 926-932. – 0.32/0.18 а.л. – DOI: 10.21883/ЖТФ.2021.06.50861.329-20.

В переводной версии журнала, входящей в Scopus: Korotkikh, A. G. Ignition of boron-containing high-energy materials based on an oxidizer and polymer binder / A. G. Korotkikh, K. V. Slyusarsky, **I. V. Sorokin**, V. A. Arkhipov // Technical Physics. – 2021. – Vol. 66, No. 6. – P. 896-902. – DOI: 10.1134/S1063784221060104.

4. Архипов В. А. Зажигание вращающихся образцов высокоэнергетических материалов лазерным излучением / В. А. Архипов, Н. Н. Золоторёв, А. Г. Коротких, В. Т. Кузнецов, О. В. Матвиенко, **И. В. Сорокин** // Физика горения и взрыва. – 2021. – Т. 57, № 1. – С. 90-98. – 0.41/0.09 а.л. – DOI 10.15372/FGV20210110.

В переводной версии журнала, входящей в Scopus: Arkhipov V. A. Ignition of Rotating Samples of High-Energy Materials by Laser Radiation / V. A. Arkhipov, N. N. Zolotarev, A. G. Korotkikh, V. T. Kuznetsov, O. V. Matvienko, **I. V. Sorokin** // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2021. – Vol. 57, No. 1. – P. 83-90. – DOI: 10.1134/S001050822101010X.

5. Коротких А. Г. Зажигание и горение смесевых твердых топлив на основе двойного окислителя и борсодержащих добавок / А. Г. Коротких, **И. В. Сорокин**, Е. А. Селихова, В. А. Архипов // Химическая физика. – 2020. – Т. 39, № 7. – С. 32-40. – 0.41/0.2 а.л. – DOI: 10.31857/S0207401X20070080.

В переводной версии журнала, входящей в Scopus: Korotkikh A. G. Ignition and Combustion of Composite Solid Propellants Based on a Double Oxidizer and Boron-Based Additives / A. G. Korotkikh, **I. V. Sorokin**, E. A. Selikhova, V. A. Arkhipov // Russian Journal of Physical Chemistry B. – 2020. – Vol. 14, № 4. – P. 592-600. – DOI: 10.1134/S1990793120040089.

6. Коротких А. Г. Кинетика термического окисления порошков Al, B, AlB₂ и AlB₁₂ / А. Г. Коротких, К. В. Слюсарский, **И. В. Сорокин** // Химическая физика и мезоскопия. – 2020. – Т. 22, № 2. – С. 164-174. – 0.5/0.13 а.л. – DOI: 10.15350/17270529.2020.2.16.

7. Коротких А. Г. Исследование зажигания высокоэнергетических

материалов с бором и диборидами алюминия и титана / А. Г. Коротких, В. А. Архипов, К. В. Слюсарский, **И. В. Сорокин** // Физика горения и взрыва. – 2018. – Т. 54, № 3. – С. 109-115. – 0.32/0.11 а.л.

В переводной версии журнала, входящей в Scopus: Korotkikh A. G. Study of ignition of high-energy materials with boron and aluminum and titanium diborides / A. G. Korotkikh, K. V. Slyusarsky, **I. V. Sorokin**, V. A. Arkhipov // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2018. – Vol. 54, No. 3. – P. 350-356. – DOI: 10.1134/S0010508218030127.

8. Коротких А. Г. Зажигание и горение высокоэнергетических материалов, содержащих алюминий, бор и диборид алюминия / А. Г. Коротких, В. А. Архипов, **И. В. Сорокин**, Е. А. Селихова // Химическая физика и мезоскопия. – 2018. – Т. 20, № 1. – С. 5-14. – 0.45/0.12 а.л.

9. Коротких А. Г. Влияние добавок ультрадисперсного порошка металла на характеристики горения ВЭМ / А. Г. Коротких, В. А. Архипов, О. Г. Готов, **И. В. Сорокин** // Химическая физика и мезоскопия. – 2016. – Т. 18, № 2. – С. 179-186. – 0.36/0.07 а.л.

Публикации в изданиях, входящих в базы данных Scopus и Web of Science

Глава в коллективной монографии:

10. Korotkikh A. G. Bimetal Fuels for Energetic Materials (Chapter 7) / A. G. Korotkikh, O. G. Glotov, **I. V. Sorokin**, V. A. Arkhipov // Springer Nature Singapore Pte Ltd. Innovative Energetic Materials: Properties, Combustion Performance and Application 2020 – P. 183-210. – 1.27/0.25 а.л. – DOI: 10.1007/978-981-15-4831-4_7.

Статьи:

11. Korotkikh, A. G. Effect of Me/B-powder on the ignition of high-energy materials / A. G. Korotkikh, **I. V. Sorokin** // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 2021. – Vol. 46, No. 11. – P. 1709-1716. – 0.36/0.18 а.л. – DOI: 10.1002/prep.202100180.

12. Korotkikh A. G. Effect of B, Fe, Ti, Cu nanopowders on the laser ignition of Al-based high-energy materials / A. G. Korotkikh, **I. V. Sorokin**, E. A. Selikhova, V. A. Arkhipov // Combustion and Flame. – 2020. – Vol. 222. – P. 103-110. – 0.36/0.15 а.л. – DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.08.045.

13. Korotkikh A. G. Effect of boron and aluminum diboride on ignition of high-energy materials / A. G. Korotkikh, **I. V. Sorokin**, E. A. Selikhova, V. A. Arkhipov // Science and Technology of Energetic Materials. – 2019. – Vol. 80, No. 5. – P. 189-193. – 0.23/0.1 а.л.

Другие публикации:

14. **Sorokin I. V.** The effect of boron, copper, and magnesium on the ignition of NEM containing aluminum powder / **I. V. Sorokin**, A. G. Korotkikh, E. A.

Selikhova // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1675, No. 1. – P. 012067 1-6; 5th All-Russian Scientific Conference Thermophysics and Physical Hydrodynamics with the School for Young Scientists, TPH 2020; Yalta, Crimea; September 13-20, 2020. – 0.27/0.14 а.л. – DOI: 10.1088/1742-6596/1675/1/012067.

15. Korotkikh A. G. Thermal analysis and ignition of HEM containing aluminum and titanium borides / A. G. Korotkikh, **I. V. Sorokin**, E. A. Selikhova, V. A. Arkhipov // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1675, No. 1. – P. 012060 1-6; 5th All-Russian Scientific Conference Thermophysics and Physical Hydrodynamics with the School for Young Scientists, TPH 2020; Yalta, Crimea; September 13-20, 2020. – 0.27/0.09 а.л. – DOI: 10.1088/1742-6596/1675/1/012060.

16. Korotkikh A. G. Study of the chemical activity of metal powders based on aluminum, boron and titanium / A. G. Korotkikh, **I. V. Sorokin** // AIP Conference Proceedings. – 2020. – Vol. 2212. – P. 020029 1-6; Thermophysical Basis of Energy Technologies, TBET, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk; Russian Federation; October 9-11, 2019. – 0.27/0.17 а.л. – DOI: 10.1063/5.0000838.

17. Korotkikh A. G. Ignition and combustion of high-energy materials containing aluminum, boron and aluminum diboride / A. Korotkikh, **I. Sorokin**, E. Selikhova // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 194. – P. 01055 1-6: Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Technological Energy Equipment, HMTTSC 2018; Tomsk; Russian Federation; April 24-26, 2018. – 0.27/0.1 а.л. – DOI: 10.1051/mateconf/201819401055.

18. Korotkikh A. G. Features of thermal behavior and ignition of HEM with bimetal powders / A. Korotkikh, **I. Sorokin**, E. Selikhova // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 194. P. 01029 1-5: Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Technological Energy Equipment, HMTTSC 2018; Tomsk; Russian Federation; April 24-26, 2018. – 0.23/0.9 а.л. – DOI: 10.1051/mateconf/201819401029.

19. Korotkikh A. G. Ignition study of high-energy materials containing Al, B, AlB₂ and TiB₂ powders / A. Korotkikh, V. Arkhipov, K. Slyusarskiy, **I. Sorokin** // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 115. – P. 03016 1-4: 33rd Siberian Thermophysical Seminar, STS 2017; Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS Novosibirsk; Russian Federation; June 6-8, 2017. – 0.18/0.04 а.л. – DOI: 10.1051/mateconf/201711503016.

20. Korotkikh A. G. Effect of Metal Additives on the Combustion Characteristics of High-Energy Materials / A. Korotkikh, O. Glotov, **I. Sorokin** // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 72. – P. 01048 1-6: Heat and Mass Transfer in the System of Thermal Modes of Energy - Technical and Technological Equipment, HMTTSC 2016; Tomsk; Russian Federation; April 19-21, 2016. – 0.27/0.07 а.л. – DOI: 10.1051/mateconf/20167201048.