

На правах рукописи



Золоторёв Николай Николаевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В ГИБРИДНОМ
РАКЕТНОМ ДВИГАТЕЛЕ ПРЯМОЙ СХЕМЫ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» на кафедре прикладной газовой динамики и горения и в лаборатории 11 отдела газовой динамики и физики взрыва Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Томского государственного университета

Научный
руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор
Архипов Владимир Афанасьевич

Официальные
оппоненты:

Павловец Георгий Яковлевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО "Военная академия Ракетных
войск стратегического назначения имени Петра
Великого" Министерства обороны Российской
Федерации, старший научный сотрудник
научно-исследовательского центра

Лапшин Олег Валентинович,
доктор физико-математических наук, Томский
научный центр СО РАН, ведущий научный
сотрудник лаборатории математического
моделирования физико-химических процессов в
гетерогенных системах научно-
исследовательского отдела структурной
макрокинетики

Ведущая организация:

ФГБУН «Институт проблем химико-
энергетических технологий» СО РАН

Защита состоится « 25 » декабря 2018 г. в 9.30 на заседании диссертационного совета Д 212.269.13 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Усова, д. 7, уч. корпус 8, ауд. 217

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/2803/worklist>

Автореферат разослан

« ____ » _____ 2018 г.

Ученый секретарь
к.т.н., доцент



Матвеев Александр
Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Гибридный ракетный двигатель (ГРД) относится к классу двигательных установок на комбинированном топливе с пространственно разделенными горючим и окислителем. В ГРД прямой схемы в качестве горючего используется заряд твердого горючего материала (ТГМ), горящий в потоке распыленного жидкого или газообразного окислителя. В ГРД обратной схемы используются распыленное жидкое или газообразное горючее и твердый окислитель. Впервые гибридный ракетный двигатель ГИРД-9, работающий на сгущенном бензине и газообразном кислороде, был создан С. П. Королевым и М. К. Тихонравовым в 20-х годах прошлого века.

Интенсификация космических программ в последнее десятилетие стимулирует интерес к исследованиям рабочих процессов в гибридных схемах ракетных двигателей, о чем свидетельствует возрастающий объем публикаций в этой области. Исследования в области разработки ГРД проводятся в ряде развитых стран. ГРД обладает рядом преимуществ по сравнению с классическими схемами жидкостных ракетных двигателей (простота конструкции, отсутствие сложной системы охлаждения камеры сгорания) и твердотопливных ракетных двигателей (отсутствие взрывчатых веществ в составе топлива, нечувствительность к дефектам твердотопливного заряда, более высокие значения удельного импульса тяги, возможность регулирования тяги и многократного включения).

В настоящей работе рассматривается наиболее перспективная прямая схема ГРД. Для практической реализации ГРД необходимо проведение детальных исследований рабочих процессов в двигателе (экспериментально-теоретическое исследование характеристик зажигания перспективных топливных композиций, процесса распыливания жидкого компонента топлива, закономерностей горения твердотопливного заряда в потоке окислителя). Эти процессы более сложны и гораздо менее исследованы, чем в ракетных двигателях на жидком и твердом топливах. Исследование рабочих процессов в ГРД экономически целесообразно проводить методами математического моделирования и на экспериментальных установках с использованием методов теории подобия и анализа размерностей.

Целью диссертационной работы является экспериментально-теоретическое исследование рабочих процессов в гибридном ракетном двигателе прямой схемы.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи.

1. Выбор и термодинамические расчеты характеристик новых перспективных составов высокоэнергетических материалов (ВЭМ) и зарядов ТГМ, содержащих в

качестве металлических горючих порошки алюминия, бора, диборида алюминия (AlB_2), полиборида алюминия (AlB_{12}) и диборида титана (TiB_2).

2. Разработка лабораторных стендов и методик для исследования процессов зажигания и горения образцов ВЭМ и зарядов ТГМ.

3. Проведение комплекса экспериментальных исследований процессов зажигания и горения образцов ВЭМ и зарядов ТГМ. Определение основных характеристик зажигания и горения образцов ВЭМ и зарядов ТГМ в зависимости от следующих условий: источник воздействующего теплового потока; интенсивность воздействующего теплового потока; изменение давления в диапазоне $(0.1 \div 2.0)$ МПа.

4. Проведение экспериментальных исследований характеристик распыливания жидкого окислителя ГРД на модельных компонентах. Определение дисперсности и пространственного распределения концентрации капель в факеле распыла центробежной (ЦБФ) и эжекционной (ЭФ) форсунок в лабораторных условиях.

5. Разработка математической модели процесса горения твердотопливного заряда в потоке окислителя, оптимизация твердотопливного заряда ТГМ, обеспечивающая высокую полноту сгорания. Разработка лабораторного стенда для исследования рабочих процессов в модельном ГРД.

Новизна результатов исследований, состоит в предлагаемом подходе, включающем изучение комплекса рабочих процессов в ГРД прямой схемы.

Проведен выбор и получены результаты расчетов термодинамических характеристик новых перспективных твердотопливных композиций с борсодержащими компонентами.

Получены новые экспериментальные данные по характеристикам зажигания рассмотренных составов ВЭМ и ТГМ. Определены константы формальной кинетики зажигания кондуктивным нагревом, интегральным и монохроматическим потоком излучения.

Разработаны модифицированные установки для лазерной диагностики характеристик процесса распыливания жидкого компонента топлива в лабораторных условиях с использованием метода малых углов индикатрисы рассеяния и метода спектральной прозрачности. Получены новые результаты по влиянию конструктивных и режимных характеристик форсунки на дисперсность и пространственное распределение концентрации капель в факеле распыла.

Разработана математическая модель процесса горения заряда ТГМ в потоке окислителя, на основе которой впервые предложен способ оптимизации заряда ТГМ

введением дополнительного окислителя. Проведена разработка и отладка экспериментального стенда для исследования рабочих процессов в модельном ГРД.

Практическая и научная значимость. Научная значимость диссертационной работы заключается в том, что:

- расширены представления о характеристиках и механизмах зажигания и горения ВЭМ и ТГМ с новыми перспективными борсодержащими компонентами;
- получены уточненные характеристики дисперсности и пространственного распределения распыливаемого жидкого компонента топлива ГРД для разных типов форсунок;
- обоснована возможность обеспечения равномерного горения заряда ТГМ в потоке окислителя путем введения дополнительного окислительного компонента в состав твердотопливного заряда.

Практическая значимость диссертационного исследования обусловлена потребностями ракетно-космической отрасли в повышении эффективности ГРД как одного из наиболее перспективных типов двигательных установок космического назначения.

Полученные результаты по константам формальной кинетики позволяют прогнозировать характеристики зажигания перспективных композиций ВЭМ и ТГМ с борсодержащими компонентами.

Модель горения заряда ТГМ в потоке окислителя может быть использована для расчета рабочих процессов как в модельных, так и в натурных ГРД прямой схемы.

Использование способа оптимизации твердотопливного заряда позволяет повысить полноту сгорания и энергетические характеристики ГРД.

Степень достоверности результатов экспериментальных исследований. Достоверность научных положений и выводов, полученных в работе, следует из применения современных взаимодополняющих методов экспериментального исследования, использования бесконтактных оптических методов диагностики факела распыла, сопоставлением полученных результатов с данными других исследователей в пересекающихся диапазонах параметров, статистической обработкой результатов измерений.

Связь работы с научными программами и грантами. Диссертационное исследование проведено в соответствии с тематикой научно-исследовательской работы кафедры прикладной газовой динамики и горения физико-технического факультета и отдела газовой динамики и физики взрыва Научно-исследовательского института прикладной математики и механики Национального исследовательского

Томского государственного университета, соответствующей приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, утвержденным указом Президента Российской Федерации от 07.07.2011 № 899, п. 8 «Транспортные и космические системы».

Результаты диссертационного исследования получены в том числе:

– при выполнении научно-исследовательских работ по гранту Российского научного фонда, проект № 15-19-10014 «Экспериментально-теоретическое исследование процессов динамического взаимодействия консолидированной системы частиц дисперсной фазы в двухфазных потоках», руководитель – В. А. Архипов, в составе исполнителей – Н. Н. Золоторёв (2014–2017 гг.);

– при проведении прикладных научных исследований в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», проект № 14.578.21.0034 «Разработка новых высокоэнергетических материалов (ВЭМ) и технических решений для перспективных схем гибридных двигателей космического назначения», по теме «Разработка теоретических моделей и методик по расчету параметров физических процессов в ГРДТТ и при получении нанокomпонентов ВЭМ», руководитель – А. С. Жуков, в составе исполнителей – Н. Н. Золоторёв (2014–2016 г.).

Научные положения, результаты и выводы, выносимые на защиту.

1. Результаты экспериментального исследования характеристик зажигания (времени задержки зажигания и константы формальной кинетики) новых перспективных образцов высокоэнергетических материалов, содержащих порошки Al, B, AlB₂, AlB₁₂ и TiB₂, при нагреве лучистым тепловым излучением и излучением CO₂-лазера.

2. Результаты экспериментального исследования стационарной скорости горения новых перспективных образцов ВЭМ и ТГМ в диапазоне давлений (0.1 ÷ 2.0) МПа.

3. Методики и результаты экспериментального исследования дисперсности и пространственного распределения концентрации капель в факеле распыла жидкого окислителя ГРД для центробежной и эжекционной форсунок в лабораторных условиях.

4. Математическая модель процесса горения ТГМ в потоке газообразного окислителя.

5. Способ и результаты оптимизации твердотопливного заряда ГРД прямой схемы введением дополнительного окислительного компонента, обеспечивающий высокую полноту сгорания.

6. Результаты отработки экспериментального стенда модульной конструкции, для исследования процессов горения заряда ТГМ в модельном ГРД.

Личный вклад автора. Постановка цели и задач исследования проведена совместно с научным руководителем. Термодинамические расчеты, подготовка экспериментальных стендов и их модернизация, настройка программно-аппаратного комплекса для регистрации параметров, эксперименты по зажиганию и горению образцов ВЭМ и зарядов ТГМ, расчеты процесса горения ТГМ в потоке окислителя и по оптимизации заряда проведены автором самостоятельно.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационных исследований представлены на следующих конференциях и семинарах: Международная конференция «Высокоэнергетические материалы: демилитаризация, антитерроризм и гражданское применение» (Бийск, 3-5 сентября 2014; Томск, 7–9 сентября 2016); 7-я Международная конференция «Космический вызов XXI века. Новые материалы, технологии и приборы для космической техники» (Севастополь, Крым, 22–26 июня 2015); XXI Международная научная конференция студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (Томск, 5–9 октября 2015); Всероссийская конференция «Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, 19–20 ноября 2015; Новосибирск, 6-8 июня 2017; Новосибирск, 27–30 августа 2018); Всероссийская научно-техническая конференция «Авиадвигатели XXI века» (Москва, 24–27 ноября 2015); VI Всероссийская научная конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск, 13–15 октября 2015); XV Минский Международный форум по тепло- и массообмену (Минск, Беларусь, 23–26 мая 2016); XI Международная конференция по неравновесным процессам в соплах и струях (Алушта, Крым, 25–31 мая 2016); International Congress on «Energy Fluxes and Radiation Effects» (Tomsk, Russia, October 2–7, 2016); IX Всероссийская научная конференция, посвященная 55-летию полета Ю.А. Гагарина «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (Томск, 21–25 сентября 2016); Международная молодежная научная конференция «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» (Томск, 26–28 апреля 2017); Юбилейная конференция Национального комитета РАН по тепло- и массообмену «Фундаментальные и прикладные проблемы тепломассообмена» : (Санкт-Петербург, 22–26 мая 2017); XX Юбилейная Международная конференция по вычислительной

механике и современным прикладным программным системам (Алушта, Крым, 24–31 мая 2017); 9th International Seminar on «Flame Structure» (Novosibirsk, Russia, July 10–14, 2017); XII Всероссийская конференция молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии» (Новосибирск–Шерегеш, 16–22 марта 2018); VI Всероссийская научно-техническая конференция «Фундаментальные основы баллистического проектирования» (Санкт-Петербург, 5-10 июня 2018).

Публикации. Результаты диссертационных исследований опубликованы в 43 печатных работах, в том числе 5 статей в журналах, включенных в Перечень изданий, рекомендуемых ВАК, из них 4 – в изданиях, переводные версии которых индексируются Web of Science, 10 статей в научных изданиях, индексируемых Web of Science и / или Scopus, 28 публикаций в сборниках материалов международных и всероссийских научных конференций. Общий объем работ – 9.29 а.л., личный вклад автора – 2.55 а.л. Получен патент на изобретение РФ.

Структура и содержание работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 155 наименований. Диссертация изложена на 168 страницах машинописного текста, содержит 76 рисунков и 52 таблиц.

КРАТКОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ

Во введении сформулированы цель и задачи исследований по теме диссертационной работы, обоснована актуальность темы и поставленных задач, представлены положения, выносимые на защиту, отмечены научная новизна, научная и практическая значимость результатов исследования.

В первой главе проведен обзор литературы по исследованиям и разработкам в области создания ГРД. Рассмотрены особенности, преимущества и недостатки ГРД в сравнении с классическими схемами жидкостных и твердотопливных ракетных двигателей. Проанализированы работы отечественных и зарубежных ученых (США, Франции, Японии, Италии, Израиля, Китая). На основании анализа современного состояния в области исследований рабочих процессов в гибридных схемах ракетных двигателей проведено обоснование выбора направления, методов и средств экспериментальных и теоретических исследований по теме научно-квалификационной работы.

Во второй главе представлены результаты определения термодинамических характеристик исследуемых ВЭМ, содержащих в качестве металлических горючих порошки Al, В и соединений AlB_2 , AlB_{12} , TiB_2 . Содержание металлического горючего составляет до 15 мас. %. В качестве органического горючего-связующего

использовали инертный каучук СКДМ-80. Термодинамические характеристики рассчитаны при коэффициенте избытка окислителя $\alpha = 0.5$.

Рассчитаны термодинамические характеристики ВЭМ с окислителем на основе перхлората аммония (ПХА) и смешанного окислителя, содержащего 30 мас. % ПХА и 70 мас. % нитрата аммония (НА). Компонентные составы приведены в табл. 1.

Влияние металлического горючего оценивалось по изменению температуры (T , К) в камере сгорания, в критическом и в выходном сечениях сопла, молекулярной массе газообразных продуктов сгорания ($M_{\text{Мг}}$, г/моль), а также удельному импульсу ($I_{\text{уд}}$, с), количеству и составу твердых продуктов сгорания (к-фаза, моль/кг).

Табл. 1. Компонентные составы образцов ВЭМ

№ п/п	Содержание, мас. %							
	СКДМ-80	ПХА	НА	Al	B	AlB ₂	AlB ₁₂	TiB ₂
A1	16.0	69.0	—	15.0	—	—	—	—
A2	10.8	74.2	—	—	15.0	—	—	—
A3	13.6	71.4	—	—	—	15.0	—	—
A4	11.8	73.2	—	—	—	—	15.0	—
A5	14.8	70.2	—	—	—	—	—	15.0
B1	13.9	21.3	49.8	15.0	—	—	—	—
B2	10.0	22.5	52.5	—	15.0	—	—	—
B3	11.8	21.9	51.3	—	—	15.0	—	—
B4	10.0	22.5	52.5	—	—	—	15.0	—
B5	13.0	21.6	50.4	—	—	—	—	15.0

Влияние смешанного металлического горючего «алюминий–бор» на характеристики ТГМ для ГРД с воздухом в качестве окислителя (воздушно реактивный двигатель) проанализировано на примере системы, содержащей 40 % тетразола и 60 % металлического горючего при варьировании соотношения Al/B. В табл. 2 приведены компонентные составы топливных композиций с коэффициентом избытка окислителя $\alpha = 1$, а также значения расхода воздуха, обеспечивающего условия стехиометрии смеси.

Табл. 2. Компонентные составы топливных композиций

№	Содержание, мас. %				Расход воздуха на 100 г топлива	
	тетразол	Al	B	O ₂	грамм	литр
1	15.32	22.98	0	61.70	267.09	159.78
3	13.60	16.40	4.10	65.90	285.28	220.65
5	12.28	11.05	7.37	69.30	300.00	232.04
7	11.20	6.72	10.08	72.00	311.69	241.08
9	10.06	3.02	12.06	74.86	324.07	250.65
11	9.48	0	14.22	76.30	330.30	255.47

В табл. 3 представлены термодинамические характеристики топливных композиций.

Табл. 3. Термодинамические характеристики топливных композиций

№	Содержание, мас. %		$T_{ад}$, К	$I_{уд}$, с	$M_{Мг}$, г/моль	Конденсированная фаза, моль/кг
	Al	B				
1	100	0	3718.2	267.49	21.672	5.407
3	80	20	3585.8	271.76	26.934	3.994
5	60	40	3482.7	274.31	31.483	2.689
7	40	60	3405.7	277.01	35.226	1.545
9	20	80	3345.6	278.92	38.313	0.530
11	0	100	3332.1	282.02	39.742	0.000

Анализ результатов расчетов показал, что повышение содержания бора в металлическом компоненте топливной композиции приводит к росту удельного импульса, увеличению средней молекулярной массы газообразных продуктов сгорания, к снижению адиабатической температуры горения и содержания конденсированных веществ в продуктах сгорания. Следует отметить повышение требуемого расхода кислорода воздуха с увеличением содержания бора в топливе (табл. 2).

Анализ полученных результатов показал, что снижение коэффициента избытка окислителя от $\alpha = 1$ до $\alpha = 0.7$ практически влияет на энергетические характеристики исследованных топливных композиций. Значение коэффициента избытка окислителя влияет на состав конденсированных продуктов сгорания. Дальнейшее снижение коэффициента избытка окислителя приводит к значительному снижению удельного импульса и адиабатической температуры горения, а также к появлению в продуктах сгорания бора и нитрида бора.

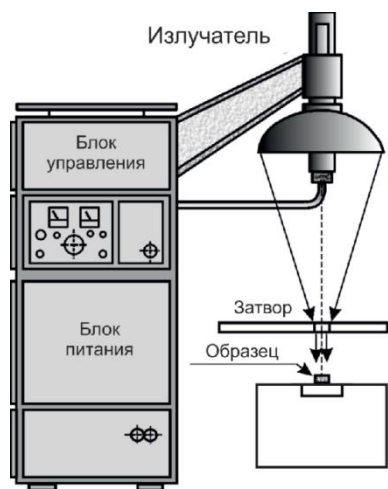


Рис. 1. Схема установки «Уран-1»

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию зажигания и горения перспективных композиций ВЭМ. Представлена методика изготовления экспериментальных образцов исследуемых составов ВЭМ и зарядов ТГМ. Приведены результаты исследования процесса зажигания образцов ВЭМ при кондуктивном подводе тепла, зажигания лучистым потоком и излучением CO_2 -лазера. Исследование зажигания образцов ВЭМ при кондуктивном подводе тепла проводилось на установке кондуктивного нагрева в диапазоне температур $(640 \div 700)$ К. Процесс зажигания лучистым потоком проводили на установке

радиационного нагрева «Уран-1» (рис. 1). Интенсивность потока варьировали в диапазоне $(14 \div 100)$ Вт/см². Исследование процесса зажигания экспериментальных образцов осуществлялось с использованием установки лучистого нагрева на основе СО₂-лазера непрерывного действия с длиной волны излучения 10.6 мкм, максимальная мощность – до 200 Вт (рис. 2).

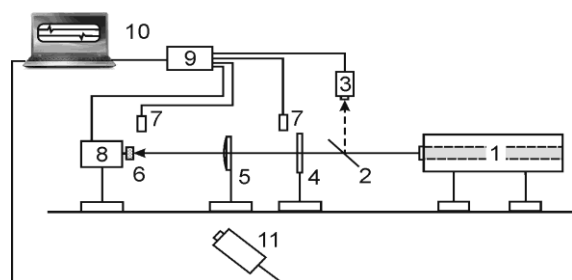


Рис. 2. Схема экспериментальной установки на основе СО₂-лазера: 1 – СО₂-лазер; 2 – полупрозрачное зеркало; 3 – измеритель мощности излучения; 4 – затвор; 5 – линза; 6 – экспериментальный образец; 7 – фотодиоды; 8 – измеритель реактивной силы; 9 – АЦП; 10 – ПК; 11 – видео (тепловизионная) камера

Установлено по результатам сравнительного анализа, что в отличие от зажигания при кондуктивном подводе тепла в условиях нагрева лучистым потоком повышенной воспламеняемостью обладают образцы, содержащие аморфный бор и борид алюминия. Графики зависимости времени задержки зажигания образцов ВЭМ серии А от плотности теплового потока при зажигании с использованием установки «Уран-1» (а) и при использовании СО₂-лазера (б) приведены на рис. 3.

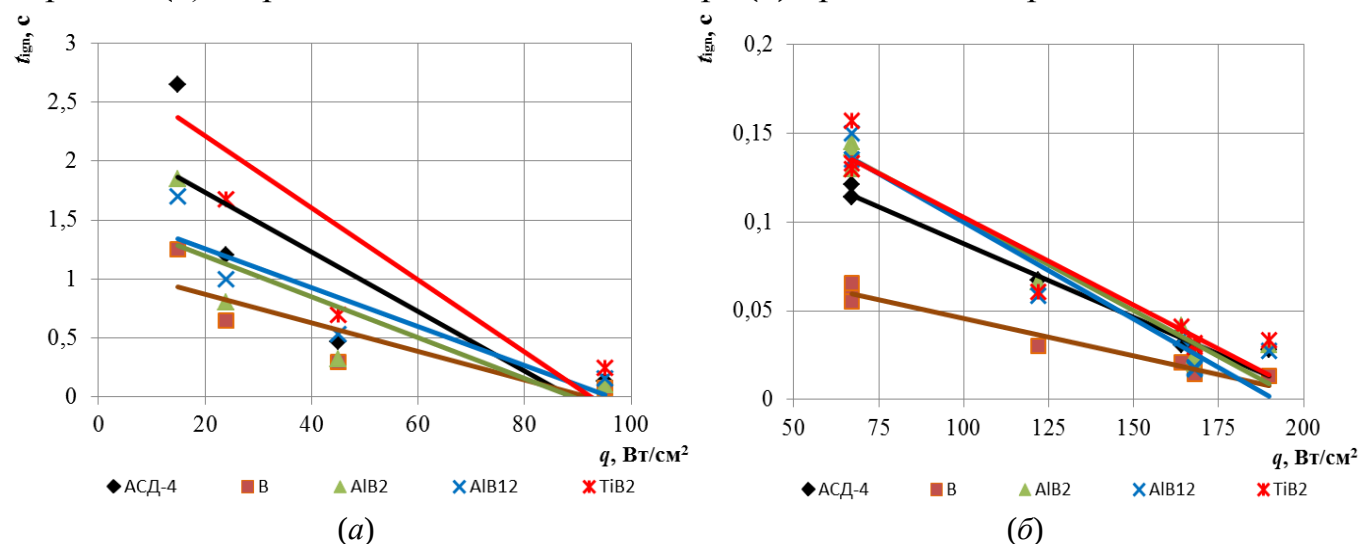


Рис. 3. Время задержки зажигания образцов ВЭМ с использованием установки «Уран-1» (а) и при использовании СО₂-лазера (б)

Расчет констант формальной кинетики процесса зажигания (энергия активации E и комплекса Qz) проводился с использованием квазистационарной теории зажигания В.Н. Вилюнова, в рамках которой получено уравнение для времени задержки зажигания t_{ign} :

$$t_{\text{ign}} = \frac{0.349 \cdot cE}{(1 - 0.8\beta)QzR} \left(1 - \frac{T_n}{T_*}\right)^2 \exp\left(\frac{E}{RT_*}\right),$$

где c – удельная теплоемкость топлива; β – число Аррениуса; Q – тепловой эффект реакции; z – предэкспоненциальный множитель; R – универсальная газовая постоянная; T_H – начальная температура топлива; T_* – масштабная температура.

В табл. 4 представлены результаты определения E и Qz для новых перспективных борсодержащих композиций ВЭМ.

Табл. 4. Результаты определения констант формальной кинетики

Составы	E , кДж/моль	Qz , Дж/(кг·с)
A1(Al)	158	$9.95 \cdot 10^{13}$
A2(B)	90	$3.63 \cdot 10^{11}$
A3(AlB ₂)	73	$4.65 \cdot 10^9$
A4(AlB ₁₂)	242	$9.46 \cdot 10^{22}$
A5(TiB ₂)	98	$2.40 \cdot 10^{10}$

В условиях РДТТ и ГРД зажигание зарядов ВЭМ или ТГМ происходит в большинстве случаев переменным во времени тепловым потоком. По результатам исследований зажигания ВЭМ (на примере пироксилина) при динамических режимах нагрева показано, что время задержки зажигания при линейно возрастающем тепловом потоке меньше, чем при воздействии постоянного теплового потока (рис. 4).

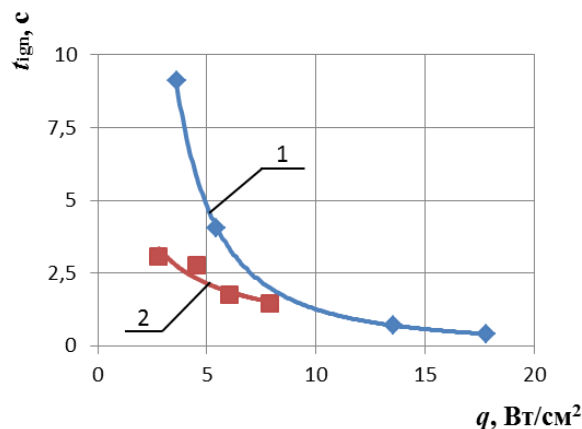


Рис. 4. Время задержки зажигания при воздействии постоянного (1) и возрастающего (2) теплового потока

Обнаруженный эффект связан, по-видимому, с особенностями формирования прогретого слоя конденсированной фазы в условиях статического и динамического режимов нагрева ВЭМ. Полученные данные позволяют утверждать, что в исследованном диапазоне плотности теплового потока воспламеняемость ВЭМ в динамических условиях нагрева выше, чем в статических.

Измерение скорости горения модельных составов ВЭМ проводили при варьировании давления (0.1 ÷ 2.0) МПа и начальной температуре 295 К. При давлении 0.1 МПа серия экспериментов проведена в воздушной среде. Кадры процесса горения, визуализированного при помощи фотокамеры NIKON D600, приведены на рис. 5.

Распыливание проводилось при варьировании расхода модельной жидкости и воздуха на входе в форсунку. Пространственное распределение концентрации капель определялось теньвым методом (прибор ИАБ-451 и методом спектральной прозрачности).

Формирование раскрытого конуса для ЦБФ происходит в диапазоне перепадов давления на форсунке $\Delta p > (0.03 \div 0.05)$ МПа, а удовлетворительное качество распыливания обеспечивается при $\Delta p > (0.08 \div 0.12)$ МПа. При работе ЦБФ в условиях малых перепадов давления ($\Delta p < 0.1$ МПа) качество распыливания резко ухудшается (рис. 7).

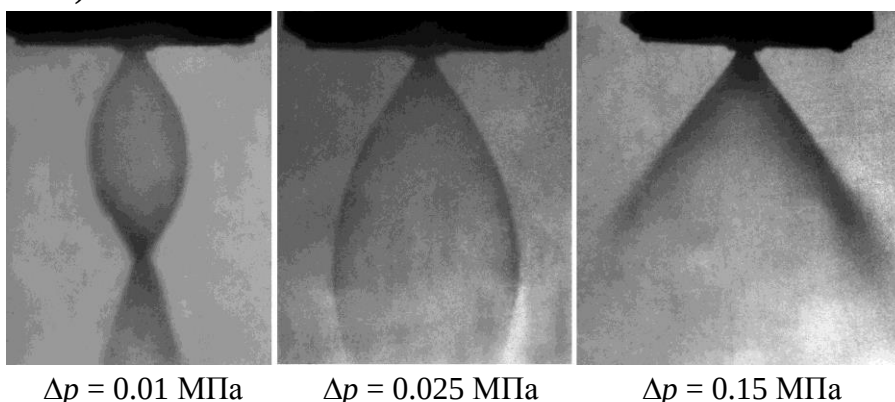


Рис. 7. Факел распыла центробежной форсунки

На рис. 8 приведены типичные радиальные распределения концентрации капель, отнесенной к ее максимальному значению, для ЦБФ и ЭФ при различных расстояниях z от среза сопла.

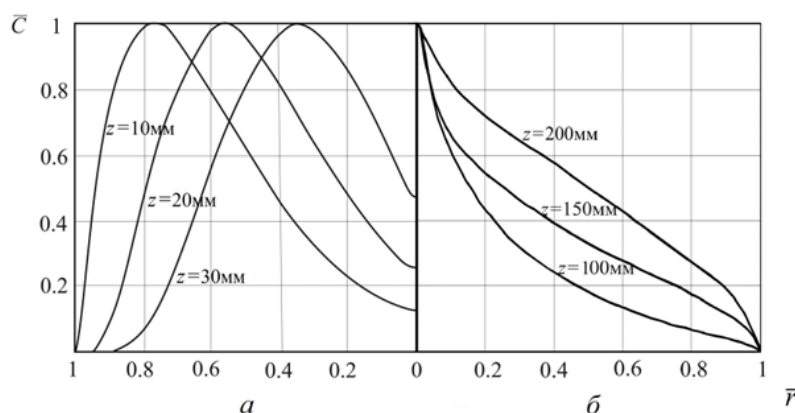


Рис. 8. Радиальные распределения концентрации капель в разных сечениях факела распыла центробежной (а) и эжекционной (б) форсунками

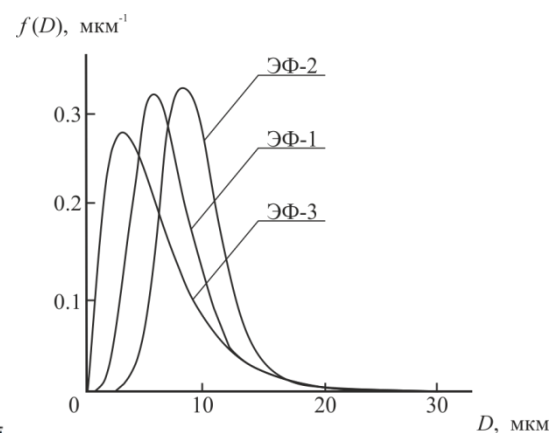


Рис. 9. Дифференциальные функции счетного распределения для эжекционных форсунок

Результаты измерений распределения концентрации капель для эжекционной форсунки показывают, что распределение $C(r)$ носит монотонный характер с максимумом на оси симметрии факела распыла. С увеличением расстояния z распределение концентрации капель становится более равномерным.

Наличие газового вихря в ЦБФ и вращательное движение вытекающей струи жидкости приводят к тому, что струя приобретает форму полого тела вращения. Присутствие жидкости в приосевой зоне объясняется выносом капель из основной струи за счет турбулентных пульсаций.

Дисперсность капель в факеле распыла ЦБФ и ЭФ определялась методом малоугловой индикатрисы рассеяния. При проведении экспериментов исследовались характеристики факела распыла для трех модификаций эжекционной форсунки: ЭФ-1 – газовый тракт выполнен в виде конфузора; ЭФ-2 – газовый тракт выполнен в виде сопла Лавалья; ЭФ-3 – тангенциальная подача газа, обеспечивающая закрутку потока. На рис. 9. приведены полученные дифференциальные функции счетного распределения капель по размерам для исследованных форсунок. Результаты проведенных экспериментов для ЦБФ были обработаны в виде критериального уравнения с использованием чисел Рейнольдса (Re) и Онезорге (Oh)

$$Re = \frac{\rho_g u \delta}{\mu_g}, \quad Oh = \frac{Re^2}{We},$$

где We – число Вебера, u , δ – скорость и толщина пленки жидкости на срезе сопла ЦБФ, рассчитываемые по теории Г.Н. Абрамовича.

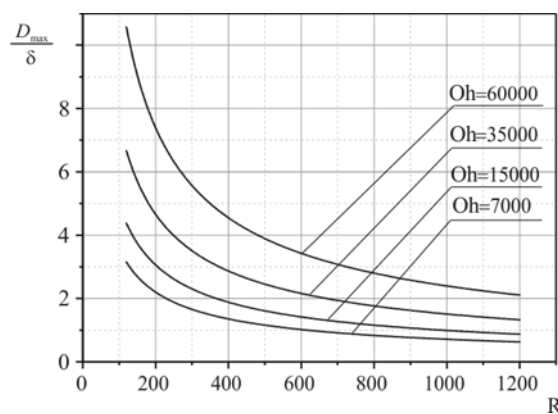


Рис. 10. Зависимость $D_{\max}/\delta$ от значений критериев Re и Oh

Графики зависимости максимального диаметра капель для разных значений чисел Рейнольдса и Онезорге приведены на рис. 10. Анализ полученных данных показывает, что критериальное соотношение для определения $D_{\max}$, полученное для модельных компонентов (H_2O и Т-1), можно использовать и для расчета характеристик распыливания реальных окислителей ГРД (H_2O_2 , NH_4NO_3 , N_2O_4).

В пятой главе представлены результаты исследования процесса горения заряда ТГМ в ГРД прямой схемы. Представлена математическая модель и результаты расчетов параметров потока окислителя и скорости горения одноканального твердотопливного заряда, в рамках следующих допущений:

- течение газа в канале заряда одномерное и квазистационарное;
- скорость газификации (линейная скорость горения, u) определяется степенной зависимостью от плотности потока окислителя $y = \rho w$ с учетом эмпирических констант a , ν для конкретного топлива:

$$u = ay^v,$$

где ρ , w – плотность и скорость окислителя вдоль оси канала.

Уравнение закона сохранения массы окислителя по длине заряда при квазистационарном течении имеет вид:

$$\frac{d}{dx}(yS) = -\Pi\alpha\rho_m ay^v,$$

где x – длина канала ($0 < x < L$); S , Π – площадь проходного сечения и периметр осевого канала; α – отношение массы окислителя, поступающего из потока, к массе твердого горючего в процессе горения; ρ_m – плотность ТГМ.

Для цилиндрического канала радиусом r ($\Pi = 2\pi r$, $S = \pi r^2$) соотношения определяющие распределение плотности потока окислителя и скорости горения ТГМ по длине канала, имеют вид:

$$y(x) = \left[\left(\frac{G_0}{\pi r^2} \right)^{1-v} - \frac{2\alpha\rho_m a}{r^2} (1-v)x \right]^{\frac{1}{1-v}}, \quad u(x) = a[y(x)]^v,$$

где G_0 – массовый секундный расход окислителя на входе в канал.

На рис. 11 приведены зависимости плотности потока окислителя и скорости горения ТГМ от длины канала для типичного ГРД.

y , кг / (с·м²)

u , мм / с

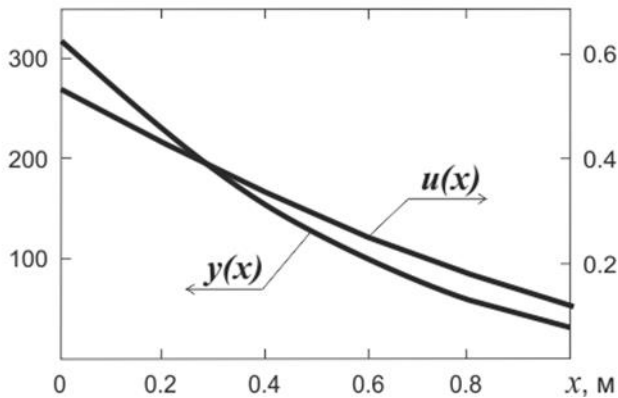


Рис. 11. Зависимость плотности потока окислителя и линейной скорости горения от длины канала для топливной композиции без дополнительного окислительного компонента

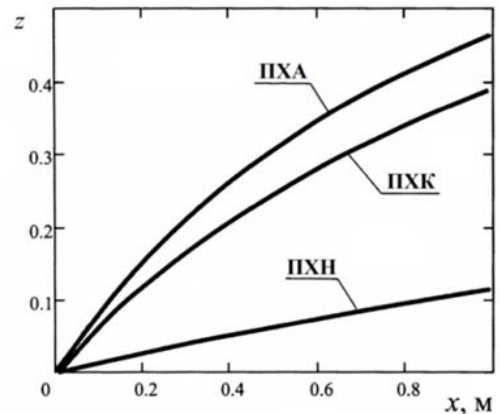


Рис. 12. Распределения массовой доли дополнительного окислителя по длине канала

Из приведенных графиков следует, что $y(x)$ монотонно уменьшается за счет расходования окислителя в процессе горения заряда ТГМ от начального значения $313 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ (на входе в канал) до $31 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$ (на выходе из канала), скорость горения $u(x)$ также монотонно снижается от 0.54 мм/с до 0.12 мм/с . Это

приводит к неравномерному выгоранию заряда ТГМ по его длине и снижению полноты сгорания и энерготяговых характеристик двигателя.

Предложен способ оптимизации заряда ТГМ путем введения в него дополнительного твердого окислителя. При этом твердый окислитель необходимо распределять по длине заряда таким образом, чтобы уменьшающаяся по длине канала плотность потока окислителя компенсировалась введенным в состав твердотопливного заряда твердого окислителя. Уравнение определяющее распределение массовой доли окислителя в твердотопливном заряде имеет вид:

$$z(x) = \frac{\beta \left\{ 1 - \left[1 - 2\pi r \alpha (1-v) \frac{\omega_o}{G_o} x \right]^{\frac{v}{1-v}} \right\}}{1 + \beta \left\{ 1 - \left[1 - 2\pi r \alpha (1-v) \frac{\omega_o}{G_o} x \right]^{\frac{v}{1-v}} \right\}}.$$

где $\omega_o - \rho_m \cdot u_o$ массовая скорость горения ТГМ во входном сечении заряда.

Приведены примеры оптимизации твердотопливного заряда, содержащего 85 % бутадиенового каучука и 15 % порошка алюминия, путем введения в его состав дополнительного твердого окислителя – перхлората аммония (ПХА) – NH_4ClO_4 , перхлората калия (ПХК) – KClO_4 и перхлората нитрония (ПХН) – NO_2ClO_4 .

Распределения массовой доли окислительного компонента по длине заряда, приведены на рис. 12.

Разработан экспериментальный стенд для исследования процессов горения образцов ТГМ в потоке нагретого газа в модельном ГРД. Модульная конструкция стенда позволяет адаптировать его конфигурацию для проведения исследований в рамках решения конкретных задач. Экспериментальный стенд включает системы подачи и подогрева газа, системы контроля параметров газа и тягоизмерительный стенд с модельным двигателем. Схема экспериментального стенда для исследования горения образцов ТГМ в потоке нагретого газа приведена на рис. 13. В качестве экспериментальных образцов ВЭМ и зарядов ТГМ использовались образцы цилиндрической формы с внутренним каналом диаметром 10 мм. Внешний диаметр заряда составлял 40 мм, длина заряда 50 мм.

Определены условия воспламенения и горения поверхности внутреннего канала модельного заряда. Остальная поверхность заряда бронировалась раствором линолеума в ацетоне и полихлорвиниловой изоляцией.

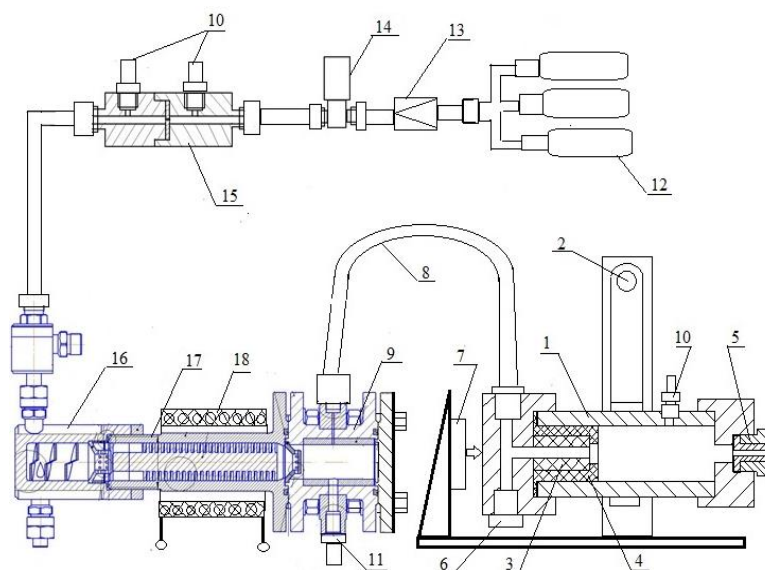


Рис. 13. Схема экспериментального стенда с подогревом воздуха: 1 - модельный двигатель; 2 - маятниковая подвеска тягоизмерительного стенда; 3 - исследуемый образец; 4 - контейнер для образца; 5 - сопло; 6, 10 - датчики давления; 7 - датчик тяги; 8 - гибкий металлический рукав; 9 - форкамера; 11 - датчик температуры; 12 - баллон с газом; 13 - редуктор; 14 - пневмоклапан; 15 - дифференциальный расходомер; 16 - смеситель; 17 - печь для подогрева газа; 18 - индуктор

В качестве регистрирующей аппаратуры на стенде использовались цифровые приборы: 8-ми каналный тензометрический усилитель АТ1-8 и 20-ти каналный программируемый контроллер SIMATIC S7-1200 (16 каналов по давлению и 4 канала по температуре). Тензометрический усилитель АТ1-8 имеет частоту дискретизации до 5 кГц, погрешность измерения номинального входного сигнала $< 0.2\%$ при нелинейности преобразования $< 0.1\%$. Точность преобразования аналогового сигнала для программируемого контроллера SIMATIC S7-1200 составляет $\pm 3\%$. Сигналы с измерительных приборов передавались на персональный компьютер и записывались в виде таблиц.

Общий вид экспериментального стенда для исследования процессов горения зарядов ТГМ приведен на рис. 14. Процесс горения образца ТГМ в модельном ГРД приведен на фотографии (рис. 15).

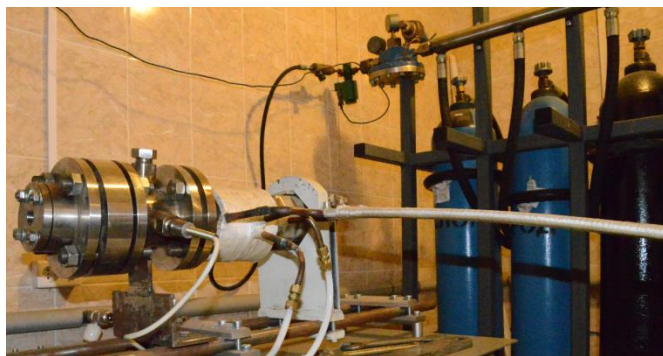


Рис. 14. Общий вид экспериментального стенда



Рис. 15. Процесс горения образца ТГМ в модельном ГРД

Результаты отработки модельного ГРД с твердотопливным зарядом ТГМ позволили получить данные по температуре газа в форкамере, температуре и давлению в камере модельного ГРД, а также по тяге двигателя.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. По результатам расчетов компонентного состава и термодинамических характеристик ТГМ и ВЭМ на активном горючем-связующем предложены перспективные компонентные составы базовых топливных композиций для ГРД, содержащие 40 % тетразола и 60 % металлического горючего. Выявлено, что в качестве металлического горючего наиболее эффективно использование смесей Al/V в соотношениях 60/40, 50/50 и 40/60.

2. На основании экспериментальных исследований определены характеристики зажигания перспективных компонентных составов ВЭМ и ТГМ при воздействии кондуктивного и лучистого теплового потока. Исследование зажигания образцов ВЭМ и ТГМ проведено для кондуктивного, интегрального (установка «Уран-1») и монохроматического (CO₂-лазер) лучистого теплового потока. По измеренным значениям времени задержки зажигания получены константы формальной кинетики для исследуемых составов ВЭМ. Получены новые экспериментальные данные по характеристикам зажигания ВЭМ переменным во времени лучистым тепловым потоком.

3. Проведены экспериментальные исследования и получены новые данные о скорости горения образцов рассматриваемых ВЭМ при атмосферном и повышенном давлении, в диапазоне давлений (0.1 ÷ 2.0) МПа.

4. Для экспериментального исследования закономерностей распыливания жидких компонентов топливных композиций ГРД сконструирован и отработан пневмогидравлический стенд и разработан лазерно-диагностический комплекс для измерения пространственного распределения концентрации капель в факеле распыла и функции распределения капель по размерам.

5. Получены новые экспериментальные данные по количественным характеристикам структуры факела распыла модельных жидкостей при распыливании центробежной и эжекционной форсунками. Установлены особенности формирования факела распыла при распыливании жидкости ЦБФ и ЭФ: наличие газового вихря в ЦБФ и вращательное движение вытекающей струи жидкости приводят к формированию струи в форме полого тела вращения; факел распыла эжекционной форсунки характеризуется большей дальностью и наличием максимальной концентрации капель в приосевой области.

6. Показано, что для обоих типов форсунок функция распределения является унимодальной и описывается распределением Розина-Раммлера. Получены новые результаты по влиянию конструкции и режимных характеристик форсунки на дифференциальную функцию счетного распределения капель по размерам.

7. Предложена математическая модель и представлены результаты расчетов параметров потока окислителя и скорости горения одноканального твердотопливного заряда в типичном ГРД прямой схемы. Установлено, что плотность потока окислителя вдоль оси канала снижается на порядок, а скорость горения ТГМ снижается в ~ 5 раз, что приводит к снижению полноты сгорания заряда.

8. Предложен способ оптимизации характеристик гибридного ракетного двигателя прямой схемы путем введения в состав твердого горючего материала дополнительного окислителя с заданным распределением по длине твердотопливного заряда. Получена аналитическая зависимость для определения распределения содержания окислителя, обеспечивающего равномерность и высокую полноту сгорания твердотопливного заряда.

9. Разработаны модельный ГРД прямой схемы и экспериментальный стенд для исследования процесса горения в ГРД. Модульная конструкция стенда реализует два варианта подачи окислителя. При отработке модельного ГРД с зарядом ТГМ получены данные о температуре газа в форкамере, температуре и давлении в камере двигателя, данные измерений тяги двигателя.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Горбенко Т. И. Исследование энергетических характеристик металлизированных смесевых композиций на основе двойного окислителя при повышенных давлениях / Т. И. Горбенко, М. В. Горбенко, Е. О. Дюндин, **Н. Н. Золоторёв** // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – Т. 57, № 5. – С. 45–50. – 0,49 / 0,12 а.л.

2. Архипов В. А. Оптимизация твердотопливного заряда гибридной двигательной установки / В. А. Архипов, С. С. Бондарчук, А. С. Жуков, **Н. Н. Золоторёв** // Ползуновский вестник. – 2016. – № 3. – С. 101–106. – 0,43 / 0,11 а.л.

3. Архипов В. А. Лазерная диагностика структуры факела распыла при диспергировании жидкости форсунками / В. А. Архипов, С. А. Басалаев, В. Ф. Трофимов, **Н. Н. Золоторёв** // Инженерно-физический журнал. – 2017. – Т. 90, № 6. – С. 1499–1505. – 0,46 / 0,11 а.л.

4. Архипов В. А. Оптимизация характеристик гибридного ракетного двигателя прямой схемы / В. А. Архипов, С. С. Бондарчук, А. С. Жуков, **Н. Н. Золоторёв**, К. Г. Перфильева // Физика горения и взрыва. – 2017. – Т. 53, № 6. – С. 19–25. – DOI: 10.15372/FGV20170603. – 0,59 / 0,12 а.л.

5. Архипов В. А. Дисперсность капель в факеле распыла форсунок / В. А. Архипов, **Н. Н. Золоторев**, С. А. Басалаев, С. С. Бондарчук // Оптика атмосферы и океана. – 2018. – Т. 31, № 6. – С. 489–491. – 0,18 / 0,04 а.л. – DOI: 10.15372/AOO20180612. (*Web of Science*)

Статьи в научных изданиях, индексируемых Web of Science и / или Scopus:

6. Arkhipov V. Effect of Aluminum-Boron Powders Mechanical Mixtures on the Combustion of High-Energy Materials at Subatmospheric Pressures / V. Arkhipov, L. Savel'eva, **N. Zolotorev** // MATEC Web of Conferences. – 2015. – Vol. 23 : International Workshop of Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Technological Energy Equipment (TSOTR 2015). Tomsk, Russian Federation, April 22–23, 2015. – Article number 01005. – 4 p. – DOI: 10.1051/matecconf/20152301005. – 0,22 / 0,08 а.л. (*Web of Science*)

7. **Zolotorev N.** Dynamic regime of ignition of solid propellant / N. Zolotorev, V. Kuznetsov, E. Maslov // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 72 : 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. – Article number 01136. – 3 p. – DOI: 10.1051/matecconf/20167201136. – 0,18 / 0,06 а.л. (*Web of Science*)

8. **Zolotorev N. N.** Technique of the research of characteristics of ignition of the condensed systems to variables heat flux / N. N. Zolotorev, V. A. Arkhipov, E. A. Maslov // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 92 : Thermophysical Basis of Energy Technologies (TBET-2016). Tomsk, Russian Federation, October 26–28, 2016. – Article number 01021. – 4 p. – DOI: 10.1051/matecconf/20179201021. – 0,16 / 0,05 а.л. (*Web of Science*)

9. Arkhipov V. A. Dynamic ignition regime of condensed system by radiate heat flux / V. A. Arkhipov, **N. N. Zolotorev**, A. G. Korotkikh, V. T. Kuznetsov // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 830, is. 1 : 5th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects 2016. Tomsk, Russian Federation, October 02–07,

2016. – Article number 012136. – 9 p. – DOI:10.1088/1742-6596/755/1/011001. – 0,49 / 0,12 а.л. (*Scopus*)

10. Korotkikh A. G. Ignition by laser radiation and combustion of composite solid propellants with bimetal powders / A. G. Korotkikh, V. A. Arkhipov, O. G. Glotov, **N. N. Zolotarev** // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 830. – Article number 012137. – 7 p. – DOI: 10.1088/1742-6596/830/1/012137. – 0,49 / 0,12 а.л. (*Scopus*)

11. **Zolotarev N.** Optimization of the stand for test of hybrid rocket engines of solid fuel / N. Zolotarev, V. Kuznetsov, A. Konovalenko // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 110 : International Youth Scientific Conference on Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Technological Energy Equipment (HMTTSC 2017). Tomsk, Russian Federation, April 26–28, 2017. – Article number 01093. – 5 p. – DOI: 10.1051/mateconf/201711001093. – 0,24 / 0,08 а.л. (*Scopus*)

Патент на изобретение РФ:

12. Патент РФ 2633730, МПК F02K 7/18, 7/12, 9/70. Способ организации рабочего процесса в прямоточном воздушно-реактивном двигателе / В.А. Архипов, А.И. Коноваленко, А.С. Жуков, **Н.Н. Золоторёв**. Опубл. 17.10.2017, Бюл. № 29.