



Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
**Институт проблем химико-
энергетических технологий
Сибирского отделения
Российской академии наук
(ИПХЭТ СО РАН)**

659322, г. Бийск Алтайского края, ул. Социалистическая 1
т.(3854) 305-955, ф. 303-043, 301-725, e-mail: admin@ipcet.ru
ОКПО 10018691, ОГРН 1022200571051, ИНН 2204008820,
КПП 220450001

Исх. № 15365-205-2171 от 28.11.2018
На № 318 от 06.11.2018



УТВЕРЖДАЮ
Директор, профессор

_____ **С.В. Сысолятин**
«28» ноября 2018 г.

Отзыв ведущей организации
на диссертацию **Золоторёва Николая Николаевича**
«Исследование рабочих процессов в гибридном ракетном
двигателе прямой схемы», представленную на соискание
ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 01.04.17 – Химическая физика, горение и
взрыв, физика экстремальных состояний вещества

Диссертационная работа посвящена экспериментально-теоретическому
исследованию рабочих процессов в гибридном ракетном двигателе прямой
схемы.

Актуальность темы диссертационной работы

Актуальность работы определяется необходимостью создания
наиболее перспективных ракетно-космических систем на основе
использования гибридных ракетных двигателей (ГРД) «прямой схемы»,

обладающих рядом преимуществ по сравнению с жидкостными ракетными двигателями (ЖРД) и ракетными двигателями на твердом топливе (РДТТ).

Эти преимущества позволяют использовать ГРД в качестве двигательных установок космических летательных аппаратов разного назначения.

Практическое использование гибридного ракетного двигателя возможно после проведения исследований как рабочих процессов в камере сгорания двигателя, так и процесса распыливания жидкого компонента топлива, а также изучение характеристик зажигания перспективных топливных композиций, закономерностей устойчивого горения твердотопливного заряда в потоке окислителя.

Тема диссертационной работы соответствует приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации (Указ Президента РФ от 07.07.2011 г. № 899): Транспортные и космические системы и перечню критических технологий Российской Федерации:

Технологии создания ракетно-космической и транспортной техники нового поколения.

Структура и основное содержание работы

Во введении обоснованы актуальность и практическая значимость проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы, изложены защищаемые положения, приведены сведения об апробации работы и структуре диссертации, указан личный вклад автора.

В первой главе приведен краткий обзор основных конструктивных схем гибридного ракетного двигателя. Показаны основные преимущества и недостатки ГРД в сравнении с ЖРД и РДТТ. На основании анализа современного состояния в области разработки конструкций гибридных двигательных установок проведено обоснование выбора направления, методов и средств экспериментальных и теоретических исследований.

Во второй главе представлены результаты исследований по определению термодинамических характеристик исследуемых высоко-энергетических материалов (ВЭМ), содержащих в качестве металлических горючих порошки Al, В и соединений AlB_2 , AlB_{12} , TiB_2 . В качестве органического горючего-связующего использовался инертный каучук СКДМ-80. Термодинамические характеристики рассчитаны при коэффициенте избытка окислителя $\alpha = 0.5$.

Проведены расчёты термодинамических характеристик ВЭМ с окислителем на основе перхлората аммония (ПХА) и смешанного окислителя, содержащего ПХА и нитрат аммония (НА).

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований по зажиганию и горению перспективных композиций ВЭМ.

Представлена методика изготовления экспериментальных образцов исследуемых составов ВЭМ. Изложены методики экспериментального исследования процесса зажигания образцов ВЭМ лучистым потоком на установке радиационного нагрева «Уран-1» и с использованием установки на основе CO_2 -лазера (мощность излучения до 200 Вт). Определено время задержки зажигания в зависимости от плотности мощности излучения в диапазоне $(14 \div 100)$ Вт/см². Представлены результаты характеристик зажигания образцов ВЭМ переменным тепловым потоком.

Измерение скорости горения модельных составов проведено при атмосферном давлении в воздушной среде и при повышенном давлении в камере с инертной средой. Скорость горения измеряли по видеозаписям скоростной видеокамеры при скорости съемки 1600 кадров в секунду.

Представлены результаты определения констант формальной химической кинетики процесса зажигания, полученные на основании решения обратной кинетической задачи.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований характеристик факела распыла модельных жидкостей

(дистиллированная вода и керосин) при использовании центробежной и эжекционной форсунок.

Для установления закономерностей распыливания сконструирован и отработан пневмогидравлический стенд, и разработаны лазерные измерительные установки для определения пространственного распределения концентрации капель в факеле распыла и функции распределения капель по размерам.

Распыливание проводилось при варьировании расхода модельной жидкости и воздуха на входе в форсунку. Дисперсность капель в факеле распыла ЦБФ и ЭФ определялась методом малоугловой индикатрисы рассеяния.

Пространственное распределение концентрации капель определялось теневым методом (прибор ИАБ-451) и методом спектральной прозрачности.

В пятой главе представлены результаты исследования процесса горения заряда твердого горючего материала (ТГМ) в ГРД «прямой схемы». Предложена математическая модель, и приведены результаты расчетов параметров потока окислителя и скорости горения одноканального заряда ТГМ. Получено, что плотность потока окислителя монотонно уменьшается по длине осесимметричного канала в процессе горения.

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.

Разработан экспериментальный стенд для исследования процессов горения образцов ТГМ в потоке нагретого газа в модельном ГРД, включающий системы подачи и подогрева газа, системы контроля параметров газа и тягоизмерительный стенд с модельным двигателем. Модульная конструкция стенда позволяет адаптировать его конфигурацию

для исследований при решении конкретных задач. При отработке модельного ГРД с твердотопливным зарядом ТГМ получены данные о температуре газа в форкамере, температуре и давлении в камере двигателя, данные измерений тяги двигателя.

Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы определяется тем, что в ней:

- получены результаты расчетов термодинамических характеристик новых перспективных твердотопливных композиций с борсодержащими компонентами;
- получены новые экспериментальные данные по характеристикам зажигания составов ВЭМ и ТГМ. Определены константы формальной кинетики зажигания при воздействии кондуктивным нагревом, интегральным и монохроматическим потоком излучения;
- созданы измерительные установки для лазерной диагностики характеристик процесса распыливания жидкого компонента топлива с использованием метода малых углов индикатрисы рассеяния и метода спектральной прозрачности;
- получены новые результаты по влиянию конструктивных и режимных характеристик центробежной и эжекционной форсунок 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.

Новизна полученных результатов подтверждена выдачей **Патента 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.

Практическая ценность заключается в создании экспериментального стенда модульной конструкции для исследования рабочих процессов в модельном ГРД.

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

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

Практическая значимость работы подтверждается тем, что она была выполнена по гранту Российского научного фонда, проект № 15-19-10014 «Экспериментально-теоретическое исследование процессов динамического взаимодействия консолидированной системы частиц дисперсной фазы в двухфазных потоках» (2014-2017 гг.), а также 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» (2014-2016 гг.).

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечена применением современных взаимодополняющих методов экспериментального исследования, использованием современных методов и средств при выполнении исследований, использованием бесконтактных оптических методов диагностики факела распыла, сопоставлением полученных результатов с данными других исследователей в пересекающихся диапазонах параметров, статистической обработкой результатов измерений.

Материал диссертационной работы и публикации автора в основном посвящены вопросам теоретических и экспериментальных исследований быстропротекающих физико-химических превращений веществ и систем в процессах термического разложения и горения ракетных топлив и их компонентов, а также установлению закономерностей и механизмов процессов горения, поэтому представление ее к защите по специальности 01.04.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества обоснованно.

Апробация. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 19 конференциях различного уровня. Материал диссертации достаточно полно изложен в публикациях, среди которых 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.

Материал автореферата соответствует основным положениям диссертации.

Замечания по диссертации

По содержанию и оформлению диссертации и автореферата считаем необходимым сделать следующие замечания.

1 В гибридных ракетных двигателях для распыливания жидкого окислителя используются различные конструкции форсуночных узлов. Следовало бы обосновать выбор исследуемых в диссертационной работе схем распыливания с использованием центробежной и эжекционной форсунок (глава 4).

2 В экспериментах по зажиганию твердотопливных композиций не учитывалось влияние модового состава излучения CO₂-лазера

(неоднородность распределения потока излучения в поперечном сечении луча) (раздел 3.2).

3 Следовало бы обосновать выбор пироксилина для исследования зажигания образцов переменным во времени потоком излучения (раздел 3.2.4).

4 В работе не указано, как учитывалось влияние внутрикамерного давления в законе скорости горения твердотопливного заряда $u=ay^v$ (раздел 5.1.1).

5 Формулировки решаемых в диссертации задач, представленные во введении и конце первой главы, не совпадают.

6 На рисунках 3.18 – 3.21 в диссертации и рисунке 5 в автореферате не приведен масштаб времени.

Общее заключение по работе

Сделанные замечания не снижают ценности представленной работы в целом. Анализ диссертации, автореферата и публикаций автора, соответствующих основному содержанию работы, позволяют сделать вывод, что диссертация «Исследование рабочих процессов в гибридном ракетном двигателе прямой схемы» Золоторёва Николая Николаевича представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу на актуальную тему. Для решения поставленных задач в диссертации использовались современные теоретические и практические методы исследования.

В целом по объёму и качеству изложенного материала, научной новизне и практической значимости рассматриваемая диссертационная работа Золоторёва Николая Николаевича соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней (утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842), предъявляемым к кандидатским диссертациям, и представляет собой научно-квалификационную работу, в которой содержится решение задачи, имеющей существенное значение для ракетостроительной отрасли

промышленности в плане создания перспективных двигательных установок космического назначения.

Работа достойна положительной оценки, а ее автор – Золоторёв Николай Николаевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Отзыв ведущей организации на диссертацию и автореферат обсужден и утвержден на научном семинаре Лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов ИПХЭТ СО РАН, протокол № 13 от 16.11.2018.

Главный научный сотрудник Лаборатории
физики преобразования энергии
высокоэнергетических материалов,
д.ф.-м.н., доцент

Павленко
Анатолий
Александрович

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт проблем
химико-энергетических технологий
Сибирского отделения Российской
академии наук (ИПХЭТ СО РАН)
659322, Россия, г. Бийск,
ул. Социалистическая, 1
pavlenko@ipcet.ru, тел. 8(3854) 30-14-43,
факс 8 (3854) 30-17-25.

Ученый секретарь ИПХЭТ СО РАН,
заведующий Лабораторией физики
преобразования энергии
высокоэнергетических материалов, к.т.н.

Титов
Сергей
Сергеевич