Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого» Министерства обороны Российской Федерации

143900, Московская обл., г.Балашиха, ул. Карбышева, д.8

Экз. № 1

Отзыв официального оппонента
Павловца Георгия Яковлевича
о диссертационной работе
соискателя ученой степени кандидата физико-математических наук
Золоторёва Николая Николаевича, выполненной на тему
«Исследование рабочих процессов в гибридном
ракетном двигателе прямой схемы»

Современный этап развития отечественных ракетно-космических комплексов всех видов базирования и видовой принадлежности характеризуется активным поиском новых конструктивно-компоновочных решений двигательных установок (ДУ), обеспечивающих повышение баллистической эффективности всех видов летательных аппаратов во внутри- и внеатмосферной зоне эксплуатации.

Развиваемый в настоящее время подход к модернизации ДУ заключается в применении новых, нетрадиционных способов снаряжения, к числу которых следует отнести гибридный ракетный двигатель (ГРД) на комбинированном топливе с пространственно разделенными горючим и окислителем.

Проведенными ранее исследованиями было показано, что ГРД обладает рядом преимуществ по сравнению с классическими схемами жидкостных и твердотопливных ракетных двигателей (ЖРД и РДТТ), включая относительную простоту конструкции, повышенную взрывобезопасность энергоёмких, высокоимпульсных топлив и возможность регулирования тяги в режиме многократного включения.

Однако фактором, сдерживающим реализацию данного класса двигателей, является недостаточность знаний о возможности обеспечения устойчивости процесса горения твердотопливного заряда и эффективности процесса распыливания жидкого компонента топлива.

Учитывая необходимость повышения эффективности действия ГРД в соответствии с их функциональным назначением, требуется установить закономерности горения твердотопливного заряда в потоке окислителя с

исследованием рабочих процессов в гибридном ракетном двигателе на модельных экспериментальных установках с использованием методов теории подобия и анализа размерностей.

Реализация данного подхода к решению проблемы повышения эффективности ГРД в составе ракетно-космических объектов требует проведения комплекса расчётно-теоретических и экспериментальных исследований.

В связи с этим не вызывает сомнений **актуальность темы** диссертационных исследований Золоторёва Н.Н.., **целью** которых является научно-техническое обоснование и разработка способов повышения эффективности действия гибридного ракетного двигателя путем оптимизации процессов зажигания и горения образцов высокоэнергетических материалов (ВЭМ) и зарядов твёрдого горючего материала (ТГМ).

Автор обосновал выбор темы исследований и сформулировал **научную задачу** теоретического обоснования и разработки технических и технологических решений по совершенствованию внутрикамерных процессов ГРД путём оптимизации процессов зажигания постоянным и переменным тепловым потоком составов ВЭМ иТГМ и распыливания жидкого компонента топлива.

Достижение поставленной цели обеспечивается решением задач, сформулированных автором.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы из 155 наименований, в том числе 43, автором которых по теме является Золоторёв Н.Н.

В работе на основе проведенного анализа современного состояния и направлений экспериментально-теоретических исследований рабочих процессов и разработки гибридных ракетных двигателей показано, что ГРД с пространственно разделенными горючим и окислителем, обладая рядом преимуществ по сравнению с классическими схемами ЖРД и РДТТ, позволяет существенно повысить эффективность двигательной установки с ГРД. При этом актуальным является необходимость термодинамического обоснования рецептуры твердотопливного заряда ГРД, получения данных по характеристикам зажигания и горения твердотопливного заряда ГРД и о структуре факела распыла и дисперсности капель окислительного компонента ГРД

По результатам проведенных термодинамических расчётов автором рекомендовано формировать для экспериментальных исследований составы базовых топливных композиций на основе тетразола и металлсодержащих горючих (смесей алюминия и бора при различном соотношении).

По результатам проведенных экспериментальных исследований автором установлено, что при кондуктивном подводе тепла с ростом температуры нагревательного элемента время задержки зажигания исследованных составов ВЭМ монотонно убывает. При этом повышенной воспламеняемостью обладают образцы, содержащие порошок борида титана.

При лучистом подводе тепла медленно горящие составы не способны поддерживать горение при прекращении воздействия излучения. При кондуктивном подводе тепла в условиях нагрева лучистым потоком повышенной воспламеняемостью обладают образцы, содержащие аморфный бор и борид алюминия.

Установлено, что при динамических режимах нагрева время задержки зажигания пироксилина при возрастающем тепловом потоке меньше, чем при воздействии постоянного теплового потока.

Определены константы формальной кинетики для перспективных составов ВЭМ, содержащих порошки алюминия, боридов алюминия, бора и титана, а также получены данные о скорости горения образцов ВЭМ разных компонентных составов при атмосферном и повышенном давлении образцов на основе ПХА и горючего связующего СКДМ-80 с разными металлическими добавками.

С использованием разработанных пневмогидравлического стенда и лазерно-диагностического комплекса автором были исследованы закономерностей распыливания жидких компонентов топливных композиций ГРД, пространственного распределения концентрации капель в факеле распыла и функции распределения капель по размерам. Повышение точности и информативности результатов измерений обеспечивалось за счёт применения разработанных новых схем установок для реализации метода спектральной прозрачности и метода малых углов индикатрисы рассеяния.

Получены экспериментальные данные по дифференциальной функции счетного распределения размеров капель для центробежной и эжекционной форсунок. Использование закрутки газового потока позволяет регулировать дисперсность образующихся капель.

С использованием разработанной автором математической модели и соответствующего моделирования по результатам проведенных 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.

Вполне логично, что исследования завершаются разработкой модельного ГРД "прямой схемы" и экспериментального стенда для изучения процесса горения в ГРД. При отработке модельного ГРД с зарядом ТГМ получены данные о температуре газа в форкамере, температуре и давлении в камере двигателя, данные измерений тяги двигателя.

В целом разработанные автором направления повышения эффективности действия ГРД "прямой схемы" путем оптимизации процессов зажигания и горения образцов высокоэнергетических материалов и зарядов твёрдого горючего материала, которые в совокупности с результатами исследования определяют **научную новизну** работы, включающую следующие положения:

1. Научно обоснованы и предложены к реализации технические и технологические решения и разработки по комплексной расчётно-экспериментальной оценке работоспособности высокоэнергетического состава для гибридного ракетного двигателя, сформированного на основе энергоёмкого твёрдого заряда и распыливаемого жидкого компонента.

2. Теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены закономерности влияния источника воздействующего теплового потока, интенсивности воздействующего теплового потока и изменения давления в диапазоне (0.1 ÷ 2.0) МПа на процесс зажигания и горения образцов ВЭМ и зарядов ТГМ.

3. Предложена математическая модель и представлены результаты расчетов параметров потока окислителя и скорости горения одноканального твердотопливного заряда в типичном ГРД "прямой схемы".

4. Решён ряд новых научно-технических задач по расчету и определению пространственного распределения концентрации и дисперсности капель в факеле распыла центробежной и эжекционной форсунки

Достоверность полученных в диссертации результатов обеспечивается системностью исследований, обоснованностью принятых допущений, строгостью математического описания моделей, совпадением результатов теоретических расчетов и экспериментальных исследований, а также результатами их применения в прикладных разработках, использованием аттестованных средств измерений, широкой апробацией материалов диссертации на научных конференциях и семинарах.

Практическая значимость работы заключается в том, что на основании полученных автором результатов разработан методический аппарат по формированию и исследованию композиций ВЭМ иТГМ с борсодержащими компонентами для гибридного ракетного двигателя повышенной эффективности.

Наиболее важные практические результаты состоят:

- в использовании для расчета рабочих процессов как в модельных, так и в натурных ГРД "прямой схемы" модели горения заряда ТГМ в потоке окислителя;

- в возможности прогнозировать характеристики зажигания перспективных композиций ВЭМ и ТГМ с борсодержащими компонентами по полученным константам формальной кинетики;

- в использовании метода оптимизации твердотопливного заряда, полученного в рамках диссертационного исследования, для определения направлений повышения полноты сгорания и энергетических характеристик гибридного ракетного двигателя.

Вклад диссертации Золоторёва Н.Н. в науку состоит в комплексном решении вопросов повышения энергобаллистической эффективности гибридного ракетного двигателя «прямой схемы».

Диссертация представляет собой целостную законченную научную квалификационную работу, написанную логично, в доступном изложении с использованием современного понятийного и математического аппарата.

Основные положения диссертации изложены в 43 опубликованных научных трудах, они докладывались и получили одобрение на научно-технических конференциях и симпозиумах различного уровня.

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

Тем не менее, работа не лишена отдельных недостатков:

1. Целесообразно раскрыть, в чем заключается модификация экспериментальных установок для реализации известных методов оптической диагностики двухфазных потоков - метода малых углов и метода спектральной прозрачности.

2. При аппроксимации данных по максимальному размеру капель в факеле распыла центробежной форсунки необходимо обосновать выбор критериев Re и Oh.

Указанные недостатки не снижают научной и практической значимости работы в целом. Диссертация выполнена на высоком научно-техническом уровне. Представление результатов исследований в виде схем, рисунков и таблиц концентрирует внимание на основных результатах анализа исследуемых процессов и явлений.

В целом диссертация Золоторёва Николая Николаевича является законченной научной квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена **научная задача** теоретического обоснования и разработки технических и технологических решений по совершенствованию внутрикамерных процессов ГРД путём оптимизации процессов зажигания постоянным и переменным тепловым потоком составов

ВЭМ иТГМ и распыливания жидкого компонента топлива, имеющей существенное значение для теории горения энергетических конденсированных систем.

Область исследований и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности 01.04.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

На основании изложенного считаю, что диссертация Золоторёва Николая Николаевича удовлетворяет требованиям пункта 9 раздел 2 Положения о присуждении учёных степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.17.

Официальный оппонент
старший научный сотрудник научно-исследовательского центра
Военной академии РВСН имени Петра Великого
моб. тел. 8-985-928-45-14,E-mail: g.pavlovets@yandex.ru
доктор технических наук
профессор Г.Я. Павловец

Подпись официального оппонента доктора технических наук, профессора Павловца Георгия Яковлевича заверяю.

Ученый секретарь специализированного диссертационного совета
ДС 215.003.04
кандидат технических наук В.Б. Попов

«27» ноября 2018 г.