

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель генерального директора –  
Главный конструктор,  
кандидат техн. наук



П.С. Левочкин

20 08 2018 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Галеева Антона Валерьевича  
«Разработка технологии испытаний криогенных ракетных двигателей  
с имитацией воздействующих факторов»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки  
летательных аппаратов»

### Актуальность темы диссертационной работы

Существующие и вновь проектируемые ракетные двигатели (РД), обеспечивающие конкурентоспособность на рынке космических услуг, отличаются повышенной энергонапряженностью конструкции, работают в широких диапазонах управления по тяге и соотношению компонентов. Надежность их работы во многом обеспечивается наземными испытаниями в условиях имитации факторов, соответствующих эксплуатации в составе ракеты-носителя (РН). В результате таких испытаний выявляются и устраняются различные неисправности, подтверждается правильность функционирования РД, обеспечиваются требования, предъявляемые к их надежности.

Необходимость решения научных и технических задач по повышению эффективности и безопасности проведения испытаний РД, работающих на криогенных компонентах топлива «кислород – водород» и «кислород – сжиженный природный газ», определяет актуальность темы диссертации.

### Научная новизна

1. Разработана технология поэтапной отработки РД на криогенных компонентах топлива с имитацией воздействующих факторов, обеспечивающая заданные показатели надежности двигателей.

2. Разработана методика расчета тракта «сопло-диффузор» с различными сопловыми насадками, выполненными из композиционных материалов.
3. Разработана методика определения параметров течения продуктов сгорания и запуска диффузора на основе уравнения неразрывности газа в тракте «сопло – диффузор».
4. Разработаны методики захлаживания магистралей, заправки криогенных систем, запуска двигателя с расчетными моделями процессов.
5. Предложена методика отработки сложных технических систем для подтверждения их характеристик и работоспособности при малом объеме испытаний.

### **Практическая значимость**

Технология поэтапной отработки РД на криогенных компонентах топлива на основе:

1. Оптимизации экспериментальных установок с вытеснительными и насосными системами подачи компонентов для отработки агрегатов РД;
- 2 Усовершенствования систем диагностики параметров объекта испытания и испытательного стенда на базе современных средств информационных технологий и аварийной защиты, коэффициент охвата аварийных (нештатных) ситуаций до 0,8 – 0,9 за счет применения дополнительных мер безопасности при испытаниях двигательных установок (ДУ) ракетных блоков с увеличенной заправкой бака ДУ водородом

обеспечивает требуемую надежность РД и безопасность проведения их наземных испытаний с учетом воздействия внешних факторов.

**Достоверность результатов и обоснованность научных положений** определяется тем, что они базируются на фундаментальных законах термогазодинамики и гидравлики, большом опыте экспериментальной отработки РД, на использовании сертифицированных средств измерения и сходимостью расчетов, полученных на основе разработанных методик, с результатами экспериментов.

### **Общие сведения о диссертационной работе**

Диссертационная работа Галеева А.В. состоит из введения, четырех глав, заключения, списка условных обозначений, списка использованных источников. Объем диссертации составляет 126 страницы, список цитируемых источников включает 79 ссылок.

Во **введении** обосновывается актуальность работы, сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

В **первой главе** проведен обзор существующих методов обеспечения эффективности и безопасности экспериментальной отработки (ЭО) ракетных двигателей и ДУ и эксплуатации систем испытательного стенда (ИС). Отмечена научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения работы, выносимые на защиту, и постановка задач исследования.

Во **второй главе** представлена методика повышения эффективности испытаний при ЭО ЖРД и ДУ с применением криогенных компонентов топлива. Показано, что для стендовой отработки двигателей с большой степенью расширения сопла ( $f_a$ ) используются системы имитации высотных условий с барокамерой, диффузором и парожеткторной установкой (ПЭУ). Для определения характеристик и давления запуска диффузора при испытаниях двигателя РД0146Д использованы верифицированные методика и программные комплексы (ПК) на базе газодинамических функций с моделированием процессов истечения газов для модельного и натурного выхлопного диффузора.

Обоснованы рекомендации по технологии испытаний перспективного двигателя типа РД0146Д для разгонных блоков РКС и этапы проведения:

- с охлаждаемым соплом ( $f_a=114$ ) без и с имитацией высотных условий;
- с неохлаждаемым сопловым насадком (НСН) ( $f_a=170$  и  $f_a=475$ ) с имитацией высотных условий с применением барокамеры, соответствующего выхлопного диффузора, смесителя-конденсатора и ПЭУ;
- испытания разгонного блока с двигателем, снабженным охлаждаемым соплом ( $f_a=114$ ) без имитации высотных условий.

Рассмотрены методики:

- имитации условий функционирования систем подачи (СП) стенда и двигателя на криогенных компонентах топлива в процессе захолаживания, заправки и запуска двигателя с использованием результатов, полученных при летных испытаниях разгонного блока (РБ) 12КРБ с двигателем КВД1;
- оптимизации схем экспериментальной установки с вытеснительными и насосными СП и технологии захолаживания и заправки вытеснительных СП криогенными компонентами для испытания агрегатов ЖРД.

Представлена также методика обеспечения безопасности испытаний криогенных РД и ДУ. В частности, статистика аварий, произошедших по причине выброса водорода при проведении испытаний, показывает, что развитие событий имеет заметное время, позволяющее парировать развитие аварийной (нештатной) ситуации, а коэффициент

участия водорода во взрыве  $z$  в большинстве случаев не превышает 0,1. В этой связи рассмотрены особенности испытаний и проведено обоснование испытаний на стенде НИЦ РКП ДУ с увеличенной заправкой блока РН водородом (до 7000 кг) при выполнении дополнительного комплекса мер обеспечения безопасности.

В **третьей главе** приведены результаты разработки ПК систем диагностики и аварийной защиты, реализующих выполнение дополнительного комплекса мер безопасности при испытаниях.

Показана возможность обеспечения быстродействия аппаратуры современных САЗ 0,06-0,07 с и надежности 0,978 при доверительной вероятности 0,995, что удовлетворяет требованиям обеспечения безопасности стендовых испытаний ДУ.

Рассмотрены также нештатные ситуации (НшС) при подготовке и проведении заправочных операций и испытаний РД и ДУ с взрывоопасными компонентами, обоснованы мероприятия и алгоритмы по выходу из этих ситуаций, апробированные при стендовых испытаниях ряда изделий (например, 3-я ступень РН «Ангара-А5» и др. на стендах ФКП «НИЦ РКП»), обеспечивающие при этом охват и предотвращение до 80 - 90 % НшС).

Лабораторными исследованиями показано также целесообразность применения в системах пожаровзрывопреждения ( параллельно с полупроводниковыми датчиками контроля концентраций водорода и дублирующей системой контроля температуры в двигательном отсеке ДУ) микроэлектронных датчиков с волоконно-оптическими линиями связи, построенных на основе гибридных технологий. При этом инерционность контроля утечек водорода составляет не более 2 с.

В **четвертой главе** приведены исследования по планированию комплексной отработки сложных технических систем (СТС). Показано, что оптимальные уровни числа испытаний и соответствующие им вероятности отказа могут быть выражены функцией Лагранжа, учитывающей минимизацию суммарных затрат на проведение экспериментальной отработки, при условии выполнения равенства её производной нулю.

Для этапов комплексной экспериментальной отработки уровни надежности и объемы испытаний СТС существенно зависят от числа измеряемых параметров и уровней избыточности анализируемых систем, Результаты решения представленных уравнений подтверждаются статистикой отработки агрегатов кислородно-водородного двигателя 11Д57 (с тягой 392 кН) на натуральных компонентах.

В заключительной части диссертации приведены **выводы и рекомендации**. По теме диссертации автором опубликовано 5 статей в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 2 статьи в журнале, индексируемом в Scopus,

основные положения и результаты диссертации представлены в 6 международных и всероссийских научно-технических конференциях. Всего по теме диссертации опубликовано 13 работ.

### **Рекомендации по использованию диссертации**

Результаты диссертационной работы имеют большую практическую ценность для ракетно-космической отрасли. Методики расчета систем двигателя и испытательного стенда, имитации условий эксплуатации при применении криогенных компонентов рекомендуются для внедрения в практику экспериментальной отработки перспективных двигателей и ДУ на предприятиях ракетно-космической отрасли (АО РКК «Энергия им. академика С.П. Королева», АО РКЦ «Прогресс, АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, ФКП «НИЦ РКП», АО КБХА и ФГУП КБХМ им. А.М. Исаева). Программы расчета систем ОИ и ИС и методики проведения испытаний криогенных РД рекомендуются также в качестве пособия для обучения специалистов и студентов в профильных учебных заведениях.

### **Замечания по содержанию диссертации**

1. Автор ограничил задачу исследования систем имитации высотных условий рассмотрением тракта «сопло РД – диффузор» с использованием уравнения неразрывности газа с газодинамическими функциями и коэффициента эжекции парожеторной установки без рассмотрения процессов в системе «смеситель – конденсатор – эжектор».

2. При рассмотрении теплообмена с окружающей средой в баллонах вытеснительной системы подачи с криогенной жидкостью не учитываются теплофизические свойства применяемого изоляционного материала.

Отмеченные замечания не снижают положительной оценки диссертационной работы и не влияют на ее основные результаты.

**Заключение о соответствии диссертационной работы критериям, установленным в  
Положении о присуждении ученых степеней**

Диссертация Галеева А.В. является законченной и самостоятельно выполненной научно-квалификационной работой, включающей в себя совокупность новых научных результатов и решений технических задач по разработке технологии отработки ракетных двигателей на криогенных компонентах топлива с имитацией воздействующих факторов. Цель работы достигнута. Диссертация написана технически грамотным языком, содержит логически стройный материал. Автореферат и публикации автора достаточно полно отражают основные выводы и результаты работы.

Диссертация соответствует всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, а её автор, Галеев Антон Валерьевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Диссертационная работа Галеева А.В. и данный отзыв рассмотрены и одобрены на заседании специалистов научно-исследовательского центра АО «НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко», протокол № 138 от 21.08.2018 г.

Заместитель начальника  
научно-исследовательского центра АО,  
доктор техн. наук



Д.С. Мартиросов

Начальник сектора регулирования и  
функциональной диагностики,  
доктор техн. наук



А.И. Колбасенков