

## Отзыв

### официального оппонента 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»

Диссертационная работа Галеева Антона Валерьевича посвящена решению задач по разработке технологии испытаний криогенных ракетных двигателей (РД) с имитацией воздействующих факторов, включающих соответствующие условия эксплуатации по высотности, тепло- и гидродинамике процессов в системах подачи (СП) с определением режимов настройки испытательного оборудования (ИО) и их оптимизации, программных комплексов (ПК) систем диагностики и аварийной защиты (СДАЗ) испытаний.

В настоящее время одной из важнейших научно-технических проблем является обеспечение надежной работы ЖРД, работающих на кислородно-водородном топливе при расширении диапазонов режимов работы и условий эксплуатации, что обуславливает необходимость совершенствования методик испытаний и расчета параметров для настройки систем двигателя и испытательного стенда (ИС). В связи с этим диссертация А.В. Галеева представляет научный и практический интерес, а тема является **актуальной**.

Диссертационная работа выполнена на 126 страницах текста, состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка литературы, включающего 79 наименований работ.

Во *введении* приведена общая характеристика диссертационной работы, сформулирована цель и задачи исследования, выделены объект и

предмет исследования, сформулирована научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертации.

В *первой главе* обоснована актуальность темы диссертации и необходимость решения задачи по разработке технологии испытаний криогенных ракетных двигателей с имитацией воздействующих факторов. Проведен аналитический обзор общих положений, принципов и особенностей экспериментальной отработки (ЭО) ракетно-космических систем (РКС), приведены основные положения, выносимые на защиту, и сведения об апробации работы.

Во *второй главе* детально представлены разработанные автором методика повышения эффективности и безопасности испытаний при ЭО ЖРД, снабженных сопловыми насадками с большой степенью расширения сопла и предназначенные для разгонных блоков (РБ) и верхних ступеней ракет-носителей (РН), а также методика расчета параметров течения продуктов сгорания (ПС) с использованием уравнения неразрывности газа (записанного с газодинамическими функциями) в тракте «сопло РД – диффузор» и запуска диффузора. На основе проведенных расчетов систем имитации высотных условий и верификации предложенной методики с использованием результатов численного моделирования истечения газов, полученных в ЦИАМ для модельных и натуральных условий, были выработаны рекомендации по построению этапов отработки двигателя РД0146Д с различными сопловыми насадками.

Для имитации условий функционирования СП на криогенных компонентах рассмотрены различные способы захолаживания, которые рассчитывались с использованием модели на основе уравнений сохранения массы и энергии в одномерной постановке, и по результатам обработки летных испытаний ДУ блока 12КРБ с двигателем КВД-1 были получены данные по захолаживанию расходных магистралей.

Согласно расчетов теплообмена СП проведена оптимизация



компоновки баллонов, режимов захолаживания и заполнения вытеснительной системы и показано также преимущества применения ЭУ с насосной СП с циркуляционным контуром питания и питанием газогенератора привода ТНА от испытываемых насосов для испытаний агрегатов ЖРД.

Исследования систем обеспечения безопасности испытаний позволили автору сформулировать и обобщить комплекс дополнительных мер безопасности при испытании ДУ на стенде с увеличенной дозой заправки жидкого водорода (до 7000 кг) в топливный бак ДУ.

В *третьей главе* представлены разработки программных комплексов СДАЗ, реализующие дополнительные меры безопасности при проведении испытаний. Исследования СДАЗ, отладка алгоритмов и программного обеспечения подтвердили быстроедействие аппаратуры САЗ, выполненные по одноканальной или троированной схемам с дублированием контроллеров, на уровне 0,06 – 0,07 с и надежности 0,978 (при  $\gamma=0,995$ ), удовлетворяющие требованиям безопасности испытаний.

Изложены также результаты обобщений по нештатным ситуациям при опасных операциях заправки и испытаний РД и ДУ на криогенных компонентах топлива с мероприятиями по выходу из этих ситуаций. Приведенные примеры построения систем управления и усовершенствованных СДАЗ на основе современных средств информационных технологий (ИТ) и ПК с дополнительными мерами безопасности позволяют повысить коэффициент охвата аварийных ситуаций до 0,8 – 0,9, подтвержденные при испытаниях 3-ей ступени РН «Ангара» на стенде ФКП «НИЦ РКП».

В *четвертой главе* приведены обладающие научной новизной результаты исследования по планированию комплексной отработки сложных технических систем (СТС), в которых показано, что уровни надежности и объемы испытаний СТС существенно зависят от числа измеряемых

параметров и уровней избыточности анализируемых систем. Для иллюстрации приведена статистика отработки систем кислородно-водородного двигателя 11Д57 (тяга 392 кН) на натуральных компонентах ракетного топлива.

Оценивая в целом содержание диссертационной работы, следует отметить, что автор провел большую работу по обобщению имеющегося у него материала в части расчетов, проектирования и испытаний ракетно-космических систем. Уровень обобщения достаточно высок.

Автореферат диссертации соответствует рукописи диссертации, отражает ее содержание и основные положения.

Следует отметить, что основные результаты диссертационного исследования в необходимом количестве (7 статей) опубликованы в ведущих научных рецензируемых изданиях и докладывались на всероссийских и международных научно-технических конференциях.

По тексту диссертации можно сделать следующие замечания.

1. В главы 1 не приведены ссылки на результаты экспериментально-теоретических исследований по организации высотных испытаний ЖРД, выполненные в Исследовательском Центре им. М.В. Келдыша.

2. В тексте диссертации отсутствует экспериментальное подтверждение реализации заявленных параметров СДАЗ.

3. Желательно было бы сравнить результаты оптимизации объема испытаний с результатами расчета по другим моделям, например, с использованием математической теории планирования эксперимента. И в целом в данной работе представляется ограниченным сравнение собственных результатов с результатами других авторов.

Приведенные замечания не меняют положительного мнения в работе соискателя, являющейся самостоятельно выполненным и законченным научным исследованием, в котором изложены научно-технические решения по отработке криогенных ЖРД и ДУ, имеющие существенное



