

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

**Пушкарева Дмитрия Сергеевича**

«Влияние входных давлений компонентов топлива на точность управления и регулирования многорежимных маршевых кислородно-керосиновых ЖРД типа РД191», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время развитие ракетно-космической техники достигло уровня, когда рост характеристик изделий и их тактико-технических показателей улучшается, в основном, за счет модернизации уже существующих систем, в том числе и систем управления двигателей, оставляя принцип их действия неизменным.

Анализ научно-технического задела по ЖРД в нашей стране позволяет предположить, что в ближайшие 50-70 лет запуск космических аппаратов в космическое пространство будет осуществляться с использованием ЖРД, устанавливаемых, по крайней мере, на первых ступенях ракет-носителей.

С развитием ракетно-космической техники значительно расширились требования, предъявляемые к ЖРД, например, такие как возможность широкого изменения тяги маршевых двигателей первых ступеней ракет-носителей, кроме этого стоимость запуска космического аппарата в космическое пространство и стоимость самого космического аппарата неуклонно и стремительно растет.

В настоящее время вместо одного или двух базовых режимов работы двигателя оптимизация траектории полета ракеты-носителя требует от него обеспечения возможности постоянного регулирования тяги и соотношения расходов компонентов топлива в широком диапазоне в ходе всего полета ракеты-носителя. В свою очередь проведенные исследования показали, что широкий диапазон изменения тяги двигателей первых ступеней ракет-

носителей позволяет существенно, вплоть до ~10% увеличить массу полезной нагрузки и снизить расход компонентов топлива.

В рамках создания многорежимных ЖРД одной из важнейших проблем является обеспечение высокой точности их управления и регулирования, что в свою очередь, требует проведения ряда дополнительных исследований по исследованиям влияния ранее неучтенных внешних и внутренних факторов алгоритмами управления и регулирования двигателей. Кроме этого, при глубоком дросселировании, отмечено, что некоторые из внутренних или внешних факторов влияют на двигатель совершенно иным образом, чем при его работе на номинальном режиме, в связи с чем, возникают проблемы, связанные с обеспечением его работоспособности. Именно эти вопросы, а именно вопросы влияния входных давлений компонентов топлива на тягу и соотношение расходов компонентов топлива, и рассматриваются в диссертационной работе Пушкарева Д.С. применительно к двигателю РД191 ОАО «НПО Энергомаш» им. академика В.П. Глушко.

**Структура работы.** Диссертация включает 4 главы.

**Глава 1** посвящена анализу состояния проблемы обеспечения высокоточного управления и регулирования маршевыми ЖРД в ОАО «НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко». Показано, что упрощение системы управления и регулирования двигателя увеличивает надежность двигателя и снижает его массу при необходимой точности поддержания задаваемых параметров.

**В главе 2** описаны методика настройки двигателя в процессе первого огневого испытания (КТИ), обеспечивающая его работу в полете в широком диапазоне изменения тяги, алгоритм проведения КТИ, алгоритм управления и регулирования двигателя РД191 в полете. Автор вполне обоснованно использует штатную стендовую систему управления и регулирования ЖРД, что позволило с одной стороны получить заслуживающие доверие научные результаты, а с другой- осуществить настройку двигателя по результатам контрольно-технологических испытаний.

Важным итогом выполненной в данной главе работы является примененная Д.С. Пушкаревым методика настройки системы управления и регулирования РД-191 обеспечивает высокую точность поддержания тяги и соотношения компонентов в заданных диапазонах: на всех режимах погрешность настройки по тяге и соотношению компонентов не превышает  $\pm 1\%$  при требовании в техническом задании по тяге  $\pm 2,5\%$  и соотношению компонентов топлива  $\pm 3,5\%$  на режимах дросселирования 100-65% и соответственно  $\pm 3,5\%$  и  $\pm 4,5\%$  для режимов менее 65%.

**В главе 3** выполнены экспериментально-теоретические исследования по определению влияния входных давлений компонентов топлив ОАО «НПО Энергомаш» на точность управления и регулирования ЖРД последней разработки ОАО «НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко» РД-191, отличительной особенностью которого является глубокое дросселирование тяги (27 – 30%). Для проведения необходимых расчетов автором использованы нелинейные динамические модели, учитывающие влияние внешних факторов на точность управления и регулирования двигательной установкой. Выполненные теоретические исследования позволили априори установить значительное влияние входных давлений окислителя и горючего на массовое соотношение компонентов топлива именно на режимах глубокого дросселирования, чего не было выявлено ранее при дросселировании других ЖРД, в частности РД-171М и РД-180.

Для подтверждения адекватности математической модели и достоверности результатов расчета были проведены огневые стендовые испытания разных ЖРД на различных режимах работы. В результате автором определено критическое сочетание входных давлений и температур компонентов, которые привели к срабатыванию системы аварийной защиты и выключению ЖРД по признаку превышения допустимого соотношения компонентов (3,2). Важным результатом исследований является учет возможного запредельного повышения входных параметров и их парирование с помощью выработки команд на привод управления дросселя окислителя.

Кроме того, диссертантом дополнительно предложена модификация зависимости управления ЖРД по соотношению компонентов с помощью введения поправки  $\Delta K_{\text{тр}}$ , определяемой с использованием частных производных регулируемой величины по входным давлениям окислителя и горючего. Указанные производные, являющиеся коэффициентами влияния, были определены непосредственно в процессе обработки и анализа результатов комплекса огневых стендовых испытаний РД-191 на режимах глубокого дросселирования.

Оригинальной является предложенная автором методика расчета статических давлений на входе в ЖРД с учетом значений давлений наддува баков, уровней компонентов топлива и значению продольной осевой перегрузке, которые непрерывно регистрируются в полете и поступают в систему управления ракетой-носителем.

Необходимо отметить, что все предложенные автором рекомендации были использованы и подтверждены результатами серии огневых стендовых испытаний РД-191 на испытательной базе ОАО «НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко».

**В четвертой главе** продемонстрирован один из тестовых примеров для проверки бортового программного обеспечения управления приводами регулятора и дросселя двигателя РД-191, устанавливаемого на центральном блоке ракеты-носителя «Ангара-5». Данная работа выполнена в тесном взаимодействии с предприятием-разработчиком РН «Ангара» - ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева» с учетом всех возможных вариантов полетных циклограмм, что можно оценивать как внедрение результатов диссертационной работы в практику космической деятельности России.

**Степень обоснованности научных положений и выводов.** Обоснованность научных положений и выводов, полученных в результате диссертационного исследования, подтверждается серией проведенных испытаний двигателя РД191 на стендах ОАО «НПО Энергомаш» им. академика В.П. Глушко.

**Новизна и достоверность.** Положения, выносимые на защиту, соответствуют основным тенденциям развития ракетно-космической техники. Автором диссертации разработаны алгоритмы управления и регулирования ЖРД РД191 ОАО «НПО Энергомаш» им академика В.П. Глушко при проведении доводочных испытаний двигателя и его штатной эксплуатации, которые обеспечивают высокоточное управление и регулирование с учетом существенного изменения такого внешнего фактора как входные давления компонентов топлива.

Достоверность представленных в работе выводов подтверждена в ходе успешного проведения летных испытаний двигателя РД191 в составе РН «Ангара-А5» 23.12.14г., где был использован откорректированный автором алгоритм управления и регулирования двигателя РД191.

Следует отметить, что основные результаты диссертационного исследования в необходимом количестве опубликованы в ведущих научных журналах, одобренных ВАК, и докладывались на всероссийских и отраслевых научно-технических конференциях.

Автореферат с достаточной полнотой отражает основное содержание диссертации.

В качестве замечаний и недостатков можно указать следующие.

1. Используются устаревшие термины, например, удельный вес.
2. В постановочной части диссертационной работы не рассмотрен опыт и методика управления и регулирования ЖРД с учетом глубокого дросселирования тяги, имеющиеся на ведущих предприятиях ракетного двигателестроения в России и за рубежом.
3. Не рассмотрен вопрос изменения энергетических характеристик, в частности удельного импульса ЖРД при глубоком дросселировании тяги.

Приведенные замечания не меняют положительного мнения о работе, являющейся законченным научным исследованием, в котором изложены научно-обоснованные технические решения по повышению точности управления и регулирования многорежимных маршевых кислородно-

керосиновых ЖРД, имеющие существенное значение для развития страны. Диссертация полностью отвечает требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Пушкарев Дмитрий Сергеевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Заведующий кафедрой Э-1 «Ракетные  
двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
д.т.н., профессор

 Д.А. Ягодников  
19/5 2015г.

адрес: 105005, г. Москва, ул. 2-я  
Бауманская, д. 5, стр. 1  
тел.: +7 (499) 267-89-03  
e-mail: [daj@bmstu.ru](mailto:daj@bmstu.ru)

Подпись д.т.н., проф. Ягодникова Д.А. заверяю



  
А. Г. МАТВЕЕВ  
ЗАМ НАЧ  
УПРАВЛЕНИЯ КАДРОВ  
ТЕЛ. 8499-263 67-69