

УТВЕРЖДАЮ



Генеральный директор
ФКП "НИИ РКП"

П.Н. Савчук

02 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального казенного предприятия "Научно-испытательного центра ракетно-космической промышленности" на диссертационную работу Бурцева Ивана Владимировича "Методика оценки влияния нелинейности в регуляторе на параметры автоколебаний тяги жидкостного ракетного двигателя", представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. "Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов"

Диссертационная работа Бурцева И.В. посвящена решению актуальной научно-технической задачи, заключающейся в повышении точности поддержания тяги ЖРД при его работе на режимах глубокого дросселирования, за счёт повышения точности поддержания расхода через регулятор и применения разработанной методики оценки влияния нелинейности в стабилизирующей части регулятора на амплитуду и декремент затухания автоколебаний тяги ЖРД.

Актуальность темы диссертации

С началом коммерческого освоения космического пространства расширился круг задач, решаемых с помощью ракетно-космической техники. Все более важными становятся вопросы повышения надежности ракетносителей (РН) и снижения стоимости пуска. Одно из актуальных направлений снижения стоимости пуска – это применение многоразовых элементов в конструкции РН, в том числе, возвращаемых первых ступеней с многоразовыми маршевыми двигателями. Для перспективных маршевых ЖРД на возвращаемых ракетных блоках, выполненных по схеме с дожиганием

Входящий № 2024-2149
Дата 13 МАР 2026
Самарский университет

окислительного генераторного газа, требования к диапазону регулирования тяги могут составлять вплоть до 40 % от номинального режима.

В таких ЖРД, управление тягой осуществляется регулятором за счёт изменения расхода горючего в газогенератор. Из-за особенности схемы регулирования на режимах глубокого дросселирования отклонение расхода горючего через регулятор оказывает в два раза большее влияние на отклонение тяги, чем на номинальном режиме. При некоторых условиях это приводит к автоколебаниям в диапазоне частот 3 - 4 Гц. Как известно колебания тяги оказывают существенное воздействие на динамику полета РН. Таким образом, задача обеспечения высокой точности поддержания расхода через регулятор во всем диапазоне режимов работы ЖРД является безусловно актуальной и не вызывает сомнений.

Новизна полученных результатов

Научная новизна результатов исследования прежде всего состоит в том, что автором впервые:

1. Выявлены зависимости амплитуды и декремента затухания автоколебаний тяги ЖРД от атрибутов динамической нагрузочной характеристики регулятора: угла наклона переходного участка и разности расходов между ветвями. Это обеспечило проведение адекватной оценки взаимовлияния угла наклона переходного участка для определения декремента затухания колебаний тяги и совместно с разностью расходов между ветвями, что в свою очередь определяет амплитуду колебаний тяги. Данные зависимости применительно к режимам глубокого дросселирования по тяге показывают, что нелинейные силы, возникающие при перемещении золотника стабилизирующей части регулятора, могут являться причиной возникновения автоколебаний тяги ЖРД.

2. Разработаны рекомендации по контролю атрибутов динамической нагрузочной характеристики регулятора при проведении его автономных испытаний. Предложенные автором рекомендации позволяют оценить точность поддержания расхода через регулятор при изменении перепада давления на

нем, так как повышение точности поддержания расхода через регулятор при возмущениях по перепаду давления обеспечивает снижение отклонения расхода от заданного значения, что критически важно для эксплуатации.

3. Разработана методика оценки влияния нелинейности в стабилизирующей части регулятора на параметры автоколебаний тяги ЖРД. Ее применение позволяет учесть особенности работы регулятора при оценке параметров ЖРД и выявить возможность возникновения автоколебаний тяги до проведения ОИ.

Значимость полученных результатов для науки и практики

Теоретическая значимость полученных автором диссертации результатов заключается в полученных зависимостях амплитуды и декремента затухания автоколебаний тяги ЖРД от атрибутов динамической нагрузочной характеристики регулятора.

Практический аспект значимости состоит в том, что автором:

1. Сформулированы рекомендации по проведению автономных испытаний регулятора для контроля атрибутов его динамической нагрузочной характеристики и тем самым возникает возможность прогнозирования появления автоколебаний тяги ЖРД до проведения его ОИ.

2. Предложены конструктивные изменения регулятора, направленные на повышение точности поддержания расхода через регулятор. Данные предложения внедрены в ЖРД разработки АО "НПО Энергомаш". Применение данных мероприятий обеспечивает снижение отклонения расхода от заданного значения на 52,2 % в сравнении с регулятором штатной конструкции, что в свою очередь приводит к повышению точности поддержания тяги на 2,95 %.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Предложенные автором в диссертации методические и алгоритмические средства могут быть рекомендованы к внедрению и применению при разработке математической модели функционирования регулятора, учитывающей нелинейности в стабилизирующей части за счет использования различных моделей трения и исследовании степени влияния внутренних

параметров математической модели регулятора на атрибуты динамической нагрузочной характеристики. А также в исследовании влияния нелинейных сил в стабилизирующей части регулятора на параметры автоколебаний тяги в многорежимных ЖРД с различной организацией подачи компонентов топлива в камеру сгорания.

Структура и содержание диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и списка литературы из 104 используемых источников. Общий объем работы 124 страницы текста, включая 12 таблиц и 68 рисунков.

Во введении обоснована актуальность темы, сформированы цели и задачи исследования, отмечены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен аналитический обзор подходов к обеспечению устойчивой работы современных ЖРД при их функционировании на режимах глубокого дросселирования по тяге. Проанализированы работы по исследованию механизмов возникновения автоколебаний в ракетном двигателе. Отмечено, что при определенных соотношениях параметров во внутриводвигательных контурах ЖРД возможно возникновение автоколебаний при наличии обратной связи. На основании анализа ряда параметров автор рассматривает типовой ЖРД, в котором в качестве обратной связи устанавливает зависимость характеристик турбины от характеристик насосов за счет одинаковой частоты вращения, так как они расположены на общем валу турбонасосного агрегата (ТНА).

Во второй главе приводится описание математической модели рассматриваемого типового маршевого ЖРД, выполненного по схеме с дожиганием окислительного генераторного газа. Выделены основные контуры, в которых возможно возникновение автоколебаний и представлено физическое описание механизмов возникновения автоколебаний в выделенных контурах.

Разработанная автором математическая модель включает уравнения, описывающие характеристики основных агрегатов ЖРД: насосов, турбин,

регулятора, дросселя, а также уравнения течения компонентов топлива и газа по магистралям ЖРД. Рассматриваемая система уравнений состоит из алгебраических уравнений и дифференциальных уравнений с запаздыванием.

В третьей главе представлены результаты расчетно-экспериментального исследования влияния нелинейных сил в стабилизирующей части регулятора на атрибуты его динамической нагрузочной характеристики. Автором после проведения испытаний, в ходе которых на входе в регулятор создавались колебания давления близкие к собственной частоте ЖРД на режимах глубокого дросселирования по тяге, экспериментально подтверждено, что нелинейные силы в стабилизирующей части регулятора, приводят к появлению запаздывания при перемещении золотника стабилизирующей части. Это показано на динамической нагрузочной характеристике регулятора в виде ее расслоения: различный расход через регулятор при прямом и обратном ходе.

В четвертой главе с целью верификации и валидации разработанной математической модели для режимов глубокого дросселирования приведены результаты серии расчетно-экспериментальных исследований. В начальный момент времени создавалось ступенчатое возмущение по перепаду давления на регуляторе, а далее рассчитывалось изменение параметров двигателя. В данном случае автором показано, что частота, в основном, определяется временем прохождения возмущения по обратной связи: от выхода из регулятора до входа в турбину. Можно отметить качественную сходимость результатов расчетов с экспериментальными данными.

В пятой главе на основании проведенных расчетно-экспериментальных исследований разработаны рекомендации по контролю атрибутов динамической нагрузочной характеристики регулятора при проведении его автономных испытаний, предложен способ повышения точности поддержания расхода через регулятор при возмущениях по перепаду давления с целью недопущения возникновения автоколебаний тяги ЖРД, а также разработана методика оценки влияния нелинейности в стабилизирующей части регулятора на параметры автоколебаний тяги ЖРД. Разработанная методика отличается от

существующих тем, что учитывает действительную динамическую нагрузочную характеристику регулятора при оценке функционирования ЖРД на различных режимах, в том числе на режимах глубокого дросселирования. Применение данной методики позволяет оценить точность поддержания тяги ЖРД до проведения его ОИ. Это делает возможным внедрение конструктивных мероприятий, направленных на снижение амплитуды автоколебаний тяги или полного их подавления еще на этапе проектирования.

В заключении обобщаются результаты выполненного исследования и представлены выводы по работе.

Формулировки основных результатов и выводов логически следует из содержания диссертационной работы и соответствуют научным положениям, выносим на защиту.

В целом диссертация оформлена в соответствии с требованиями, достаточно структурирована и написана технически грамотным языком. Материал изложен последовательно и логично.

Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов, сформулированных в диссертации

Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов, сформулированных в диссертации, подтверждается применением поверенного и аттестованного оборудования в процессе проведения испытаний на стендах АО "НПО Энергомаш" и высоким уровнем согласования результатов расчетов, полученных при помощи разработанной математической модели, с экспериментальными данными. Кроме того, результаты диссертации получили широкую апробацию на основе публикаций в ведущих научных журналах, в том числе рекомендованных ВАК и в материалах профильных конференций, также зарегистрирована заявка на патент.

Замечания к диссертационной работе:

1. В 2-ой главе уравнения движения окислителя и горючего через форсуночную головку газогенератора приведены с ошибками. Необходимо также добавить уравнение преобразования компонентов топлива и течения

продуктов сгорания в газогенераторе (с характерным временем задержки), которое вместе с ТНА, в основном, и определяет низкую частоту автоколебаний.

2. В 2-ой главе необходимо добавить, что наибольшими временами, определяющими время прохождения возмущения в рассмотренных автоколебательных системах, наряду со временем пребывания компонентов топлива в газогенераторе и газоведе, является также время отклика ТНА. Из разделов 4.5.2 и 4.5.3 видно, что одинаковые относительные изменения момента инерции ротора и времени пребывания газа в газогенераторе приводят к примерно одинаковому изменению частоты автоколебаний.

3. Амплитуда автоколебаний (2 и 4 главы), полученная при расчетах по приближенной математической модели без учета основных нелинейных членов не является характеристикой автоколебаний. В данном случае характеристикой являются усредненные частота и скорость роста или затухания автоколебаний (декремент).

Вышеперечисленные замечания не снижают научной и практической значимости результатов исследования, а также не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Бурцева И.В.

Заключение

Диссертационная работа Бурцева Ивана Владимировича является законченной научно-квалификационной работой, содержащей решение актуальной научной задачи, заключающейся в повышении точности поддержания тяги ЖРД при его работе на режимах глубокого дросселирования, за счёт повышения точности поддержания расхода через регулятор и применения разработанной методики оценки влияния нелинейности в стабилизирующей части регулятора на амплитуду и декремент затухания автоколебаний тяги ЖРД, имеющей теоретическое и практическое значение. Научные положения и результаты, выносимые на защиту, полностью отражены в работе и публикациях и соответствуют научной специальности 2.5.15.

"Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов".

Таким образом, диссертационная Бурцева Ивана Владимировича "Методика оценки влияния нелинейности в регуляторе на параметры автоколебаний тяги жидкостного ракетного двигателя" по научному уровню, полученным результатам, актуальности, практической и теоретической значимости, оформлению и содержанию полностью соответствует требованиям п.п. 9-14 "Положения о порядке присуждения ученых степеней", утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Бурцев И.В., заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. "Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов".

Диссертационная работа, автореферат и отзыв на диссертационную работу обсуждены и одобрены на заседании НТС ФКП "НИЦ РКП", протокол № 1/02 от 26.02.2026.

Главный специалист НИО-510, к.т.н.



В.А. Орлов

Федеральное казенное предприятие "Научно-испытательный центр ракетно-космической промышленности", 141320, Московская область, Сергиево-Посадский городской округ, г. Пересвет, ул. Бабушкина, д. 9.

Орлов Владимир Аркадьевич, главный специалист научно-исследовательского отдела НИО-510, кандидат технических наук, тел. 8(496)546-34-50, e-mail: mail@nic-rkp.ru

Подпись Орлова В.А. заверяю

Генеральный директор



П.Н. Савчук



Госкорпорация «Роскосмос»
Федеральное казенное предприятие
"Научно-испытательный центр
Ракетно-космической промышленности"



ФКП «НИЦ РКП»

Бабушкина ул., 9 д., г. Пересвет,
Сергиево-Посадский городской округ,
Московская область,
Российская Федерация, 141320,
Тел. (496)556-2270, (496)546-3321;
факс (496)546-7698; телекс 846246 АГАТ;
E-mail: mail@nic-rkp.ru
ОГРН 1025005328820; ОКПО 07540930;
ИНН/КПП 5042006211/504201001

От 03.03.2026 № ИсхП-461-957-2026

На № 104-786 от 19.02.2026

О направлении отзыва ведущей организации

Председателю диссертационного
совета 24.2.379.10

Шахматову Е.В.

ул. Московское шоссе, д. 34, г. Самара,
443086

Уважаемый Евгений Владимирович!

По результатам ознакомления с диссертационной работой Бурцева Ивана Владимировича на тему: "Методика оценки влияния нелинейности в регуляторе на параметры автоколебаний тяги жидкостного ракетного двигателя", представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15 "Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов", и обсуждения ее на заседании НТС ФКП "НИЦ РКП" направляю официальный отзыв ведущей организации.

Приложение: Отзыв ведущей организации на 8 л. в 2 экз., н/с.

Генеральный директор

П.Н. Савчук

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	3A41E4318E114512C454C575F4F973B2
Владелец:	Савчук Павел Николаевич, ФЕДЕРАЛЬНОЕ КАЗЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ НАУЧНО-ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ, Генеральн директор
Действителен:	с 13.01.2026 по 08.04.2027