

О Т З Ы В

официального оппонента кандидата технических наук, доцента, заведующего кафедрой «Авиа- и ракетостроение» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет» ЯКОВЛЕВА Алексея Борисовича на диссертационную работу БУРЦЕВА Ивана Владимировича на тему «Методика оценки влияния нелинейности в регуляторе на параметры автоколебаний тяги жидкостного ракетного двигателя», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов

1 Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из раздела «Введение», пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объём составляет 124 страницы, работа содержит 12 таблиц и 68 рисунков, список литературы включает 104 источника. По своему объёму и структуре работа соответствует требованиям Положения к оформлению диссертаций. Изложение материала диссертационной работы в основном способствует пониманию предлагаемых решений поставленных в работе задач исследования. Задачи выбраны обоснованно и грамотно, их решение приводит к достижению цели работы.

Автореферат диссертации изложен на 16 страницах и по стилю изложения материала идентичен тексту диссертации. Его содержание в целом раскрывает основные результаты, полученные соискателем.

2 Актуальность темы диссертации. Для современного развития ракетно-космической техники характерно использование маршевых жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) с турбонасосным агрегатом, регулируемых в широком диапазоне режимов работы по тяге, которые нашли применение как в возвращаемых ракетных блоках, так и, например, на вторых ступенях ракет-носителей, построенных по пакетной схеме. ЖРД по своей природе является динамической системой, для которой характерны на отдельных режимах (например, дросселирование) неустойчивость работы, склонность к автоколебаниям. Причинами возникновения данных явлений могут быть сложные внутренние связи между элементами, замкнутые контуры воздействий и пр. Для устранения негативных влияний, повышения точности поддержания режима работы ЖРД требуется проведение всестороннего анализа динамических свойств элементов системы, в том числе и регуляторов, с целью обеспечения их заданными динамическими характеристиками.

Автор в своей работе решает задачу повышения точности поддержания режима работы ЖРД и недопущения возникновения автоколебаний тяги на



режиме глубокого дросселирования за счет управления параметрами «динамической» нагрузочной характеристики регулятора. Поэтому тему диссертационной работы можно охарактеризовать как достаточно актуальную для современных исследований.

3 Основные результаты работы, степень их обоснованности и научная новизна.

В работе проведён необходимый (с учетом сделанного замечания 8.2.1) обзор и анализ наработок по исследуемой тематике, показано современное состояние проблемы по процессам, способствующим возбуждению автоколебаний в ЖРД при переходе на режимы глубокого дросселирования по тяге, выявлены не решенные до сих пор задачи, представлены и обсуждены возможные способы решения проблемы, выбран путь для достижения цели исследования.

К важным результатам работы, обладающим научной новизной, следует отнести разработку математической модели ЖРД, учитывающей действительную нагрузочную характеристику регулятора, полученную при его автономных испытаниях, а также выявление зависимостей амплитуды и декремента затухания автоколебаний тяги ЖРД от параметров «динамической» нагрузочной характеристики регулятора (угла наклона переходного участка и разности расходов между ветвями), что в итоге позволяет оценить точность поддержания расхода через регулятор при изменении перепада давления на нём.

С целью получения экспериментальной нагрузочной характеристики были проведены физические эксперименты по исследованию регулятора, которые качественно подтвердили исходные предположения по влиянию сил трения на динамику работы регулятора и составленную математическую модель процессов.

Для проверки адекватности математической модели ЖРД и его агрегатов было проведено сравнение результатов вычислений с расчетными значениями по моделям, используемым в АО «НПО Энергомаш имени академика В. П. Глушко», полученными в результате автономных испытаний агрегатов, а также в результате огневых испытаний ЖРД. Сравнение результатов показало качественную сходимость.

К основным результатам работы можно отнести также:

- экспериментальное подтверждение влияния нелинейных сил, возникающих в стабилизирующей части регулятора на запаздывание при перемещении золотника, что отражается в отклонении расхода через регулятор при прямом и обратном ходе и может являться причиной возникновения автоколебаний тяги ЖРД;

- разработку методики оценки влияния нелинейности в стабилизирующей части регулятора на параметры автоколебаний тяги ЖРД, включающую проведение автономных испытаний регулятора, с определением параметров нагрузочной характеристики;

Обоснованность научных положений и выводов, сформулированных на основании выполненных исследований, подтверждается корректностью применения математического аппарата, базирующегося на фундаментальных методах и использующего апробированные, многократно доказавшие адекватность, теории, не противоречащие известным положениям гидродинамики.

В целом научные положения, выносимые на защиту, рекомендации и выводы, сделанные автором по итогам выполнения им диссертационной работы, являются вполне обоснованными, логичными и не содержат противоречий.

4 Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается применением поверенного и аттестованного оборудования в процессе проведения испытаний на стендах АО «НПО Энергомаш имени академика В. П. Глушко» и высоким уровнем согласования расчётных данных, выполненных по предложенной математической модели ЖРД, с результатами автономных испытаний регуляторов и огневых испытаний ЖРД, а также их сходимостью со значениями, полученными по известным математическим моделям.

5 Практическая значимость работы.

Автором в результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований сформулированы рекомендации по проведению автономных испытаний регулятора для определения параметров его действительной нагрузочной характеристики, которые позволяют оценить точность поддержания расхода через регулятор при изменении перепада давления на нём, а также прогнозировать появление автоколебаний тяги ЖРД до проведения его огневых испытаний. Кроме этого, предложены конструктивные изменения регулятора, направленные на повышение точности поддержания расхода через регулятор и внедрённые в разработки АО «НПО Энергомаш имени академика В. П. Глушко».

Несомненную научно-практическую значимость работы можно отнести к ее положительным сторонам.

6 Апробация и опубликованность основных результатов работы. Количество публикаций, в которых излагаются основные результаты диссертации, соответствует требованиям пп. 11 и 13 «Положения о присуждении учёных степеней». К работам по теме диссертации автором отнесены семь научных трудов, четыре (все по научной специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов) из которых входят в Перечень изданий, рекомендованных ВАК.

С другой стороны, результаты диссертации были в достаточной мере представлены автором и обсуждены на различных симпозиумах, конференциях и семинарах (3 позиции), в том числе Академических чтениях по космонавтике (г. Москва, 2019 г.). Это позволяет сделать вывод о

достаточной апробации и опубликованности основных результатов диссертационной работы.

7 Соответствие диссертации паспорту специальности.

Проведённые в работе исследования, на мой взгляд, отвечают следующим направлениям исследований паспорта научной специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов:

- п. 8. Колебания в тепловых двигателях летательных аппаратов. Резонансные явления, автоколебательные и нестационарные процессы в конструкциях двигателей. Способы борьбы с опасными вибрациями в двигателях.

- п. 11. Управление и регулирование двигателей, силовых и энергетических установок в целом, вопросы устойчивости их работы.

- п. 13. Математическое моделирование рабочих процессов, характеристик, динамических процессов, рабочих состояний двигателей и энергетических установок, стадий и этапов их жизненного цикла (создания, производства, эксплуатации и утилизации).

8 Замечания по диссертационной работе.

8.1 Замечания содержательного характера.

1. В автореферате и диссертации отсутствует пункт на соответствие паспорту специальности 2.5.15.

2. В диссертации отсутствует список условных обозначений, что затрудняет осмысление содержания работы, особенно в части математического описания моделей (например, п. 2.2 и др.).

3. При математическом описании участка нагрузочной характеристики, представленной на рис. 2.3, в выражении (2.25) использована функция \tanh , однако обоснования не представлено, будет ли такое представление корректным.

4. При анализе колебательной системы (п. 2.3.1) принято, внесенное возмущение представляет собой изменение температуры в газогенераторе (ГГ), однако график возмущения рис. 2.7 показан после реакции системы на это возмущение (частота вращения ТНА), что несколько запутывает описание. Не приведены основные исходные данные по ЖРД для расчетов этих реакций (в том числе относительной тяги), или хотя бы величины отклонения температуры ГГ. Аналогично это повторяется и в п. 2.3.3, а также в гл. 5.

Таким образом следует отметить, на мой взгляд, что в работе уделено недостаточное внимание математически формализованному и обоснованному описанию и расчету динамических процессов, что, несомненно, повысило бы достоверность результатов работы.

5. Описание в главах 3 и 4 проведенных экспериментов (испытаний) отходит от канонов – не описаны подробно план, варьируемые параметры и их диапазоны, методы измерения и условия проведения, не представлено

планирование эксперимента, нет методики обработки полученных данных. Все это отчасти снижает достоверность результата и может говорить, на мой взгляд, больше о качественном подтверждении полученных результатов (табл. 3.1, рис. 3.10, 3.11, и далее табл. 4.1).

8.2 Замечания методического характера.

1. На мой взгляд, недостаточно внимания в главе 1 уделено аналитическому обзору по механизмам и причинам возникновения автоколебаний на режимах глубокого дросселирования, а также факторам, влияющим на данный процесс.

2. Уравнения математической модели (п. 2.2) приведены без описания учтенных факторов и допущений, можно лишь догадываться, что, например, была учтена инерция столба жидкости в форсуночной головке (выражение (2.2)), но не были учтены различия в геометрии форсунок. Это несколько затрудняет сделать вывод об адекватности модели.

3. Некоторые введённые автором определения, на мой взгляд, не совсем корректны. Например, это касается «динамической нагрузочной характеристики», которой по факту является зависимость параметров на установившихся режимах, тогда как динамической характеристика будет, если функция будет зависеть от времени.

4. В заключении кроме приведения результатов, по моему мнению, следовало бы еще сделать вывод о достижении цели работы путём решения всех поставленных задач.

8.3 Замечания по оформлению.

1. В диссертации присутствуют орфографические и пунктуационные ошибки.

2. Имеются опечатки и неточности на рисунках, например, на с. 29 диссертации упоминается точка А, отсутствующая на рис. 1.16.

3. Имеются ошибки в математических выражениях, например, выражение (2.1) на с. 37 ошибочно и не сходится в размерности, а в (2.10)-(2.12) в правой части второе слагаемое должно иметь знак «минус».

4. На некоторых рисунках (например, рис. 2.3) показан общий вид графика функции, а не сама функция (нагрузочная характеристика).

Все отмеченные замечания носят частный характер и не влияют на общую положительную оценку работы, а лишь преследуют цель всестороннего обсуждения представленной к защите научной работы.

9 Заключение по диссертации. На основании изучения материалов диссертации, автореферата и основных публикаций по теме диссертации, на мой взгляд, можно сделать вывод о том, что в целом работа является законченным научным исследованием, выполненным соискателем самостоятельно и на достаточно высоком научном уровне. В результате решения поставленных в работе задач получены результаты, обладающие научной новизной и имеющие практическую значимость. Эти результаты подтверждены экспериментально. Разработана методика оценки влияния

нелинейности в стабилизирующей части регулятора на параметры автоколебаний тяги ЖРД, включающая проведение автономных испытаний регулятора. Разработаны рекомендации по контролю параметров «динамической» нагрузочной характеристики регулятора и предложены конструктивные мероприятия, направленные на повышение точности поддержания расхода через регулятор при возмущениях по перепаду давления.

Исходя из вышеизложенного, считаю, что диссертационная работа БУРЦЕВА Ивана Владимировича на тему «Методика оценки влияния нелинейности в регуляторе на параметры автоколебаний тяги жидкостного ракетного двигателя», представленная к защите по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов, содержит новые научно обоснованные технические решения и разработки, имеющие существенное значение для повышения точности поддержания режима работы по тяге ЖРД, соответствует п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней», а её автор – Бурцев И.В. – заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по указанной специальности.

Официальный оппонент,
заведующий кафедрой «Авиа- и ракетостроение»
федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования
«Омский государственный технический университет»,
к.т.н., доцент

Алексей Борисович Яковлев

«17» 03 2026 г.

Сведения об оппоненте:

1. ФИО: Яковлев Алексей Борисович.
2. Служебный адрес: 644050, г. Омск, проспект Мира, 11.
3. Служебный телефон: (3812) 25-75-77.
4. E-mail: yakovlev@omgtu.ru .
5. Организация: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет» (ОмГТУ).
6. Должность: заведующий кафедрой «Авиа- и ракетостроение».

Подпись Яковлева Алексея Борисовича удостоверяю:

Ученый секретарь ученого совета ОмГТУ

А.Ф. Немцова

«17» 03 2026 г.

М.П.

