

Бурцев Иван Владимирович

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ
НЕЛИНЕЙНОСТИ В РЕГУЛЯТОРЕ
НА ПАРАМЕТРЫ АВТОКОЛЕБАНИЙ ТЯГИ
ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели
и энергоустановки летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в акционерном обществе «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко».

Научный руководитель: Левочкин Петр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, акционерное общество «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко», заместитель генерального директора – главный конструктор.

Официальные оппоненты:

Ягодников Дмитрий Алексеевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», заведующий кафедрой «Ракетные двигатели»;

Яковлев Алексей Борисович, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», заведующий кафедрой «Авиа- и ракетостроение».

Ведущая организация: федеральное казённое предприятие «Научно-испытательный центр ракетно-космической промышленности», г. Пересвет.

Защита диссертации состоится 17 апреля 2026 года в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.2.379.10, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» и на сайте: https://ssau.ru/resources/dis_protection/burcev.

Автореферат разослан _____._____ 2026 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.379.10

А.С. Виноградов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. С началом коммерческого освоения космического пространства расширился круг задач, решаемых с помощью ракетно-космической техники. Все более важными становятся вопросы повышения надёжности ракет-носителей (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.

В томах №28–30 сборника «Труды НПО Энергомаш» отмечено, что в процессе отработки двигателя на режимах глубокого дросселирования по тяге, возникали автоколебания в диапазоне частот от 3 до 4 Гц. Под режимами глубокого дросселирования жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) в данной работе считаются режимы по тяге ниже 40% от номинального значения. На рисунке 1 представлено изменение давления горючего в смесительной головке камеры сгорания в процессе огневого испытания (ОИ) при работе двигателя на режиме 30% от номинального значения тяги.

Тяга ЖРД прямо пропорциональна давлению в камере сгорания. Поэтому амплитуды колебаний давления в камере сгорания и тяги равны и, в данном случае, составляют 20 % от исходных значений. Колебания тяги оказывают воздействие на динамику полёта РН.

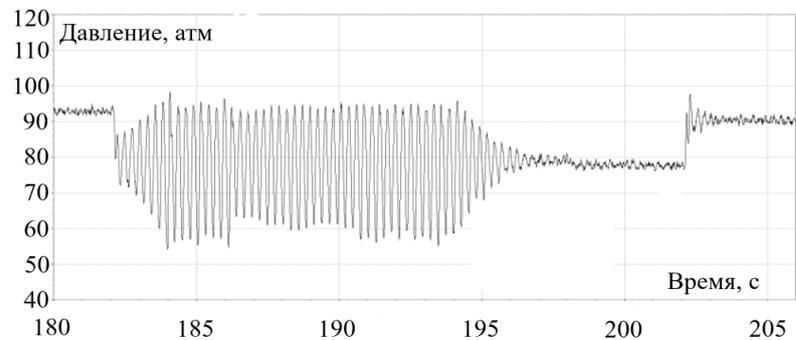


Рисунок 1 – Изменение давления горючего в процессе ОИ

В современных РН, выполненных по пакетной схеме расположения первой и второй ступеней, как правило, двигатели первой и второй ступени запускаются при старте РН, затем, двигатель второй ступени дросселируется и долгое время функционирует на режиме пониженной тяги для экономии топлива. Поэтому важно обеспечить устойчивую работу маршевых ЖРД, в том числе на режимах глубокого дросселирования по тяге, для обеспечения их функционирования в составе существующих РН и, в перспективе, для применения на возвращаемых ракетных блоках.

В ЖРД, выполненном по схеме с дожиганием окислительного генераторного газа, управление тягой, как правило, осуществляется за счёт изменения расхода горючего в газогенератор посредством регулятора.

На рисунке 2 приведена зависимость относительных расходов (отношение расхода на текущем режиме по тяге к расходу на номинальном режиме) окислителя и горючего, поступающих в газогенератор, от относительной тяги двигателя \bar{R} .

В диапазоне \bar{R} от 80 до 100% $d\bar{m}_{ГОР}/d\bar{R}=1,585$.
В диапазоне \bar{R} от 30 до 40% $d\bar{m}_{ГОР}/d\bar{R}=0,794$.

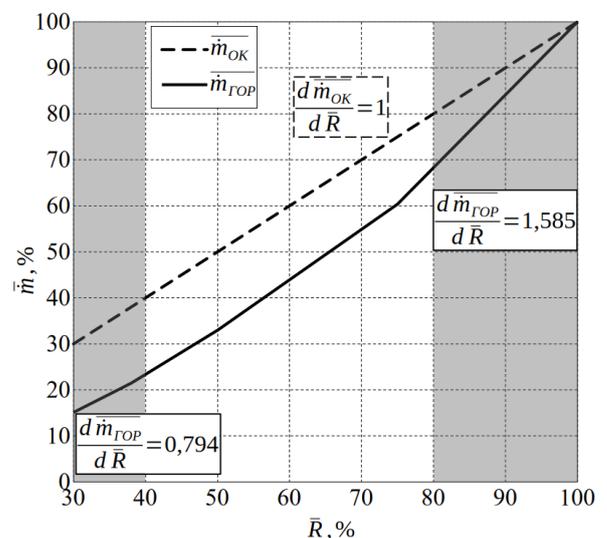


Рисунок 2 – Зависимость относительных расходов от тяги

Таким образом, в диапазоне значений \bar{R} от 30 до 40 % отклонение расхода горючего через регулятор оказывает в 2 раза большее влияние на отклонение тяги, чем на номинальном режиме. Это является особенностью выбранной схемы регулирования. Поэтому актуальной является задача обеспечения высокой точности поддержания расхода через регулятор при функционировании ЖРД, в особенности, на режимах глубокого дросселирования, с целью недопущения возникновения автоколебаний тяги.

Степень разработанности темы.

В работах Колесникова К.С., Харкевича А.А. отмечено, что гидравлические системы РН являются потенциально автоколебательными и важной задачей является недопущение возникновения в них автоколебаний. Солодовниковым В.В., Бабкиным А.И. предложены подходы к анализу устойчивости автоколебательных систем, применительно к системам автоматического регулирования и системам управления ЖРД.

Беляевым Е.Н., Мартиросовым Д.С. предложена методика расчёта стационарных и переходных процессов в ЖРД, выполненном по схеме с дожиганием окислительного генераторного газа. В работах Кошелева И.М. и Мартиросова Д.С. рассмотрены причины появления колебаний в ЖРД на режимах глубокого дросселирования по тяге и предложены способы их подавления.

Гимадиевым А.Г., Лебединским Е.В. представлена методика выбора параметров и расчёта статических и динамических характеристик регулятора и их влияния на устойчивость ЖРД.

В работах Гликмана Б.Ф. отмечено, что в некоторых случаях нелинейности в гидравлических регуляторах оказывают сильное влияние на устойчивость и точность системы регулирования. Приведён обзор устойчивости системы «двигатель-регулятор» с нелинейностью в регуляторе. Шориным В.П. и Горячкиным А.А. проведено исследование динамических характеристик регуляторов различных конструкций с учётом влияния нелинейностей характеристик дросселирующих элементов.

Цель работы. Повышение точности поддержания тяги ЖРД при его работе на режимах глубокого дросселирования.

Задачи работы:

1. Проанализировать процессы, способствующие возбуждению автоколебаний при переходе на режимы глубокого дросселирования по тяге и разработать математическую модель ЖРД, учитывающую действительную нагрузочную характеристику регулятора и обеспечивающую проведение вариантных расчётов параметров динамических процессов.
2. Провести экспериментальное исследование влияния нелинейных сил в стабилизирующей части регулятора на точность поддержания расхода через регулятор и на атрибуты его динамической нагрузочной характеристики: угол наклона переходного участка и разность расходов между ветвями.
3. Выявить зависимости между атрибутами динамической нагрузочной характеристики регулятора и параметрами автоколебаний тяги ЖРД: амплитудой и декрементом затухания.
4. Разработать рекомендации по контролю атрибутов динамической нагрузочной характеристики регулятора при проведении его автономных испытаний.
5. Предложить способ повышения точности поддержания расхода через регулятор, а также разработать методику оценки влияния нелинейности в стабилизирующей части регулятора на амплитуду и декремент затухания автоколебаний тяги ЖРД.

Объект исследования. Автоколебания тяги типового ЖРД, выполненного по схеме с дожиганием окислительного генераторного газа.

Предмет исследования. Регулятор, управляющий подачей горючего в газогенератор типового ЖРД, выполненного по схеме с дожиганием окислительного генераторного газа.

Научная новизна:

1. Впервые выявлены зависимости амплитуды и декремента затухания автоколебаний тяги ЖРД от атрибутов динамической нагрузочной характеристики регулятора: угла наклона переходного участка и разности расходов между ветвями.

2. Впервые разработаны рекомендации по контролю атрибутов динамической нагрузочной характеристики регулятора при проведении его автономных испытаний. Они позволяют оценить точность поддержания расхода через регулятор при изменении перепада давления на нём.

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

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость работы заключается в полученных зависимостях амплитуды и декремента затухания автоколебаний тяги ЖРД от атрибутов динамической нагрузочной характеристики регулятора: угла наклона переходного участка и разности расходов между ветвями.

Практическая значимость работы заключается:

- в сформулированных рекомендациях по проведению автономных испытаний регулятора для контроля атрибутов его динамической нагрузочной характеристики;

- в возможности прогнозирования появления автоколебаний тяги ЖРД до проведения его огневых испытаний. Для чего необходимо учитывать действительную динамическую нагрузочную характеристику регулятора, полученную при его автономных испытаниях для проведения расчётов по математической модели ЖРД;

- в предложенных конструктивных изменениях регулятора, направленных на повышение точности поддержания расхода через регулятор и внедрённых в ЖРД разработки АО «НПО Энергомаш». Выпущен Акт о внедрении №777/270 от 23.10.2025 г. и зарегистрирована заявка на патент рег. № 2024130241 от 08.10.2024 г. Повышение точности поддержания расхода через регулятор обеспечивается за счёт уменьшения нелинейных сил в стабилизирующей части регулятора и необходимо для повышения точности поддержания поддержания тяги и недопущения возникновения автоколебаний тяги, в особенности, на режимах глубокого дросселирования ЖРД.

Положения, выносимые на защиту:

1. Выявленные зависимости частоты и декремента затухания автоколебаний в рассматриваемом типовом ЖРД от атрибутов динамической нагрузочной характеристики регулятора: угла наклона переходного участка и разности расходов между ветвями.

2. Рекомендации по контролю атрибутов динамической нагрузочной характеристики регулятора при проведении его автономных испытаний.

3. Разработанная методика оценки влияния нелинейности в стабилизирующей части регулятора на амплитуду и декремент затухания автоколебаний тяги рассматриваемого типового ЖРД.

Достоверность полученных результатов подтверждается применением поверенного и аттестованного оборудования в процессе проведения испытаний на стендах АО «НПО Энергомаш» и высоким уровнем согласования расчётных данных с результатами испытаний.

Апробация результатов исследования. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на XLIII Академических чтениях по космонавтике, посвящённых памяти академика С.П. Королёва (Москва, 2019 г.), I Молодёжной научно-практической конференции «Инновации и исследования как двигатель науки» посвящённой памяти В.К. Чванова (Химки, 2022 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Ракетно-космические двигательные установки», посвящённой 75-летию со дня основания кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2023 г.), Молодёжной научно-технической конференции «Будущее ракетных двигателей и космических энергоустановок» посвящённой 90-летию юбилею со дня основания АО ГНЦ «Центр Келдыша» (Москва, 2023 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 работ, из них 4 в изданиях, входящих в перечень ВАК для публикации материалов диссертации.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 5-ти глав, выводов и списка литературы из 104 используемых источников. Общий объём работы 124 страниц текста, 12 таблиц, 68 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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 Горячкина А.А., Гликмана Б.Ф., Михайлова В.В., Овсянникова Б.В., и других, в которых рассмотрены механизмы возникновения автоколебаний в ракетном двигателе. ЖРД является потенциально автоколебательной системой и при определённых соотношениях параметров во внутривдвигательных контурах возможно возникновение автоколебаний, для этого необходимо наличие обратной связи. В рассматриваемом типовом ЖРД обратной связью является зависимость характеристик турбины от характеристик насосов за счёт одинаковой частоты вращения, так как они расположены на общем валу турбонасосного агрегата (ТНА). По результатам анализа были сформулированы задачи исследования.

Во второй главе разработана математическая модель рассматриваемого типового маршевого ЖРД. Выделены основные контуры, в которых возможно возникновение автоколебаний и представлено физическое описание механизмов возникновения автоколебаний в выделенных контурах.

На рисунке 3 представлена структурно-функциональная схема исследуемого типового ЖРД, выполненного по схеме с дожиганием окислительного генераторного газа. Выделены основные контуры с обратными связями, в которых возможно возникновение автоколебаний. Контур 1 включает в себя насос окислителя, газогенератор, проточную часть и турбину. Контур 2 состоит из насоса окислителя, газогенератора, проточной части, турбины, газоведа до бустерного насоса и турбины. Контур 3 включает в себя насос горючего, регулятор, газогенератор, проточную часть и турбину.

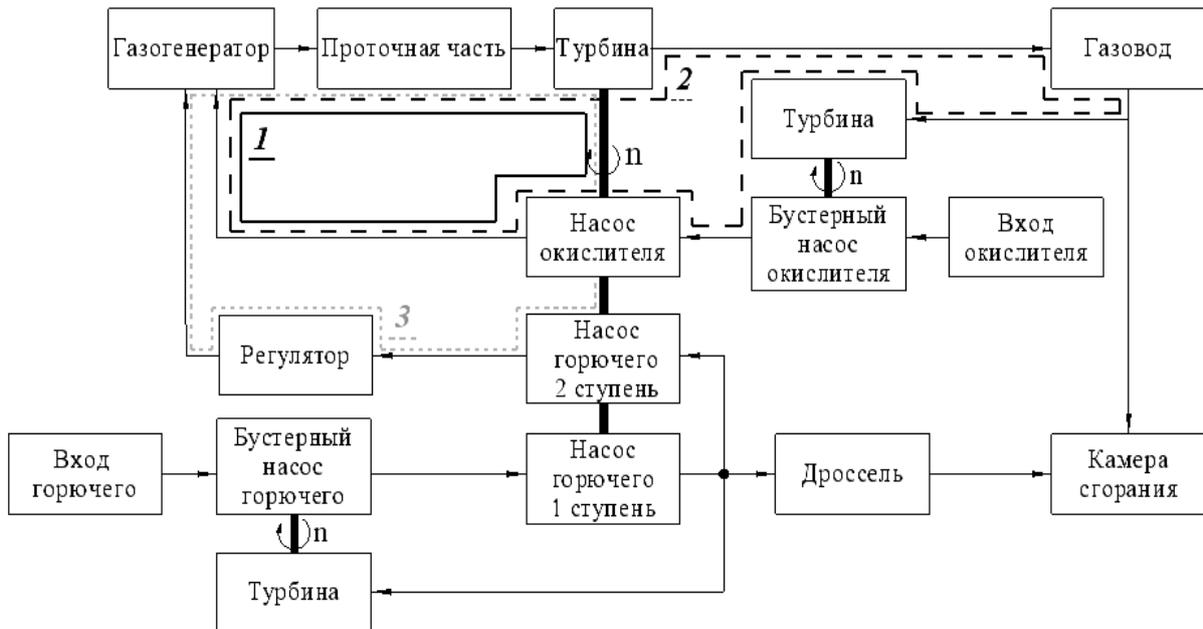


Рисунок 3 – Структурно-функциональная схема ЖРД

Разработана математическая модель рассматриваемого типового ЖРД на основании уравнений, приведённых в работах Беляева Е.Н., Чванова В.К., Червакова В.В. 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. Дифференциальные уравнения решались численно, методом Рунге-Кутты 4 порядка.

В работах Гликмана А.Ф., Горячкина А.А. сделан вывод, что нелинейные силы в регуляторе являются причиной отклонения расхода от заданного значения, что может, при определённых условиях приводить к возникновению автоколебаний в ЖРД, а также представлена методика оценки устойчивости системы «двигатель-регулятор». Однако отсутствует анализ влияния атрибутов нагрузочной характеристики регулятора на амплитуду и декремент затухания автоколебаний тяги ЖРД.

На рисунке 4 представлена схема регулятора, который состоит из дросселирующей и стабилизирующей частей, находящихся в корпусе 7. Дросселирующая часть регулятора состоит из приводного валика 1, связанного с гильзой 2 посредством зубчатой передачи, гильза при

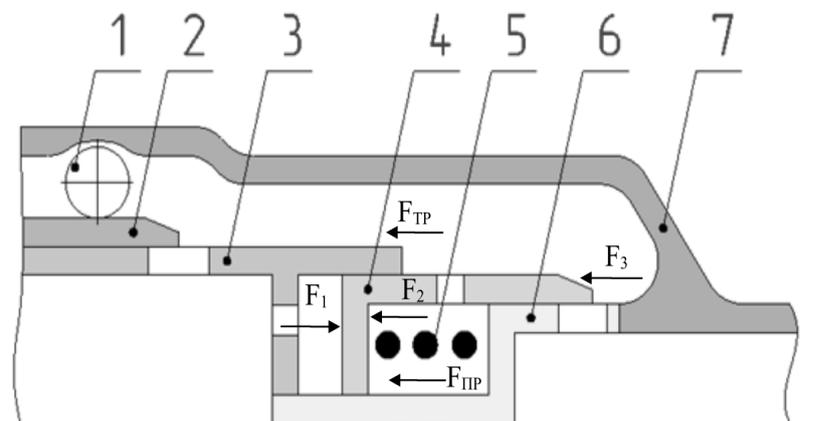


Рисунок 4 – Схема регулятора

перемещении перекрывает окна в направляющей 3. Стабилизирующая часть регулятора состоит из золотника 4, перекрывающего окна в направляющей 6 и пружины 5.

Положение золотника 4 в стационарной постановке определяется балансом сил от сжатия пружины $F_{\text{пр}}$ и перепадом давления на золотнике $F_1 - F_2 - F_3$. Однако, при определении характера изменения расхода при переходных процессах появляется нелинейная сила – сила трения $F_{\text{тр}}$, действующая на золотник 4. Уравнение 1 описывает зависимость положения золотника 4 от баланса сил на нём.

$$m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} + D \cdot \frac{dx}{dt} + c \cdot x = F_1 - F_2 - F_3 - F_{\text{тр}}, \quad (1)$$

где x – положение золотника 4 относительно направляющей 6, c – жёсткость пружины, D – коэффициент вязкостного трения, m – масса золотника 4.

В статической постановке, без учёта переходных процессов, расход через регулятор зависит от двух параметров — заданного положения дросселирующей части и перепада давления на регуляторе. При автономных испытаниях регуляторов определяют две характеристики – настроечную и нагрузочную. Настроечная характеристика представляет зависимость расхода через регулятор от положения дросселирующей части и определяется при постоянном перепаде давления. Нагрузочная характеристика – это зависимость расхода через регулятор от перепада давления на нём и определяется при постоянном положении дросселирующей части.

Как правило, данные характеристики снимают в статической постановке. Применительно к нагрузочной характеристике регулятора это означает, что рабочий диапазон перепадов давления на регуляторе делится на конечное количество точек, определение расхода в каждой точке производится после завершения переходных процессов. Расход в каждой точке определяется два раза — при прямом и обратном ходе регулятора (при увеличении и уменьшении перепада давления на регуляторе). Далее, полученные значения аппроксимируются.

Описанный подход позволяет определить характеристики регулятора для обеспечения точной настройки ЖРД на стационарные режимы, однако не учитывает отклонение расхода от заданного значения из-за запаздывания при перемещении стабилизирующей части регулятора в процессе изменения перепада давления на нём.

На рисунке 5 приведены две теоретические нагрузочные характеристики регулятора. Нагрузочная характеристика 1 определена в статической постановке и содержит два характерных участка: 0-1 переходный участок, 1-3 рабочий участок. Можно отметить незначительное изменение расхода на рабочем участке 1-3. При прямом и обратном ходе регулятора значение расхода будет неизменно располагаться на прямой 1-3.

Нагрузочная характеристика 2 отражает функционирование регулятора в динамике, с учётом запаздывания при перемещении золотника стабилизирующей части из-за воздействия нелинейных сил в процессе изменения перепада давления на регуляторе.

Как видно из рисунка, на рабочем участке 1-3, запаздывание перемещения золотника стабилизирующей части при



Рисунок 5 – Нагрузочные характеристики регулятора

изменении перепада давления на регуляторе приводит к расслоению нагрузочной характеристики. Появляется отличие в расходе через регулятор при прямом и обратном ходе с возникновением двух ветвей: 2`-2 и 4`-4. Это объясняется тем, что стабилизирующая часть регулятора не успевает встать в положение, обеспечивающее поддержание постоянного расхода, в процессе изменения перепада давления.

Здесь и далее, нагрузочная характеристика регулятора, определённая с учётом переходных процессов при перемещении стабилизирующей части, называется «динамической нагрузочной характеристикой».

Для проведения дальнейшего исследования выделим ключевые атрибуты динамической нагрузочной характеристики, представленные на рисунке 5: угол наклона переходного участка α и разность расходов между ветвями $\Delta \dot{m}$.

Переходный участок 4`-4-2-3 динамической нагрузочной характеристики (рисунок 3) можно описать зависимостью 2.

$$\dot{m} = A \cdot \tanh(B \cdot \Delta p_{pp}) + C, \quad (2)$$

где \dot{m} – массовый расход через регулятор, Δp_{pp} – перепад давления на регуляторе, А, В, С – эмпирические коэффициенты, определённые на основании автономных испытаний регулятора.

При расчёте функционирования ЖРД на стационарном режиме в небольшой окрестности, относительно установившегося перепада давления на регуляторе, зависимость (2) позволяет описать изменение расхода при прохождении возмущения по перепаду давления на регуляторе для последующего проведения оценки параметров автоколебаний.

Использование зависимости 2, описывающей динамическую нагрузочную характеристику регулятора и составленной с учётом результатов автономных испытаний регулятора, является основным отличием разработанной математической модели рассматриваемого типового ЖРД от моделей, представленных в литературе.

Динамическая нагрузочная характеристика 2, представленная на рисунке 5, построена на основе представленной в работах Гликмана Б.Ф. характеристики регулятора с учётом «неоднозначности, связанной с сухим трением», при этом верхняя ветвь соответствует прямому ходу, а нижняя — обратному. В действительности, не исключён и противоположный случай, поэтому изучение данной особенности требует отдельного исследования и выходит за рамки данной работы.

В третьей главе представлены результаты расчётно-экспериментального исследования влияния нелинейных сил в стабилизирующей части регулятора на атрибуты его динамической нагрузочной характеристики. Приведены результаты экспериментальных работ в диапазоне расходов и перепадов давления, соответствующих режимам глубокого дросселирования ЖРД по тяге. Работы организованы с целью оценки переходных процессов изменения расхода при функционировании регулятора. Испытания проводились на аттестованном стенде с вытеснительной системой подачи и использованием поверенных и калиброванных средств измерения.

В процессе испытаний на входе в регулятор создавались колебания давления с частотой 4 Гц, что близко к собственной частоте ЖРД на режимах глубокого дросселирования по тяге, и регистрировалось изменение перепада давления и расхода через регулятор. На рисунке 6 приведено изменение перепада давления на регуляторе и расхода через регулятор в течение одного периода колебаний. На рисунке 7 представлен фрагмент динамической нагрузочной характеристики регулятора за соответствующий период времени. Цифры в кружках на

рисунке 7 обозначают участки изменения перепада давления расхода через регулятор во временных интервалах, отмеченных на рисунке 6.

Внешний вид полученной по результатам автономных испытаний регуляторов динамической нагрузочной характеристики соответствует теоретической, представленной на рисунке 5.

На экспериментально полученной динамической нагрузочной характеристике регулятора наблюдается расслоение расхода при прямом и обратном ходе.

На рисунке 7 отмечены атрибуты динамической нагрузочной характеристики: α – угол наклона переходного участка, $\Delta \dot{m}$ – разность расходов между ветвями.

Экспериментально подтверждено, что нелинейные силы в стабилизирующей части регулятора, приводят к появлению запаздывания при перемещении золотника стабилизирующей части. Это наблюдается на динамической нагрузочной характеристике регулятора в виде её расслоения: различный расход через регулятор при прямом и обратном ходе.

Результаты проведённых экспериментальных исследований свидетельствуют, что увеличение нелинейных сил в стабилизирующей части регулятора приводит к увеличению запаздывания при перемещении стабилизирующей части регулятора, что, в свою очередь, приводит к увеличению угла α переходного участка и увеличению разности расходов между ветвями $\Delta \dot{m}$. Это отражается в большем расслоении расходов на динамической нагрузочной характеристике регулятора.

В четвёртой главе верифицирована и валидирована математическая модель рассматриваемого типового ЖРД, определено влияние атрибутов динамической нагрузочной характеристики регулятора на амплитуду и декремент затухания автоколебаний, возникающих в ЖРД на режимах глубокого дросселирования по тяге.

Проведена серия расчётов тяги и внутренних параметров ЖРД по разработанной математической модели для режимов глубокого дросселирования. В начальный момент времени создавалось ступенчатое возмущение по перепаду давления на регуляторе, далее рассчитывалось изменение параметров двигателя. Для расчётов №1, 2, 3 использовались следующие атрибуты динамической нагрузочной характеристики регуляторов: разность

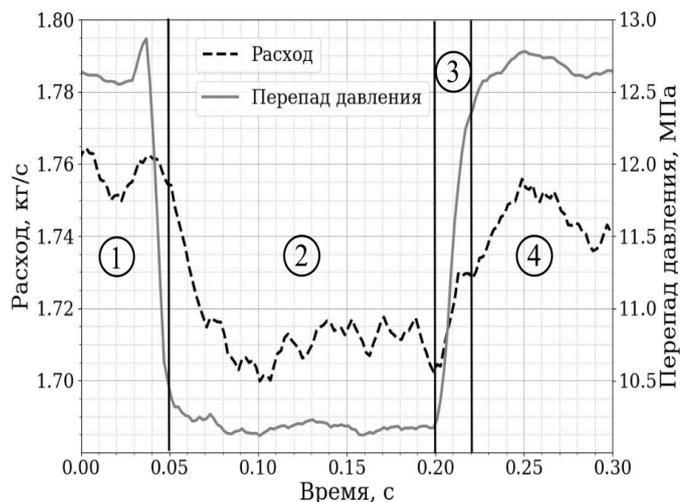


Рисунок 6 – Зависимость расхода и перепада давления на регуляторе от времени

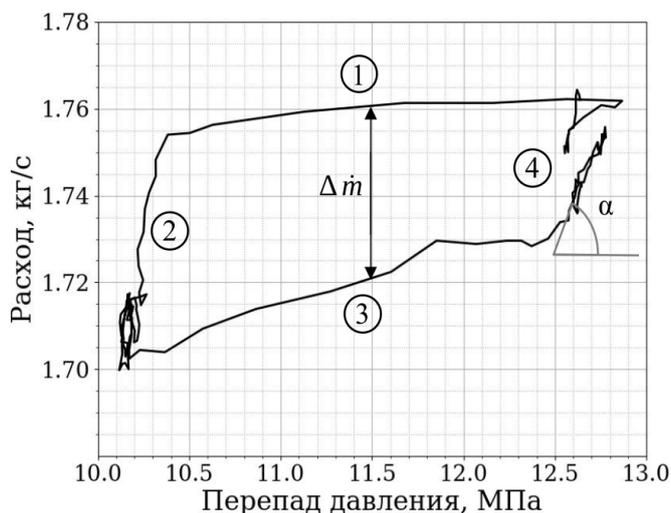


Рисунок 7 – Экспериментальная динамическая нагрузочная характеристика регулятора

расходов между ветвями $\Delta \dot{m}$ 0,0116; 0,03; 0,04 кг/с, тангенс угла наклона переходного участка α 0,025; 0,056; 0,073. Данные значения получены на основании проведённых автономных испытаний регуляторов.

На рисунке 8 приведено изменение тяги в процентах от номинального значения \bar{R} , рассчитанное по разработанной математической модели ЖРД. Как известно, частота автоколебаний определяется исключительно параметрами системы и не зависит от возмущающего воздействия. В данном случае, частота, в основном, определяется временем прохождения

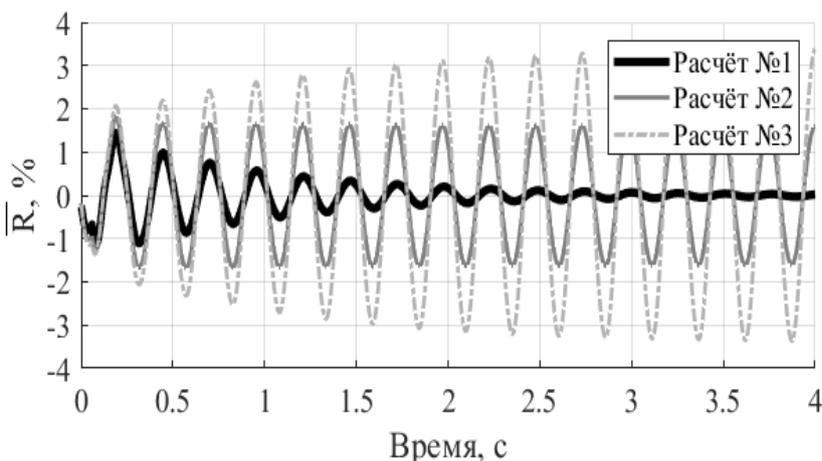


Рисунок 8 – Результаты расчётов

возмущения по обратной связи: от выхода из регулятора до входа в турбину (рисунок 3, контур 3). Данное время соответствует $\frac{1}{4}$ периода колебаний.

Логарифмический декремент затухания колебаний тяги для первых трёх периодов колебаний составляет для расчётов № 1, 2 и 3 (0,433 / 0,315 / 0,325); (0,092 / 0,003 / 0,003); (-0,059 / -0,105 / -0,082) соответственно. Таким образом, при уменьшении тангенса угла наклона переходного участка α происходит увеличение логарифмического декремента затухания колебаний тяги. Для случая, когда логарифмический декремент затухания колебаний имеет отрицательное значение, размах колебаний тяги ограничивается максимальным значением разности расходов между ветвями динамической нагрузочной характеристики регулятора $\Delta \dot{m}$. Если логарифмический декремент затухания колебаний имеет неотрицательное значение, то максимальный размах колебаний тяги ограничивается максимальным отклонением расхода от заданного значения, происходящим за $\frac{1}{4}$ периода колебаний, если это значение не превышает заданного $\Delta \dot{m}$, в обратном случае также определяется заданным $\Delta \dot{m}$.

Это можно объяснить тем, что отклонение расхода через регулятор приводит к изменению соотношения компонентов в газогенераторе и температуры генераторного газа, что отражается в изменении мощности, вырабатываемой на турбине, которая определяет частоту вращения вала ТНА. В свою очередь, изменение частоты вращения вала ТНА сказывается на изменении давления на выходе из насосов и, в конечном итоге, на изменении тяги двигателя. Поэтому отклонение расхода через регулятор напрямую влияет на отклонение тяги ЖРД.

Влияние угла наклона переходного участка α на декремент затухания колебаний можно объяснить тем, что изменение расхода через регулятор отражается на изменении частоты вращения вала ТНА и тяги только спустя время прохождения возмущения от выхода из регулятора до входа в турбину. Поэтому, чем больше угол наклона переходного участка, тем большее отклонение расхода через регулятор будет происходить за время прохождения возмущения по расходу от регулятора до турбины, пока возмущение не передастся через обратную связь обратно на вход в регулятор (рисунок 3, контур 3).

На рисунке 9 представлено сравнение расчётных и экспериментальных данных по изменению тяги ЖРД на режиме глубокого дросселирования в процентах от номинального значения \bar{R} . Пунктирной серой линией представлены расчётные значения, а сплошной чёрной — экспериментальные данные.

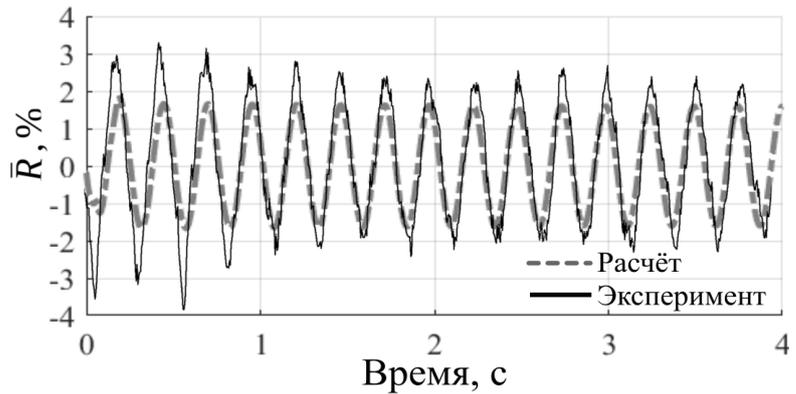


Рисунок 9 – Сравнение результатов расчётов

Можно отметить качественную сходимость результатов расчетов с экспериментальными данными. Отличия могут быть связаны с погрешностью определения характеристик в процессе автономных испытаний, а также принятыми допущениями расчётной модели.

В пятой главе на основании проведённых расчётно-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.

На основании проведённого исследования разработаны рекомендации по контролю атрибутов динамической нагрузочной характеристики регулятора при проведении его автономных испытаний:

1. Определение диапазона расходов и перепадов давления на регуляторе на всех режимах работы ЖРД.
2. Для каждого режима определение номинального расхода через регулятор, номинального перепада давления на регуляторе и собственной частоты ЖРД.
3. Для параметров из п. 2 на каждом режиме проведение автономного испытания регулятора. Регистрацию параметров рекомендуется производить с частотой опроса не менее 125 Гц, погрешность определения расхода и перепада давления рекомендуется обеспечивать не более 0,05 %.

3.1. Обеспечение номинального расхода и перепад давления на регуляторе, при неизменном положении дросселирующей части регулятора создание колебаний давления на входе в регулятор с частотой, соответствующей собственной частоте ЖРД.

3.3. По результатам испытания определение атрибутов динамической нагрузочной характеристики регулятора: α и $\Delta \dot{m}$.

На рисунке 10 представлен регулятор усовершенствованной конструкции, обеспечивающий меньшее отклонение расхода от заданного значения при возмущении по перепаду давления. В стабилизирующей части регулятора установлена пружина с целым числом рабочих витков (рисунок 10 поз. 1), которая обеспечивает меньший перекоп золотника, а также внедрены кольцевые проточки на направляющей стабилизирующей части в зазоре между направляющей и золотником для центрирования золотника за счёт организации турбулентного потока утечек между направляющей и золотником (рисунок 10 поз. 2).

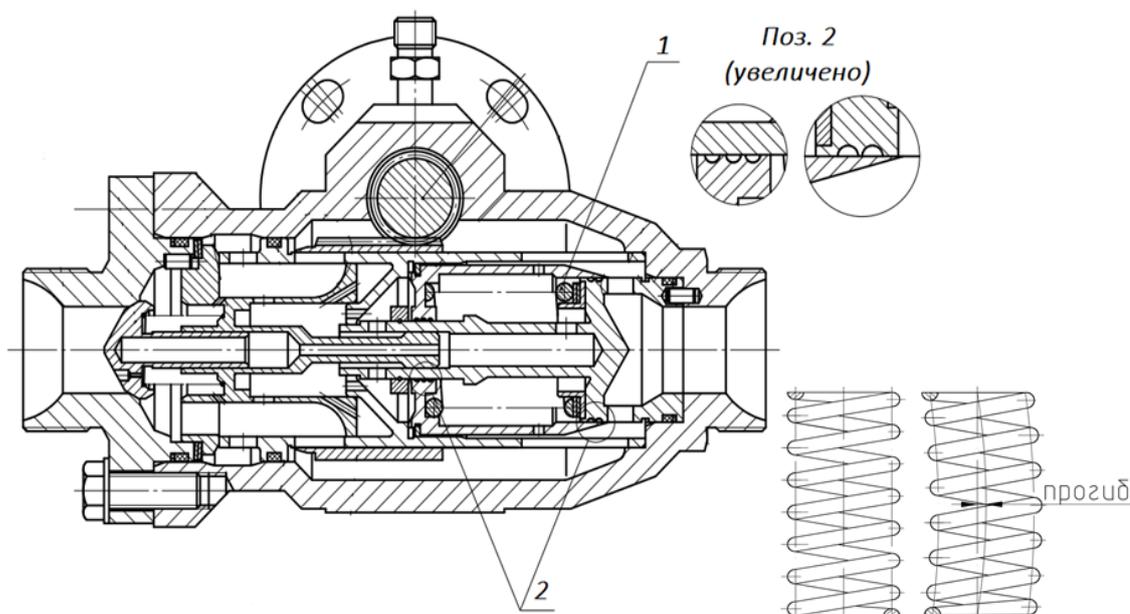


Рисунок 10 – Регулятор усовершенствованной конструкции

Для подтверждения эффективности предлагаемых мероприятий были проведены автономные испытания регуляторов: регулятор №1 имеет штатную конструкцию, а регулятор №2 – усовершенствованную конструкцию.

На рисунках 11 и 12 приведено изменение перепада давления и расхода через регуляторы от времени. В процессе испытаний происходило резкое изменение перепада давления на регуляторах и фиксировался переходный процесс. При испытаниях регулятора усовершенствованной конструкции №2 отсутствует заброс по перепаду давления при переходном процессе, а также отсутствует заброс по расходу в сторону уменьшения. Отклонение расхода при переходном процессе от заданного значения в сторону увеличения для регулятора №1 составляет 0,46 кг/с, а для регулятора №2 составляет 0,24 кг/с.

Таким образом, регулятор усовершенствованной конструкции №2 обеспечивает на 52,2 % меньшее отклонение расхода, в сравнении с регулятором штатной конструкции №1.

Относительно заданного значения 1,7 кг/с отклонение расхода при

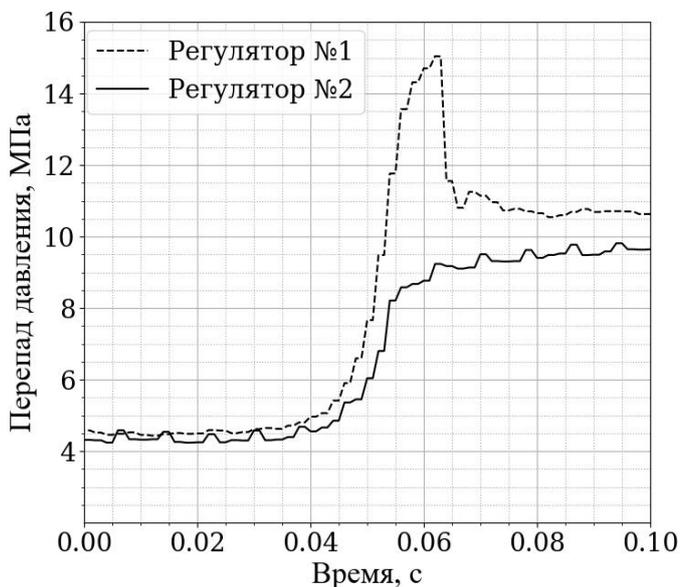


Рисунок 11 – Перепад давления на регуляторах

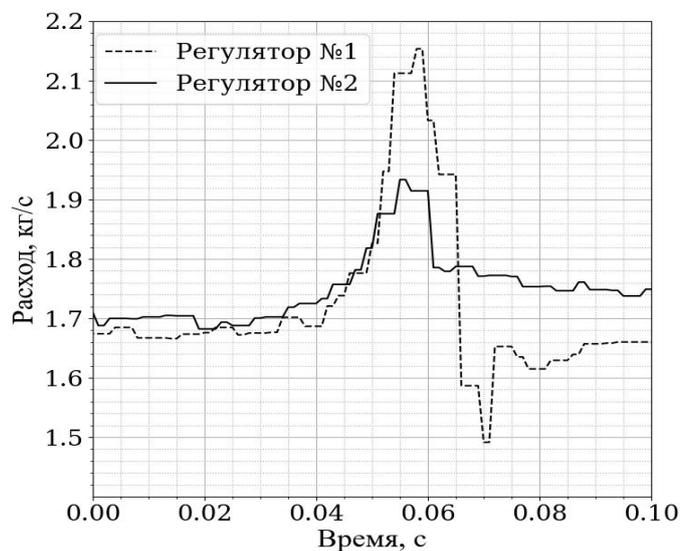


Рисунок 12 – Расход через регуляторы

переходном процессе для регулятора №1 составляет 27,1 %, а для регулятора №2 составляет 14,1 %.

На основании проведённого комплекса исследований разработана методика оценки влияния нелинейности в стабилизирующей части регулятора на параметры автоколебаний тяги ЖРД:

1. Составить математическую модель, описывающую функционирование ЖРД в динамике, с учётом запаздывания при прохождении возмущений по внутренним трактам и учитывающую действительные динамические нагрузочные характеристики регулятора.

2. Определить атрибуты динамической нагрузочной характеристики регулятора (угол наклона переходного участка α и разность расходов между ветвями $\Delta \dot{m}$) для исследуемых режимов.

3. Провести расчёт параметров рассматриваемого ЖРД на всех исследуемых режимах с использованием математической модели. При этом необходимо использовать полученные экспериментальные динамические характеристики регулятора.

4. Оценить полученный расчётным путём характер изменения параметров ЖРД, в том числе точность поддержания тяги, а также проверить соответствие характера изменения параметров техническим требованиям.

5. Сделать заключение о допустимости использования регулятора с имеющимися атрибутами динамической нагрузочной характеристики: α , $\Delta \dot{m}$ в ЖРД на требуемых режимах.

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 огневых испытаний. Это делает возможным внедрение конструктивных мероприятий, направленных на снижение амплитуды автоколебаний тяги или полного их подавления ещё на этапе проектирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого расчётно-экспериментального исследования решена актуальная научно-техническая задача, заключающаяся 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.

В процессе выполнения работы получены следующие результаты:

1. Разработана и валидирована математическая модель ЖРД, учитывающая действительную нагрузочную характеристику регулятора, полученную при его автономных испытаниях.

2. Экспериментально подтверждено, что нелинейные силы, возникающие в стабилизирующей части регулятора приводят к запаздыванию при перемещении золотника стабилизирующей части регулятора, что отражается в отклонении расхода через регулятор при прямом и обратном ходе: при колебаниях перепада давления на регуляторе с амплитудой 0,9 МПа для исследуемых образцов наблюдается отклонение расхода при прямом и обратном ходе в диапазоне от 0,03 до 0,05 кг/с.

3. Выделены атрибуты динамической нагрузочной характеристики регулятора: угол наклона переходного участка α и разность расходов между ветвями $\Delta \dot{m}$. Выявлены зависимости между атрибутами динамической нагрузочной характеристики регулятора и параметрами автоколебаний тяги ЖРД: угол наклона переходного участка определяет декремент затухания колебаний тяги и совместно с разностью расходов между ветвями определяет амплитуду колебаний тяги. Применительно к режимам глубокого дросселирования по тяге, для экспериментально определённых атрибутов динамической нагрузочной характеристики: разности расходов между ветвями $\Delta \dot{m}$ 0,0116; 0,03; 0,04 кг/с и тангенсов угла наклона переходного участка α 0,025; 0,056; 0,073 рассчитаны значения декремента затухания колебаний тяги для первых трёх периодов, составляющие (0,433 / 0,315 / 0,325); (0,092 / 0,003 / 0,003); (-0,059 / -0,105 / -0,082). Таким образом, нелинейные силы, возникающие при перемещении золотника стабилизирующей части регулятора, могут являться причиной возникновения автоколебаний тяги ЖРД.

4. Разработаны рекомендации по контролю атрибутов динамической нагрузочной характеристики регулятора α , $\Delta \dot{m}$ при проведении его автономных испытаний, что позволяет оценить характер изменения расхода через регулятор при возмущениях перепада давления на нём.

5. Разработана методика оценки влияния нелинейности в стабилизирующей части регулятора на параметры автоколебаний тяги ЖРД, включающая проведение автономных испытаний регулятора, с определением атрибутов динамической нагрузочной характеристики α , $\Delta \dot{m}$ и последующую оценку по математической модели точности поддержания тяги ЖРД, в том числе на режимах глубокого дросселирования.

6. Предложены конструктивные мероприятия, направленные на повышение точности поддержания расхода через регулятор при возмущениях по перепаду давления (применение пружины с целым числом рабочих витков и внедрение кольцевых проточек на направляющей стабилизирующей части). Применение данных мероприятий обеспечивает снижение отклонения расхода от заданного значения на 52,2 % в сравнении с регулятором штатной конструкции, что подтверждено в процессе испытаний на аттестованных стендах АО «НПО Энергомаш». Выпущен Акт о внедрении №777/270 от 23.10.2025 г. и зарегистрирована заявка на патент рег. № 2024130241 от 08.10.2024 г. Продемонстрированное снижение отклонения расхода через регулятор по расчётным оценкам приводит к повышению точности поддержания тяги на 2,95 %.

Перспектива дальнейшего развития темы состоит в разработке математической модели функционирования регулятора, учитывающей нелинейности в стабилизирующей части за счёт использования различных моделей трения и исследовании степени влияния внутренних параметров математической модели регулятора на атрибуты динамической нагрузочной характеристики α , $\Delta \dot{m}$ с последующим проведением верификации и валидации и внедрением её в математическую модель двигателя. 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: открытой схеме, схеме с дожиганием восстановительного генераторного газа, схеме с полной газификацией компонентов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК России**

1. Механизмы возникновения автоколебаний в ЖРД / И.В. Бурцев, П.С. Левочкин, Д.С. Мартиросов, М.А. Шильнов – Текст : непосредственный // Труды НПО Энергомаш. – 2022. – №38-39. – С.103-110, ISSN 2079-0228.
2. Исследование зависимости автоколебаний в ЖРД при глубоком дросселировании от характеристик системы подачи / И.В. Бурцев – Текст : непосредственный // Труды НПО Энергомаш. – 2022. – №38-39 – С. 111-123, ISSN 2079-0228.
3. Оценка влияния регулятора расхода на устойчивость работы жидкостного ракетного двигателя / И.В. Бурцев – Текст : непосредственный // Вестник московского авиационного института. – 2023. – Т.30. – №4. – С.195-201, ISSN 0869-6101.
4. Исследование влияния особенностей функционирования регуляторов расхода горючего на низкочастотные колебания в трактах агрегатов подачи мощного однокамерного кислородно-керосинового двигателя / И.В. Бурцев, Е.В. Крапивных, А.А. Теленков – Текст : непосредственный // Труды НПО Энергомаш. – 2024. – №41. – С. 100-116, ISSN 2079-0228.

Статьи в прочих изданиях

5. Обеспечение устойчивости жидкостного ракетного двигателя на режимах глубокого дросселирования / П.С. Левочкин, Е.Н. Семина, И.В. Бурцев – Текст : непосредственный // XLIII Академические чтения по Космонавтике посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных учёных — пионеров освоения космического пространства (Москва, 29 января – 1 февраля) : сборник тезисов : в 2 т. – Москва : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. – ISBN 978-5-7038-5094-7. – Т.1. – С. 72-73.
6. Влияние нелинейностей характеристик регулятора расхода на устойчивость ЖРД / И.В. Бурцев – Текст : непосредственный // Р19 Ракетно-космические двигательные установки: сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции / сост. Ягодников Д.А. – Москва : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023. – ISBN 978-5-907612-53-2 – Т.1. – С. 34-36.
7. Оценка областей устойчивости жидкостного ракетного двигателя при дросселировании по тяге / И.В. Бурцев – Текст : непосредственный // Будущее ракетных двигателей и космических установок: II Ежегодная научно-техническая конференция молодых учёных и специалистов предприятий Госкорпорации «Роскосмос»: тезисы докладов. – Москва : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. – ISBN 978-5-7038-3253-7. – С. 51-53.