

На правах рукописи

**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

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук,  
**Левочкин Петр Сергеевич**

## **ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О МЕХАНИЗМАХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ АВТОКОЛЕБАНИЙ В ЖРД ПРИ ДРОССЕЛИРОВАНИИ ПО ТЯГЕ.....	11
1.1. Особенности работы многорежимных ЖРД на режимах глубокого дросселирования по тяге.....	11
1.2. Автоколебания в маршевом ЖРД большой тяги на режимах глубокого дросселирования.....	17
1.3. Автоколебания при глубоком дросселировании двигателя RL-10.....	24
1.4. Возникновение колебаний в тракте шнекоцентробежного насоса.....	28
1.5. Влияние параметров газовой каверны за бустерным насосным агрегатом окислителя на возникновение автоколебаний.....	30
1.6. Выводы по главе.....	31
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ В РАССМАТРИВАЕМОМ ЖРД.....	32
2.1. Рассмотрение структурно-функциональной схемы ЖРД.....	32
2.2. Составление математической модели рассматриваемого ЖРД.....	34
2.3. Рассмотрение механизмов возникновения автоколебаний в контурах ЖРД.....	46
2.3.1. Контур с обратной связью по линии насоса окислителя.....	46
2.3.2. Контур с обратной связью по линии привода БНАО.....	50
2.3.3. Контур с обратной связью по линии регулятора.....	51
2.3.4. Контур с обратной связью по линии форсуночной головки.....	55
2.4. Выводы по главе.....	57
ГЛАВА 3. РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РЕГУЛЯТОРА.....	58

3.1. Постановка цели испытаний.....	58
3.2. Состав испытательного стенда.....	61
3.3. Результаты автономных испытаний регуляторов расхода.....	64
3.4. Выводы по главе.....	71
<b>ГЛАВА 4. РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ НА УСТОЙЧИВОСТЬ В ВЫДЕЛЕННЫХ КОНТУРАХ ЖРД.....</b>	<b>72</b>
4.1. Определения степени влияния расходов компонентов на тягу двигателя при его дросселировании.....	72
4.2. Оценка устойчивости двигателя в целом в частотной области.....	73
4.3. Верификация и валидация математической модели двигателя.....	74
4.4. Выделение атрибутов динамической характеристики регулятора.....	76
4.5. Исследование влияния внутренних параметров ЖРД на амплитуду и частоту автоколебаний, возникающих на режимах глубокого дросселирования по тяге.....	80
4.5.1. Влияние повышения гидравлического сопротивления в магистралях на устойчивость системы.....	80
4.5.2. Влияние времени запаздывания при преобразовании жидких компонентов топлива в продукты сгорания на параметры колебаний.....	86
4.5.3. Влияние величины момента инерции ротора ТНА на параметры колебаний.....	89
4.6. Механизм возникновения автоколебаний тяги двигателя вследствие запаздывания золотника стабилизирующей части регулятора.....	92
4.7. Выводы по главе.....	95
<b>ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ТОЧНОСТИ ПОДДЕРЖАНИЯ ТЯГИ ЖРД.....</b>	<b>97</b>

5.1. Рекомендации по контролю атрибутов динамической нагрузочной характеристики регулятора при проведении его автономных испытаний.....	97
5.2. Способ повышения точности поддержания расхода через регулятор.....	100
5.3. Методика оценки влияния нелинейности в стабилизирующей части регулятора на параметры автоколебаний тяги ЖРД.....	105
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	107
ЛИТЕРАТУРА.....	110

## ВВЕДЕНИЕ

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.

Жидкостные ракетные двигатели (ЖРД) являются основой силовых установок большинства современных космических средств выведения, совершенствование которых тесно связано с совершенствованием ЖРД.

Перспективным отечественным средством выведения является семейство РН «Ангара»: от лёгкого (РН «Ангара 1.2ПП») до тяжёлого (РН «Ангара-А5») классов и разрабатываемая модификация РН «Ангара» повышенной грузоподъёмности. На нижних ступенях РН семейства «Ангара» устанавливаются жидкостные ракетные двигатели, выполненные по схеме с дожиганием окислительного генераторного газа и работающие на компонентах топлива жидкий кислород и керосин.

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 ЖРД в данной работе будем считать режимы по тяге ниже 40% от номинального значения.

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. Для перспективных маршевых ЖРД, с учётом возможности применения их на

возвращаемых ракетных блоках требования к диапазону регулирования могут расширяться, вплоть до 15% от номинального режима.

В диапазоне значений тяги от 30 до 40% от номинального значения для ЖРД, выполненного по схеме с дожиганием окислительного генераторного газа отклонение расхода горючего через регулятор оказывает в 2 раза большее влияние на отклонение тяги, чем на номинальном режиме. Это является особенностью выбранной схемы регулирования.

Таким образом, исходя из текущих концепций развития мировой ракетной техники: повышения надёжности и снижения стоимости запуска, **задача обеспечения высокой точности поддержания тяги маршевых ЖРД во всём диапазоне режимов работы является безусловно актуальной.**

#### **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 работы.** Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. XLIII Академические чтения по космонавтике, посвящённые памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных учёных –

пионеров освоения космического пространства, 29 января – 1 февраля 2019 года, г. Москва.

2. I Молодёжная научно-практическая конференция «Инновации и исследования как двигатель науки» посвящённая памяти В.К. Чванова, 15-16 ноября 2022 года, г. Химки.

3. Всероссийская научно-техническая конференция «Ракетно-космические двигательные установки», посвящённая 75 - летию со дня основания кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана, октябрь 2023 года, г. Москва.

4. Молодёжная научно-техническая конференция «Будущее ракетных двигателей и космических энергоустановок» посвящённая 90-летию со дня основания АО ГНЦ «Центр Келдыша», ноябрь 2023 года, г. Москва.

**Личное участие** заключается: в составлении математической модели исследуемого ЖРД, в формировании требований для проведения автономных испытаний регуляторов, а также в последующем анализе результатов испытаний и формулировании заключения по работе. Автор, совместно с Теленковым А.А., Крапивных Е.В., Ивановым Ю.Ю., принимал участие в разработке предложений по усовершенствованию конструкции регулятора, который, впоследствии был внедрён в ЖРД разработки и производства АО «НПО Энергомаш».

# ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О МЕХАНИЗМАХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ АВТОКОЛЕБАНИЙ В ЖРД ПРИ ДРОССЕЛИРОВАНИИ ПО ТЯГЕ

## 1.1. Особенности работы многорежимных ЖРД на режимах глубокого дросселирования по тяге

На рисунке 1.1 представлена РН тяжёлого класса «Ангара-А5». На данной РН применено пакетное расположение первой и второй ступеней. Так как двигатели первой и второй ступени запускаются при запуске РН возникает необходимость дросселирования и продолжительной работы двигателя центрального блока на пониженном режиме по тяге с целью экономии топлива.



Рисунок 1.1 – РН тяжёлого класса «Ангара-А5»

Отличительной чертой линейки ряда отечественных двигателей является возможность функционирования в широком диапазоне значений тяги: от 100 до 50 % от номинального значения, а на некоторых двигателях и до 30%, поэтому важно обеспечить устойчивую работу двигателей во всём диапазоне режимов работы.

Рассмотрим общий случай работы маршевых ЖРД в составе РН, выполненной по пакетной схеме. На рисунке 1.2 представлены циклограммы работы двигателя в составе центрального (сплошная линия) и боковых (штриховая линия) блоках ракеты-носителя с пакетной схемой расположения первой и второй ступеней.

Как правило, все двигатели при запуске выходят на номинальный режим, но спустя определённое время, двигатель центрального блока дросселируется и работает на данном режиме до момента отделения боковых блоков. Время работы на режиме глубокого дросселирования составляет бóльшую часть от времени суммарной работы двигателя центрального блока.

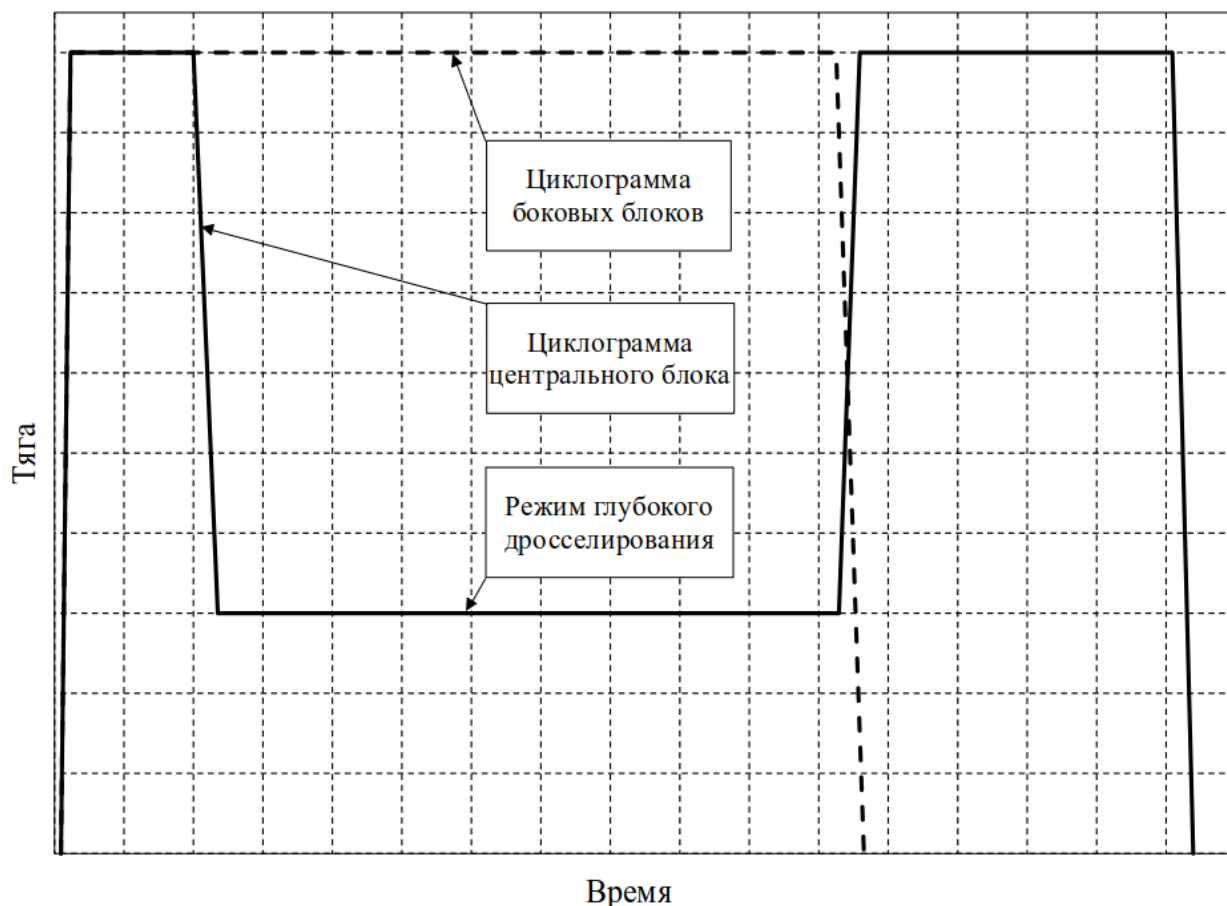


Рисунок 1.2 – Циклограммы работы двигателей центрального и боковых блоков

Таким образом, в процессе работы в составе существующих ракет-носителей маршевые ЖРД должны продолжительное время работать на режимах глубокого дросселирования.

Перспективным направлением развития ракет-носителей в настоящее время является применение многоразовых элементов, а именно, тенденция на обеспечение возвращения первых ступеней ракет-носителей с целью их повторного применения что требует создания многоразовых маршевых ЖРД.

Рассмотрим несколько основные способы спасения первых ступеней ракет-носителей:

**Паращютная посадка:** торможение при входе в атмосферу, а также посадка производится с помощью парашютной системы.

В процессе создания РН «Энергия» разрабатывался проект парашютной посадки боковых блоков. Проект предусматривал, через некоторое время после отделения параблоков от центрального блока, их разделение. Перед входом в плотные слои атмосферы каждый блок ориентируется носовой частью по ходу движения, для чего оснащается реактивной системой управления, далее задействуется тормозной парашют. Последующее торможение происходит с помощью парашюта, до высоты порядка 5 км, далее в действие вводится основной многокупольный парашют. На высоте 3-4 км происходит смещение узла крепления парашюта к центру тяжести. Блок приземляется в горизонтальном положении. Амортизационные стойки устанавливаются в рабочее положение. На высоте 30-50 м происходит включение двигателей мягкой посадки [27]. На рисунке 1.3 представлена схема посадки бокового блока ракеты-носителя «Энергия».

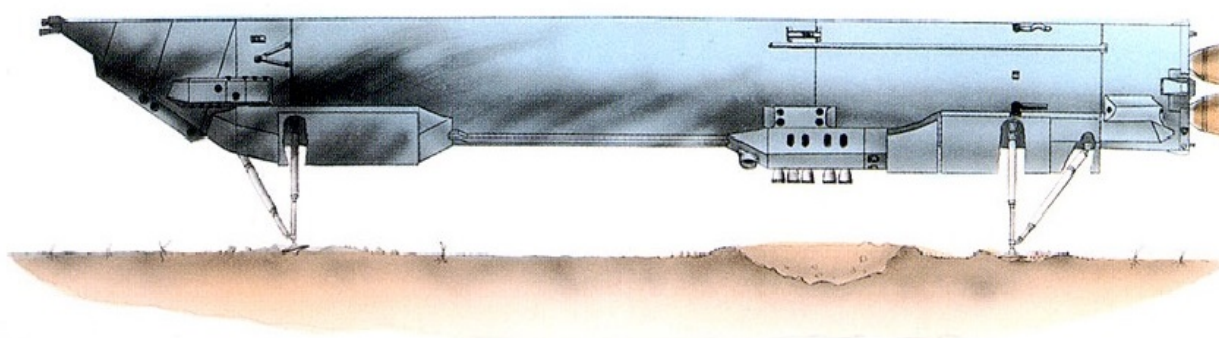


Рисунок 1.3 – Схема посадки бокового блока РН «Энергия»

**Ракетная посадка:** торможение при входе в атмосферу и посадка производится с помощью маршевых двигателей.

Данная схема реализована на РН «Falcon 9», разработанной компанией «SpaceX», а также на РН «New Shepard», разработанной компанией «Blue Origin».

Приземление этих РН производится на выдвижные опоры. Данные ракеты-носители представлены на рисунке 1.4.

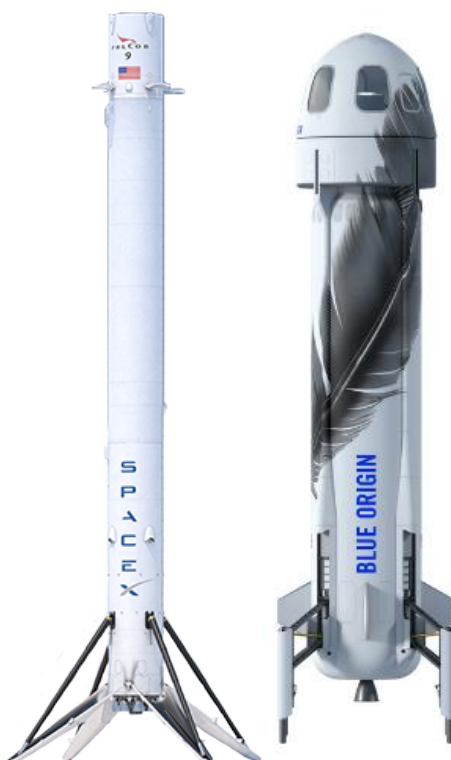


Рисунок 1.4 – РН «Falcon 9» (слева) и «New Shepard» (справа)

На РН «Falcon 9» для обеспечения управления положением ракеты на высоких скоростях снижения используются аэродинамические рули, а непосредственно перед приземлением задействуется реактивная система управления. Торможение ступени производится повторным включением трёх маршевых двигателей, а мягкая посадка обеспечивается включением центрального двигателя.

Схема посадки РН «New Shepard» аналогична реализованной на РН «Falcon 9», но имеет особенности: РН «New Shepard» имеет всего один маршевый двигатель «BE-3», что влечёт за собой необходимость его глубокого дросселирования по тяге для обеспечения возможности посадки ступени ракетодинамическим способом. На РН «Falcon 9» установлено 9 маршевых ЖРД, поэтому для посадки возможно включение только одного ЖРД, поэтому не требуется возможности глубокого дросселирования.

Однокамерный двигатель «BE-3», разработанный компанией «Blue Origin», работает на криогенных компонентах топлива кислород и водород. Особенностью схемы данного двигателя является наличие двух отдельных турбонасосных агрегатов: по горючему и по окислителю. Привод обоих ТНА осуществляется газом, отбираемым непосредственно из камеры сгорания двигателя. После прохождения через турбину ТНА, отработавший газ сбрасывается через два патрубка в атмосферу. Для обеспечения тяги, необходимой для посадки ступени, двигатель может дросселироваться до величины менее 20% от номинального значения. Данный двигатель представлен на рисунке 1.5.

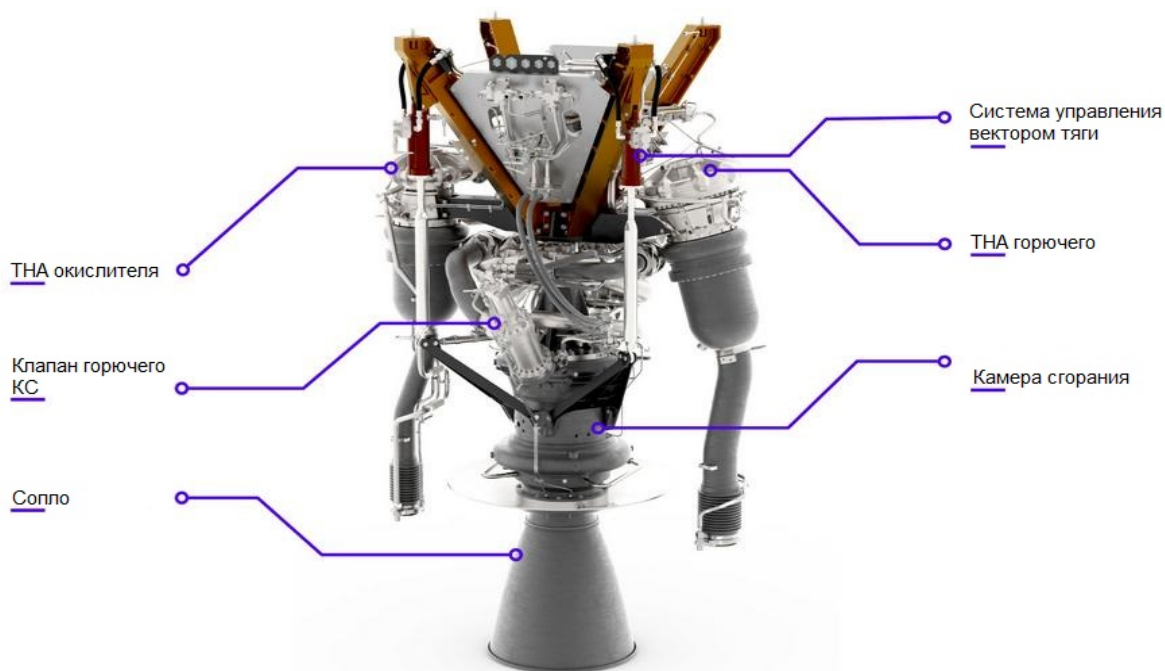


Рисунок 1.5 – BE-3: маршевый двигатель РН «New Shepard»

**Самолётная посадка:** торможение при входе в атмосферу производится с помощью крыла, далее полет и посадка на аэродром самолётным способом.

Существует проект самолётной посадки «Байкал-Ангара», изображённый на рисунке 1.6. Концепция перехода на частично многоразовые носители семейства «Ангара» предусматривала использование универсального ракетного модуля в качестве одноразового элемента, и как конструктивную основу для «Байкала». Для обеспечения многократного использования, УРМ оснащается поворотным крылом, хвостовым оперением, воздушно-реактивной силовой установкой, шасси,

автономной системой управления и другими подсистемами. В такой комплектации он уже представляет собой ускоритель «Байкал» [4]. Особенность «Байкала» не только посадка многоразового ускорителя на землю, но и возвращение его в точку старта с помощью средств обратного полёта, включающих воздушно-реактивный двигатель и систему управления, которая была отработана на орбитальном корабле «Буран» [6].

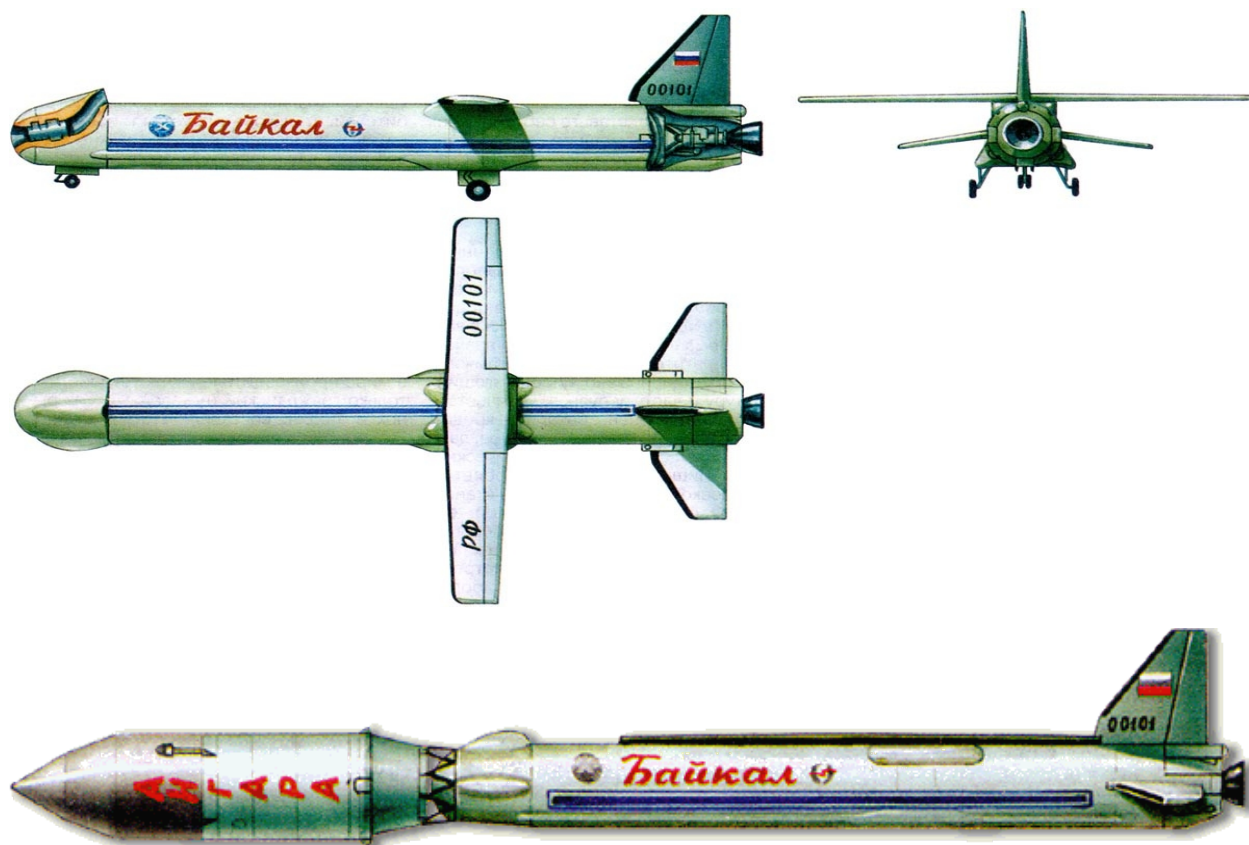


Рисунок 1.6 - Макет ступени «Байкал-Ангара»

Применение крылатых ракетных блоков является одним из наиболее эффективных способов реализации принципов многоразовости в ракетно-космической технике применительно к географическим особенностям расположения космодромов на территории РФ.

Разработка РН с многоразовыми ускорителями первых ступеней, которые бы представляли конкуренцию образцам зарубежной ракетной техники, планируется на основе задела существующих, а также вновь разрабатываемых РН [72].

Как правило, маршевые ЖРД проектируются под режимы работы вблизи номинального значения, но, учитывая тенденцию на расширение диапазона

дросселирования по тяге, важно обеспечить высокую точность поддержания тяги и отсутствие автоколебаний в маршевых ЖРД во всём диапазоне требуемых режимов работы.

## **1.2. Автоколебания в маршевом ЖРД большой тяги на режимах глубокого дросселирования**

При разработке одного из отечественных маршевых ЖРД наблюдались незатухающие автоколебаний при работе на режимах глубокого дросселирования по тяге. Дросселирование осуществлялось до значения тяги порядка 30% от номинального [85].

Двигатель функционирует по схеме с дожиганием окислительного генераторного газа. Регулирование по тяге обеспечивается за счёт управления расходом горючего в газогенератор.

На режимах, близких к номинальному, работа двигателя была устойчивой. При переходе двигателя на пониженные режимы работы возникали колебания частоты вращения вала ТНА, что вызывало распространение колебаний давления компонентов топлива по всем полостям двигателя и, в конечном итоге, приводило к колебаниям тяги двигателя.

В процессе анализа данного явления было отмечено, что частота колебаний, наблюдаемых на режимах глубокого дросселирования составляет от 3 до 5 Гц, что совпадает с собственной частотой двигателя на данном режиме.

Были предложены следующие возможные причины возникновения установившихся автоколебаний в процессе работы на режимах глубокого дросселирования по тяге:

1. Увеличение времени преобразования компонентов топлива в газогенераторе;
2. Снижение гидравлических сопротивлений в трактах подачи компонентов топлива;
3. Работа насоса окислителя в неустойчивой области напорной характеристики (в рабочей точке напорной характеристики угол наклона

напорной характеристики превышает угол наклона характеристики требуемого напора системы питания).

4. Попадание газовой каверны на вход в шнек основного насоса окислителя, что порождает возникновение кавитационных автоколебаний.

В качестве мероприятия по снижению амплитуды колебаний было предложено ступенчатое увеличение гидравлического сопротивления в магистрали подачи кислорода от основного насоса в газогенератор в процессе дросселирования двигателя по тяге. Причём при работе на номинальном режиме, гидравлическое сопротивление должно оставаться прежним, чтобы не изменять параметры работы ЖРД на этом режиме.

Для решения поставленной задачи была разработана конструкция клапана окислителя, получившего название трёхпозиционного [79].

При переходе на режимы глубокого дросселирования трёхпозиционный клапан окислителя прикрывается, обеспечивая дополнительное гидравлическое сопротивление. Трёхпозиционный клапан располагается в магистрали подачи окислителя в газогенератор. Его местоположение в пневмогидравлической схеме двигателя показано на рисунке 1.7.

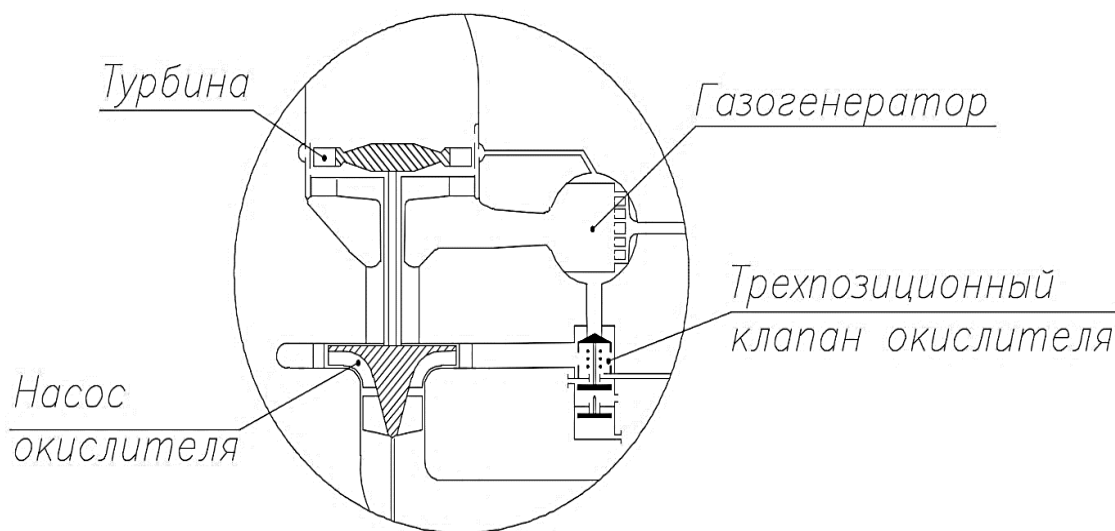


Рисунок 1.7 – Расположение трёхпозиционного клапана окислителя

Для обеспечения эффективного управления трёхпозиционным клапаном была доработана пневматическая часть двигателя, посредством внедрения линии

прикрытия трёхпозиционного клапана, а также разработана система управления прикрытием клапана [75].

Трёхпозиционный клапан содержит гидравлическую часть и пневматическую часть. Схема клапана в закрытом положении представлена на рисунке 1.8.

Клапан состоит из затвора 1, который прижимается к седлу 8 пружиной 2. Открытие клапана производится подачей управляющего газа Рупр. 1, который отводит затвор от седла, воздействуя на поршень 3. В полностью открытом положении клапан садится на седло 7. Также имеется поршень 5 с толкателем 4, служащие для прикрытия клапана и обратный клапан 6 для сброса давления из управляющей полости.

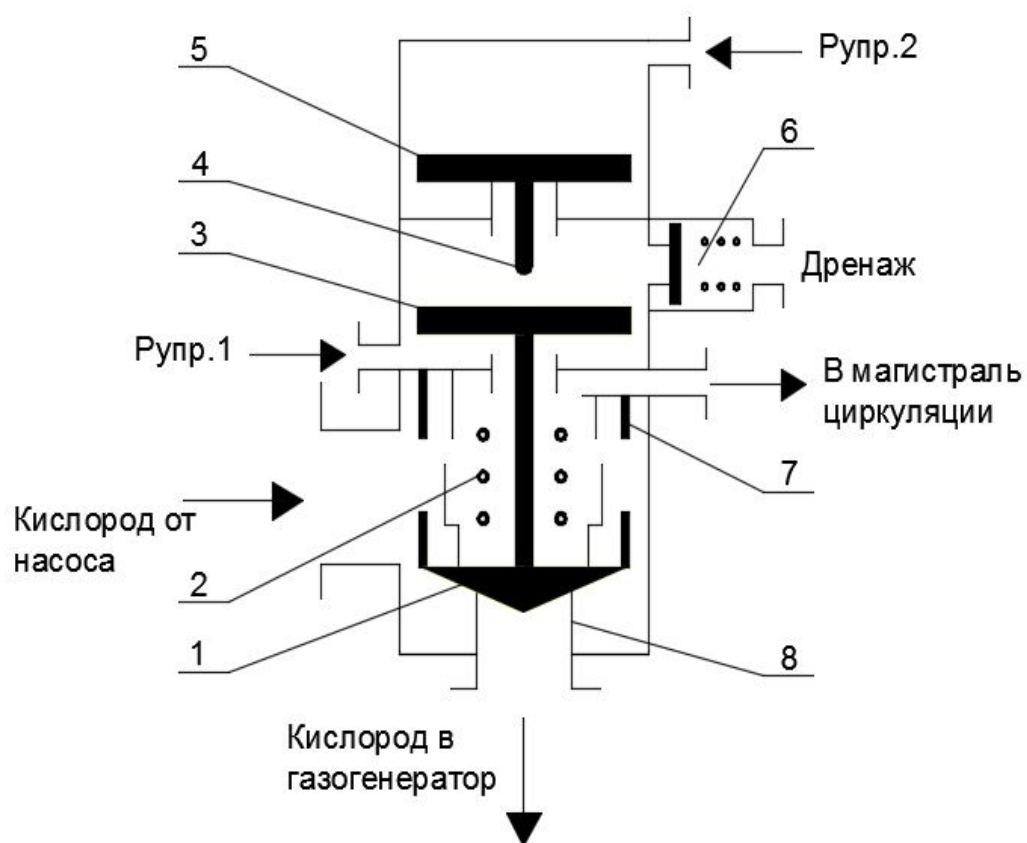


Рисунок 1.8 – Схема трёхпозиционного клапана (закрытое положение):

1 – затвор, 2 – пружина, 3 – поршень, 4 – толкатель, 5 – поршень, 6 – обратный клапан, 7 – седло, 8 – седло

Открытие клапана производится на запуске, для этого подаётся давление Рупр.1, и газ, воздействуя на поршень 3, отводит затвор 1 в крайнее положение –

клапан полностью открывается. Спустя некоторое время после команды на запуск производится сброс управляющего давления. Клапан удерживается в открытом положении под действием давления компонента, воздействующего на затвор клапана.

При дросселировании двигателя происходит прикрытие клапана, для этого подаётся давление Рупр. 2. Газ воздействует на поршень 5, и он толкателем 4 сдвигает поршень 1, тем самым обеспечивая прикрытие клапана. При переходе на более высокие режимы подаётся команда на сброс управляющего давления Рупр. 2 и клапан переходит в полностью открытое положение под действием сил давления кислорода на затвор клапана. Закрытие клапана происходит с помощью пружины 2, по мере снижения давления кислорода на входе в клапан (на момент закрытия, давление в пневматических полостях клапана – отсутствует).

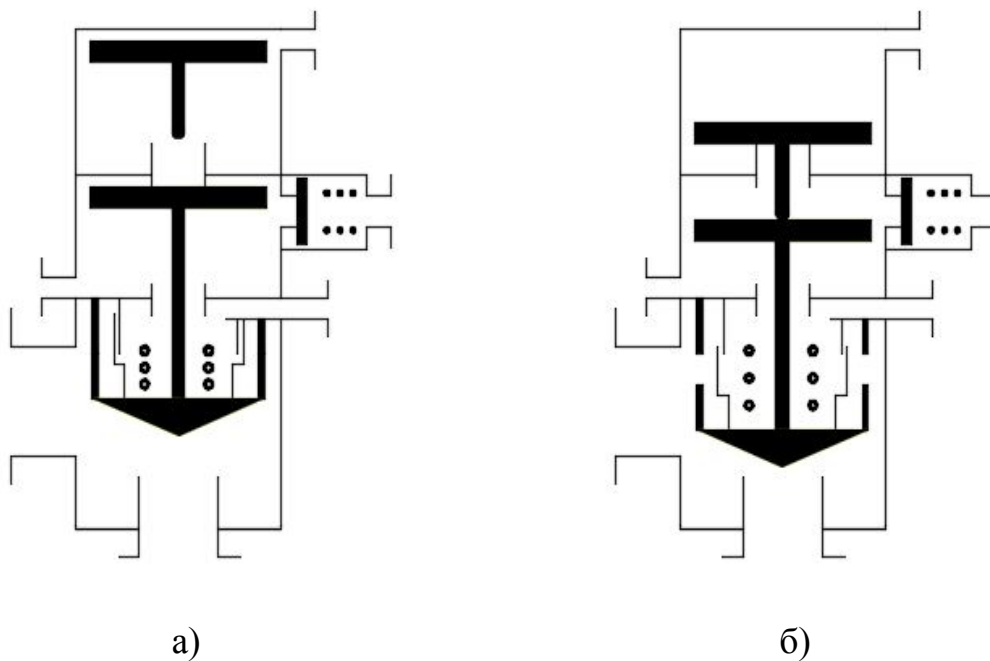


Рисунок 1.9 – Схема трёхпозиционного клапана в полностью открытом положении (а) и в прикрытом положении (б)

На рисунке 1.10 представлена конструкция трёхпозиционного клапана.

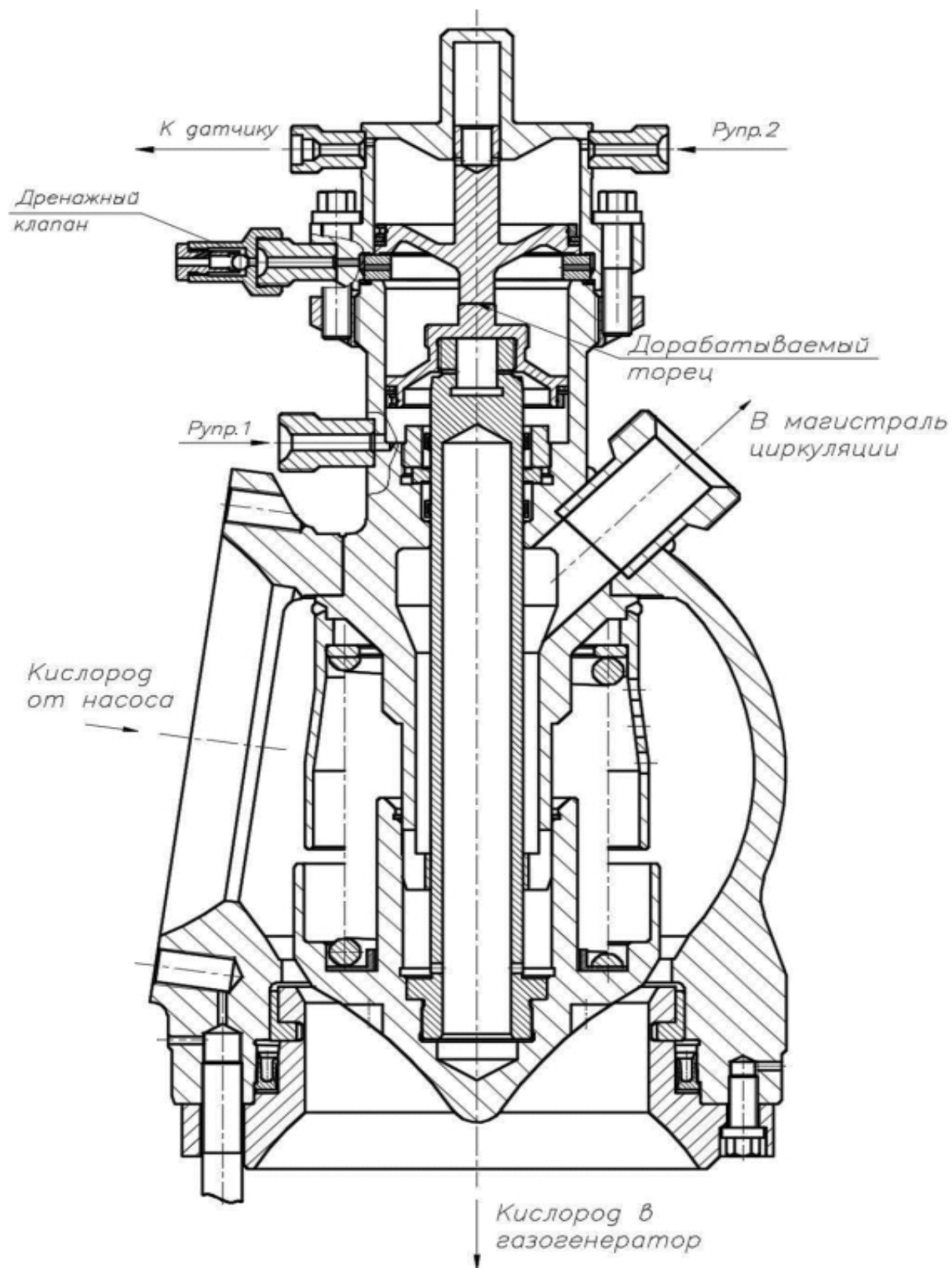


Рисунок 1.10 – Конструкция трёхпозиционного клапана окислителя (клапан изображён в закрытом состоянии)

Клапан обеспечивает:

1. в закрытом положении клапана (рисунок 1.8) проток окислителя в магистраль циркуляции при захлаживании магистрали окислителя и одновременное разделение окислительной и газовой полостей двигателя;
2. при подаче управляющего газа Рупр. 1 клапан обеспечивает сообщение магистрали подачи окислителя с газогенератором и одновременное перекрытие магистрали циркуляции (рисунок 1.9 а);
3. при подаче управляющего газа Рупр. 2 перевод затвора клапана в прикрытое положение. Используется при работе двигателя на низких режимах (ниже 38% по тяге от номинального значения) с целью повышения устойчивости двигателя к низкочастотным колебаниям (рисунок 1.9 б).

В процессе проведения огневых испытаний двигателя подтверждено снижение амплитуды автоколебаний после прикрытия трёхпозиционного клапана. На рисунках 1.11, 1.12 и 1.13 продемонстрированы зависимости температуры генераторного газа, частоты вращения вала ТНА и давления в камере сгорания от времени при проведении огневого испытания двигателя. В представленном интервале времени двигатель работал на режимах глубокого дросселирования. С 182 с наблюдается возникновение незатухающих автоколебаний. На 194 с происходиткрытие клапана и отмечается затухание автоколебаний с логарифмическим декрементом затухания порядка 0,3.

В процессе проведения работ сделан вывод, что увеличение гидравлического сопротивления в линии подачи окислителя в газогенератор существенно уменьшает амплитуду колебаний тяги при глубоком дросселировании ЖРД.

При последующих испытаниях была проведена оценка влияния величины гидравлического сопротивления трёхпозиционного клапана на подавление автоколебаний и была найдена оптимальная величина гидравлического сопротивления трёхпозиционного клапана в прикрытом положении, составляющая 0,7 МПа. При дальнейшем увеличении гидравлического

сопротивления трёхпозиционного клапана не зафиксировано снижение амплитуды автоколебаний при работе двигателя на режимах глубокого дросселирования.

Необходимая величина гидравлического сопротивления клапана обеспечивается с помощью проведения предварительной проливки, где определяется нужное положение затвора, которое обеспечивается последующей доработкой торца поршня.

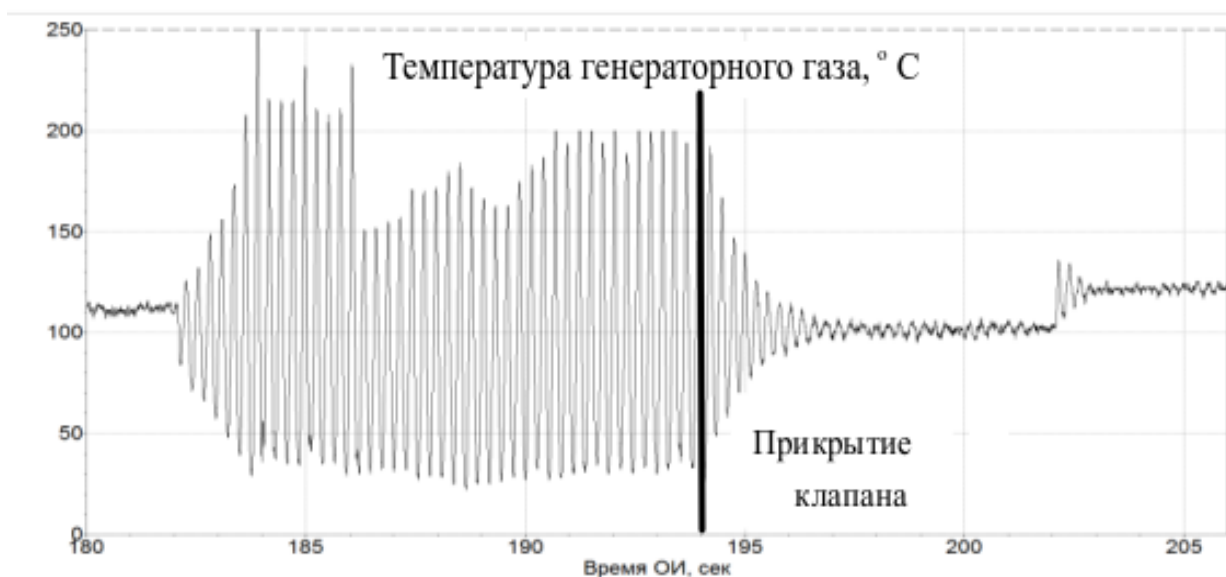


Рисунок 1.11 – Изменение температуры генераторного газа в процессе ОИ

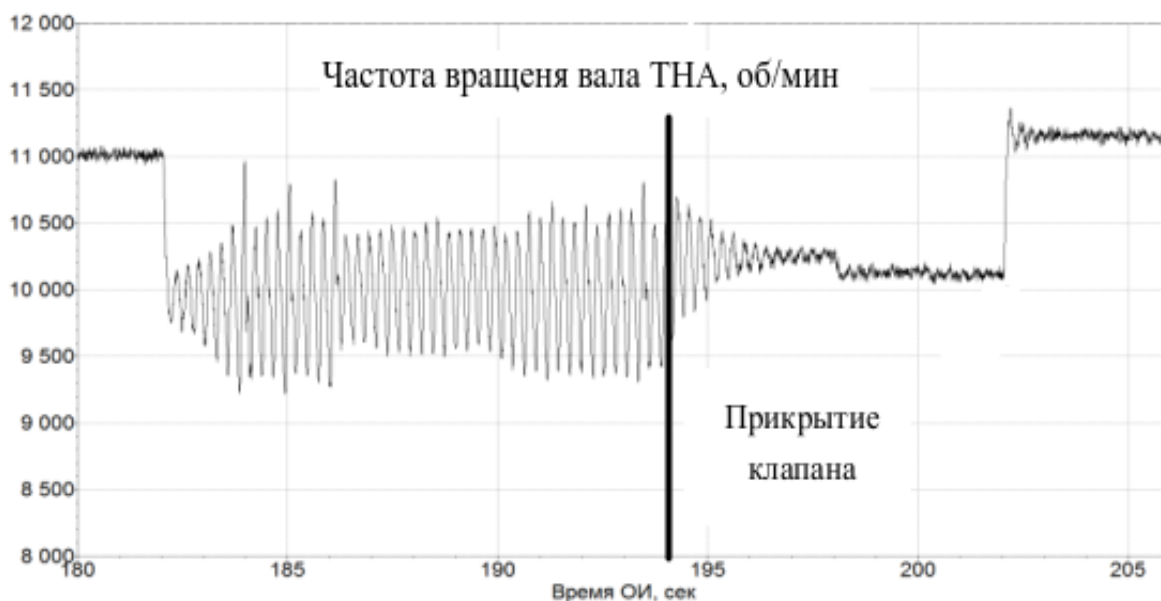


Рисунок 1.12 – Изменение частоты вращения вала ТНА в процессе ОИ

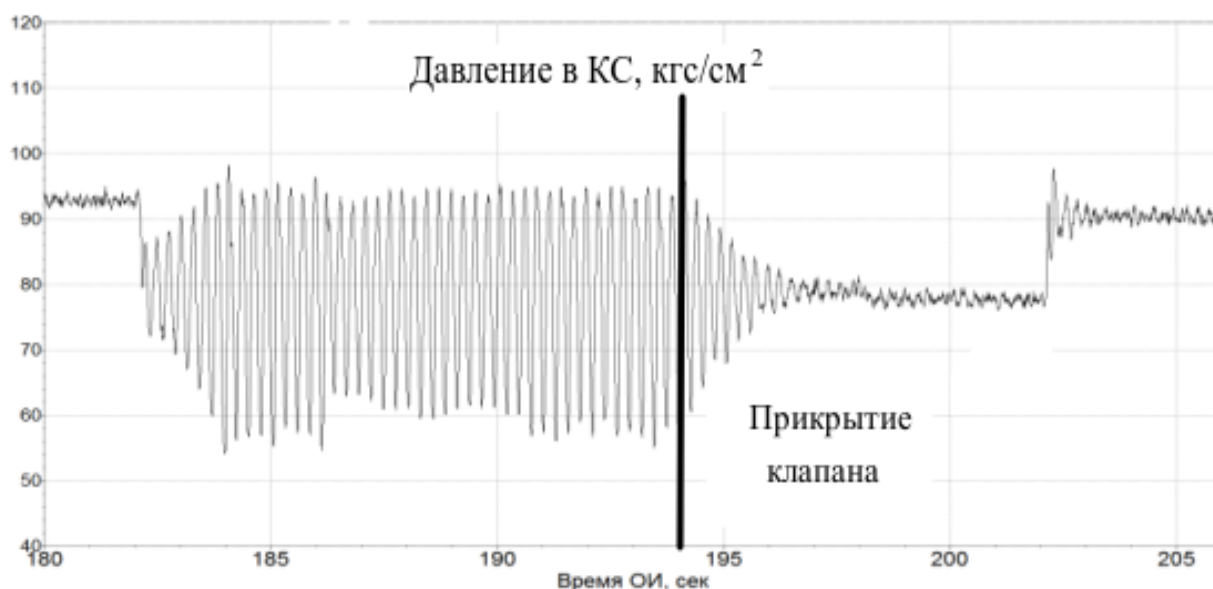


Рисунок 1.13 – Изменение давления в камере сгорания в процессе ОИ

В рассмотренном случае автоколебания наблюдаются во всей системе подачи, поэтому колебательным контуром является весь двигатель. В конечном итоге колебания внутренних параметров двигателя приводят к появлению колебаний тяги. В схеме двигателя с дожиганием окислительного генераторного газа имеется ряд обратных связей, каждая из которых может вызывать появление автоколебаний, поэтому их выделение и анализ является безусловно актуальной задачей.

### 1.3. Автоколебания при глубоком дросселировании двигателя RL-10

Случай возникновения автоколебаний зафиксирован в процессе огневых испытаний модификации двигателя RL-10, разработанного компанией Rocketdyne. Данных ЖРД в настоящее время применяется в качестве маршевого на вторых ступенях ракет-носителей «Atlas V» и «Delta IV» компании ULA и на второй ступени РН «SLS».

Двигатель RL-10 работает на компонентах топлива жидкий кислород и жидкий водород и выполнен по безгазогенераторной схеме. На рисунке 1.14 представлена пневмогидравлическая схема двигателя RL-10 [97, 98]. На входе в двигатель установлены пуско-отсечные клапаны. Кислород после пуско-отсечного клапана 1 поступает в основной насос и далее поступает на вход в

форсуночную головку камеры сгорания через клапан 5, который управляет соотношением компонентов двигателя. Горючее (водород) после пуско-отсечного клапана 2 подаётся на вход в двухступенчатый шнекоцентробежный насос. После насоса горючее проходит через рубашку охлаждения камеры где нагревается и через трубку Вентури 7 поступает на вход в турбину. Также имеется байпасная линия в обход турбины в которой установлен регулятор расхода 8 управляющий тягой двигателя. После турбины подогретый водород через пуско-отсечной клапан 6, поступает в форсуночную головку камеры сгорания. Турбина приводит во вращение насос горючего и через редуктор насос окислителя. Редуктор охлаждается водородом.

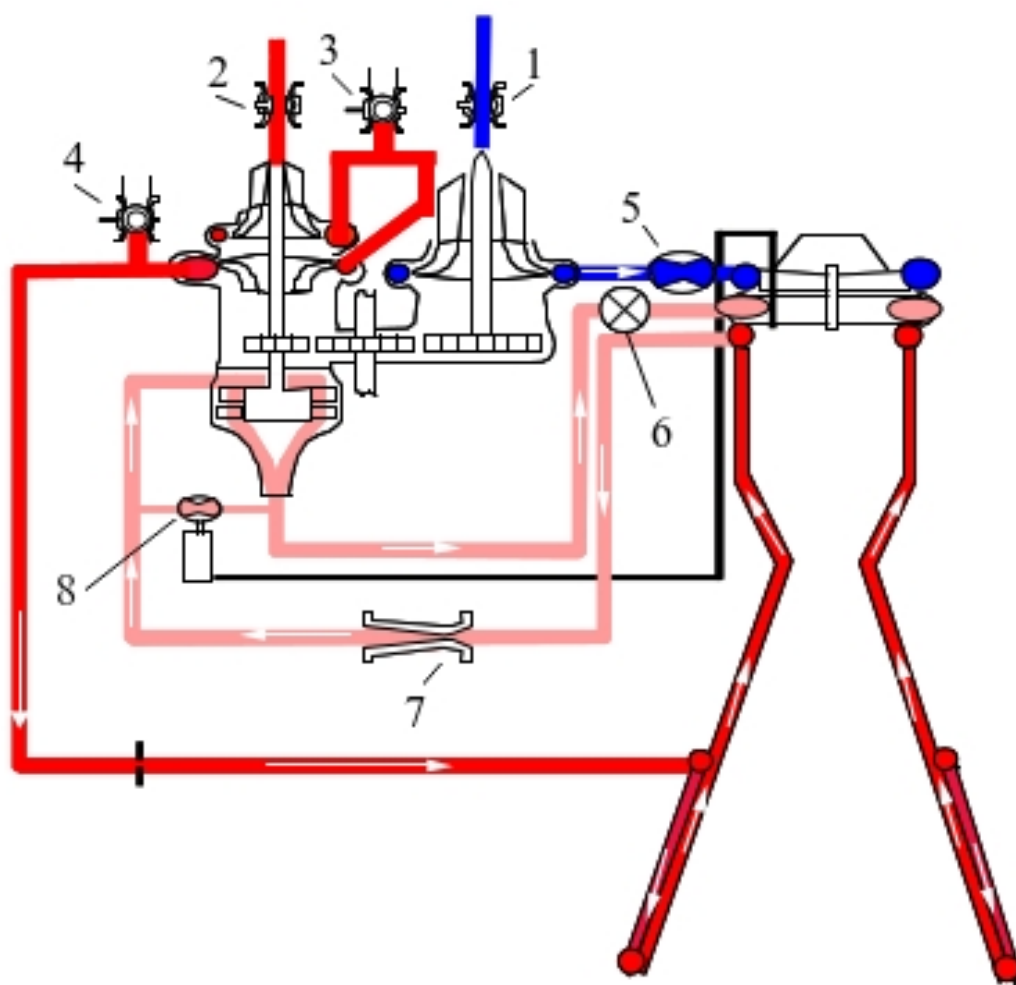


Рисунок 1.14 – Пневмогидравлическая схема двигателя RL-10

Использование такой схемы позволяет обеспечить изменение тяги двигателя в широком диапазоне из-за отсутствия газогенератора [104].

В рамках программы «Common Extensible Cryogenic Engine» NASA разработало демонстратор двигателя с расширенным диапазоном регулирования по тяге. В результате демонстратор на основе двигателя RL-10 продемонстрировал устойчивую работу на режиме 5,9 % от номинального значения тяги [100].

При дросселировании двигателя наблюдались колебания давления в камере сгорания и, как следствие, колебания тяги. Частота колебаний составляла 1 Гц. При анализе функционирования двигателя было определено, что наблюдаемое явление связано с тем, что на режимах глубокого дросселирования возникало кипение водорода в рубашке охлаждения (давление и температура водорода на входе в рубашку охлаждения камеры оказывались в области ниже сверхкритических). Для подавления колебаний на данных режимах была проведена доработка трубки Вентури, что позволило обеспечить сверхкритические параметры водорода.

На рисунке 1.15 представлена модернизированная пневмогидравлическая схема двигателя RL-10, на котором была продемонстрирована возможность дросселирование до 5,9 % от номинальной тяги.

В двигатель установлена форсуночная головка 5 с повышенным перепадом давления, обеспечивающая регулирование двигателя в расширенном диапазоне по тяге. В линию подачи горючего на турбину была добавлена вторая байпасная магистраль с клапаном 1, обеспечивающая бóльший расход на перепуск в обход турбины. В магистраль подачи горючего от насоса до рубашки охлаждения камеры внедрена дополнительная трубка Вентури 2 для изоляции насоса от колебаний давления. Модернизованы клапан управления соотношением компонентов 3, установленный в линии подачи окислителя в камеру и клапан 4 в линии перепуска в обход турбины по магистрали горючего.

Таким образом, при проведении исследований, связанных с расширением диапазона режимов работ по тяге демонстратора на основе двигателя RL-10 установлено, что при глубоком дросселировании снижение давлений

компонентов приводит к тому, что параметры течения водорода в рубашке охлаждения камеры оказываются ниже сверхкритических. Это приводит к закипанию водорода в рубашке охлаждения камеры. Подобранные параметры трубки Вентури по линии подачи водорода в рубашку охлаждения камеры, обеспечивающие сохранение сверхкритических параметров водорода, обеспечили устойчивую работу двигателя во всём диапазоне.

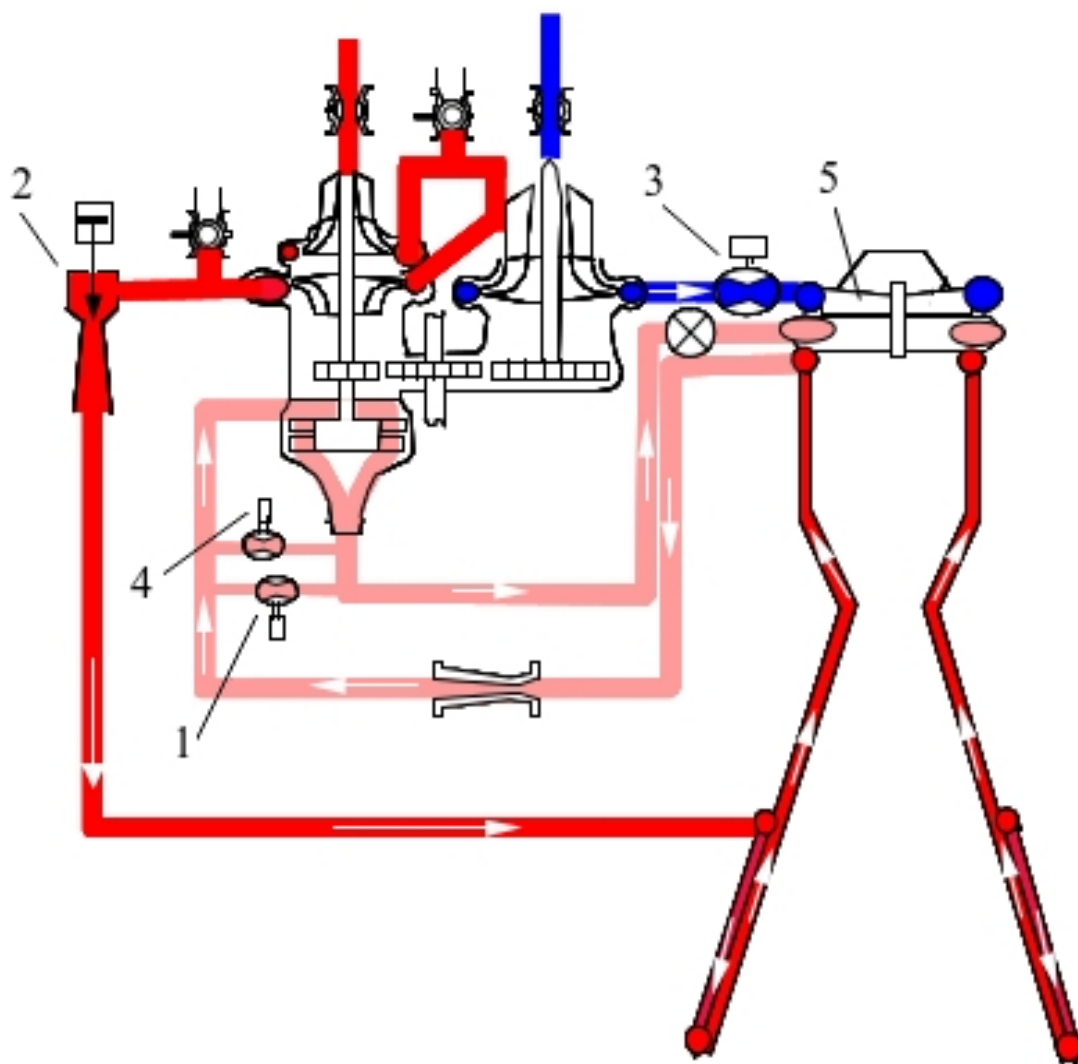


Рисунок 1.15 – Пневмогидравлическая схема модернизированного двигателя RL-10

В рассматриваемом случае колебательный контур состоит из линии подачи горючего: насос горючего, магистраль подачи горючего от насоса до камеры, рубашка охлаждения, магистраль подачи горючего через турбину в камеру сгорания. В случае возникновения кипения горючего в рубашке охлаждения

колебания давления вызывают колебания частоты вращения турбины, что приводит к возникновению колебаний давления во всей системе подачи и, в конечном итоге, приводит к возникновению колебаний тяги двигателя.

Обратной связью выступает зависимость напора насоса горючего от параметров подогретого в рубашке охлаждения горючего, посредством характеристик турбины.

#### **1.4. Возникновение колебаний в тракте шнекоцентрибежного насоса**

Одна из возможных причин возникновения автоколебаний связана с работой насоса в системе питания ЖРД [64].

Насосы в системе питания ЖРД должны устойчиво функционировать на всех режимах работы двигателя, чтобы обеспечить постоянство параметров компонентов топлива перед форсунками газогенератора и камеры сгорания. От этого напрямую зависит устойчивая работа двигателя в целом. Это значит, что параметры насоса на заданном режиме должны оставаться постоянными, несмотря на малые отклонения их значений, вызванные случайными воздействиями.

Неустойчивость в работе насоса проявляется в периодическом изменении напора жидкости. Существует ряд факторов, определяющих устойчивость работы насоса. Устойчивость зависит от напора насоса, а также от потребного напора системы питания. Потребный напор системы питания, в свою очередь, определяется потерями энергии на перемещение компонента от выхода из насоса до камеры сгорания.

Для насоса окислителя двигателя, выполненного по схеме с дожиганием окислительного генераторного газа, потребный напор системы определяется: давлением в камере сгорания  $p_k$ , перепадом давления на форсунках  $\Delta p_\phi$ , сопротивлением газоведа  $\Delta p_z$ , перепадом давления на турбине  $\pi_m$ , потерями от газогенератора до входа в сопловую решетку турбины  $\Delta p_{гг.т}$ , перепадом на форсунках газогенератора  $\Delta p_{\phi.гг}$ , а также сопротивлением магистрали от выхода

из насоса окислителя до входа в газогенератор  $\Delta p_{\text{маг.но}}$ .  $p_{\text{вх}}$  – давление на входе в насос;  $c_{\text{вх}}$  – скорость компонента на входе в насос.

$$H_C = \left( \left( p_k / \rho + \Delta p_\phi / \rho + \Delta p_z / \rho \right) \cdot \pi_m + \Delta p_{\text{гг.м}} / \rho + \Delta p_{\text{маг.но}} / \rho + c_{\text{вых}}^2 / 2 \right) - \left( \Delta p_{\text{вх}} / \rho + c_{\text{вх}}^2 / 2 \right) \quad (1.1)$$

Рассмотрим влияние отклонений параметров на устойчивость системы. На рисунке 1.14 изображены в общем виде напорная характеристика насоса  $H_N$  и характеристики потребного напора системы питания  $H_C$ ,  $H_C'$ ,  $H_C''$ .

Как правило, насос проектируют так, чтобы номинальный режим соответствовал точке в области I (рисунок 1.16), но в процессе дросселирования расход компонентов снижается, и рабочая точка смещается влево по напорной характеристике и может оказаться в области II.

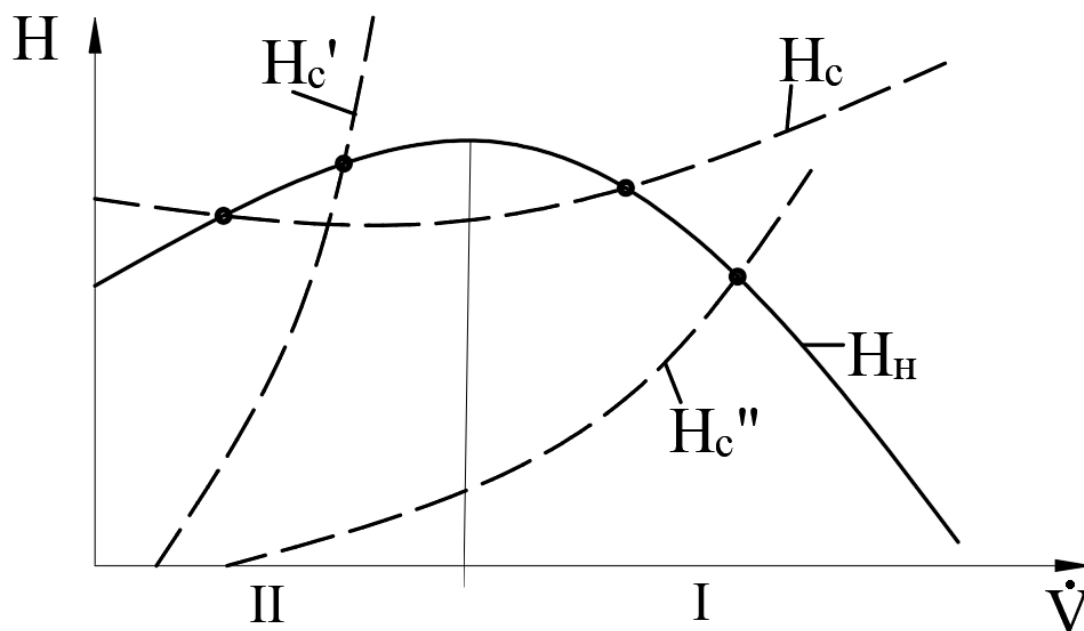


Рисунок 1.16 – Напорные характеристики насоса и системы подачи

В области II зона неустойчивого равновесия – малое возмущение влечёт за собой резкое отклонение параметров от номинальных. В то время как в точке А наблюдается устойчивое равновесие – малое возмущение не выводит систему из равновесия. Математически это можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial H_C}{\partial \dot{V}} > \frac{\partial H_N}{\partial \dot{V}} \quad (1.2)$$

В точке пересечения характеристик насоса и системы питания угол между касательной к характеристике системы питания должен быть больше, чем угол к касательной к характеристике насоса. Чем круче характеристика системы питания, тем меньше вероятность неустойчивой работы насоса.

С характеристикой потребного напора системы питания  $H_c'$  работа насоса будет устойчивой, а с характеристикой  $H_c$  – неустойчивой.

Таким образом при проектировании насоса необходимо, чтобы рабочая точка находилась в области I во всём диапазоне работы двигателя. Имеются конструктивные методы, позволяющие обеспечить требуемую форму напорной характеристики насоса [36].

Колебательным контуром в данном случае являются внутренние полости насоса, а обратной связью выступает зависимость напора насоса от характеристик системы подачи. Колебания давления на выходе из насоса также могут приводить к возникновению колебаний тяги двигателя.

### **1.5. Влияние параметров газовой каверны за бустерным насосным агрегатом окислителя на возникновение автоколебаний**

Возникновение кавитации в полостях насоса также может явиться причиной возникновения автоколебаний [40, 50, 70]. Как правило, возникновение кавитации наблюдается на повышенных режимах работы, где частота вращения максимальная, но возможны случаи, при которых данное явление может произойти и на режимах глубокого дросселирования.

В работах [15, 66] рассмотрена схема привода бустерного насосного агрегата окислителя (БНАО) генераторным газом. При этом генераторный газ после турбины внедряется в основной поток окислителя на выходе из БНАО. Таким образом, на определённом расстоянии от выхода из БНАО имеется зона, в которой происходит конденсация генераторного газа, то есть поток является двухфазным.

Снижение режима по тяге приводит к снижению давлений компонентов на выходе из БНАО и характер конденсации газа за БНАО изменяется.

При определённом сочетании параметров, конденсация генераторного газа может не завершаться до входа потока в основной насос, и это может приводить к возникновению кавитационных автоколебаний в основном насосе.

Колебательным контуром являются полости БНАО и основного насоса окислителя, а обратной связью является линия привода БНАО от генераторного газа.

### **1.6. Выводы по главе**

На основе проведённого анализа сформулированы следующие выводы:

1. ЖРД является потенциально автоколебательной системой и при определённых соотношениях параметров во внутридвигательных контурах возможно возникновение автоколебаний тяги двигателя.

2. Для рассмотренных случаев можно констатировать, что необходимым, но не достаточным условием возникновения автоколебаний, является наличие обратной связи в колебательном контуре. При этом, возникновение автоколебаний возможно только при определённых соотношениях параметров колебательной системы.

3. Как правило, при работе ЖРД на номинальном режиме обеспечивается отсутствие автоколебаний, но при глубоком дросселировании по тяге характеристики агрегатов подачи, параметры течения компонентов и процессы горения существенно меняются, что может приводить к появлению автоколебаний.

4. Далее необходимо выделить внутридвигательные контуры, в которых есть обратные связи, и определить параметры системы, влияющие на возникновение автоколебаний тяги ЖРД.

## ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ В РАССМАТРИВАЕМОМ ЖРД

### 2.1. Рассмотрение структурно-функциональной схемы ЖРД

На рисунке 2.1 представлена структурно-функциональная схема ЖРД выполненного по схеме с дожиганием окислительного генераторного газа. В общем случае она состоит из ТНА, который включает в себя насос окислителя, две ступени насоса горючего и турбину. Горючее из второй ступени насоса и весь окислитель подаются в газогенератор, где газифицируются и приводят во вращение турбину основного ТНА, а далее поступают в камеру сгорания, где смешиваются с оставшейся частью горючего и получившиеся продукты сгорания истекают из сопла. Перед основными насосами установлены бустерные насосы. По линии окислителя привод бустерного насоса осуществляется генераторным газом, отобранном после турбины основного ТНА, а бустерный насос горючего приводится во вращение горючим, отобранном на выходе из первой ступени насоса. Изменение тяги осуществляется регулятором, который регулирует расход горючего поступающий в газогенератор. Управление соотношением компонентов в двигателе осуществляется дросселем, который регулирует расход горючего, поступающий в камеру сгорания.

На рисунке 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.

При работе ЖРД в широком диапазоне по тяге, значения параметров в трактах агрегатов подачи значительно изменяются по сравнению с номинальными.



Необходимым условием для возникновения автоколебаний в каком-либо контуре двигателя, как известно, является наличие в нём источника энергии и обратной связи, через которую осуществляется переменное воздействие на источник энергии [45, 88]. Однако, наличие обратной связи не означает, что в системе обязательно возникнут автоколебания. Для появления автоколебаний необходимо определённое сочетание характеристик, как системы, так и обратной связи.

## **2.2. Составление математической модели рассматриваемого ЖРД**

Для проведения анализа параметров двигателя составлена математическая модель рассматриваемого двигателя, которая представляет собой систему уравнений, описывающую функционирование агрегатов системы подачи. Также выделены и рассмотрены некоторые контуры с обратными связями.

Для описания сложной технической системы, как ЖРД, возможно создание математических моделей различной сложности, в зависимости от требуемых задач. Как правило, математические модели разделяют на статические и динамические.

При описании стационарных режимов работы ЖРД можно использовать статические модели. Для описания нестационарных режимов (переход с режима на режим, запуск, останов) используют динамические модели. Динамические модели, в свою очередь, можно разделить на линейные и нелинейные.

На функционирование ЖРД влияют такие параметры, как инерция перемещаемых масс компонентов топлива, инерция вращающегося ротора ТНА. Также оказывает влияние: инерция при распространении тепловых потоков, податливость стенок трубопроводов и элементов конструкции ЖРД. Кроме того, необходимо учитывать изменение характерных времён запаздывания при протекании рабочих процессов в газогенераторе и камере сгорания, а также сжимаемость жидкости [10].

Для следующих задач целесообразно использовать статические модели:

- настройка двигателя на требуемые тягу и соотношение компонентов перед проведением огневых испытаний, в том числе лётных испытаний в составе РН;
- проведение энергетической увязки двигателя на стационарных режимах работы. С помощью статической модели определяется оптимальная схема ЖРД и рассчитываются основные параметры.

Линейные динамические модели можно использовать для таких задач, как:

- Определение особенностей функционирования двигателя в составе РН;
- Анализ устойчивости в агрегатах, контурах или ЖРД в целом;
- Определение амплитудно-фазовых частотных характеристик ЖРД.

Линейная динамическая модель получается за счёт линеаризации нелинейной динамической модели. Линейная динамическая модель ЖРД является замкнутой системой линеаризованных дифференциальных и алгебраических уравнений, описывающих процесс изменения параметров двигателя в окрестности выбранного стационарного режима.

Нелинейные динамические модели являются более сложными и их можно использовать для решения следующих задач:

- Анализ схемных решений ЖРД, обеспечивающих надёжный запуск и возможность широкого регулирования по тяге;
- Определение параметров регулирующих органов (регулятора и дросселя), которые обеспечат устойчивость и приемлемую точность работы системы регулирования;
- Исследование процессов в ЖРД при его глубоком дросселировании;
- Определение характеристик останова с различных режимов работы для минимизации разброса импульса последствия;
- Исследование процессов запуска ЖРД и определение характеристик пусковых устройств и органов управления тягой и соотношением

компонентов, обеспечивающих запуск двигателя в требуемых условиях по давлениям и температурам компонентов топлива на входе в двигатель;

- Согласование динамических характеристик ЖРД с ракетными или стендовыми системами.

Математическая модель рассматриваемого типового ЖРД разработана на основании уравнений, приведённых в работах Беляева Е.Н., Чванова В.К., Червакова В.В. Рассматриваемая система уравнений состоит из алгебраических уравнений и дифференциальных уравнений с запаздыванием.

При формировании математической модели исследуемого ЖРД будем использовать нелинейные дифференциальные уравнения для описания движения компонентов и газов по магистралям, а также для описания вращательного движения роторов агрегатов подачи. Это позволит в полной мере учесть влияние вышеописанных явлений на изменение параметров в трактах агрегатов подачи. Дифференциальные уравнения решались численно, методом Рунге-Кутты 4 порядка.

В состав математической модели входят алгебраические уравнения, описывающие напорные и мощностные характеристики насосов, дифференциальные уравнения движения окислителя и горючего по магистралям, дифференциальное уравнение движения продуктов сгорания по газоводу, дифференциальное уравнения, определяющее частоту вращения вала ТНА в зависимости от крутящих моментов турбины и насосов.

Математическая модель не включает уравнения, описывающие процессы горения компонентов в газогенераторе и камере сгорания, так как в данной работе вопросы устойчивости горения не рассматриваются. Температура продуктов сгорания описывается экспоненциальными зависимостями с использованием эмпирических коэффициентов на основании опыта проектирования ЖРД в АО «НПО Энергомаш».

Составленная система уравнений является системой уравнений с запаздыванием, то есть учитывается время прохождения возмущений по трактам ЖРД.

Для рассматриваемого ЖРД будем учитывать следующие характерные времена:

1. Время прохождения возмущений по магистралям подачи компонентов топлива к насосам и в камеру. Данные времена определяются скоростью распространения звука в магистрали и геометрическими характеристиками магистрали. Время прохождения возмущения по трубопроводу может быть определено следующим образом [83]:

$$t = l \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\frac{1}{E'} + \frac{d_0}{\delta} + \frac{1}{E''}}}, \quad (2.1)$$

где  $l$  – длина трубопровода,  $d_0$  – внутренний диаметр трубопровода,  $\delta$  – толщина стенки трубопровода,  $E'$  – модуль объёмной упругости жидкости,  $E''$  – модуль упругости материала трубопровода.

2. Время преобразования компонентов топлива и время пребывания продуктов сгорания компонентов в газогенераторе и камере. Данные времена определяются исходя из конструктивных особенностей конкретных экземпляров.

С учётом этого, возмущение по температуре в газогенераторе будет сказываться на изменении частоты вращения вала ТНА, давлениях и расходах компонентов топлива только спустя время задержки. Это время будет определяться суммой времени протекания рабочих процессов в газогенераторе, скоростью распространения возмущений в газопроводе и в магистралях компонентов топлива от насосов до входа в газогенератор.

Применительно к режимам глубокого дросселирования ЖРД, оценка скорости распространения возмущений в жидкостных трубопроводах и времён пребывания газа в газогенераторе показывает, что наибольшими временами в данном случае будут являться: время преобразования компонентов топлива в газогенераторе, время пребывания газа в газогенераторе и время пребывания газа

в газоведе от газогенератора до форсунок камеры сгорания. Эти времена и будут в основном определять время прохождения возмущения в системе и, тем самым, частоту собственных колебаний. На режимах глубокого дросселирования температура в газогенераторе может опускаться ниже 100 °С, а также уменьшаются перепады давления на форсунках, что существенно ухудшает процессы смесеобразования и увеличивает время преобразования компонентов топлива в газогенераторе. Применительно к рассматриваемой схеме ЖРД это означает, что собственная частота двигателя будет уменьшаться при уменьшении тяги. С учётом вышеописанного, составим систему уравнений для рассматриваемой схемы ЖРД:

**1. Уравнение движения окислителя через форсуночную головку:**

$$p_{\text{вх.фо}} - p_{\text{зз}} - \zeta_{\text{ф.о}} \cdot G_{\text{ок}}^2 - j_{\text{ф.о}} \cdot \frac{dG_{\text{ок}}}{dt} = 0, \quad (2.2)$$

$$\text{где } \zeta_{\text{ф.о}} = \frac{1}{2 \cdot \rho_{\text{ок}} \cdot (\mu_{\text{ф.о}} \cdot F_{\text{ф.о}})^2}; j_{\text{ф.о}} = \frac{l_{\text{ф.о}}}{F_{\text{ф.о}}}. \quad (2.3)$$

**2. Уравнение движения горючего через форсуночную головку:**

$$p_{\text{вх.фо}} - p_{\text{зз}} - \zeta_{\text{ф.о}} \cdot G_{\text{ок}}^2 - j_{\text{ф.о}} \cdot \frac{dG_{\text{ок}}}{dt} = 0, \quad (2.4)$$

$$\text{где } \zeta_{\text{ф.о}} = \frac{1}{2 \cdot \rho_{\text{ок}} \cdot (\mu_{\text{ф.о}} \cdot F_{\text{ф.о}})^2}; j_{\text{ф.о}} = \frac{l_{\text{ф.о}}}{F_{\text{ф.о}}}. \quad (2.5)$$

**3. Зависимость температуры генераторного газа от соотношения компонентов:**

$$T_{\text{зз}} = B \cdot K m_{\text{зз}}^C, \quad (2.6)$$

где  $B, C$  – эмпирические коэффициенты.

**4. Уравнение движения газа по тракту от ГГ до турбины:**

$$p_{\text{зз}}^2 - p_{\text{вх.т}}^2 - \zeta \cdot R \cdot T_{\text{зз}} \cdot \dot{m}_m^2 = 0 \quad (2.7)$$

**5. Расход газа через турбину ТНА:**

$$\dot{m}_m = \mu_m \cdot F_m \cdot A(k) \cdot q(\lambda_{1\text{ад}}) \cdot \frac{p_{\text{вх.т}}}{\sqrt{R \cdot T_{\text{зз}}}} \quad (2.8)$$

**6. Уравнение для приведённой адиабатной скорости потока газа в сопловом аппарате турбины:**

$$\lambda_{1ад} = \sqrt{\frac{k+1}{k-1} \cdot \left( 1 - \left( \rho_m + (1 - \rho_m) \cdot \left( \frac{p_{вых.м}}{p_{вх.м}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right) \right)} \quad (2.9)$$

**7. Уравнение напорной характеристики насоса окислителя:**

$$p_{вых.но} - p_{вх.но} = A_1 \cdot n^2 + B_1 \cdot n \cdot G_{ок} - C_1 \cdot G_{ок}^2, \quad (2.10)$$

где  $A_1, B_1, C_1$  – коэффициенты, получаемые при проливке насоса.

**8. Уравнение напорной характеристики БНАО:**

$$p_{вых.БНАО} - p_{вх.БНАО} = A_2 \cdot n_{БНАО}^2 + B_2 \cdot n_{БНАО} \cdot G_{ок} - C_2 \cdot G_{ок}^2, \quad (2.11)$$

где  $A_2, B_2, C_2$  – коэффициенты, получаемые при проливке БНАО.

**9. Уравнение напорной характеристики БНАГ:**

$$p_{вых.БНАГ} - p_{вх.БНАГ} = A_2 \cdot n_{БНАГ}^2 + B_2 \cdot n_{БНАГ} \cdot G_{гор} - C_2 \cdot G_{гор}^2, \quad (2.12)$$

где  $A_2, B_2, C_2$  – коэффициенты, получаемые при проливке БНАГ.

**10. Уравнение движения окислителя по магистрали от выхода из БНАО до входа в насос окислителя:**

$$p_{вх.но} - p_{вых.БНАО} - \frac{\xi_{маг.БНО}}{\rho_{ок}} \cdot G_{ок}^2 - \frac{l_{маг.БНО}}{F_{маг.БНО}} \cdot \frac{dG_{ок}}{dt} = 0 \quad (2.13)$$

**11. Уравнение движения окислителя по магистрали от выхода из БНАГ до входа в насос горючего:**

$$p_{вх.но} - p_{вых.БНАО} - \frac{\xi_{маг.БНО}}{\rho_{ок}} \cdot G_{ок}^2 - \frac{l_{маг.БНО}}{F_{маг.БНО}} \cdot \frac{dG_{ок}}{dt} = 0 \quad (2.14)$$

**12. Уравнение движения окислителя по магистрали от выхода из насоса до входа в газогенератор (включая клапан окислителя):**

$$p_{вх.фо} - p_{вых.но} - \frac{\xi_{маг.о}}{\rho_{ок}} \cdot G_{ок}^2 - \frac{l_{маг.о}}{F_{маг.о}} \cdot \frac{dG_{ок}}{dt} = 0 \quad (2.15)$$

**13. Уравнение вращательного движения ротора ТНА:**

$$\left( I_p + \sum_{i=1}^3 I_H \right) \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_m - \sum_{i=1}^3 M_H^{cm} + \sum_{i=1}^3 B_H \frac{dG_H}{dt} \quad (2.16)$$

**14. Крутящий момент турбины:**

$$M_m = \frac{\dot{m}_m \cdot L_{0ад} \cdot \eta_m}{2 \cdot \pi \cdot n} \quad (2.17)$$

**15. Располагаемая адиабатная работа газа:**

$$L_{0ад} = \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T_{зз} \cdot \left( 1 - \frac{1}{\left( \frac{P_{вх.м}}{P_{вых.м}} \right)^{\frac{k-1}{k}}} \right) = \frac{k}{k+1} \cdot R \cdot T_{зз} \cdot \lambda_{2ад}^2 \quad (2.18)$$

**16. Уравнение для приведённой адиабатной скорости потока газа в рабочем колесе турбины:**

$$\lambda_{2ад} = \sqrt{\frac{k+1}{k-1} \cdot \left( 1 - \left( \frac{P_{вых.м}}{P_{вх.м}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)} \quad (2.19)$$

**17. Моментная характеристика БНАО:**

$$M_{БНАО}^{cm} = A_3 \cdot n_{БНАО}^2 + B_3 \cdot n_{БНАО} \cdot G_{ок} - C_3 \cdot G_{ок}^2, \quad (2.20)$$

где  $A_3, B_3, C_3$  – коэффициенты, получаемые при проливке БНАО.

**18. Моментная характеристика БНАГ:**

$$M_{БНАГ}^{cm} = A_3 \cdot n_{БНАГ}^2 + B_3 \cdot n_{БНАГ} \cdot G_{гор} - C_3 \cdot G_{гор}^2, \quad (2.21)$$

где  $A_3, B_3, C_3$  – коэффициенты, получаемые при проливке БНАГ.

**19. Моментная характеристика насоса окислителя:**

$$M_{н.о}^{cm} = A_4 \cdot n^2 + B_4 \cdot n \cdot G_{ок} - C_4 \cdot G_{ок}^2, \quad (2.21)$$

где  $A_4, B_4, C_4$  – коэффициенты, получаемые при проливке насоса окислителя.

**20. Моментная характеристика насоса горючего 1-й ступени:**

$$M_{н.г1}^{cm} = A_5 \cdot n^2 + B_5 \cdot n \cdot G_{г1} - C_5 \cdot G_{г1}^2, \quad (2.22)$$

где  $A_5, B_5, C_5$  – коэффициенты, получаемые при проливке насоса горючего первой ступени.

**21. Моментная характеристика насоса горючего 2-й ступени:**

$$M_{н.г2}^{cm} = A_6 \cdot n^2 + B_6 \cdot n \cdot G_{г2} - C_6 \cdot G_{г2}^2, \quad (2.23)$$

где  $A_6, B_6, C_6$  – коэффициенты, получаемые при проливке насоса горючего второй ступени.

Основное отличие составленной математической модель исследуемого ЖРД от представленных в литературе заключается в том, что уравнение, описывающее функционирование регулятора учитывает силу трения покоя, которая является существенно нелинейной.

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.

Если детали стабилизатора двигаются с перекосом или на движение золотника оказывают влияние различного вида существенные нелинейности, например, сила сухого трения, сила трения покоя, сила вязкого трения, то перемещение золотника стабилизатора может происходить с запаздыванием [37, 53].

Рассмотрим регулятор, схема конструкции которого представлена на рисунке 2.2. Управление расходом через регулятор осуществляется в дроссельной части посредством жёсткой связи валика 1 и гильзы 2, которая перемещаясь, перекрывает дросселирующие окна в направляющей 3, располагающейся в корпусе 7. Расход через регулятор задаётся положением валика, который жёстко соединён с приводом. После прохождения дросселирующих окон поток направляется в стабилизирующую часть регулятора, состоящую из золотника 4, которая перекрывает регулирующие окна в направляющей 6. Положение золотника определяется балансом сил сжатия пружины 5 и сил, действующих на торцевые поверхности золотника 4 от перепада давления.

При увеличении давления на входе в регулятор увеличивается сила, действующая на левый торец золотника, следовательно, он смещается вправо, и проходная площадь регулирующих окон в направляющей перекрывается так, что

исходный расход сохраняется. При снижении давления перед регулятором золотник стабилизатора смещается влево, открывая регулирующие окна. Таким образом обеспечивается парирование возмущений и поддержание постоянного расхода регулятором.

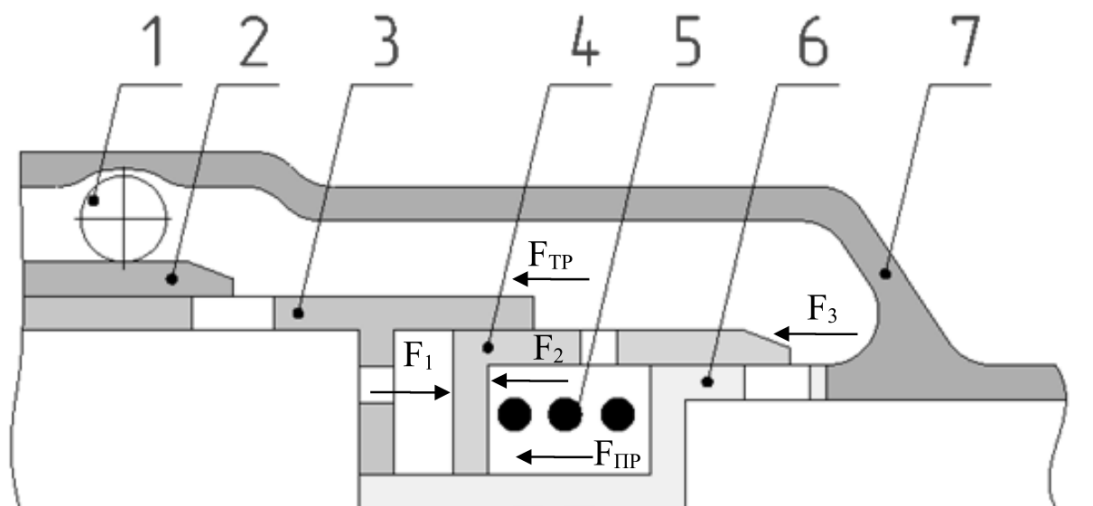


Рисунок 2.2 – Схема регулятора

Положение золотника 4 в стационарной постановке определяется балансом сил от сжатия пружины ( $F_{ПР}$ ) и перепадом давления на золотнике ( $F_1-F_2-F_3$ ), однако, для определения характера изменения расхода при переходных процессах в математической модели учитывались силы вязкого трения и трения покоя ( $F_{ТР}$ ). Формула 2.24 описывает зависимость положения золотника от баланса сил от перепада давления, сжатия пружины и сил трения.

$$m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} + D \cdot \frac{dx}{dt} + c \cdot x = F_1 - F_2 - F_3 - F_{ТР}, \quad (2.24)$$

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 2.3 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. В итоге появляется расслоение расхода при прямом и обратном ходе.

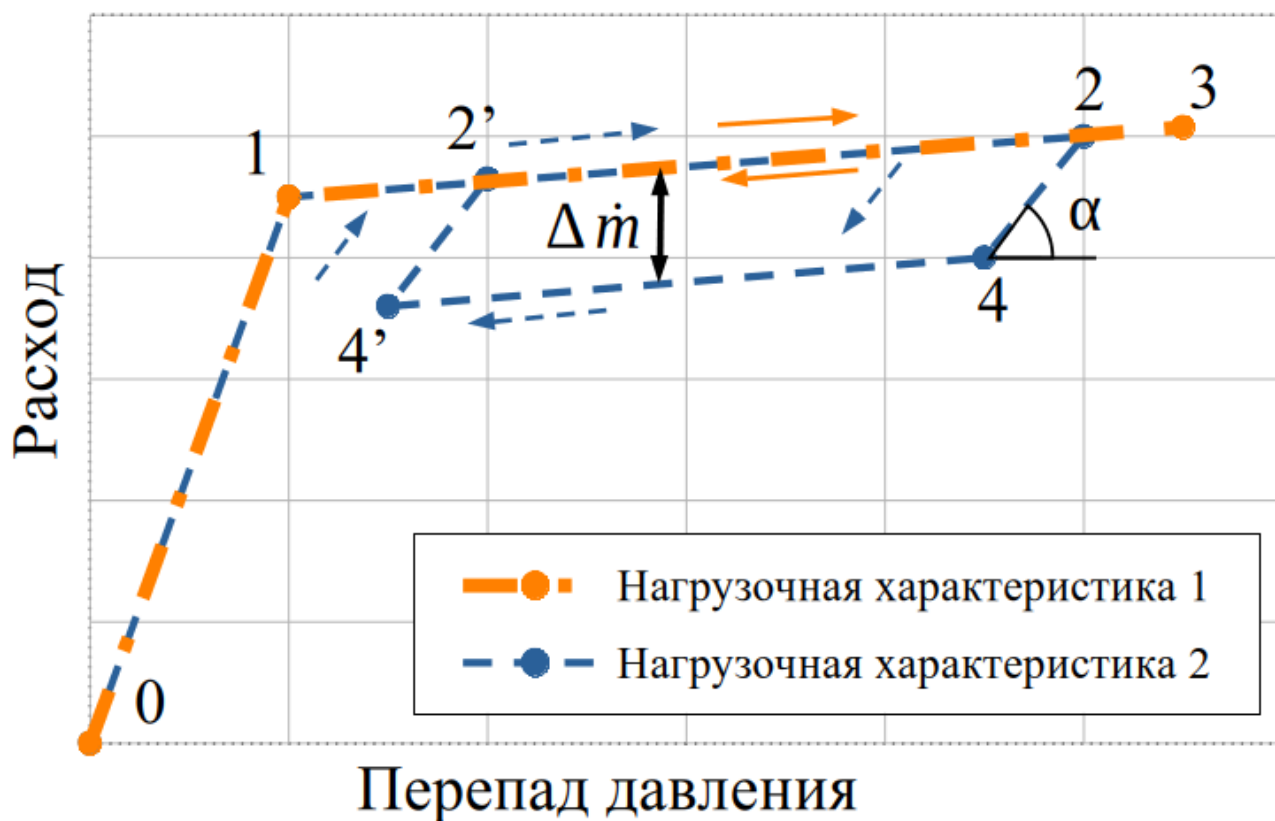


Рисунок 2.3 – Нагрузочные характеристика регулятора

Как видно из рисунка, на рабочем участке 1-3, запаздывание перемещения золотника стабилизирующей части при 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 2.3: угол наклона переходного участка  $\alpha$  и разность расходов между ветвями  $\Delta m$ .

Переходный участок 4`-4-2-3 динамической нагрузочной характеристики (рисунок 3) можно описать зависимостью 2.25.

$$\dot{m} = A \cdot \tanh(B \cdot \Delta p_{pp}) + C, \quad (2.25)$$

где  $\dot{m}$  – массовый расход через регулятор,  $\Delta p_{pp}$  – перепад давления на регуляторе,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  – 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 2.25 позволяет описать изменение расхода при прохождении возмущения по перепаду давления на регуляторе для последующего проведения оценки параметров автоколебаний.

Использование зависимости 2.25, 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 2.3, 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.

При расчёте по разработанной математической модели для определения характера изменения параметров двигателя в начальный момент времени в систему подаётся возмущение, далее в процессе времени определяется изменение параметров, представляющее реакцию системы на данное возмущение. Для этого, временной интервал разбивается на ряд отрезков для интегрирования. В каждом цикле определяются параметры системы.

## 2.3. Рассмотрение механизмов возникновения автоколебаний в контурах ЖРД

### 2.3.1. Контур с обратной связью по линии насоса окислителя

На рисунке 2.4 представлен контур, где в качестве основной колебательной системы выступает газовый тракт от газогенератора до турбины, а обратной связью является связь характеристик турбины с характеристиками насоса окислителя, посредством передачи крутящего момента через вал ТНА. Между блоками представлены входные и выходные параметры для каждого блока.

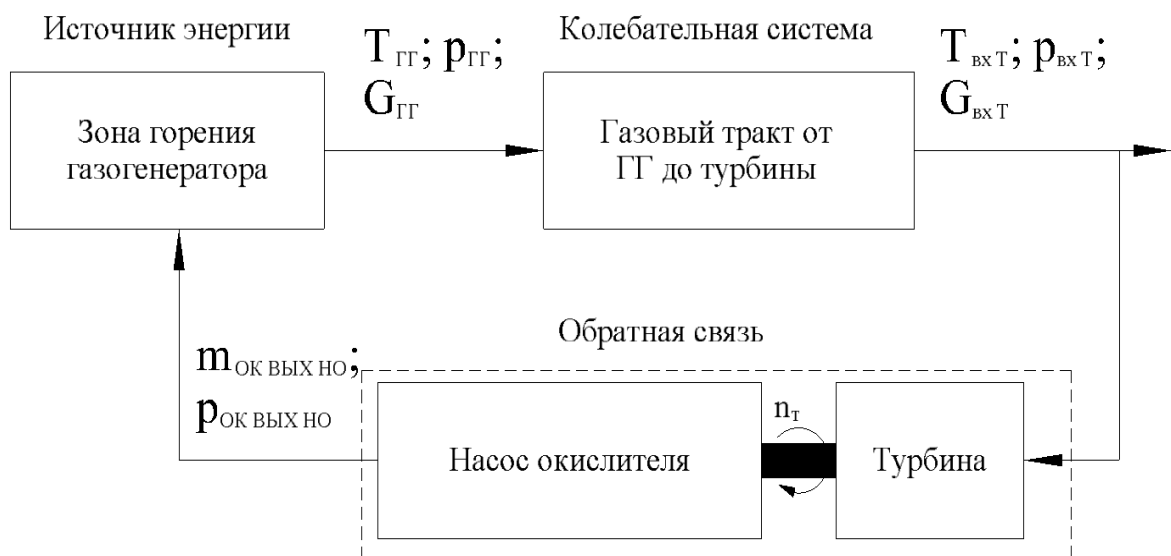


Рисунок 2.4 – Контур с обратной связью по линии насоса окислителя

Исходя из вышеописанных особенностей работы ЖРД на режимах глубокого дросселирования по тяге отмечено, что в процессе дросселирования рабочая точка может смещаться в область, где значение производной становится положительным.

Рабочая точка на напорной характеристике насоса окислителя определяется из равенства напора насоса и потребного напора системы питания, который, в случае ЖРД, выполненного по схеме с дожиганием окислительного генераторного газа определяется зависимостью 2.26.

$$H_c = \left( \frac{p_{zz}}{\rho} + \frac{\Delta p_{\phi.zg}}{\rho} + \frac{\Delta p_{\phi.zg}}{\rho} + \frac{\Delta p_{mag.o}}{\rho} + \frac{c_{вых}^2}{2} \right) - \left( \frac{p_{вх}}{\rho} + \frac{c_{вх}^2}{2} \right) \quad (2.26)$$

На рисунке 2.5 представлен фрагмент с вариантами напорных характеристик насоса окислителя в области параметров, соответствующих режимам глубокого дросселирования ЖРД. По оси ординат представлено отношение напора насоса к квадрату частоты вращения вала ТНА, а по оси абсцисс отношение объёмного расхода через насос к частоте вращения вала ТНА.

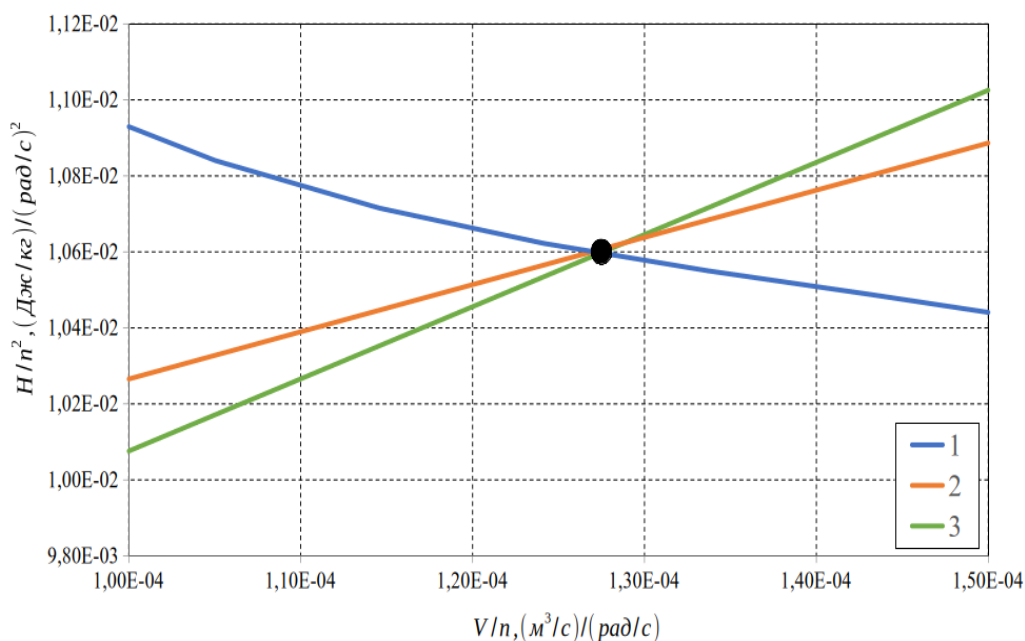


Рисунок 2.5 – Напорные характеристики насоса окислителя

Отличие данных напорных характеристик заключается в различных значениях производной в точке пересечения, которая является рабочей точкой для режима работы ЖРД, для которого производился расчёт. В таблице 2.1 приведены значения параметров напорных характеристик насосов окислителя в рабочей точке (точке пересечения характеристик).

Таблица 2.1. Параметры напорных характеристик насосов окислителя.

№ напорной хар-ки	Относительный расход ( $V/n$ ) в рабочей точке, $(\text{м}^3/\text{с})/(\text{рад}/\text{с})$	Производная напорной характеристики в рабочей точке, $((\text{Джс}/\text{кг})/(\text{рад}/\text{с})^2)/((\text{м}^3/\text{с})/(\text{рад}/\text{с}))$
1	$1,28 \cdot 10^{-4}$	-7,54
2	$1,28 \cdot 10^{-4}$	12,42
3	$1,28 \cdot 10^{-4}$	18,99

Для системы с вышеприведёнными параметрами напорной характеристикой насоса окислителя при одинаковых начальных условиях проведены расчёты параметров ЖРД. Расчёт представляет собой реакцию системы на внесённое возмущение в виде случайного изменения температуры в газогенераторе.

На рисунках 2.6 и 2.7 приведены расчётные значения частоты вращения вала ТНА и температуры генераторного газа. На рисунке 2.8 представлены расчётные значения относительной тяги двигателя  $\bar{R}$ .

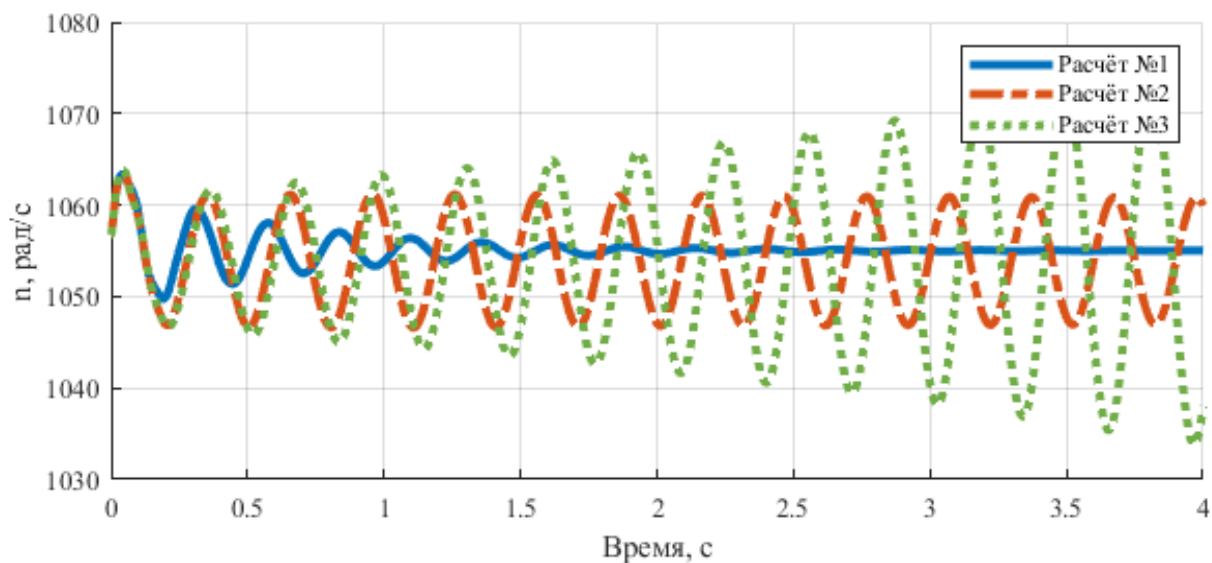


Рисунок 2.6 – Частота вращения вала ТНА

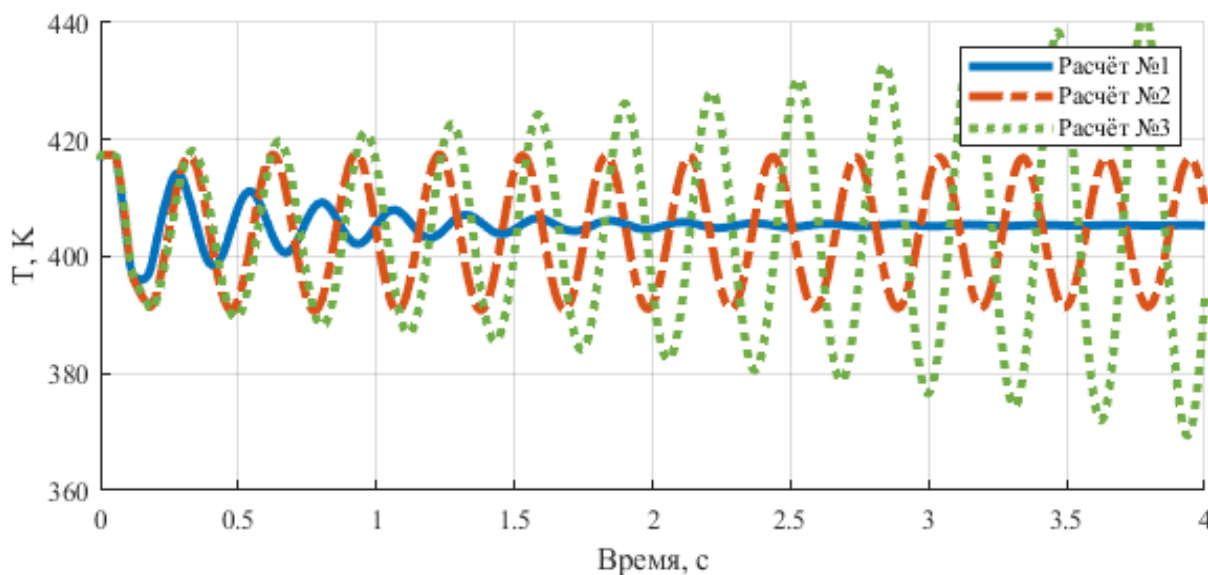


Рисунок 2.7 – Температура генераторного газа

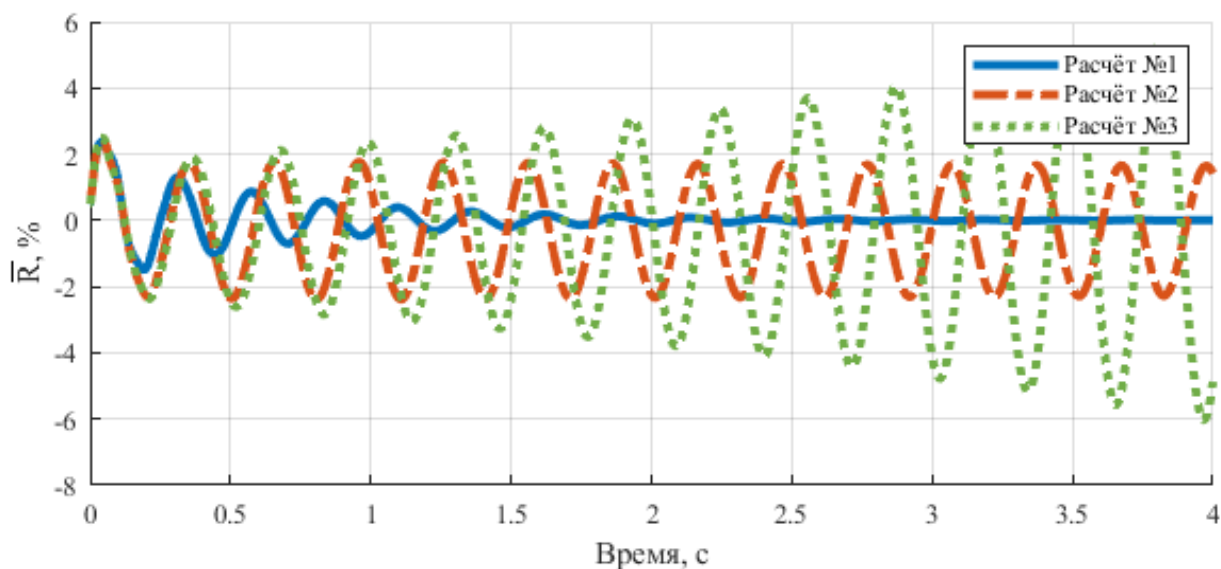


Рисунок 2.8 – Относительная тяга ЖРД

По результатам проведенных расчетов, для первых трёх периодов колебаний с момента времени 0,31 с определены частота, амплитуда и логарифмический декремент затухания колебаний относительной тяги ЖРД и приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Параметры колебаний относительной тяги ЖРД.

	Частота колебаний, Гц	Амплитуда колебаний, %	Логарифмический декремент затухания колебаний
Расчёт №1	3,79 / 3,83 / 3,83	1,32 / 0,87 / 0,59	0,416 / 0,398 / 0,394
Расчёт №2	3,31 / 3,32 / 3,32	1,71 / 1,75 / 1,77	-0,023 / -0,009 / 0,006
Расчёт №3	3,20 / 3,20 / 3,20	1,89 / 2,13 / 2,35	-0,122 / -0,100 / -0,088

При увеличении производной напорной характеристики насоса окислителя в рабочей точке происходит уменьшение логарифмического декремента затухания колебаний, и, как следствие, увеличение амплитуды колебаний.

Механизм прохождения возмущения по контуру реализуется следующим образом (например, при увеличении температуры в газогенераторе):

- увеличение температуры в газогенераторе;

- увеличение мощности турбины;
- увеличение частоты вращения вала ТНА;
- увеличение расхода окислителя в газогенератор;
- увеличение соотношения компонентов в газогенераторе (в случае если расход горючего в газогенератор поддерживается постоянной работой регулятора);
- уменьшение температуры в газогенераторе.

Таким образом, возмущение передаётся через обратную связь обратно на вход в систему.

В рассматриваемом случае, устойчивость определяется сочетанием характеристик насоса окислителя, турбины и параметрами потока в тракте от газогенератора до турбины. Для устойчивой работы необходимо, чтобы во всём диапазоне работы угол наклона напорной характеристики насоса окислителя не превышал угол наклона характеристики требуемого напора системы питания [53].

Колебания внутренних параметров ЖРД приводят к возникновению колебаний тяги, так как возмущения частоты вращения вала ТНА приводят к возникновению колебаний давления в камере сгорания, изменение которого пропорционально изменению тяги двигателя.

По результатам расчётов определено влияние параметров нагрузочной характеристики насоса окислителя на амплитуду и логарифмический декремент затухания колебаний тяги ЖРД.

### **2.3.2. Контур с обратной связью по линии привода БНАО**

На рисунке 2.9 представлен контур, в котором обратной связью является изменение параметров газа в газовом тракте от выхода турбины ТНА до входа в турбину БНАО, их влияние на частоту вращения турбины БНАО, что, в свою очередь, приводит к изменению параметров окислителя на входе в насос окислителя основного ТНА.

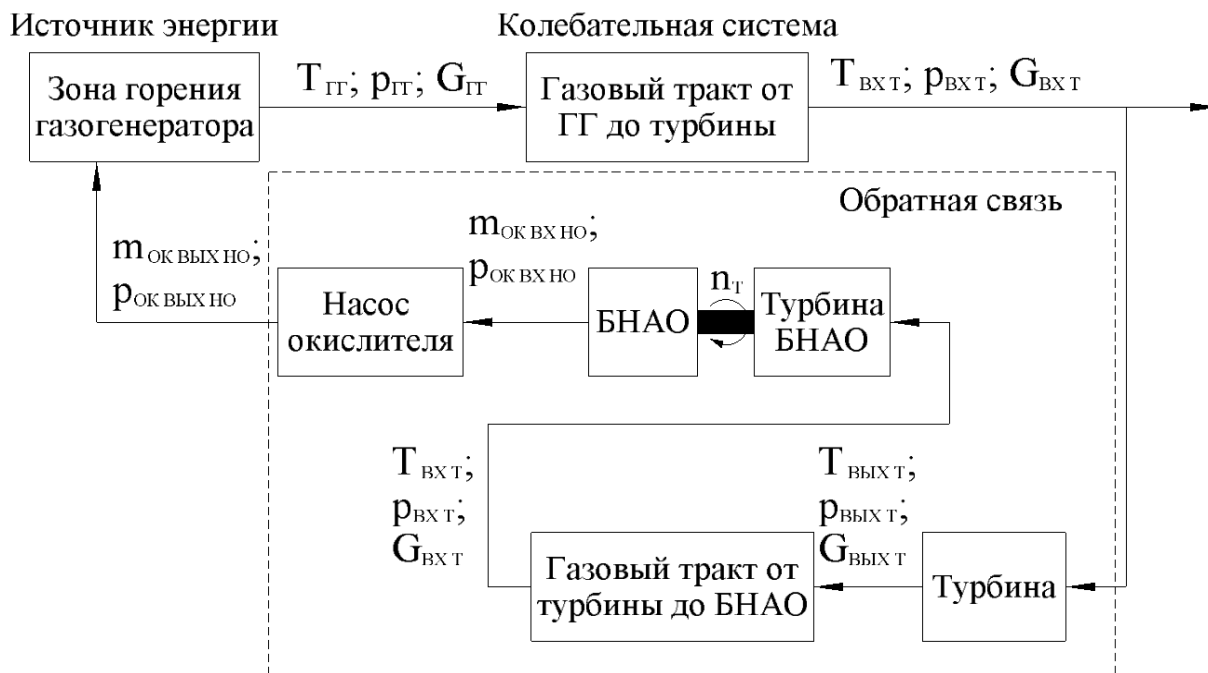


Рисунок 2.9 – Контур с обратной связью по линии привода турбины БНАО

Механизм прохождения возмущения в данном контуре частично совпадает с механизмом, рассмотренным в предыдущем контуре:

- увеличение температуры в газогенераторе;
- увеличение мощности турбины БНАО;
- увеличение расхода окислителя через БНАО;
- увеличение расхода окислителя через основной насос;
- увеличение соотношения компонентов в газогенераторе (в случае если расход горючего в газогенератор поддерживается постоянным с помощью регулятора);
- уменьшение температуры в газогенераторе.

Таким образом, возмущение передаётся через обратную связь обратно на вход в систему.

### 2.3.3. Контур с обратной связью по линии регулятора

На рисунке 2.10 приведён контур, в котором, в качестве обратной связи выступает зависимость характеристики второй ступени насоса горючего от

частоты вращения вала ТНА и зависимость расхода через регулятор от перепада давления на нём.

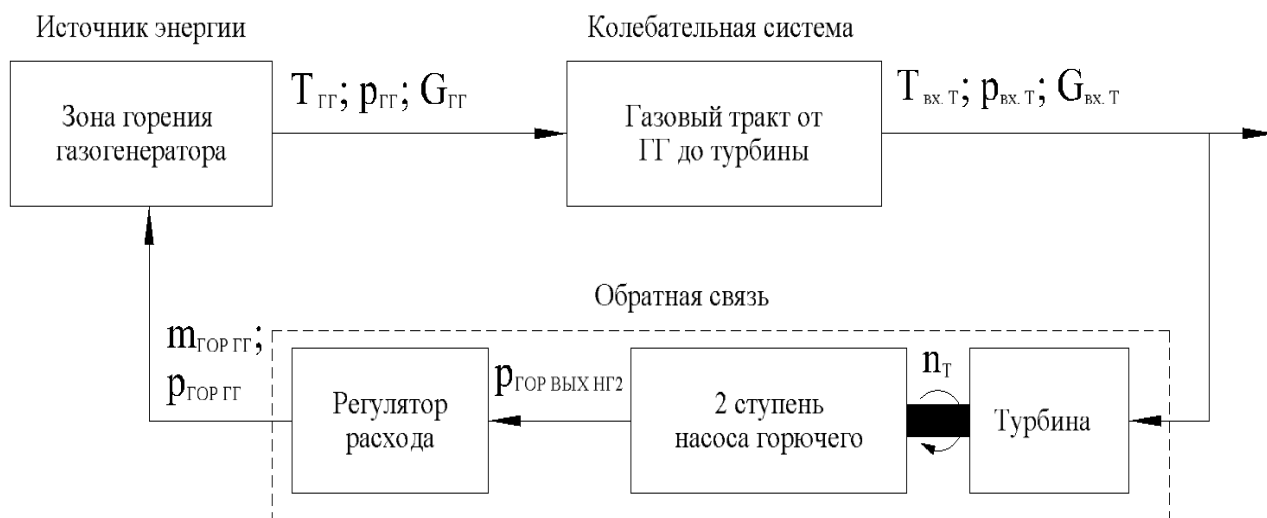


Рисунок 2.10 – Контур с обратной связью по линии подачи горючего в газогенератор

В таблице 2.3 приведены атрибуты нагрузочных характеристик регуляторов, используемых при расчёте параметров ЖРД. Ранее, данные атрибуты выделены в главе 2.2 и отображены на рисунке 2.3.

Характеристика 1 отражает идеальный случай: поддержание постоянного расхода через регулятор при возмущениях по перепаду давления на нём. Характеристики 2 и 3 иллюстрируют случай запаздывания при перемещении стабилизирующей части регулятора в процессе изменения перепада давления на нём из-за влияния существенно нелинейных сил.

Таблица 2.3. Атрибуты динамических нагрузочных характеристик регуляторов.

	Разность расходов между ветвями $\Delta \dot{m}$ , кг/с	Производная переходного участка характеристики с углом $\alpha$ , кг/с/МПа
Характеристика 1	0	0
Характеристика 2	0,025	0,06
Характеристика 3	0,025	0,12

Для системы с вышеприведёнными атрибутами динамических нагрузочных характеристик регуляторов при одинаковых начальных условиях проведена серия расчётов параметров ЖРД. Расчёт представляет собой реакцию системы на внесённое возмущение в виде случайного изменения температуры в газогенераторе.

На рисунках 2.11 и 2.12 приведены расчётные значения частоты вращения вала ТНА и температуры генераторного газа. На рисунке 2.13 представлены расчётные значения относительной тяги двигателя  $\bar{R}$ .

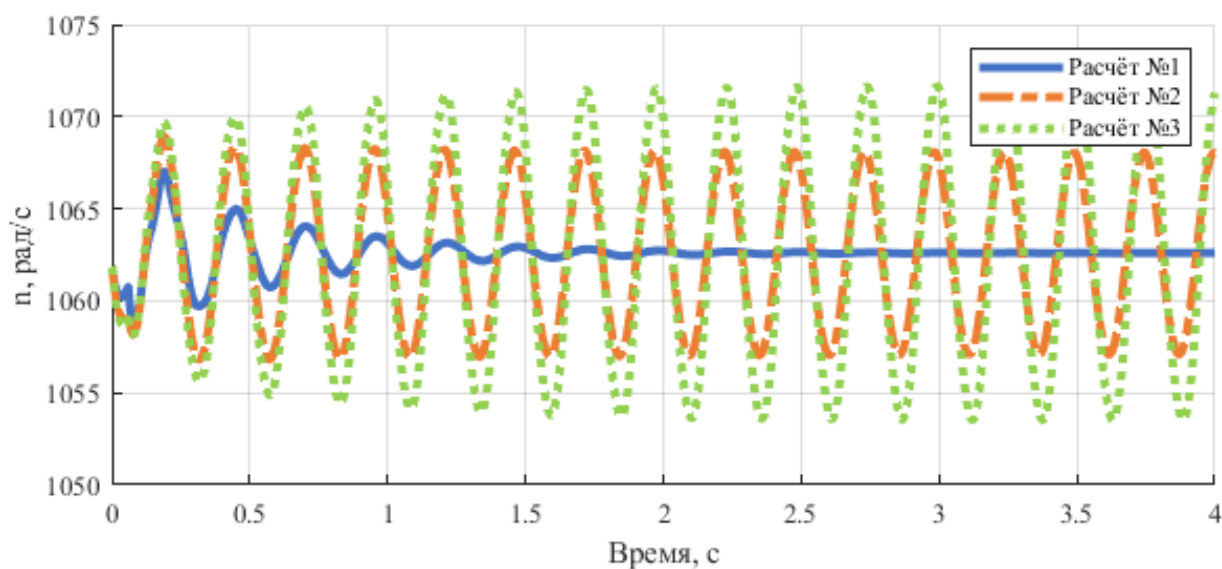


Рисунок 2.11 – Частота вращения вала ТНА

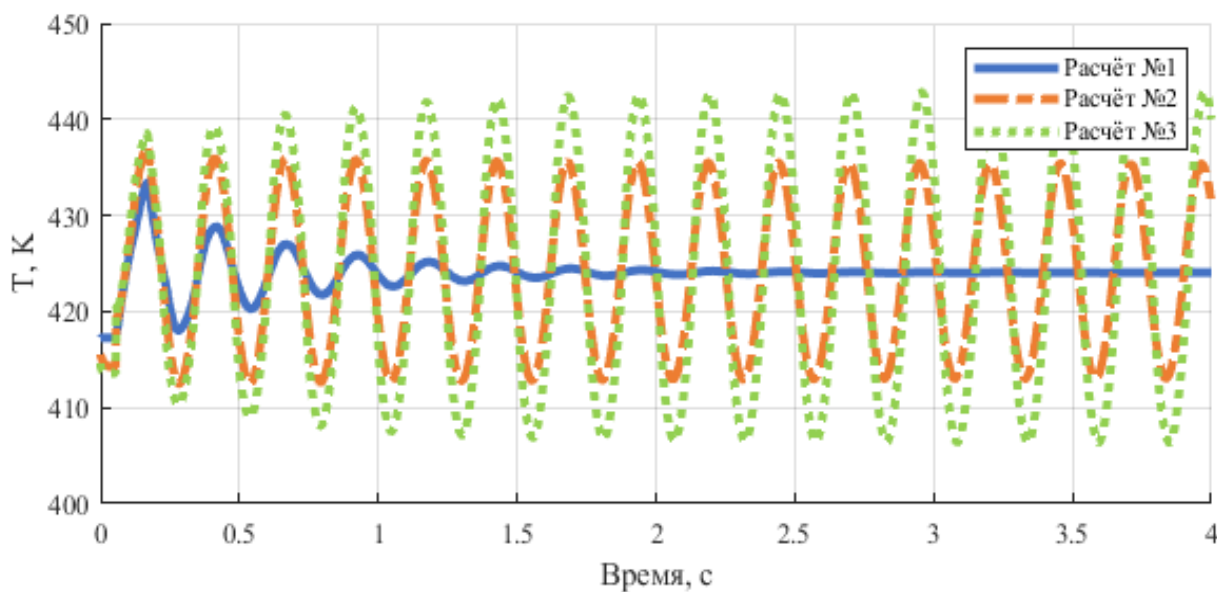


Рисунок 2.12 – Температура генераторного газа

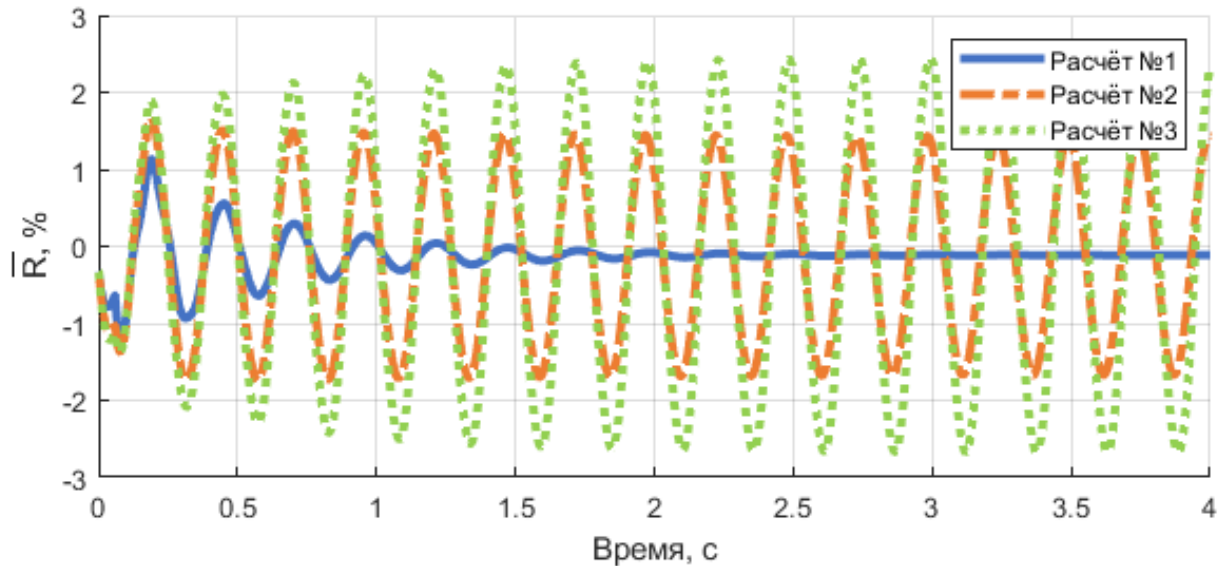


Рисунок 2.13 – Относительная тяга ЖРД

По результатам проведённых расчётов, для первых трёх периодов колебаний с момента времени 0,19 с определены частота, амплитуда и логарифмический декремент затухания колебаний относительной тяги ЖРД и приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.4. Параметры колебаний относительной тяги ЖРД.

	Частота колебаний, Гц	Амплитуда колебаний, %	Логарифмический декремент затухания колебаний
Расчёт №1	3,82 / 3,95 / 3,91	1,14 / 0,56 / 0,30	0,712 / 0,635 / 0,749
Расчёт №2	3,90 / 3,94 / 3,94	1,68 / 1,51 / 1,49	0,104 / 0,010 / 0,009
Расчёт №3	3,88 / 3,93 / 3,92	1,89 / 1,97 / 2,13	-0,041 / -0,076 / -0,049

На основании анализа результатов можно сказать, что увеличение угла переходного участка  $\alpha$  нагрузочной характеристики приводит к снижению логарифмического декремента затухания колебаний.

Механизм прохождения возмущения, следующий:

- увеличение температуры в газогенераторе;
- увеличение мощности турбины;

- увеличение давления на выходе из 2 ступени насоса горючего;
- уменьшение перепада давления на регуляторе;
- уменьшение расхода горючего через регулятор;
- увеличение соотношения компонентов в газогенераторе.

По результатам серии расчётов с различными атрибутами динамической нагрузочной характеристики регулятора выявлено, что воздействие нелинейных сил в процессе изменения перепада давления на регуляторе приводит к запаздыванию при перемещении золотника стабилизирующей части. В свою очередь, это отражается на расслоении расхода через регулятор при прямом и обратном ходе. В случае возникновения возмущений внутренних параметров при работе ЖРД возможно появление автоколебаний.

Колебания внутренних параметров ЖРД приводят к возникновению колебаний тяги, так как возмущения частоты вращения вала ТНА приводят к возникновению колебаний давления в камере сгорания, изменение которого пропорционально изменению тяги двигателя.

По результатам расчётов определено влияние атрибутов динамической нагрузочной характеристики регулятора на амплитуду и логарифмический декремент затухания колебаний тяги ЖРД.

#### **2.3.4. Контур с обратной связью по линии форсуночной головки**

На рисунке 2.14 приведена схема применительно к неустойчивости рабочего процесса в камере сгорания с обратной связью между давлением в камере сгорания и массовым расходом компонентов топлива через форсуночную головку.

В данном контуре неустойчивость рабочего процесса развивается следующим образом [61].

- увеличение давления в КС;
- возрастание расхода продуктов сгорания (ПС) через сопло;
- снижение расхода через форсуночную головку (ФГ);

- расход ПС возрастает, а скорость газообразования не изменяется, происходит снижение давления в КС;
- начнёт выгорать топливо, которое поступило в КС при повышенном давлении, то есть, произойдёт уменьшение газообразования и дальнейшее уменьшение давления в КС;
- падение давления в КС ниже начального значения вызовет рост перепада давления на форсуночной головке и, как следствие, приведёт к увеличению расхода компонентов через ФГ и снижению расхода ПС через сопло;
- из-за снижения расхода ПС через сопло и увеличения расхода компонентов через форсунки произойдёт рост давления в КС.

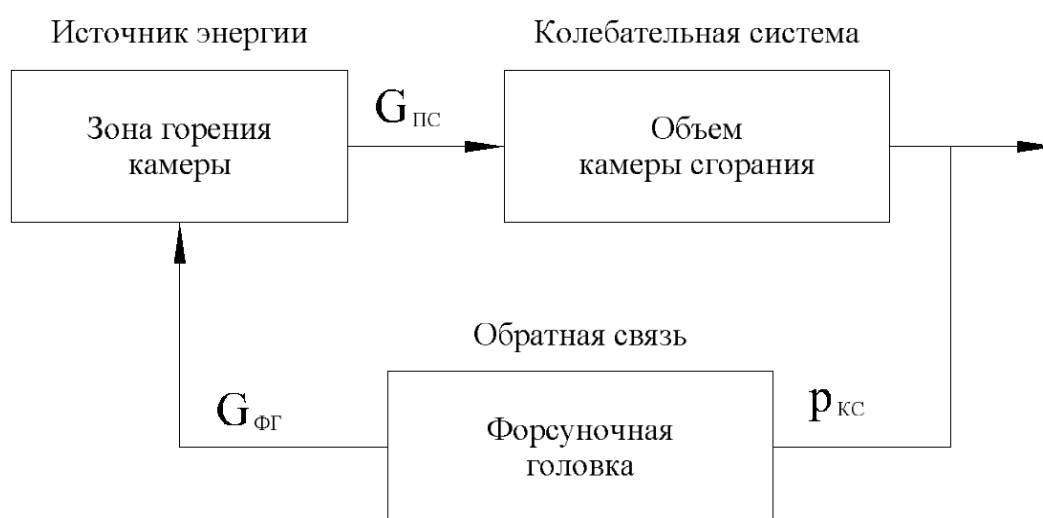


Рисунок 2.14 – Контур рабочего процесса в камере сгорания

Следует отметить, что выше рассмотрены только основные контуры ЖРД, в которых возможно возникновение автоколебаний. Обратные связи, обеспечивающие баланс осевых сил в основном ТНА и бустерных насосных агрегатах, а также обратные связи, обусловленные особенностями конструкции двигателя, также могут быть причиной возникновения автоколебательных процессов.

«Работу» обратных связей, представленных на рисунках 2.4, 2.9, 2.10 и 2.14 следует рассматривать системно, поскольку изменение параметров в одном из контуров оказывает влияние на двигатель в целом, что сказывается на изменении

частоты вращения вала ТНА и изменении расходов и давлений компонентов топлива на входе в камеру и газогенератор.

Во всех рассмотренных контурах наличие обратной связи является необходимым, но не достаточным условием возникновения автоколебаний. Обратная связь может также привести и к стабилизации процесса. Автоколебания возникают только при определённых характеристиках колебательной системы. Именно эти условия и являются предметом исследования механизмов возникновения автоколебаний и способов их подавления.

#### **2.4. Выводы по главе**

На основании проведённого анализа выделенных контуров процессов сделаны следующие выводы:

1. Выделены основные контуры, в которых возможно возникновение автоколебаний и представлено физическое описание механизмов возникновения автоколебаний в этих контурах.

2. Составлена математическая модель, описывающая процессы в рассматриваемых контурах ЖРД.

3. Описано влияние существенных нелинейных сил в стабилизирующей части регулятора на вид его динамической нагрузочной характеристики. Выделены атрибуты динамической нагрузочной характеристики регулятора: разность расходов между ветвями  $\Delta \dot{m}$  и угол наклона переходного участка  $\alpha$ .

4. Расчётно подтверждено, что при функционировании такого регулятора в составе ЖРД возможно возникновение незатухающих автоколебаний при определённых сочетаниях атрибутов динамической нагрузочной характеристики регулятора и внутренних параметров ЖРД.

5. Определено влияние характеристик некоторых агрегатов ЖРД на амплитуду и логарифмический декремент затухания автоколебаний тяги.

6. Далее необходимо экспериментально подтвердить влияние существенно нелинейных сил в стабилизирующей части регулятора на расщепление его динамической нагрузочной характеристики.

# ГЛАВА 3. РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РЕГУЛЯТОРА

## 3.1. Постановка цели испытаний

Рассмотрим регулятор, который состоит из дросселирующей части, в которой задаётся необходимый расход и стабилизирующей части, которая поддерживает его постоянным. Далее более подробно рассмотрим работу стабилизирующей части.

На рисунке 3.1 приведён базовый вариант конструкции стабилизирующей части регулятора. Золотник перекрывает окна стабилизирующей части. Его положение определяется балансом сил от перепада давления на левый торец золотника и силы сжатия пружины.

Красными овалами выделены области контакта золотника и направляющей.

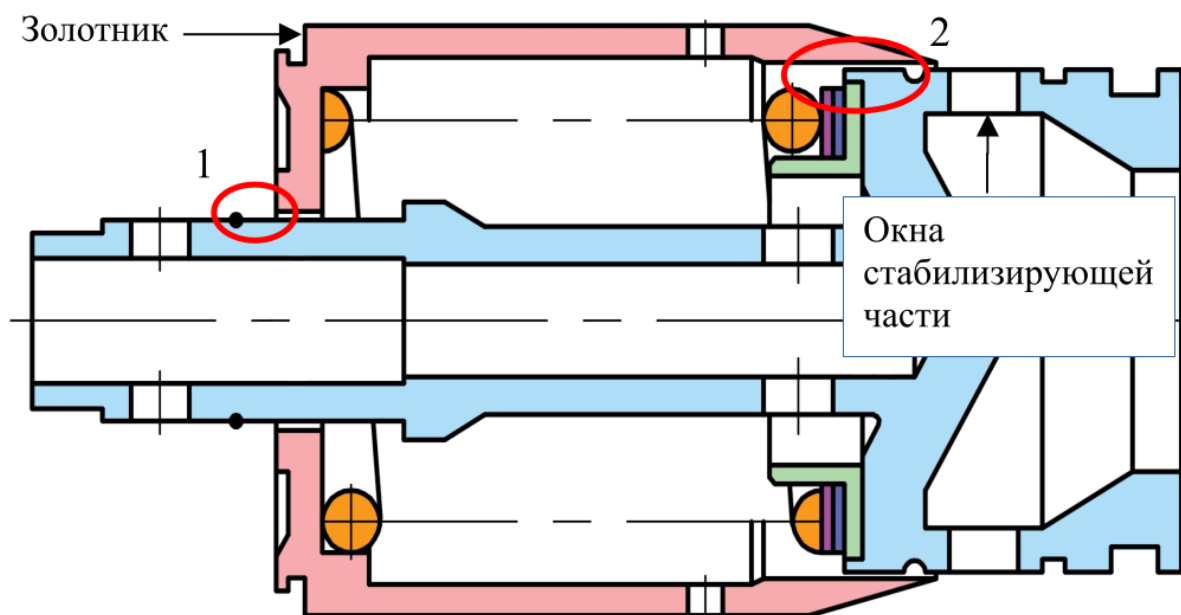


Рисунок 3.1 – Стабилизирующая часть регулятора

Плавное перемещение золотника обеспечивается соосностью золотника и направляющей, подбором требуемых зазоров.

Рассмотрим факторы, которые могут повлиять на плавность работы стабилизирующей части:

- Перекос золотника из-за изгиба пружины при сжатии.
- Перекос золотника из-за неравномерного течения в зазорах между золотником и направляющей.

О задержке при перемещении золотника стабилизирующей части могут свидетельствовать следующие факторы:

- наличие следов контакта по посадочным поверхностям золотника в областях 1 и 2 (рисунок 3.1) с противоположных сторон по диаметру;
- наличие ответных следов в областях 1 и 2 контакта на направляющей.

На рисунке 3.2 представлена схема стабилизирующей части регулятора в случае перекоса золотника.

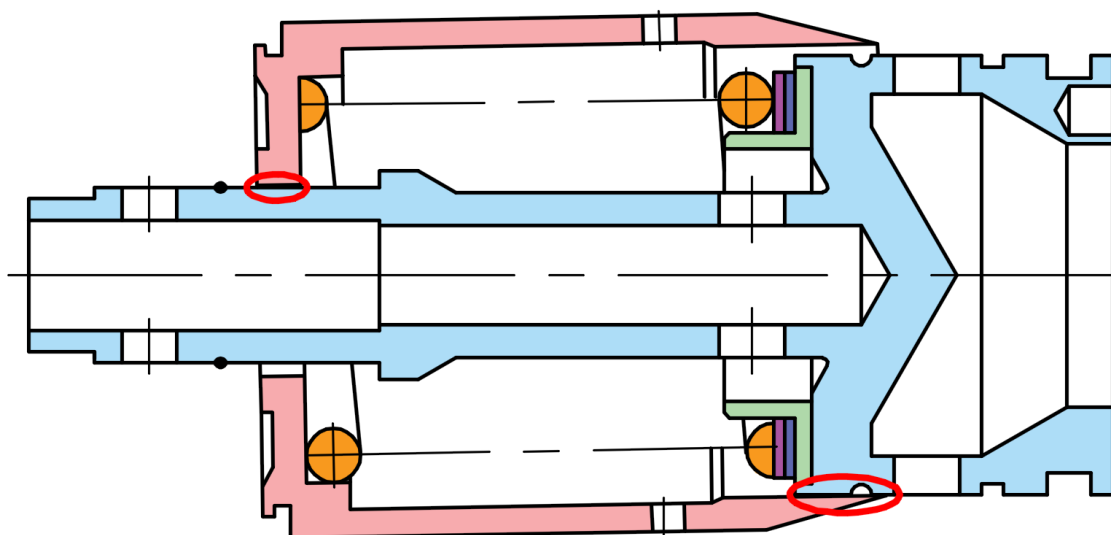


Рисунок 3.2 – Стабилизирующая часть регулятора при перекосе

Силы трения покоя, возникающие при перекосе золотника, приводят к появлению запаздывания при перемещении золотника стабилизирующей части, что отражается в появлении отклонения расхода от требуемого значения при изменении перепада давления на регуляторе. Это отражается на динамической нагрузочной характеристике регулятора.

Для оценки переходных процессов изменения расхода при функционировании регулятора проведены экспериментальные работы с четырьмя экземплярами регуляторов в диапазоне расходов и перепадов давления,

соответствующих режимам глубокого дросселирования ЖРД. Испытания проведены на стенде с вытеснительной системой подачи [35].

На рисунке 3.3 представлена базовая конструкция регулятора. Функционирование регулятора происходит следующим образом. При запуске двигателя горючее подаётся через «Вход-2» и через отверстия А в направляющей 10 поступает к передним дроссельным окнам Б. Перетекание горючего в полость «Входа-1», соединённого с выходом из насоса горючего второй ступени, предотвращается обратным клапаном 13, прижатым к седлу крышки 1.

Регулирование расхода горючего производится с помощью открытия дроссельных окон Б рейкой 4, связанной с валиком 5 зубчатым зацеплением. При росте давления основного компонента за насосом осуществляется автоматическое перекрытие магистрали подачи пускового компонента с помощью обратного клапана, установленного в этой магистрали (на фигурах не показан). Сквозное отверстие К в обратном клапане 13 служит для заполнения регулятора и последующей за ним магистрали компонентом перед запуском двигателя.

Величина расхода через регулятор определяется открытым проходным сечением передних дроссельных окон Б. Постоянный расход при неизменном положении валика 5, связанного с приводом регулятора, и, соответственно, неизменной величине открытого проходного сечения передних дроссельных окон Б в регуляторе расхода, автоматически обеспечивается поддержанием постоянного перепада давлений перед и после дроссельных окон Б с помощью золотника 9, на поршень которого воздействует перепад давлений в полостях Е и В и усилие пружины 6. В полость Е с помощью отверстий И, Ж в направляющих 2, 10 подводится давление, имеющееся до передних дроссельных окон Б, а в полость В – с помощью отверстий Г в золотнике 9 подводится давление, за дроссельными окнами Б. При нарушении баланса сил, действующих на золотник 9, он перемещается в ту или другую сторону, частично закрывая или приоткрывая задние дроссельные окна Д, тем самым восстанавливая баланс сил и перепад давлений на передних дроссельных окнах Б. Часть регулятора,

поддерживающая постоянный перепад на окнах Б, далее называется стабилизирующей золотниковой частью регулятора.

Испытания проводились на трёх экземплярах регуляторов. Конструкция регулятора приведена на рисунке 3.3.

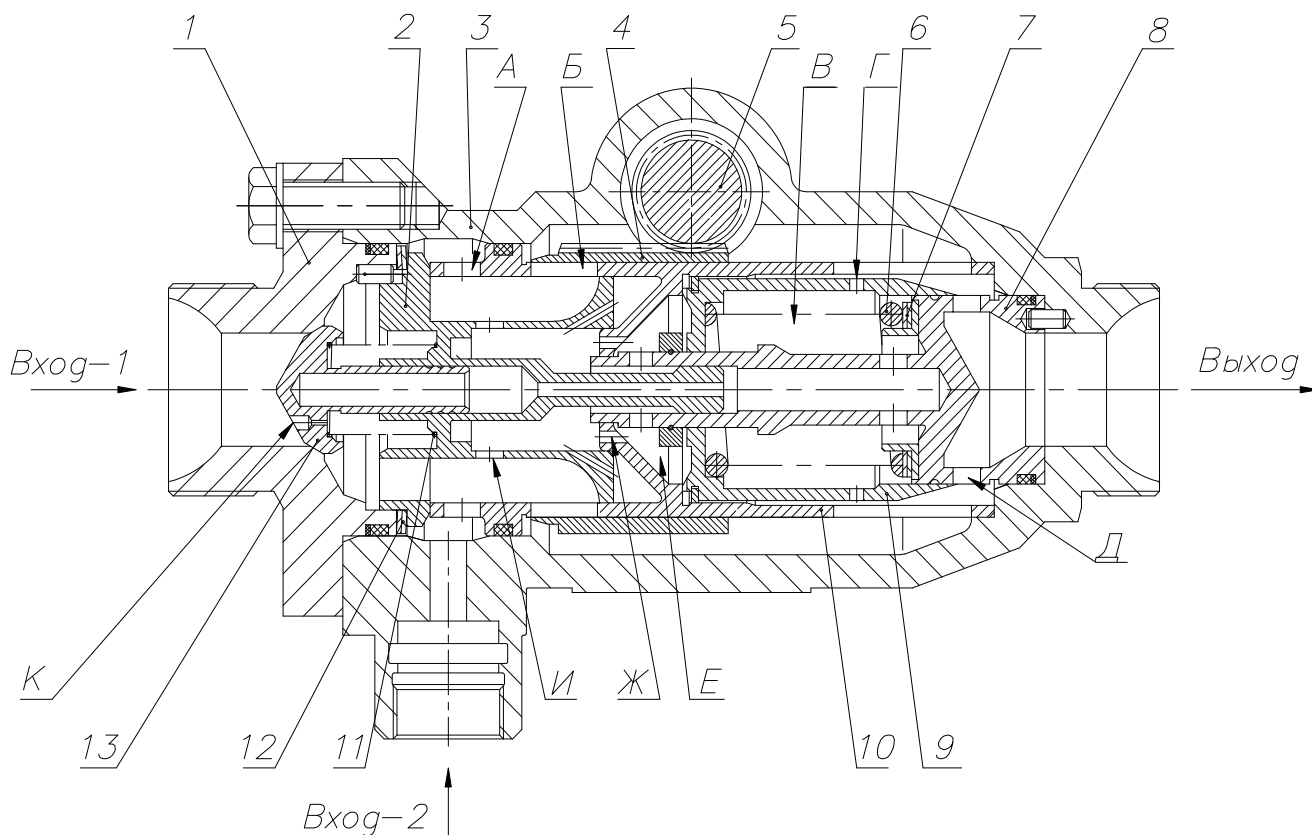


Рисунок 3.3 – Конструкция регулятора

### 3.2. Состав испытательного стенда

Для испытаний использовался аттестованный стенд с поверенными и калиброванными средствами измерения.

Для проведения испытаний использовался стенд с вытеснительной системой подачи рабочего тела, который предназначен для автономных испытаний регуляторов расхода в различном диапазоне параметров и состоит из:

- баллонов с рабочим телом для автономных испытаний регулятора;
- автомата наддува баков;
- трубопроводов для подвода керосина к регулятору;

- трубопроводов для отвода керосина от регулятора.

С целью обеспечения колебаний давления на входе в регулятор стенд был модернизирован:

- В линию подачи горючего к регулятору добавлена параллельная ветка с клапаном для создания пульсаций и жиклёром для обеспечения пульсаций давления перед регулятором при открытии и закрытии клапана;
- В линию отвода горючего от регулятора установлен расходомер с мерным участком;

Автономные испытания проводились со штатным приводом регулятора с непрерывной регистрацией значений давлений и расходов компонента через регулятор и через привод.

В процессе проведения испытаний регистрируются следующие параметры:

- давления наддува баков рабочего тела;
- давление и температура на выходе из баков для подачи рабочего тела в регулятор;
- давление рабочего тела перед пульсатором;
- расход рабочего тела в магистрали перед регулятором;
- давление и температура в стендовой магистрали перед регулятором;
- давление и пульсации давления рабочего тела перед регулятором;
- давление и пульсации давления рабочего тела на выходе из регулятора;
- температура рабочего тела в стендовой магистрали на выходе из регулятора;
- расход рабочего тела в магистрали на выходе из регулятора;
- положение привода регулятора.

Пневмогидравлическая схема стенда для автономных испытаний регуляторов представлена на рисунке 3.4.

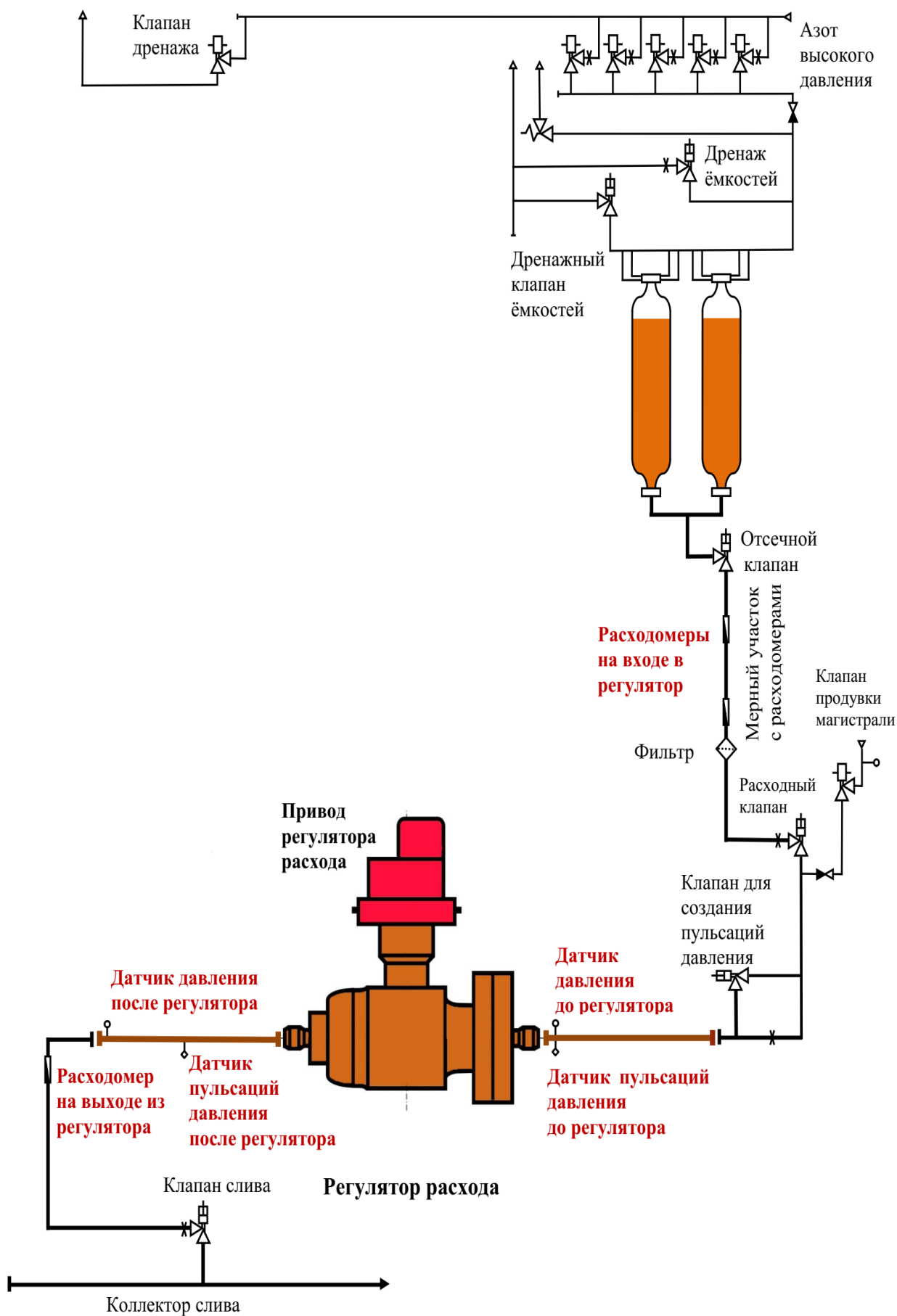


Рисунок 3.4 – ПГС станда для автономных испытаний регуляторов

### 3.3. Результаты автономных испытаний регуляторов расхода

Целью выполняемых автономных испытаний являлась оценка характера изменения расхода через регулятор при появлении колебаний давления на входе в регулятор. Колебания давления задавались с помощью стендовых систем (пульсатора давления). Частота колебаний составляла порядка 4Гц, что близко к собственной частоте ЖРД большой тяги, выполненного по схеме с дожиганием окислительного генераторного газа. Амплитуда колебаний задавалась исходя из статистики огневых испытаний ЖРД.

Для оценки точности имитации условий на входе в регулятор было проведено тестовое испытание на регуляторе №1.

На рисунке 3.5 приведён фрагмент записи параметров давления на входе в регулятор (чёрная сплошная линия) и расхода через регулятор (серая пунктирная линия) при тестовом испытании. Для сравнения добавлено давление на входе в регулятор (чёрная пунктирная линия), зарегистрированное при огневых испытаниях двигателя, на котором наблюдались низкочастотные колебания тяги.

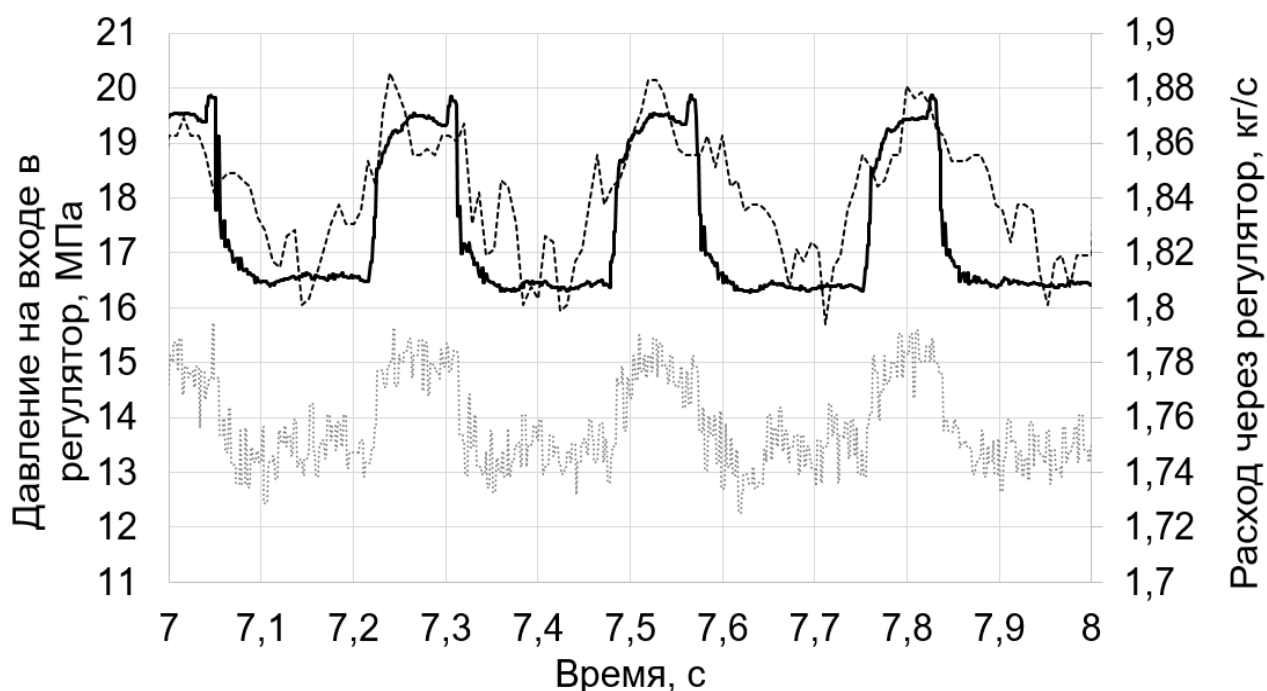


Рисунок 3.5 – Изменение давления на входе в регулятор и расхода в процессе тестового испытания

Результаты тестового испытания показали достаточность имитации характера изменения давления на входе в регулятор.

После тестового испытания, были проведены испытания всех четырёх экземпляров регулятора по одинаковой циклограмме, представленной на рисунке 3.6, в процессе которой в интервале времени с 5,5 по 35 с были созданы пульсации давления керосина на входе в регулятор с амплитудой до 3 МПа и частотой 4 Гц, также, для оценки характера изменения расхода через регулятор в момент 25,5 с перепад давления на регуляторе ступенчато увеличивался путём открытия дополнительного сливного стендового клапана.

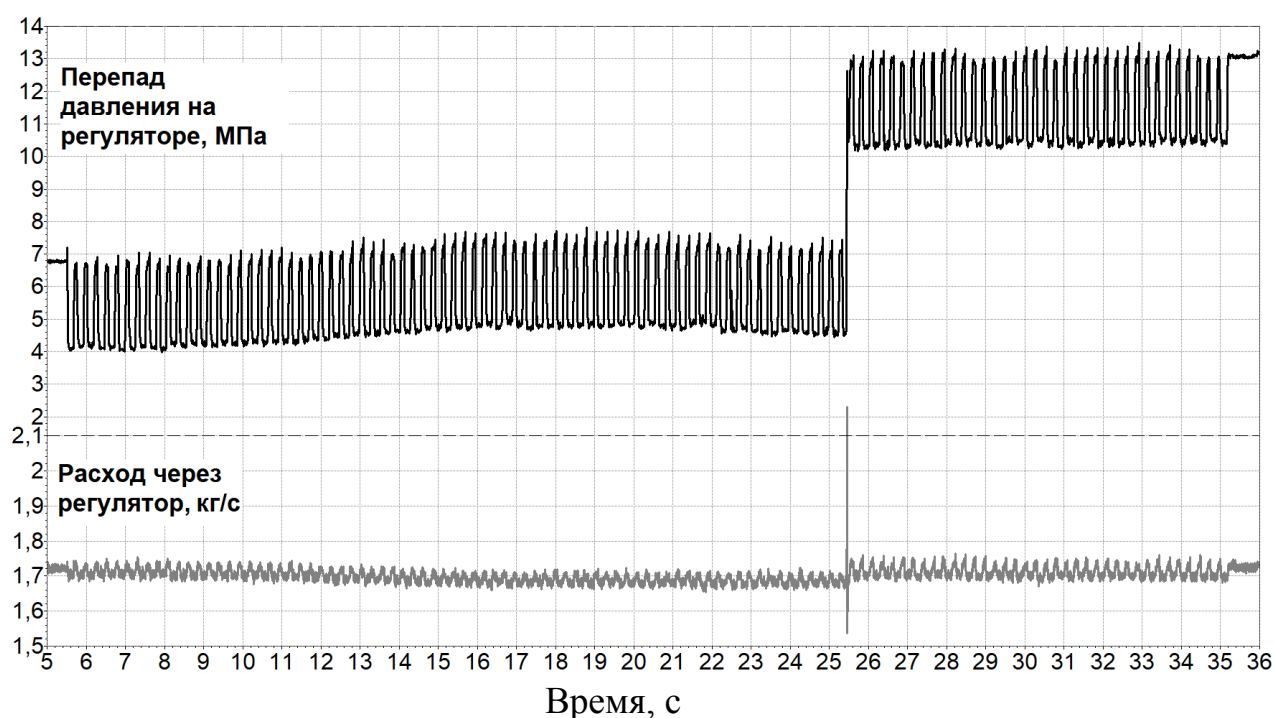


Рисунок 3.6 – Изменение перепада давления на регуляторе и расхода через регулятор (на примере испытаний регулятора № 1)

В процессе испытаний на всех экземплярах регуляторов при изменении перепада давления с частотой 4 Гц зафиксировано изменение расхода на выходе регулятора с той же частотой и амплитудой 0,15 кг/с. На рисунке 3.7 показан увеличенный фрагмент записи параметров испытаний регулятора №1 в момент начала работы клапана создания пульсаций.

При ступенчатом изменении перепада давления на регуляторе путём уменьшения давления на 6 МПа за время 0,01 с наблюдается переходной процесс.

На рисунке 3.8 изображено изменение перепада давления на регуляторах в процессе резкого открытия дополнительного сливного стенового клапана. а на рисунке 3.9 – изменение расхода через регуляторы.

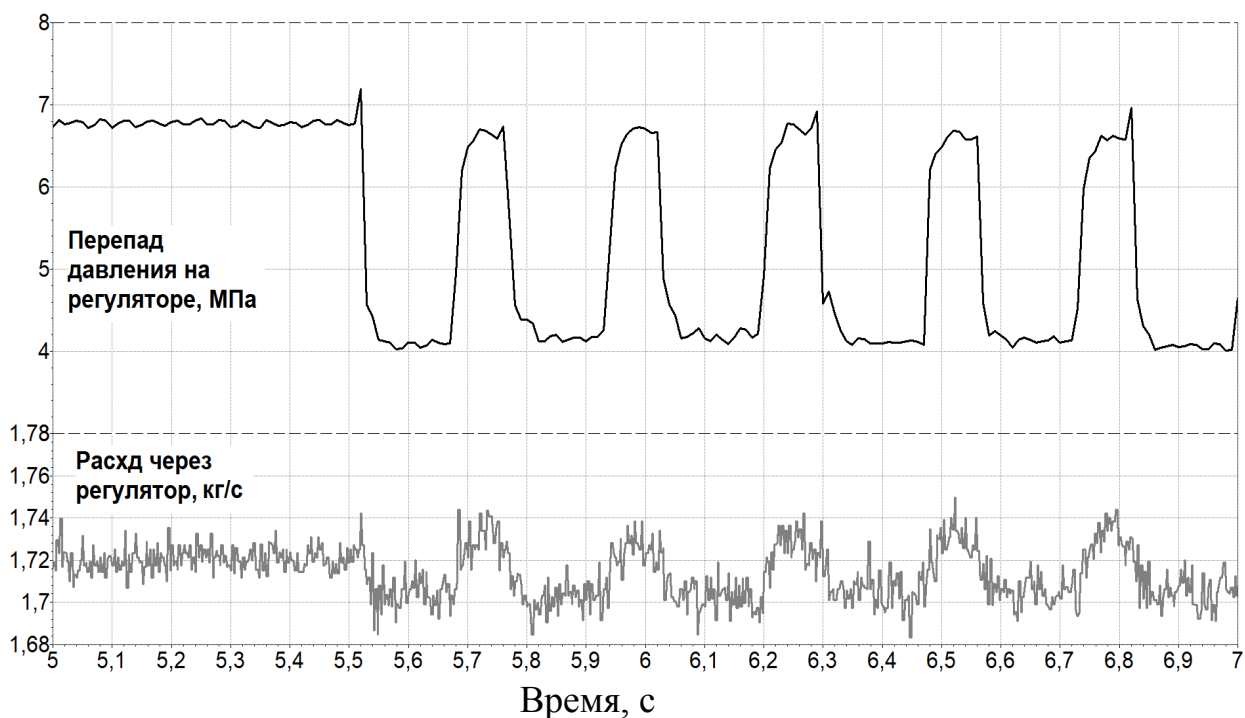


Рисунок 3.7 – Характер изменения перепада давления на регуляторе и расхода через регулятор в процессе испытаний регулятора №1

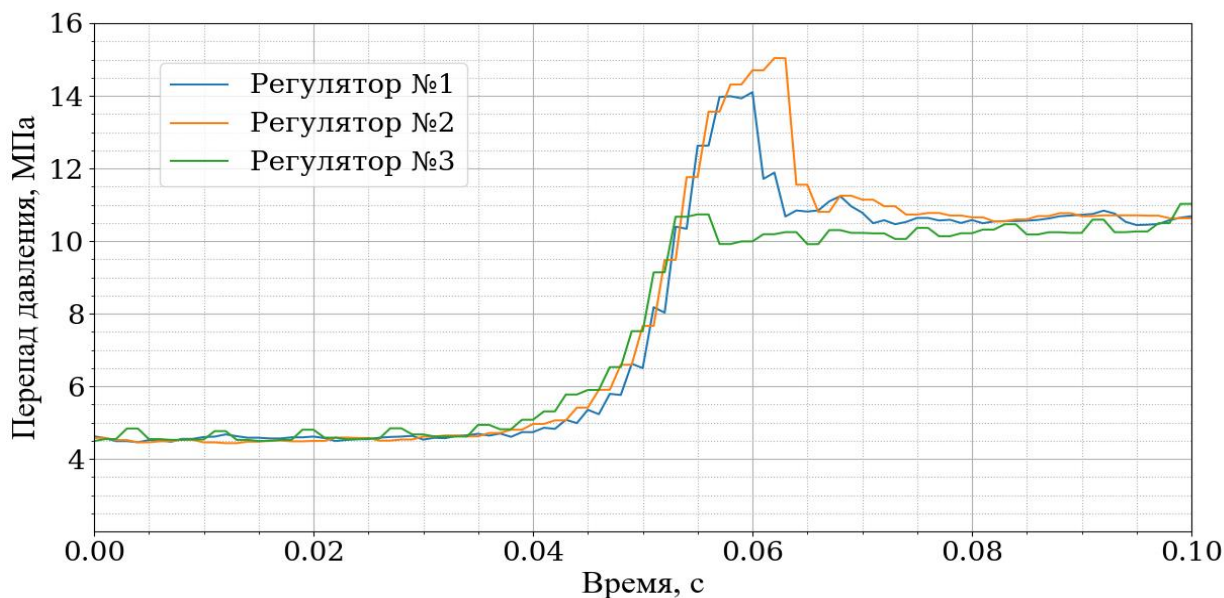


Рисунок 3.8 – Перепад давления на регуляторах при переходном процессе при открытии дополнительного стенового сливного клапана

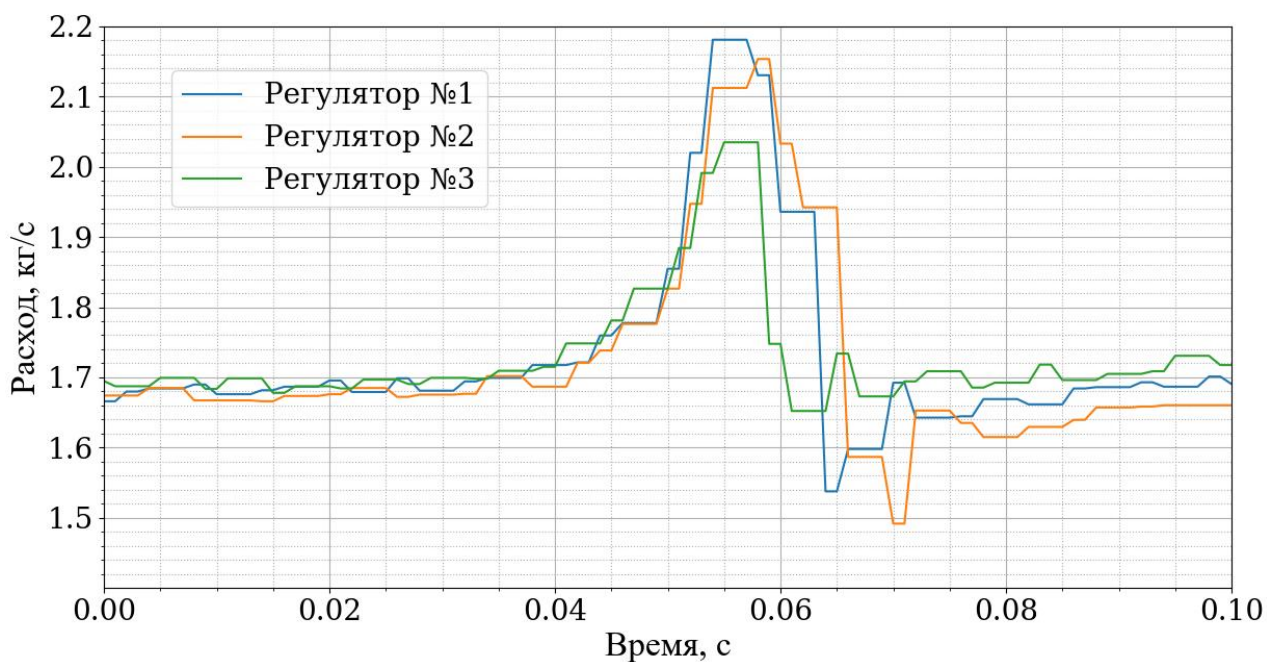


Рисунок 3.9 – Расход через регулятор при переходном процессе при открытии дополнительного стендового сливного клапана

Характерными особенностями поведения параметров переходного процесса являются.

По перепаду давления на регуляторе:

- резкий рост перепада давления выше установившегося значения (10 МПа), а затем снижение;
- резкий заброс расхода в сторону увеличения в начале переходного процесса и последующий провал расхода, а далее расход асимптотически приближается к установившемуся значению;

На основании результатов испытаний построена динамическая нагрузочная характеристика регулятора – зависимость расхода через регулятор при изменении перепада давлений с учётом переходного процесса при изменении расхода.

В таблице 3.1 приведены величины:

- заброса перепада давления на регуляторах от установившегося после переходного процесса значения;
- заброса расхода в сторону увеличения и уменьшения от установившихся после переходного процесса значений расхода.

Таблица 3.1. Экспериментальные характеристики регуляторов.

	Заброс перепада давления, МПа	Заброс расхода в сторону увеличения, кг/с	Заброс расхода в сторону уменьшения, кг/с
Регулятор №1	3,6	0,48	0,16
Регулятор №2	4,5	0,46	0,21
Регулятор №3	0,7	0,32	0,05

На рисунке 3.10 приведено изменение перепада давления на регуляторе №2 и расхода через регулятор в течение одного периода колебаний. На рисунке 3.11 приведён фрагмент динамической нагрузочной характеристики регулятора за соответствующий период времени.

Цифры в кружках на рисунке 3.11 обозначают участки изменения перепада давления расхода через регулятор во временных интервалах, отмеченных на рисунке 3.10.

Внешний вид полученной по результатам автономных испытаний регуляторов нагрузочной характеристики соответствует характеристике, приведённой на рисунке 2.3 в случае наличия существенной нелинейности в стабилизирующей части регулятора.

На нагрузочной характеристике, представленной на рисунке 3.11, наблюдается расслоение из-за запаздывания при изменении положения золотника стабилизирующей части что описано в [25].

Положение золотника стабилизирующей части регулятора определяется балансом двух сил: силы сжатия пружины и перепадом давления на торце золотника. При влиянии сил трения из-за перекоса золотника баланс сил нарушается, что приводит к смещению положения золотника и изменению площади проходного сечения стабилизирующей части золотника.

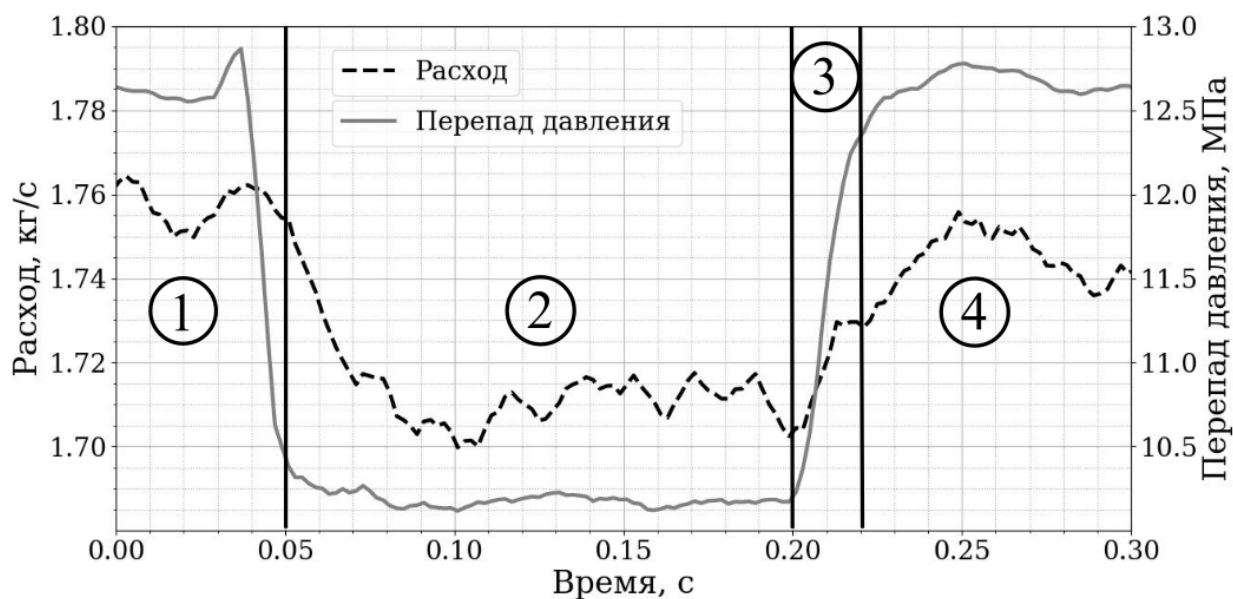


Рисунок 3.10 – Зависимость расхода и перепада давления на регуляторе от времени

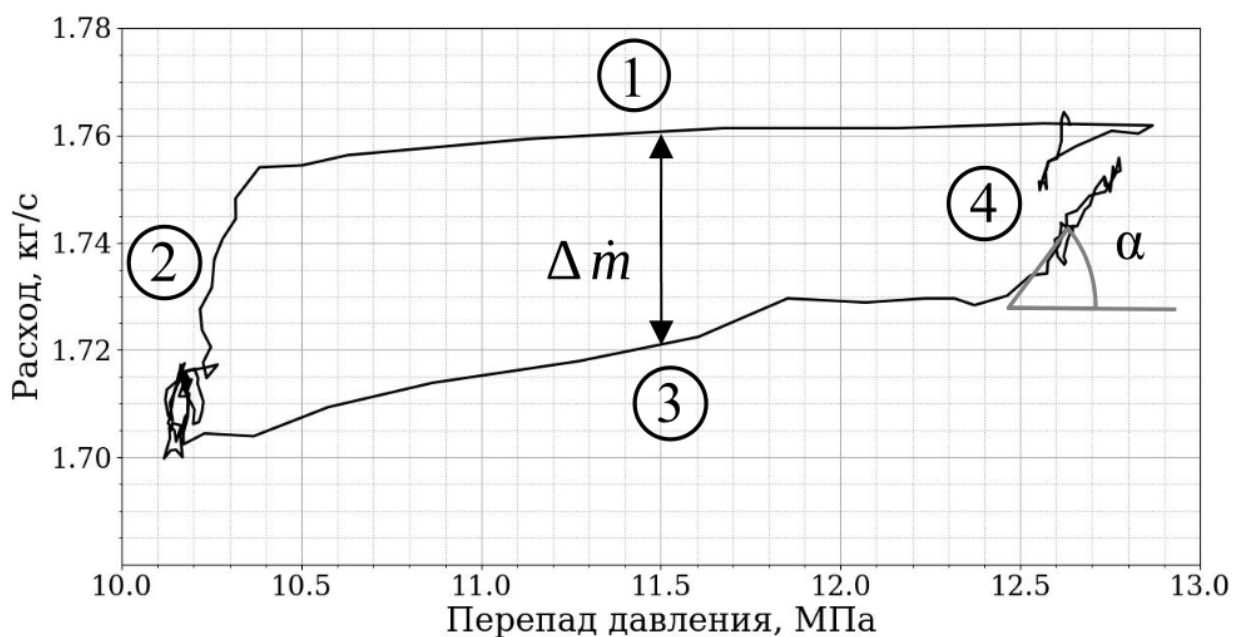


Рисунок 3.11 – Экспериментальная динамическая нагрузочная характеристика регулятора

Экспериментальная динамическая нагрузочная характеристика, представленная на рисунке 3.11 содержит 4 характерных участка:

1 – небольшое плавное снижение расхода, обусловленное статизмом регулятора при значительном уменьшении перепада давления на регуляторе.

2 – резкое падение расхода через регулятор при почти неизменном перепаде давления на регуляторе. Это свидетельствует о том, что золотник стабилизирующей части не дошёл до нужного положения при движении в сторону открытия дросселирующих окон стабилизирующей части и остановился раньше, под влиянием сил трения из-за перекоса. При этом недостаточная площадь проходного сечения дросселирующих окон стабилизирующей части регулятора привела к падению расхода. Это связано с тем, что силы сжатия пружины недостаточно, чтобы преодолеть силу от перепада давления на торце золотника и силы трения, возникающие при перекосе золотника.

3 – небольшое плавное повышение расхода, обусловленное статизмом регулятора при увеличении перепада давления на регуляторе,

4 – резкий рост расхода при почти неизменном перепаде давления на регуляторе. Это вызвано тем, что из-за перекоса золотника он не может встать в нужное положение и прикрыть окна в стабилизирующей части, так как силы от перепада давления на его торце не хватает, чтобы преодолеть силу сжатия пружины и силы трения, возникающие при его перекосе.

При этом, движение рабочей точки по нагрузочной характеристике может осуществляться как в направлении 1-2-3-4, так и в обратном направлении, что будет определяться характером изменения сил, воздействующих на золотник стабилизирующей части регулятора.

Динамические нагрузочные характеристики, полученные в ходе автономных испытаний экземпляров регуляторов № 1, 3, имеют схожий внешний вид с характеристикой, приведённой на рисунке 3.12, и отличаются только величиной разности расходов между ветвями  $\Delta \dot{m}$  и углом наклона переходного участка  $\alpha$ , что обусловлено индивидуальными особенностями регуляторов.

### 3.4. Выводы по главе

1. Результаты проведённых экспериментальных исследований свидетельствуют, что увеличение воздействия нелинейных сил в стабилизирующей части регулятора приводит к увеличению запаздывания при перемещении стабилизирующей части регулятора, что, в свою очередь, отражается в бóльшем расслоении расходов на динамической нагрузочной характеристике регулятора: увеличивается угол  $\alpha$  переходного участка и увеличивается разность расходов между ветвями  $\Delta \dot{m}$ .

2. Экспериментально подтверждено появление расслоения динамической нагрузочной характеристики регулятора при возникновении колебаний давления на входе в регулятор, что связано с запаздыванием при перемещении золотника стабилизирующей части регулятора. Полученные в ходе автономных испытаний динамические нагрузочные характеристики качественно совпадают с теоретическим, представленными в главе 2.2.

3. Подтверждено, что функционирование регулятора с существенным запаздыванием при перемещении золотника стабилизирующей части из-за его перекоса приводит к возникновению забросов по расходу при резком ступенчатом изменении перепада давления на регуляторе.

4. Далее необходимо определить влияние атрибутов динамической нагрузочной характеристики регулятора на амплитуду и декремент затухания колебаний тяги ЖРД с использованием экспериментально полученных динамических нагрузочных характеристик регуляторов.

## ГЛАВА 4. РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ НА УСТОЙЧИВОСТЬ В ВЫДЕЛЕННЫХ КОНТУРАХ ЖРД

### 4.1. Определения степени влияния расходов компонентов на тягу двигателя при его дросселировании

Рассматриваемая в данной работе схема типового ЖРД с дожиганием окислительного генераторного газа имеет два органа управления: регулятор и дроссель.

Регулятор управляет расходом горючего в газогенератор. Соотношение компонентов в газогенераторе и температура генераторного газа зависят от расхода горючего. При дросселировании по тяге расход горючего через газогенератор существенно снижается для увязки функционирования двигателя на требуемых режимах.

На рисунке 4.1 приведена зависимость относительных расходов (отношение расхода на текущем режиме по тяге к расходу на номинальном режиме) окислителя и горючего в газогенератор от относительной тяги двигателя  $\bar{R}$ . В диапазоне значений  $\bar{R}$  от 80 до 100% производная относительного расхода горючего составляет  $d\bar{m}_{ГОР}/d\bar{R}=1,585$ . В диапазоне  $\bar{R}$  от 30 до 40% производная относительного расхода горючего составляет  $d\bar{m}_{ГОР}/d\bar{R}=0,794$ . При этом, во всем рассматриваемом диапазоне значений тяги производная относительного расхода окислителя составляет  $d\bar{m}_{ОК}/d\bar{R}=1$ . Точные величины будут зависеть от параметров конкретного экземпляра ЖРД.

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.

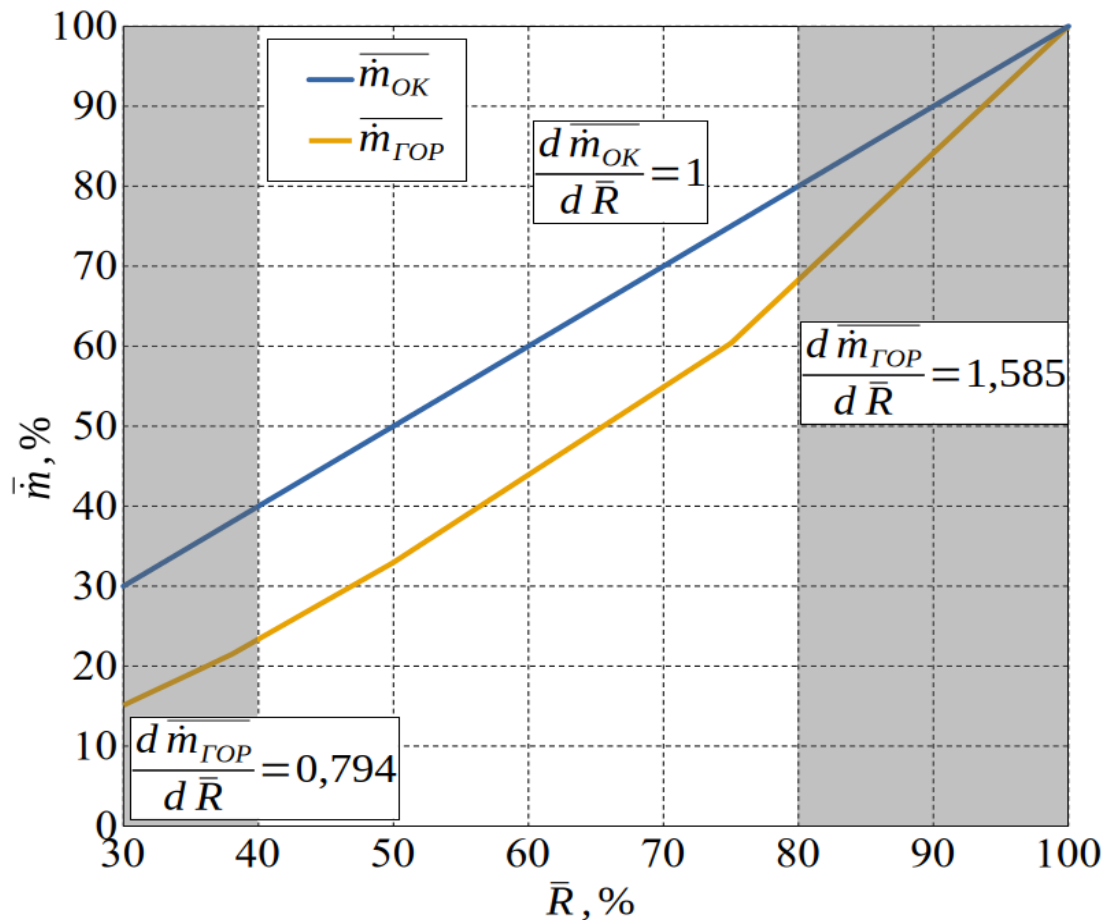


Рисунок 4.1 – Зависимость относительных расходов от тяги

#### 4.2. Оценка устойчивости двигателя в целом в частотной области

По результатам проведённых исследований можно обобщить ряд особенностей, которые происходят на режимах глубокого дросселирования по тяге и способствуют снижению запасов устойчивости ЖРД:

1. Снижение расходов и скоростей компонентов топлива в магистралях;
2. Снижение перепадов давления на форсунках газогенератора и камеры, и ухудшение процессов смесеобразования;
3. Увеличение времени преобразования и времени пребывания продуктов сгорания в газогенераторе;
4. Функционирование в не оптимальной области напорной характеристики насоса окислителя;

5. Повышение влияния расхода горючего на тягу, в сравнении с номинальным режимом.

Совокупность данных факторов приводит к возможности возникновения автоколебаний в трактах агрегатов подачи ЖРД при его дросселировании.

#### **4.3. Верификация и валидация математической модели двигателя**

Разработанная на основе уравнений, представленных в главе 2, математическая модель рассматриваемого типового маршевого ЖРД была верифицирована и валидирована.

Верификация разработанной математической модели ЖРД проведена в два этапа. На первом этапе проведена верификация математических моделей агрегатов ЖРД, на втором этапе проведена верификация математической модели ЖРД в целом [14].

Верификация разработанной математической модели типового ЖРД проведена на основании сравнения результатов вычислений с существующими математическими моделями, используемыми в АО «НПО Энергомаш». Отклонения расчётных значений, полученных по разработанной математической модели не превышают 5% от величин, определённых по математическим моделям, используемым в АО «НПО Энергомаш».

Валидация математических моделей агрегатов ЖРД проведена на основании сравнения результатов расчёта с результатам автономных испытаний агрегатов ЖРД.

Валидация разработанной математической модели типового ЖРД проведена на основании сравнения полученных результатов расчёта с результатами огневых испытаний ЖРД.

На рисунках 4.2 и 4.3 представлены графики сравнения результатов расчётов относительной тяги и температуры генераторного газа по разработанной математической модели типового ЖРД с результатами огневых испытаний ЖРД.

Серой пунктирной линией представлены результаты расчётов, а черной сплошной линией – экспериментальные данные. По оси ординат приведены

значения в процентах от исходной величины на установившемся режиме. 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.

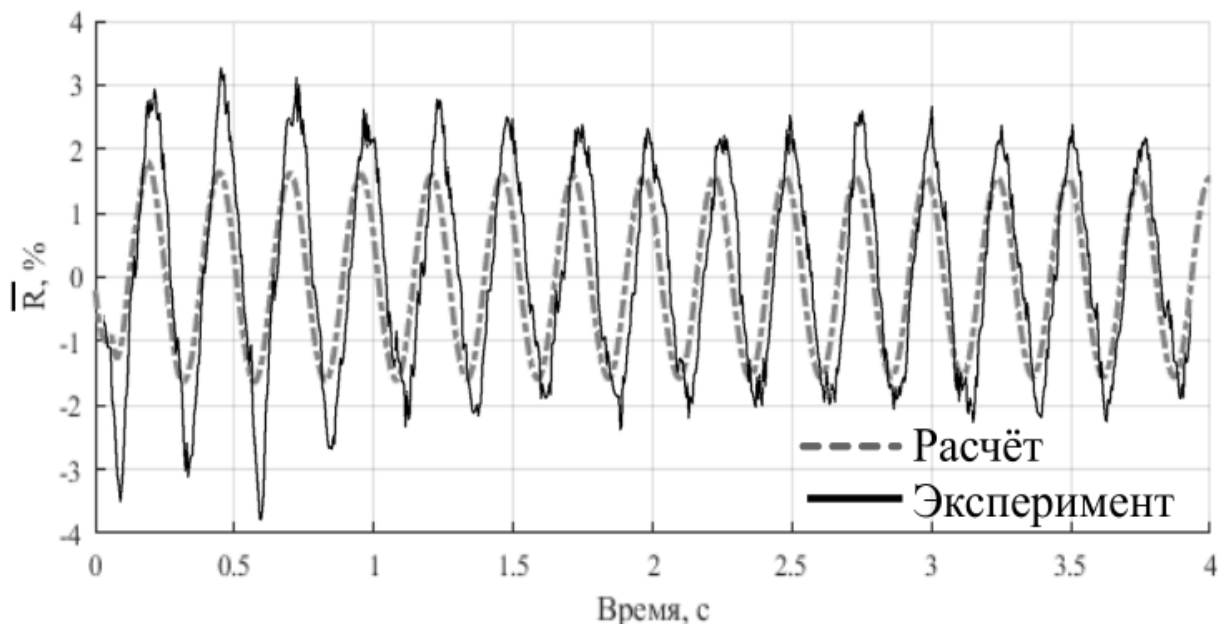


Рисунок 4.2 – Сравнение результатов расчётов тяги с результатами ОИ ЖРД

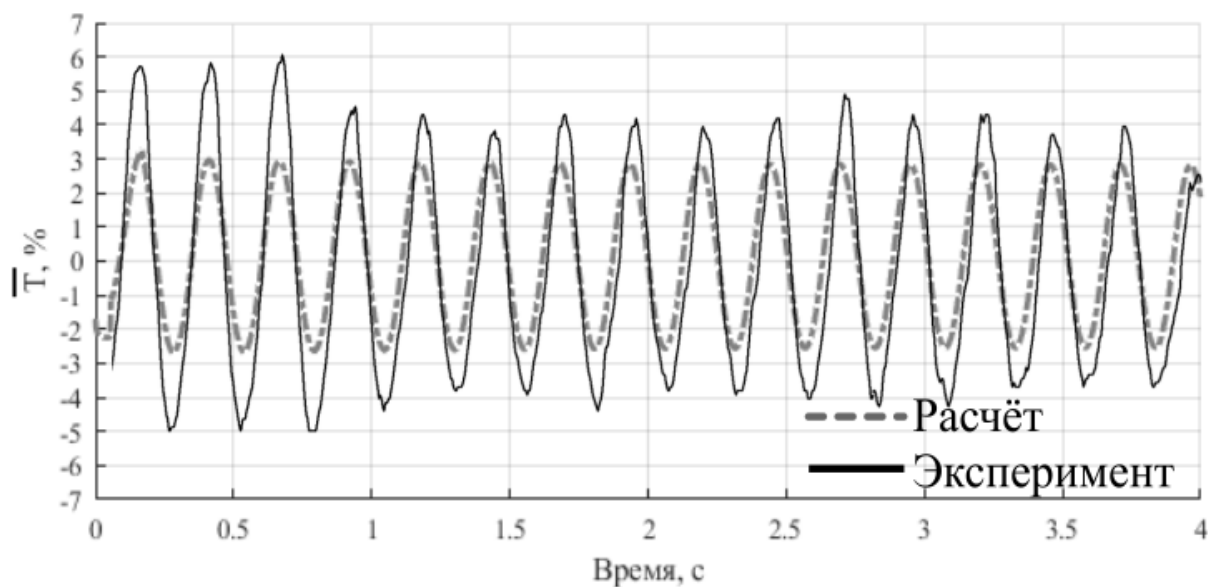


Рисунок 4.3 – Сравнение результатов расчётов температуры генераторного газа с результатами ОИ ЖРД

#### 4.4. Выделение атрибутов динамической характеристики регулятора

В таблице 4.1 приведены атрибуты динамических нагрузочных характеристик регуляторов, определённые по результатам автономных испытаний регуляторов, описанных в главе 3.

Таблица 4.1. Атрибуты динамических нагрузочных характеристик регуляторов.

	Разность расходов между ветвями $\Delta \dot{m}$ , кг/с	Производная переходного участка характеристики с углом $\alpha$ , кг/с/МПа
Характеристика 1	0,0116	0,025
Характеристика 2	0,030	0,056
Характеристика 3	0,040	0,073

Данные параметры используются для дальнейшего анализа влияния на амплитуду и декремент затухания автоколебаний тяги ЖРД.

В случае нагрузочной характеристики 3 возникают бóльшие силы трения, что приводит к увеличению угла наклона переходного участка  $\alpha$  по отношению к нагрузочной характеристике 2 ( $\alpha_3 > \alpha_2$ ). Также наблюдается рост разности расходов между верхней и нижней ветвями нагрузочной характеристики ( $\Delta \dot{m}_3 > \Delta \dot{m}_2$ ).

Для системы с вышеприведёнными атрибутами динамических нагрузочных характеристик регуляторов при одинаковых начальных условиях проведена серия расчётов параметров ЖРД. Расчёт представляет собой реакцию системы на внесённое возмущение в виде случайного изменения температуры в газогенераторе.

На рисунках 4.4 и 4.5 приведены расчётные значения частоты вращения вала ТНА и температуры генераторного газа. На рисунке 4.6 представлены расчётные значения относительной тяги двигателя  $\bar{R}$ .

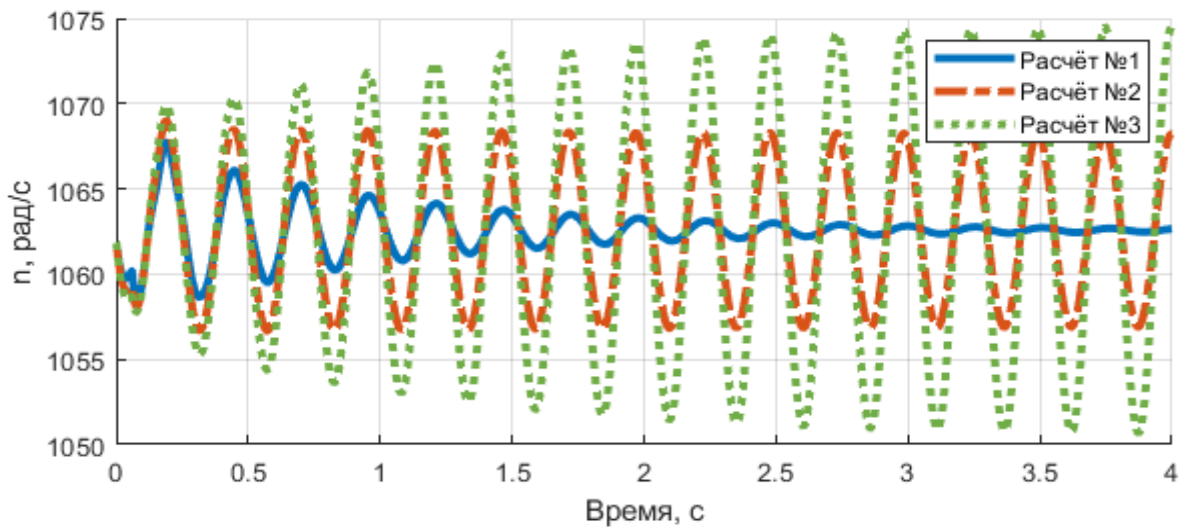


Рисунок 4.4 – Частота вращения вала ТНА

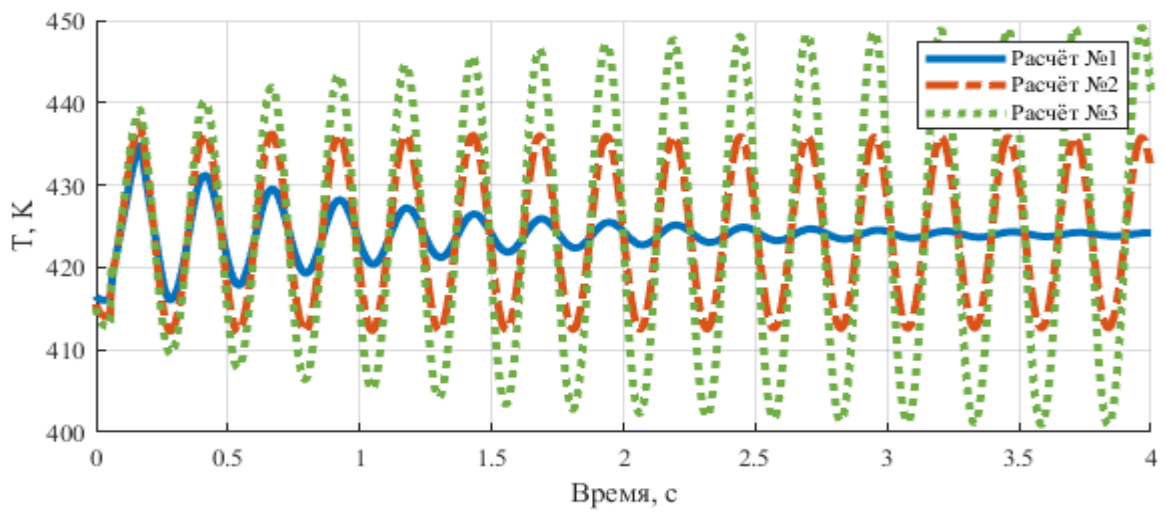


Рисунок 4.5 – Температура генераторного газа

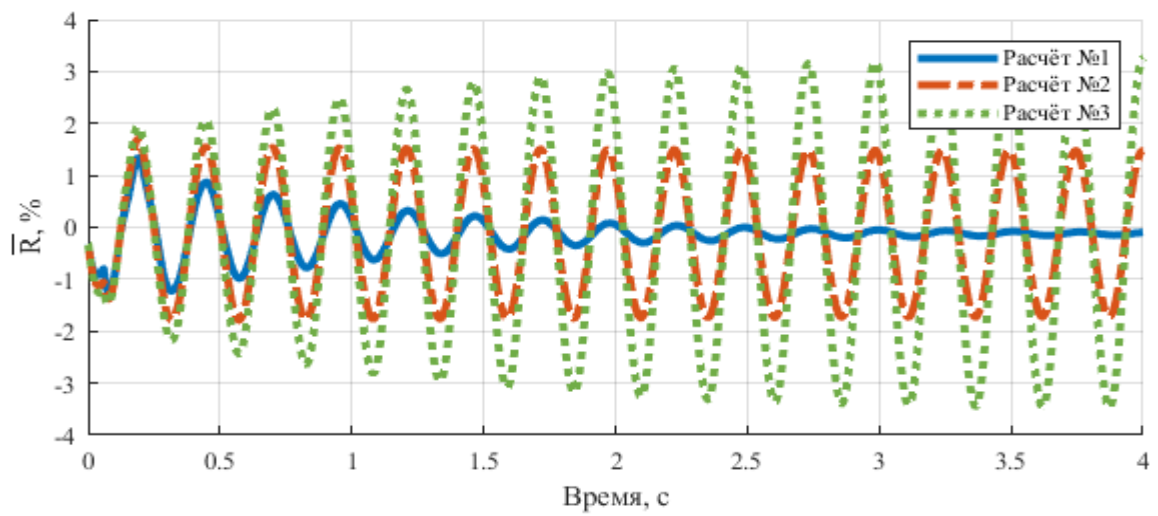


Рисунок 4.6 – Относительная тяга ЖРД

По результатам проведённых расчётов, для первых трёх периодов колебаний с момента времени 0,19 с определены частота, амплитуда и логарифмический декремент затухания колебаний относительной тяги ЖРД и приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2. Параметры колебаний относительной тяги ЖРД.

	Частота колебаний, Гц	Амплитуда колебаний, %	Логарифмический декремент затухания колебаний
Расчёт №1	3,87 / 3,94 / 3,92	1,34 / 0,87 / 0,63	0,433 / 0,315 / 0,325
Расчёт №2	3,90 / 3,93 / 3,92	1,70 / 1,55 / 1,54	0,092 / 0,003 / 0,003
Расчёт №3	3,91 / 3,94 / 3,93	1,95 / 2,07 / 2,30	-0,059 / -0,105 / -0,082

Таким образом, при уменьшении угла наклона переходного участка  $\alpha$  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  $\alpha$  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 2.10).

По результатам серии расчётов с различными атрибутами динамической характеристики регулятора выявлены следующие закономерности.

1. Расчётно определены зависимости атрибутов динамической нагрузочной характеристики регулятора на амплитуду и декремент затухания колебаний тяги ЖРД.

2. Увеличение перекоса золотника будет приводить к росту заброса расхода через регулятор при изменении перепада давления на регуляторе из-за запаздывания при перемещении золотника.

3. Величина разности расходов между ветвями  $\Delta \dot{m}$  оказывает влияние на амплитуду колебаний: чем больше величина  $\Delta \dot{m}$ , тем больше амплитуда колебаний. Это можно объяснить бóльшей амплитудой колебаний соотношения компонентов топлива в газогенераторе и, как следствие, бóльшей амплитудой колебаний частоты вращения вала ТНА.

4. Частота колебаний не зависит от характеристик регулятора, а является параметром колебательной системы и определяется, в основном, временем преобразования компонентов топлива в газогенераторе и временем пребывания газа в полости от газогенератора до турбины.

5. Фактором, влияющим на логарифмический декремент затухания колебаний, является угол наклона переходного участка  $\alpha$ . Увеличение данного угла приводит к снижению величины декремента затухания колебаний. Для

повышений устойчивости ЖРД в данном случае необходимо обеспечить плавное перемещение золотника стабилизирующей части без перекоса и запаздывания.

#### **4.5. Исследование влияния внутренних параметров ЖРД на амплитуду и частоту автоколебаний, возникающих на режимах глубокого дросселирования по тяге**

В двигателе могут возникать автоколебания, рассмотрим влияние некоторых внутренних параметров двигателя на амплитуду и декремент затухания автоколебаний.

На основании вышеизложенного рассмотрим влияние следующих факторов параметры колебаний в трактах агрегатов подачи ЖРД:

1. Влияние повышения гидравлического сопротивления в магистралях;
2. Влияние увеличения времени преобразования компонентов топлива и времени пребывания газа в газогенераторе;
3. Влияние изменения момента инерции ротора ТНА;

##### **4.5.1. Влияние повышения гидравлического сопротивления в магистралях на устойчивость системы**

В процессе дросселирования ЖРД снижаются расходы и скорости компонентов топлива в магистралях системы подачи, что приводит к снижению потерь давления при транспортировке компонентов.

В схеме с дожиганием окислительного генераторного газа при глубоком дросселировании по тяге снижается и температура генераторного газа, что оказывает влияние на качество процессов смесеобразования в газогенераторе.

Повышение гидравлического сопротивления в магистрали от насоса окислителя до газогенератора позволяет увеличить частоту вращения вала ТНА и температуру генераторного газа. Это приводит к повышению режима работы ТНА при неизменной тяге двигателя.

Увеличение гидравлического сопротивления в магистрали подачи горючего в камеру и газогенератор при этом нецелесообразно, так как мощность насоса окислителя существенно превышает мощность насосов горючего ввиду отличия

по расходам. Также увеличение гидравлического сопротивления приведёт к снижению перепада давления на регулирующих органах (регулятор и дроссель), что нежелательно для их нормального функционирования.

Рассмотрим эффект от повышения гидравлического сопротивления в магистрали на выходе из насоса окислителя. На рисунке 4.7 представлен фрагмент напорной характеристики насоса окислителя, который используется в качестве исходных данных для дальнейших расчётов. Данный фрагмент ранее приводился на рисунке 2.5 в главе 2.3.1.

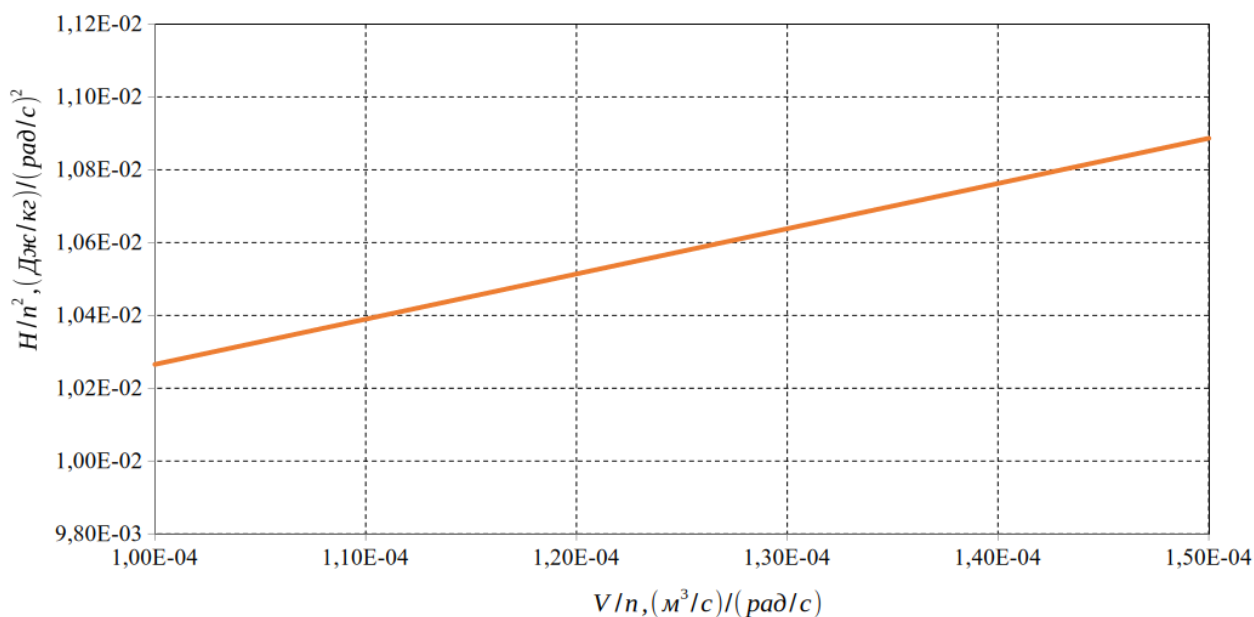


Рисунок 4.7 – Фрагмент напорной характеристики насоса окислителя

Как было показано ранее функционирование насоса в данной области напорной характеристики приводит к возникновению незатухающих автоколебаний. Далее проверим влияние повышения гидравлического сопротивления в магистрали от выхода из насоса окислителя до входа в газогенератор на параметры колебаний.

На рисунках 4.8 и 4.9 приведены расчётные значения частоты вращения вала ТНА и температуры генераторного газа. На рисунке 4.10 представлены расчётные значения относительной тяги двигателя  $\bar{R}$ .

Расчёты проведены с использованием данной напорной характеристики и различными величинами гидравлического сопротивления в магистрали от выхода

из насоса окислителя до входа в газогенератор, остальные исходные данные для всех расчётов идентичны. Для расчёта №2 гидравлическое сопротивление увеличено в 2 раза.

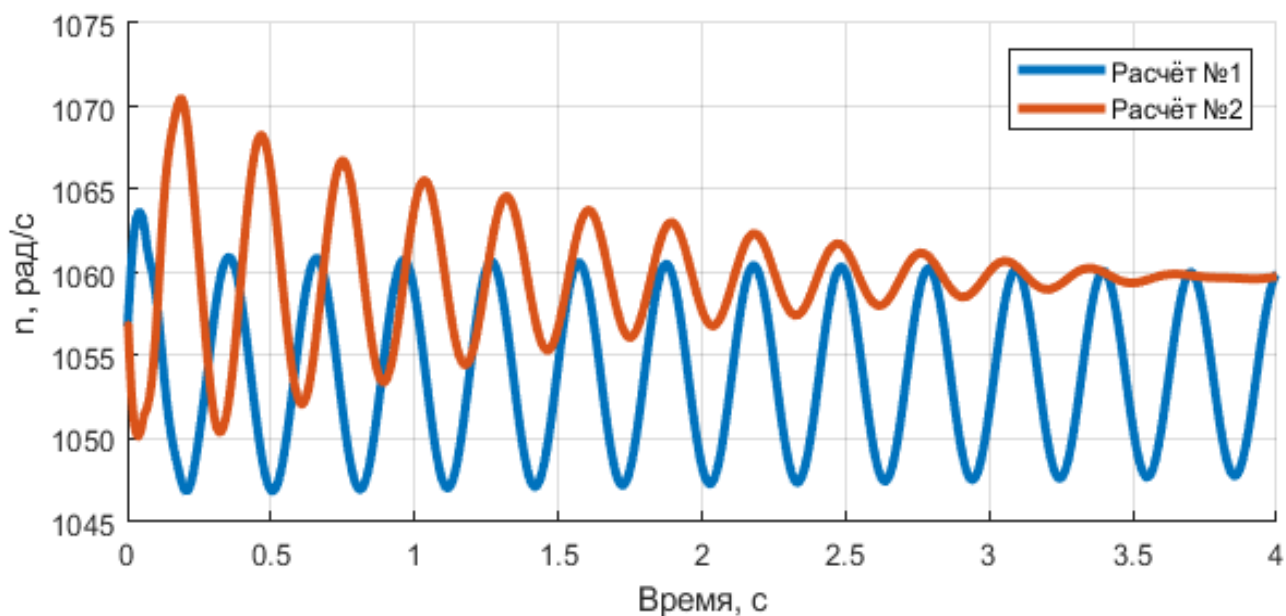


Рисунок 4.8 – Частота вращения вала ТНА

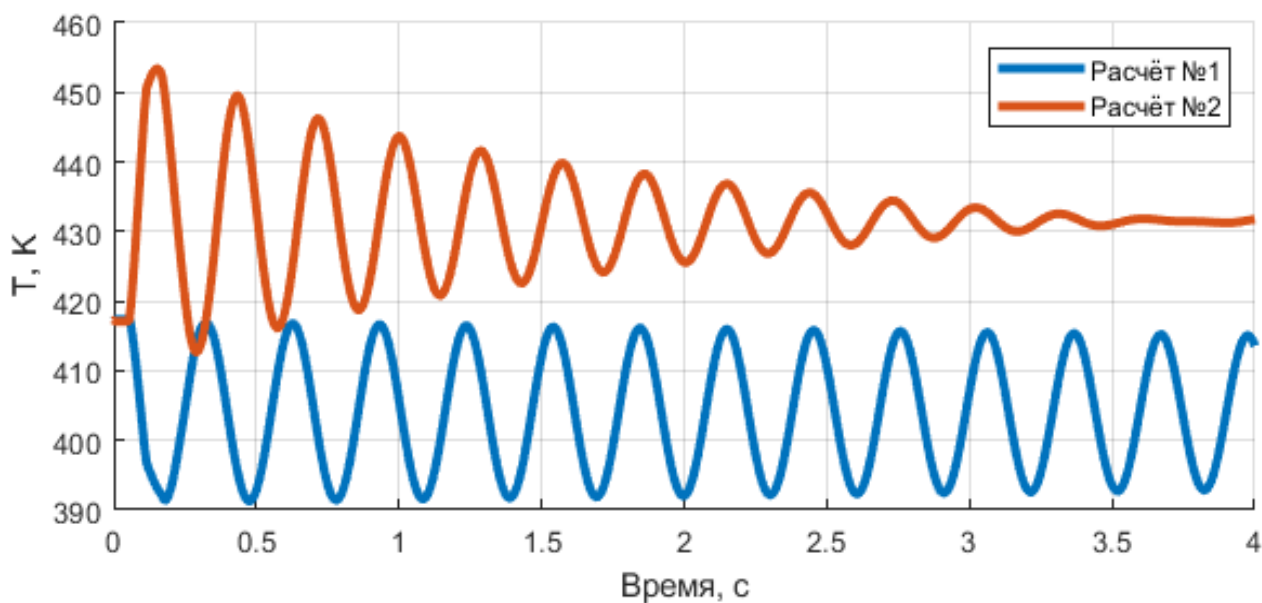


Рисунок 4.9 – Температура генераторного газа

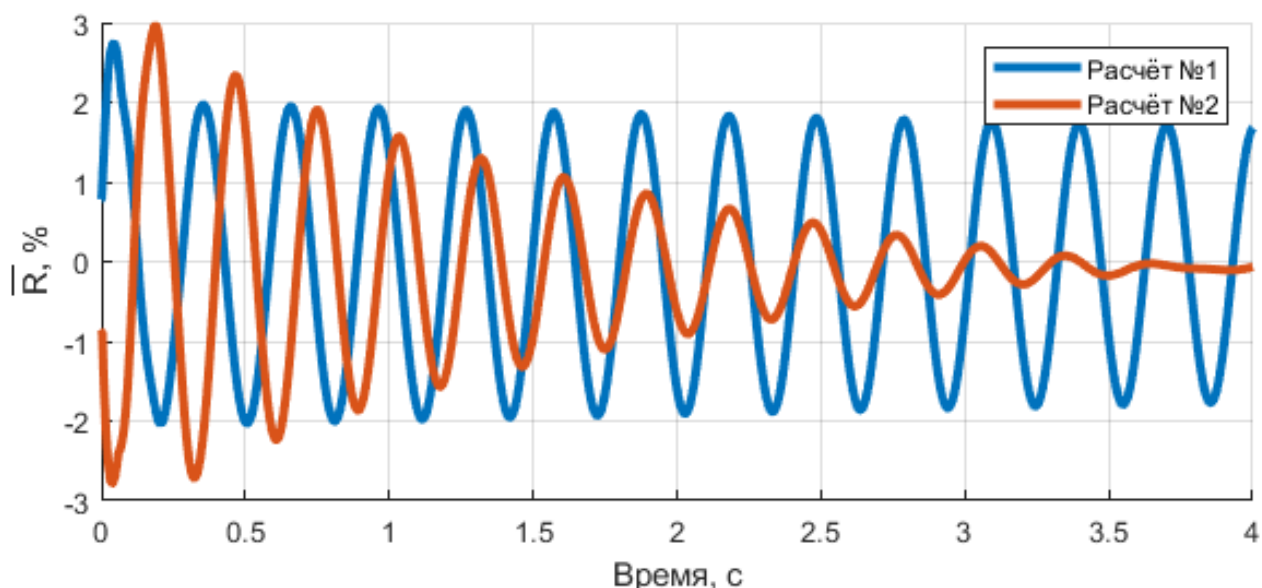


Рисунок 4.10 – Относительная тяга ЖРД

По результатам проведённых расчётов, для первых трёх периодов колебаний с момента времени 0,19 с определены частота, амплитуда и логарифмический декремент затухания колебаний относительной тяги ЖРД и приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3. Параметры колебаний относительной тяги ЖРД.

	Частота колебаний, Гц	Амплитуда колебаний, %	Логарифмический декремент затухания колебаний
Расчёт №1	3,31 / 3,32 / 3,32	1,71 / 1,75 / 1,77	-0,023 / -0,009 / 0,006
Расчёт №2	3,59 / 3,53 / 3,52	2,97 / 2,34 / 1,91	0,237 / 0,205 / 0,194

Результаты расчёта показывают, что увеличение гидравлического сопротивления в магистрали от выхода из насоса окислителя до входа в газогенератор приводит к увеличению температуры генераторного газа и частоты вращения вала ТНА. При этом увеличивается логарифмический декремент затухания колебаний и увеличивается частота. Изменение частоты колебаний связано с изменением параметров колебательного тракта к которым относятся гидравлические сопротивления в магистралях.

Механизм повышения устойчивости в данном случае следующий: несмотря на то, что повышение гидравлического сопротивления приводит к ещё большему смещению рабочей точки на напорной характеристике в область неустойчивой работы в итоге это приводит к повышению устойчивости. Это связано с тем, что, при увеличении гидравлического сопротивления на выходе из насоса окислителя происходит увеличение угла наклона характеристики потребного напора системы. Повышение угла наклона характеристики потребного напора системы приводит к тому, что выполняется условие устойчивой работы насоса в системе питания ЖРД.

В главе 2.3.1 показано, что неустойчивая работа ЖРД может быть также вызвана функционированием регулятора с существенной нелинейностью при работе стабилизирующей части.

Определим влияние повышения гидравлического сопротивления для данного случая. Для расчётов использовались следующие атрибуты динамической нагрузочной характеристики регулятора: производная переходного участка характеристики с углом  $\alpha$  0,056 кг/с/МПа, разность расходов между ветвями  $\Delta \dot{m}$  0,03 кг/с (ранее приведены в таблице 4.1). При этом считается, что насос окислителя функционирует в области устойчивой работы по напорной характеристике, поэтому использовалась напорная характеристика 1, представленная на рисунке 2.5.

На рисунках 4.11 и 4.12 приведены расчётные значения частоты вращения вала ТНА и температуры генераторного газа. На рисунке 4.13 представлены расчётные значения относительной тяги двигателя  $\bar{R}$ .

Расчёты проведены с использованием вышеприведённых атрибутов динамической нагрузочной характеристики и различными величинами гидравлического сопротивления в магистрали от выхода из насоса окислителя до входа в газогенератор, остальные исходные данные для всех расчётов идентичны. Для расчёта №2 гидравлическое сопротивление увеличено в 2 раза.

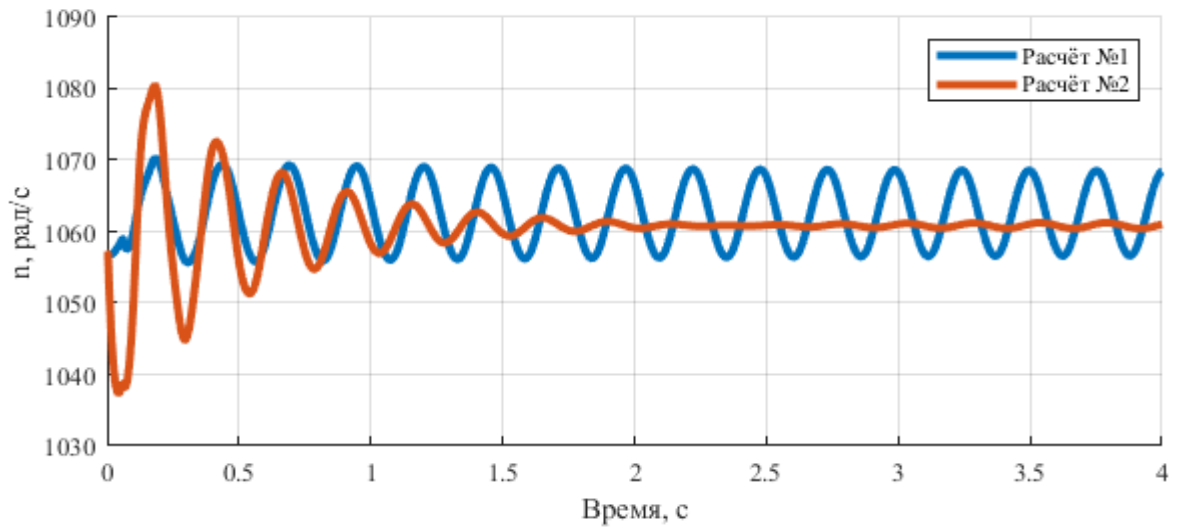


Рисунок 4.11 – Частота вращения вала ТНА

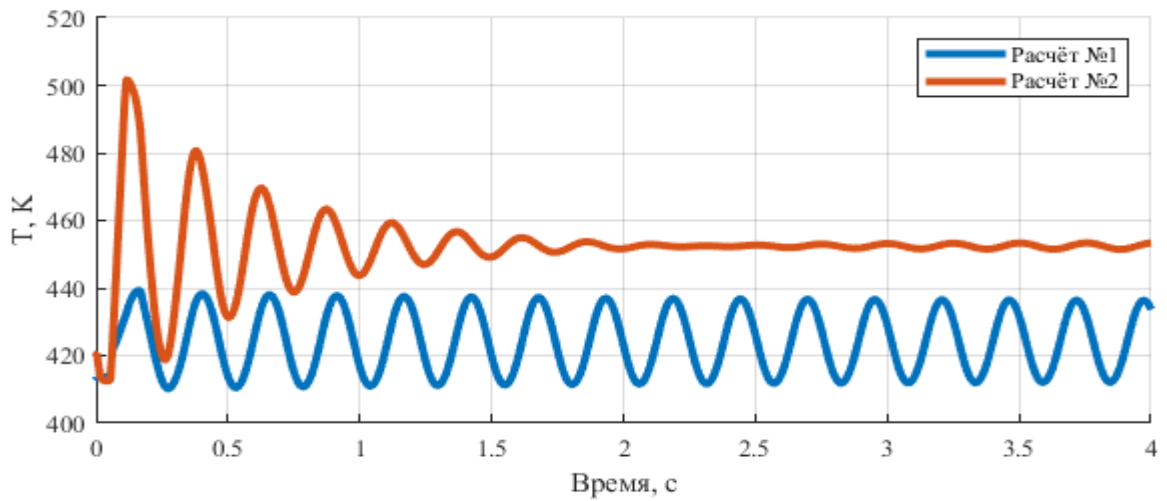


Рисунок 4.12 – Температура генераторного газа

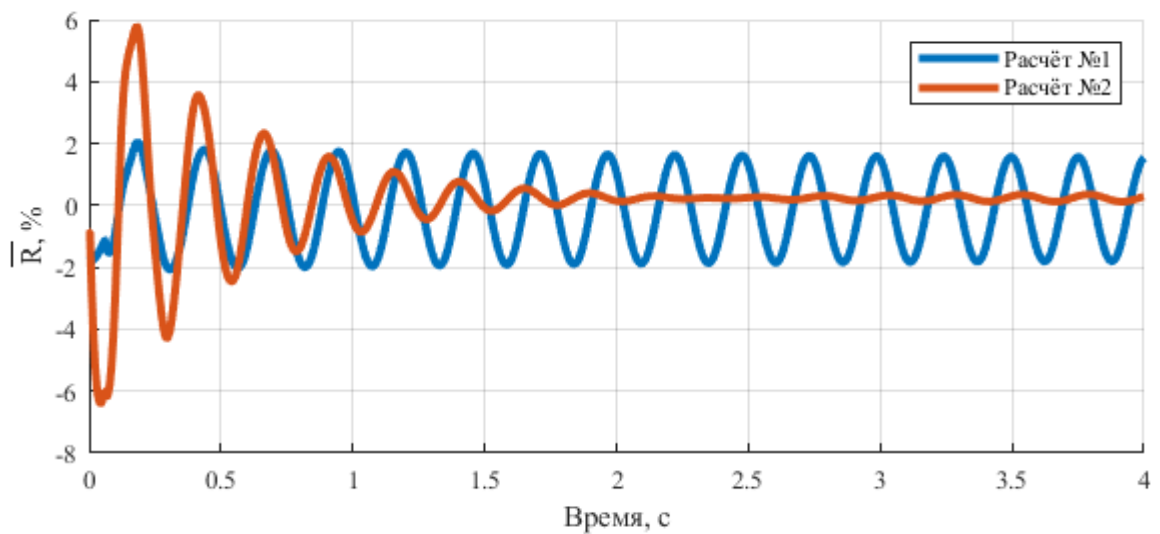


Рисунок 4.13 – Относительная тяга ЖРД

По результатам проведённых расчётов, для первых трёх периодов колебаний с момента времени 0,18 с определены частота, амплитуда и логарифмический декремент затухания колебаний относительной тяги ЖРД и приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4. Параметры колебаний относительной тяги ЖРД.

	Частота колебаний, Гц	Амплитуда колебаний, %	Логарифмический декремент затухания колебаний
Расчёт №1	3,95 / 3,93 / 3,92	2,06 / 1,81 / 1,78	0,130 / 0,018 / 0,019
Расчёт №2	4,29 / 4,02 / 4,06	5,79 / 3,57 / 2,34	0,485 / 0,422 / 0,392

Рассмотрены два фактора, провоцирующие возникновение автоколебаний в контуре ТНА – газогенератор, один из них связан с функционированием агрегатов по линии окислителя, а другой – по линии горючего. В обоих случаях отмечен положительный эффект от повышения величины гидравлического сопротивления в магистрали от выхода из насоса окислителя до входа в газогенератор.

#### **4.5.2. Влияние времени запаздывания при преобразовании жидких компонентов топлива в продукты сгорания на параметры колебаний**

В рассматриваемом типовом ЖРД, основными параметрами, определяющими прохождение возмущений от выхода из насоса до входа в турбину, являются: время преобразования компонентов топлива и время пребывания продуктов сгорания в газогенераторе.

Указанные величины зависят от конструкции газогенератора, параметров газового тракта до турбины и определяются качеством смесеобразования, а также температурой и давлением в газогенераторе.

При дросселировании ЖРД температура в газогенераторе снижается, а также ухудшаются параметры смесеобразования. Эти факторы приводят к росту времени преобразования компонентов топлива в газогенераторе и времени пребывания газа.

Для проведения расчётов использовались следующие атрибуты динамической нагрузочной характеристики регулятора: производная переходного участка характеристики с углом  $\alpha$  0,056 кг/с/МПа, разность расходов между ветвями  $\Delta \dot{m}$  0,03 кг/с (ранее приведены в таблице 4.1). При этом считается, что насос окислителя функционирует в области устойчивой работы по напорной характеристике, поэтому использовалась напорная характеристика 1, представленная на рисунке 2.5.

На рисунках 4.14 и 4.15 приведены расчётные значения частоты вращения вала ТНА и температуры генераторного газа. На рисунке 4.16 представлены расчётные значения относительной тяги двигателя  $\bar{R}$ . Для расчёта №2 время пребывания увеличено на 20% в сравнении с расчётом №1.

По результатам проведённых расчётов, для первых трёх периодов колебаний с момента времени 0,19 с определены частота, амплитуда и логарифмический декремент затухания колебаний относительной тяги ЖРД и приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5. Параметры колебаний относительной тяги ЖРД.

	Частота колебаний, Гц	Амплитуда колебаний, %	Логарифмический декремент затухания колебаний
Расчёт №1	3,90 / 3,93 / 3,92	1,70 / 1,55 / 1,54	0,092 / 0,003 / 0,003
Расчёт №2	3,68 / 3,57 / 3,60	2,04 / 2,40 / 2,94	-0,161 / -0,203 / -0,164

Исходя из результатов расчётов можно отметить следующие особенности:

- При уменьшении характерных времён пребывания компонентов топлива в газогенераторе происходит увеличение частоты колебаний.
- Уменьшение характерных времён пребывания компонентов топлива в газогенераторе приводит к снижению амплитуды колебаний.

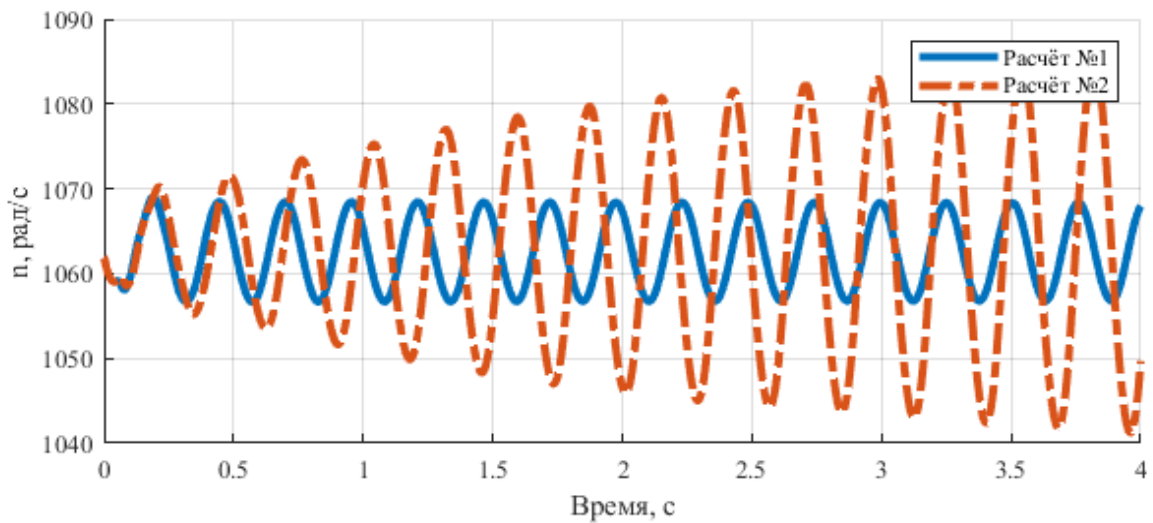


Рисунок 4.14 – Частота вращения вала ТНА

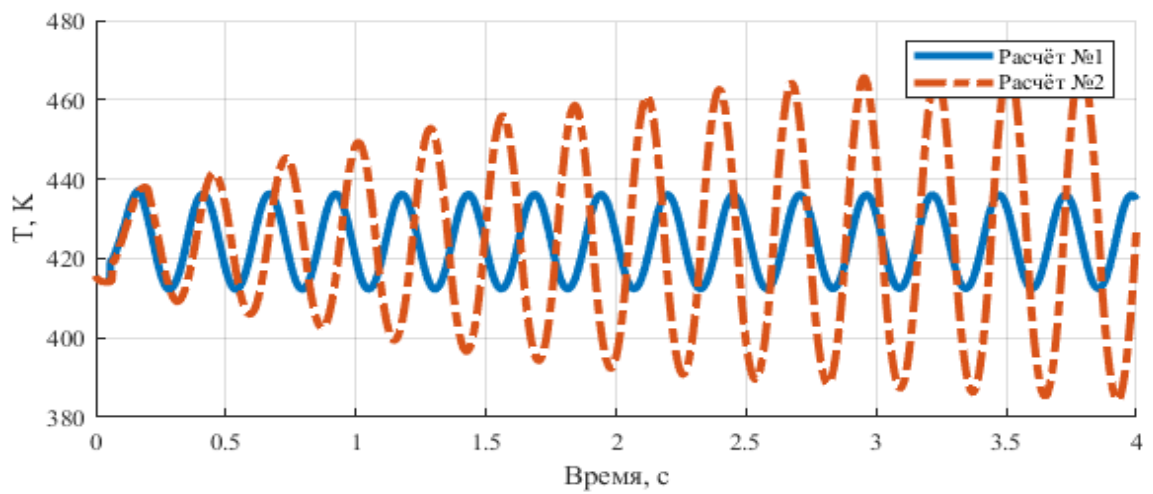


Рисунок 4.15 – Температура генераторного газа

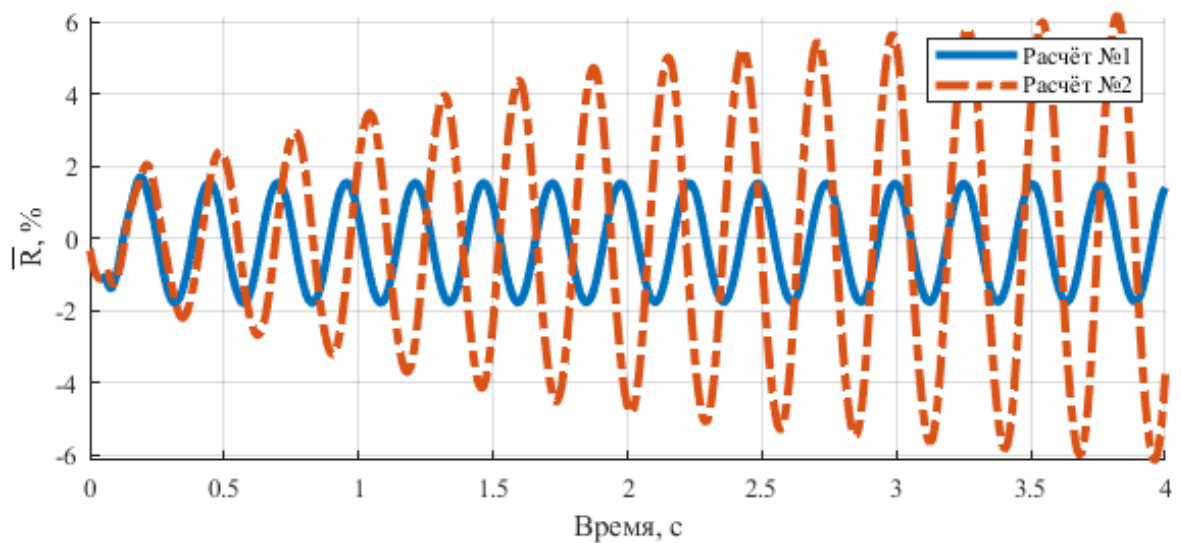


Рисунок 4.16 – Относительная тяга ЖРД

Данные особенности являются одной из причин снижения запасов устойчивости ЖРД при дросселировании по тяге. Также этим можно объяснить снижение собственной частоты ЖРД при его дросселировании.

Полученные закономерности можно интерпретировать следующим образом: увеличение времени прохождения возмущения от выхода из насосов до входа в турбину приводит к тому, что за это время происходит изменение параметров на бóльшую величину, пока возмущение через обратную связь не передастся на вход в систему, тем самым, с ростом данных характерных времён амплитуда увеличивается. Частота колебаний, в свою очередь, обратно пропорциональна периоду, который включает в себя данное время.

#### **4.5.3. Влияние величины момента инерции ротора ТНА на параметры колебаний**

Рассмотрим влияние на параметры автоколебаний величины момента инерции ротора ТНА. В случае возникновения автоколебаний в контуре ЖРД часть энергии тратится на изменение частоты вращения вала ТНА. Также, исходя из уравнения баланса мощностей ТНА, можно отметить, что величина момента инерции ротора ТНА служит коэффициентом пропорциональности между изменением частоты вращения и балансом мощностей насосов и турбины.

Проведём оценку влияния величины момента инерции ротора ТНА на параметры автоколебаний.

Для проведения расчётов использовались следующие атрибуты динамической нагрузочной характеристики регулятора: производная переходного участка характеристики с углом  $\alpha$  0,056 кг/с/МПа, разность расходов между ветвями  $\Delta \dot{m}$  0,03 кг/с (ранее приведены в таблице 4.1). При этом считается, что насос окислителя функционирует в области устойчивой работы по напорной характеристике, поэтому использовалась напорная характеристика 1, представленная на рисунке 2.5.

На рисунках 4.17 и 4.18 приведены расчётные значения частоты вращения вала ТНА и температуры генераторного газа. На рисунке 4.19 представлены

расчётные значения относительной тяги двигателя  $\bar{R}$ . Для расчёта №2 момент инерции ротора ТНА уменьшен на 30% в сравнении с расчётом №1.

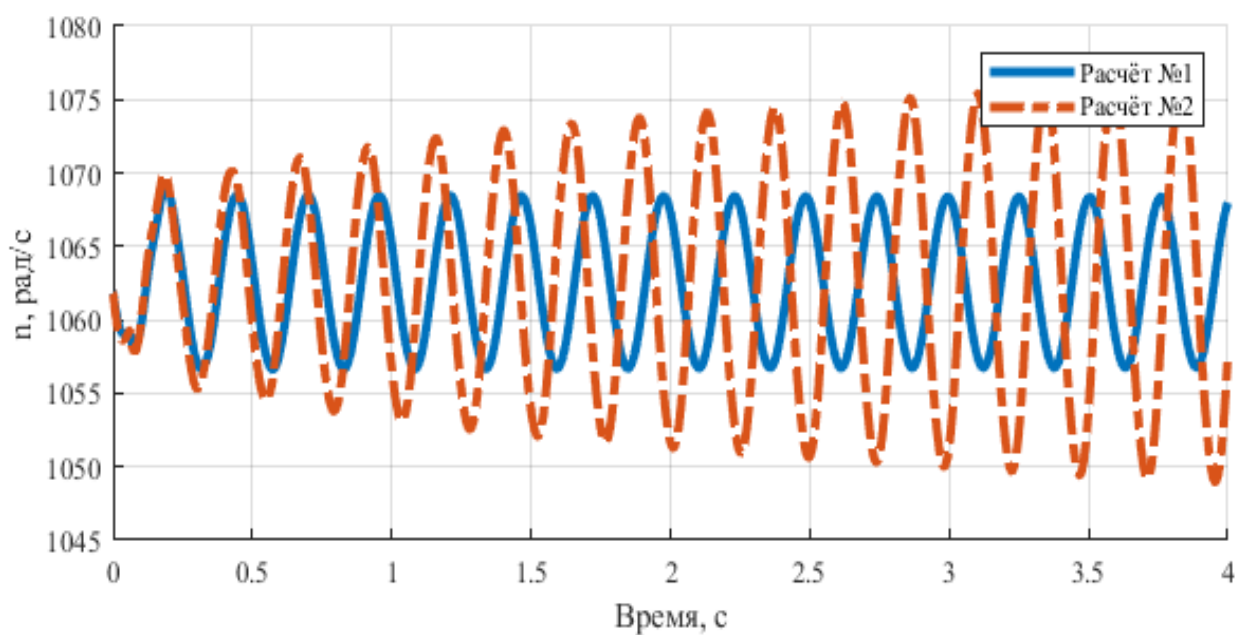


Рисунок 4.17 – Частота вращения вала ТНА

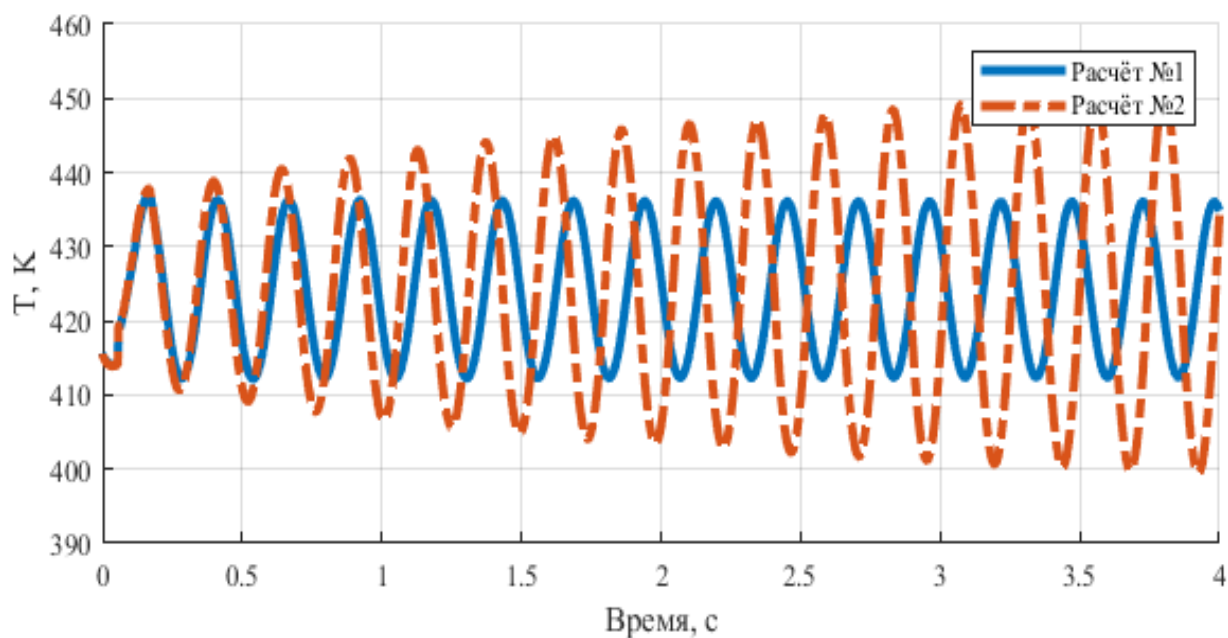


Рисунок 4.18 – Температура генераторного газа

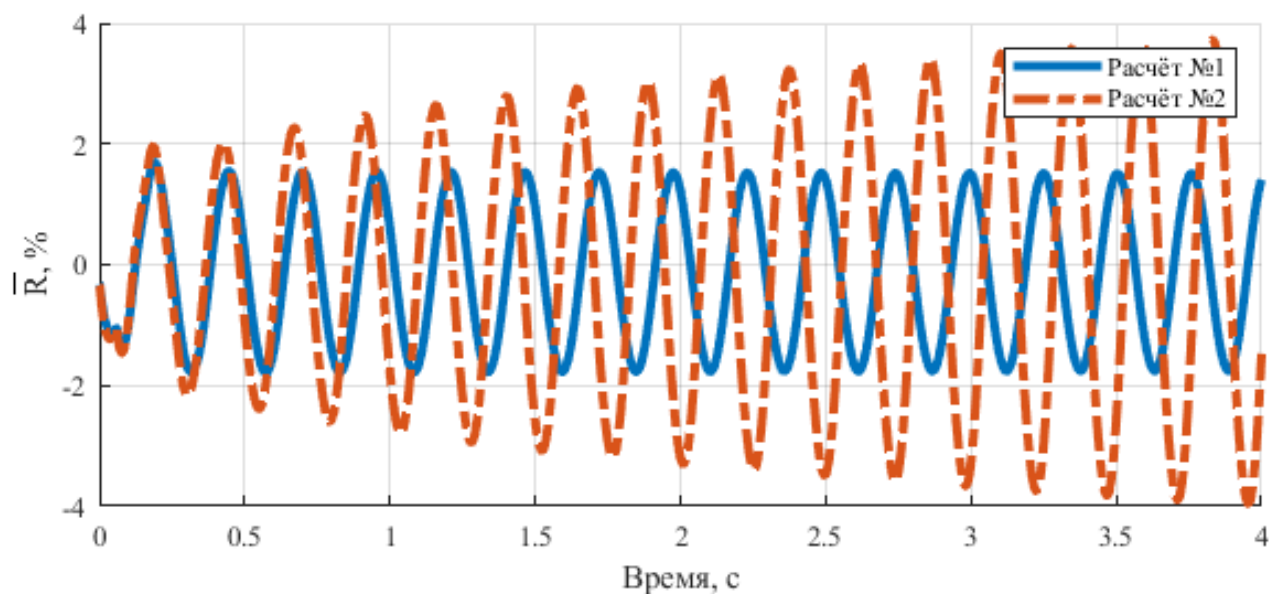


Рисунок 4.19 – Относительная тяга ЖРД

По результатам проведённых расчётов, для первых трёх периодов колебаний с момента времени 0,19 с определены частота, амплитуда и логарифмический декремент затухания колебаний относительной тяги ЖРД и приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6. Параметры колебаний относительной тяги ЖРД.

	Частота колебаний, Гц	Амплитуда колебаний, %	Логарифмический декремент затухания колебаний
Расчёт №1	3,90 / 3,93 / 3,92	1,70 / 1,55 / 1,54	0,092 / 0,003 / 0,003
Расчёт №2	4,14 / 4,10 / 4,10	1,96 / 2,02 / 2,27	-0,027 / -0,119 / -0,084

Результаты расчёта свидетельствуют о положительном влиянии на устойчивость увеличения момента инерции ТНА. Наблюдается снижение амплитуды и частоты колебаний.

Однако, увеличение момента инерции ротора ТНА имеет ряд негативных последствий:

- Увеличение массы ротора;

- Увеличение нагрузок на ротор и опоры, особенно на режимах работы ЖРД, близких к номинальным;
- Изменение характеристик ЖРД на переходных режимах, таких как запуск и останов.

При прочих равных увеличение величины момента инерции ротора приводит к растягиванию процессов запуска и останова, что приводит к увеличению импульса последствия.

Таким образом, данный способ повышения устойчивости ЖРД при работе на режимах глубокого дросселирования имеет ряд существенных недостатков, связанных с ухудшением характеристик ЖРД на режимах близких к номинальным.

#### **4.6. Механизм возникновения автоколебаний тяги двигателя вследствие запаздывания золотника стабилизирующей части регулятора**

В главе 2 отмечено, что в выделенных контурах рассматриваемого типового ЖРД, выполненного по схеме с дожиганием окислительного генераторного газа, возможно возникновение автоколебаний.

На основании проведённого исследования автором предложен механизм возникновения автоколебаний в ЖРД при функционировании регулятора в случае наличия запаздывания при перемещении золотника стабилизирующей части из-за существенно нелинейных сил.

На рисунке 4.20 представлены графики, иллюстрирующие процесс возникновения автоколебаний в ЖРД при ступенчатом изменении соотношения компонентов в камере сгорания в сторону снижения значения  $K_m$ .

На верхнем графике приведён фрагмент динамической нагрузочной характеристики регулятора – иллюстрирующий зависимость расхода через регулятор от перепада давления на регуляторе.

В нижней части рисунка представлена схема, иллюстрирующая фазы колебаний частоты вращения вала ТНА и температуры генераторного газа при

ступенчатом изменении перепада давления на регуляторе вследствие изменения соотношения компонентов топлива в камере сгорания  $K_m$ .

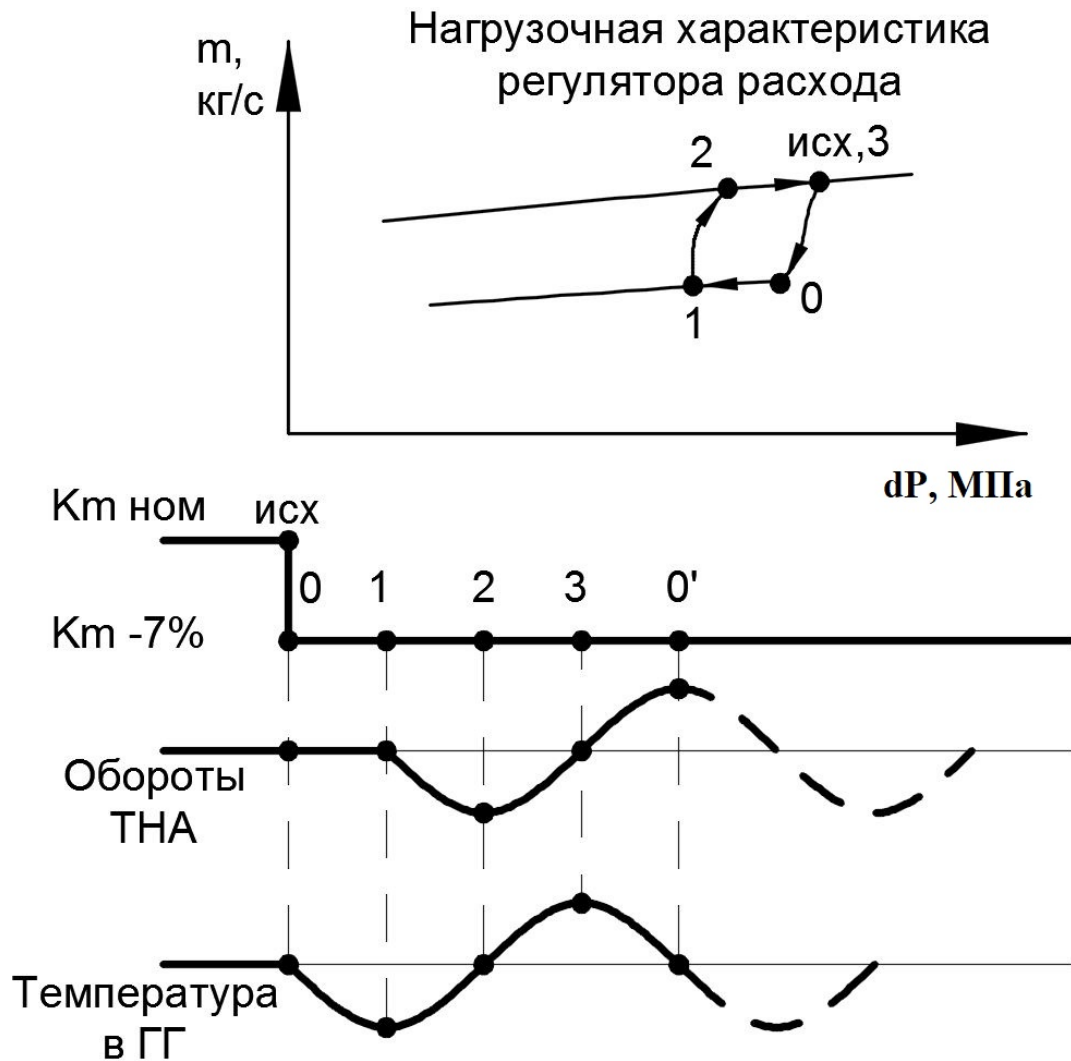


Рисунок 4.20 – Механизм развития автоколебаний при перемещении золотника регулятора с существенным запаздыванием

Применительно к неустойчивой работе, вызванной регулятором, предполагается следующая последовательность развития автоколебаний в ЖРД: исх. – работа двигателя на режимах глубокого дросселирования с номинальным значением  $K_m$ ;

0 – перекладка  $K_m$  в сторону уменьшения значения:

- резкое снижение перепада давления на регуляторе при переходе на нижнюю ветвь напорной характеристики и снижение расхода горючего в газогенератор;

- снижение температуры в газогенераторе (снижение расхода горючего при практически постоянном расходе окислителя);
- частота вращения вала ТНА пока не меняется, так как генераторный газ пока не дошёл до турбины;

1 – газ с меньшей температурой доходит до турбины:

- начало падения частоты вращения вала ТНА;
- перепад на регуляторе немного снижается, но расход остаётся постоянным;
- рост температуры в газогенераторе (частота вращения вала ТНА снижается, расход окислителя снижается,  $K_m$  в газогенераторе снижается);

2 – газ с увеличенной температурой доходит до турбины:

- увеличение частоты вращения вала ТНА;
- увеличение перепада давления на регуляторе, резкий переход на верхнюю ветвь напорной характеристики и увеличение расхода горючего через газогенератор;
- небольшой рост расхода окислителя из-за роста частоты вращения вала ТНА;
- рост температуры в газогенераторе, так как рост расхода горючего существенно больше роста расхода окислителя;

3 – газ с ещё большей температурой доходит до турбины:

- дальнейший рост частоты вращения вала ТНА;
- рост перепада давления на регуляторе, но расход остаётся постоянным, так как рабочая точка остаётся на верхней кривой нагрузочной характеристики;
- увеличение расхода окислителя из-за роста частоты вращения вала ТНА;
- снижение температуры в газогенераторе из-за увеличения  $K_m$  в газогенераторе;

0' – газ с пониженной температурой доходит до турбины:

- падение частоты вращения вала ТНА из-за снижения температуры генераторного газа;
- повторение цикла;

В рассматриваемом случае, четверть периода колебаний будет в основном определяться как время, за которое компоненты топлива проходят от входа в насосы до выхода в турбину.

#### **4.7. Выводы по главе**

1. Проведён расчётно-экспериментальный анализ влияния параметров системы на устойчивость в выделенных контурах ЖРД с использованием разработанной верифицированной и валидированной математической модели типового маршевого ЖРД применительно к режимам глубокого дросселирования по тяге.
2. Представлено описание влияния изменения расхода горючего через регулятор на изменение тяги двигателя при его дросселировании. На режимах глубокого дросселирования влияние расхода горючего на величину тяги увеличивается, что требует повышенной точности поддержания расхода через регулятор.
3. Сформулирован механизм возникновения автоколебаний при работе ЖРД на режимах глубокого дросселирования, вследствие функционирования регулятора с существенной нелинейностью в стабилизирующей части. Возмущение перепада давления на регуляторе приводит к отклонению расхода от заданного значения и вызывает изменение температуры генераторного газа и мощности турбины. Данное возмущение через обратную связь передаётся обратно на вход в регулятор.
4. Определено влияние атрибутов динамической нагрузочной характеристики регулятора на амплитуду и логарифмический декремент затухания колебаний тяги ЖРД:

- 4.1. Величина разности расходов между ветвями  $\Delta \dot{m}$  оказывает влияние на амплитуду колебаний: чем больше величина  $\Delta \dot{m}$ , тем больше амплитуда колебаний. Это можно объяснить бóльшей амплитудой колебаний соотношения компонентов топлива в газогенераторе и, как следствие, бóльшей амплитудой колебаний частоты вращения вала ТНА.
- 4.2. Фактором, влияющим на логарифмический декремент затухания колебаний, является угол наклона переходного участка  $\alpha$ . Увеличение данного угла приводит к снижению величины декремента затухания колебаний.
5. Представлено влияние следующих параметров на параметры колебаний тяги ЖРД:
  - 5.1. Увеличение гидравлического сопротивления в магистрали от насоса окислителя до газогенератора приводит к уменьшению амплитуды колебаний и увеличению логарифмического декремента затухания колебаний.
  - 5.2. Увеличение времени пребывания продуктов сгорания в тракте от форсунок газогенератора до входа в турбину приводит к увеличению амплитуды колебаний, уменьшению их частоты и уменьшению логарифмического декремента затухания колебаний.
  - 5.3. Уменьшение момента инерции ротора ТНА приводит к увеличению амплитуды и частоты колебаний и уменьшению логарифмического декремента затухания колебаний.

При появлении установившихся автоколебаний в процессе работы ЖРД на режимах глубокого дросселирования, варьированием параметров системы, возможно добиться снижения амплитуды данных колебаний. Для обеспечения устойчивой работы ЖРД на режимах глубокого дросселирования необходима разработка способов обеспечивающих повышение точности поддержания тяги.

## **ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ ТОЧНОСТИ ПОДДЕРЖАНИЯ ТЯГИ ЖРД**

### **5.1. Рекомендации по контролю атрибутов динамической нагрузочной характеристики регулятора при проведении его автономных испытаний**

Перед установкой регулятора в ЖРД происходит снятие его характеристик в процессе автономных испытаний. Как правило снимается:

- Настроечная характеристика регулятора;
- Нагрузочная характеристика регулятора.

Настроечная характеристика — это зависимость расхода через регулятор от положения дросселирующей части (например, от кодов команд на привод регулятора).

Нагрузочная характеристика – это зависимость расхода через регулятор от перепада давления на регуляторе при постоянном положении дросселирующей части регулятора.

Зависимости, описанные выше, снимаются для каждого экземпляра регулятора и требуются для настройки ЖРД на необходимую тягу в процессе проведения автономного испытания.

Как правило, в процессе автономного испытания регулятора предъявляются ряд требований:

- Так как привод регулятора имеет ограниченную скорость перемещения, для обеспечения требуемых характеристик запуска и останова должен обеспечиваться необходимый градиент изменения расхода через регулятор при изменении положения дросселирующей части. Это накладывает условия на предельный угол наклона настроечной характеристики.
- Поддержание постоянного расхода при переменном перепаде давления является важным фактором для обеспечения устойчивой работы. Для этого необходимо контролировать параметры нагрузочной характеристики регулятора в области расходов, соответствующих режимам работы ЖРД, на котором необходимо обеспечить устойчивую работу.

На рисунке 5.1 показана типовая нагрузочная характеристика регулятора, снятая при автономном испытании в статической постановке: величина расхода фиксировалась после завершения всех переходных процессов. Точками представлены экспериментальные значения, определённые при увеличении и уменьшении перепада давления. Далее проведена аппроксимация полученных данных степенной зависимостью [35].

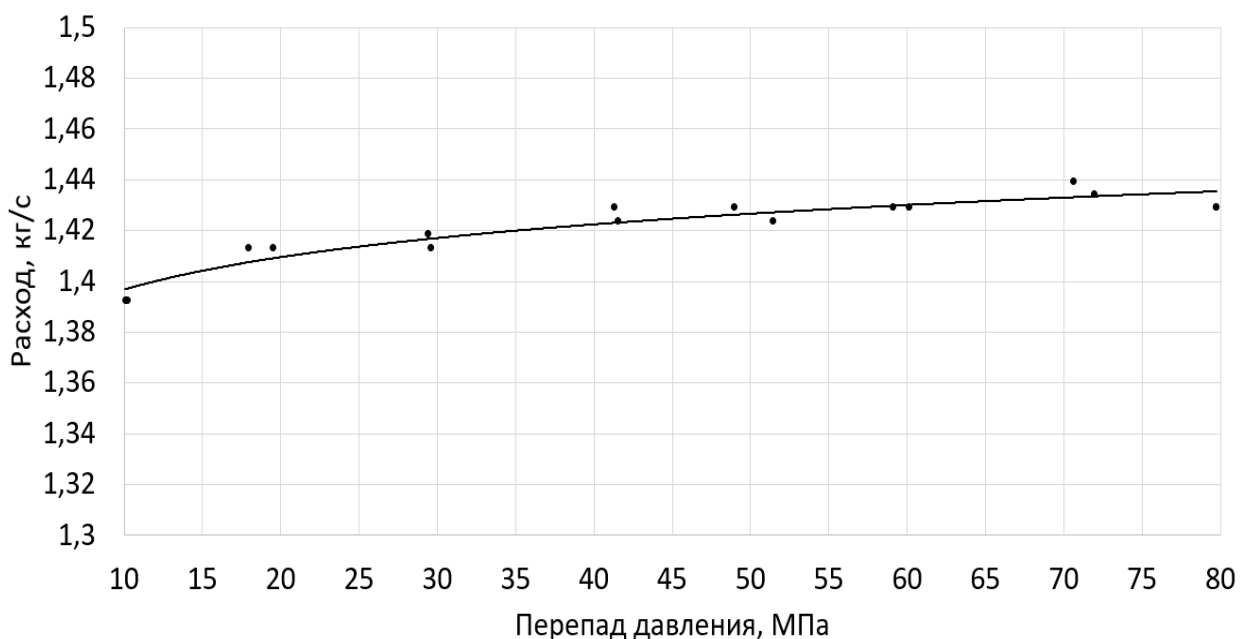


Рисунок 5.1 – Нагрузочная характеристика регулятора

С точки зрения устойчивости наиболее интересным представляется контроль нагрузочной характеристики регулятора.

Первый параметр, подлежащий контролю – это статизм нагрузочной характеристики регулятора. Статизмом называют угол наклона нагрузочной характеристики регулятора к оси абсцисс. Для устойчивой работы статизм регулятора в области рабочих перепадов давления должен быть положительным. При этом угол наклона не должен быть слишком большим, чтобы регулятор поддерживал расход в заданном диапазоне. На рисунке 5.2 представлена типовая нагрузочная характеристика регулятора. Участок 1-2 является рабочим участком регулятора.

Для контроля этого параметра необходимо произвести испытание регулятора и зафиксировать значения расхода в рабочем диапазоне 1-2.

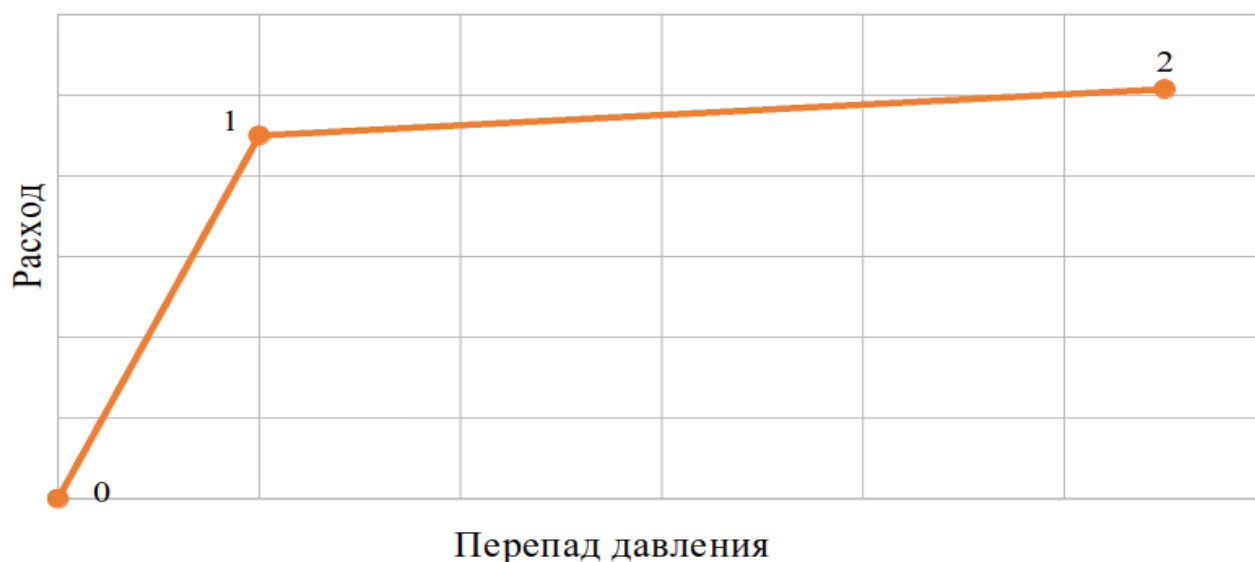


Рисунок 5.2 – Нагрузочная характеристика регулятора

Разность между расходом в точке 2 и 1 должна быть положительная и меньше некоторого предельного значения.

При проведении данных автономных испытаний возможно снятие значений расходов в диапазоне 1-2 в статической постановке, без учёта переходных процессов по расходу при изменении перепада давления.

Как было отмечено в главе 2.3.3 переходные процессы изменения расхода при изменении перепада давления могут оказывать влияние на устойчивость ЖРД. Поэтому, дополнительно к контролю статизма регулятора, при проведении автономного испытания регулятора предлагается контролировать такие атрибуты динамической нагрузочной характеристики, как угол наклона переходного участка  $\alpha$  и разность расходов между ветвями  $\Delta \dot{m}$ .

На основании проведённого исследования разработаны рекомендации по контролю атрибутов динамической нагрузочной характеристики регулятора при проведении его автономных испытаний. Это необходимо для учёта динамических свойств регулятора при проведении расчётов работы ЖРД на различных режимах.

Для этого, при приведении автономных испытаний регуляторов необходимо:

1. Определить диапазон расходов и перепадов давления на регуляторе на всех режимах работы ЖРД.

2. Для каждого режима определить номинальный расход через регулятор, номинальный перепад давления на регуляторе и собственную частоту ЖРД.

3. Для параметров из п. 2 на каждом режиме провести автономное испытание 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. Обеспечить номинальный расход и перепад давления на регуляторе, при неизменном положении дросселирующей части регулятора и создать колебания давления на входе в регулятор с частотой, соответствующей собственной частоте ЖРД.

3.3. По результатам испытания определить атрибуты динамической нагрузочной характеристики регулятора:  $\alpha$  и  $\Delta \dot{m}$ .

## **5.2. Способ повышения точности поддержания расхода через регулятор**

На основе сформулированных требований к регулятору разработаны конструктивные предложения по снижению существенно нелинейных сил в стабилизирующей части регулятора. Эффективность данных предложений подтверждена результатами автономных испытаний регуляторов.

Цель внедрения данных конструктивных изменений — снижение усилий трения и «паразитных» утечек в золотниковой паре регулятора, а также привели к незначительному увеличению статизма нагрузочной характеристики регулятора из-за большей жёсткости пружины с целым числом рабочих витков. Введение кольцевых проточек для уменьшения трения в подвижных соединениях золотниковых пар рекомендовано в [8].

Предлагаемые мероприятия обеспечивают более плавное перемещение золотника стабилизирующей части регулятора, что приводит к повышению точности поддержания расхода через регулятор.

Регулятор (рисунок 5.3) содержит корпус 1 и крышку 2, имеющие основной и дополнительный входные патрубки, а также выходной патрубков. Основной входной патрубков служит для подвода основного компонента топлива, а

дополнительный входной патрубок - для подвода пускового компонента топлива. Внутри корпуса закреплены три направляющие 3, 4 и 5, поджатые к опорным поверхностям и тарельчатыми пружинами 6 и пружиной 7; от проворота направляющие удерживаются с помощью штифтов 8 и 9.

В направляющую 3 установлен хвостовик обратного клапана 10 с кольцевыми проточками А, поджатый пружиной 11 к конической уплотнительной поверхности крышки 2. В открытом положении обратный клапан 10 упирается в коническую поверхность Б, выполненную в направляющей 3, при этом полость, образованная хвостовиком обратного клапана 10 и направляющей 3, соединена отверстиями В, Д, Р с проточной частью регулятора. В направляющей 3 выполнены отверстия Г, через которые пусковой компонент поступает к передним дроссельным окнам Е. На направляющую 4 надета гильза 12, связанная реечным зацеплением с валиком 13, который поворачивается в нужное угловое положение с помощью привода, при этом гильза обеспечивает соответствующее перекрытие передних дроссельных окон Е в направляющей 4. Форма дроссельных окон Е выполняется расширяющейся по направлению потока и, например, может иметь вид трапеции.

Между направляющими 4 и 5 размещён золотник 14, выполненный в виде подвижного поршня с юбкой. В исходном положении (без расхода жидкости) золотник 14, поджатый пружиной 7 до упора в торец направляющей 4. Пружина 7 (рисунок 5.4) имеет целое число рабочих витков, которые с обеих сторон пружины поджаты на  $3/4$  окружности опорными витками. При этом концы опорных витков повёрнуты друг относительно друга на половину окружности. Такая конструкция пружины позволяет исключить прогиб пружины вдоль своей оси при сжатии и, соответственно, радиальные усилия.

На рисунке 5.5 приведено сравнение деформаций пружины с целым числом рабочих витков с пружиной, имеющей число рабочих витков на 0,5 витка меньше от указанной величины. Регулировка усилия пружины 7 в исходном положении производится с помощью шайб 15, устанавливаемых между торцами пружины 7 и

направляющей 5. По внутреннему диаметру золотника выполнены проточки Ж, аналогичные проточки Л имеются и в направляющей 5. Цилиндрическая поверхность И направляющей 5, взаимодействующая с золотником 14, выполнена с уступом. Форма выходных дроссельных окон К в направляющей 5 выполняется сужающейся по направлению потока и может быть, например, треугольной. Выходные дроссельные окна К имеют по контуру буртик М регламентированной ширины и высоты.

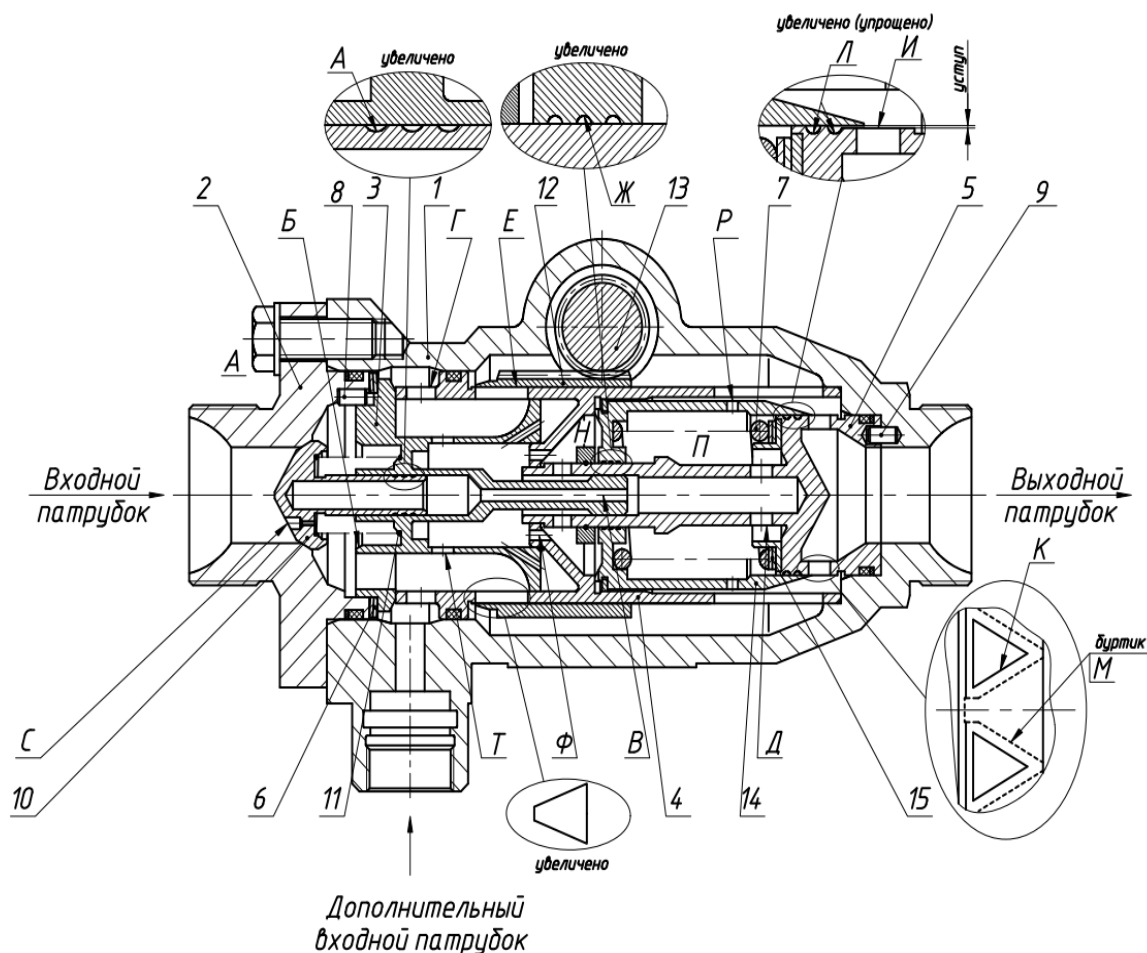


Рисунок 5.3 – Регулятор усовершенствованной конструкции

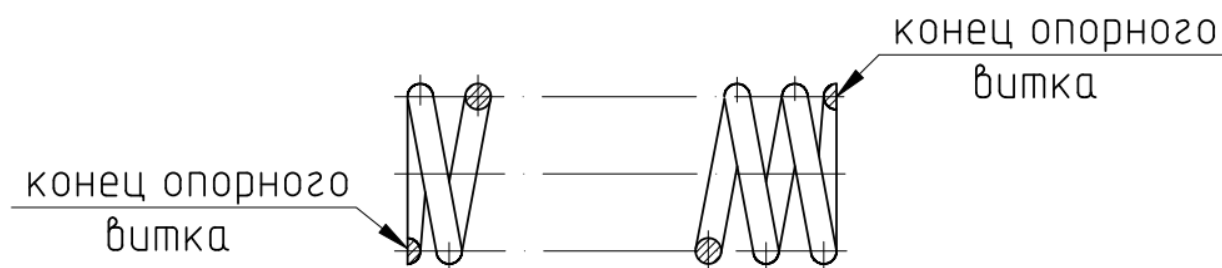
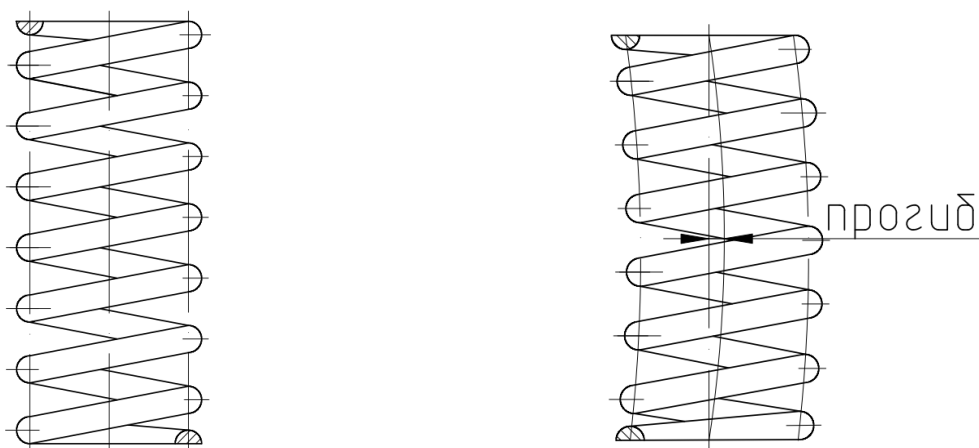


Рисунок 5.4 – Пружина с целым числом рабочих витков



а) с целым количеством рабочих витков      б) с нецелым количеством рабочих витков

Рисунок 5.5 – Деформация пружин при сжатии между параллельными плоскостями

Ниже представлено сравнение точности поддержания расхода через регулятор штатной и усовершенствованной конструкции в процессе автономных испытаний по методике, представленной в главе 3.3. На рисунках 5.6 и 5.7 представлено изменение перепада давления на регуляторах и изменение расхода через регуляторы соответственно. Пунктирной линией представлено изменение параметров для регулятора №1 штатной конструкции. Сплошной линией представлено изменение параметров для регулятора №2 усовершенствованной конструкции. Характеристики регулятора №1 (рисунки 5.6 и 5.7) соответствуют характеристикам регулятора №2 (рисунки 3.8 и 3.9).

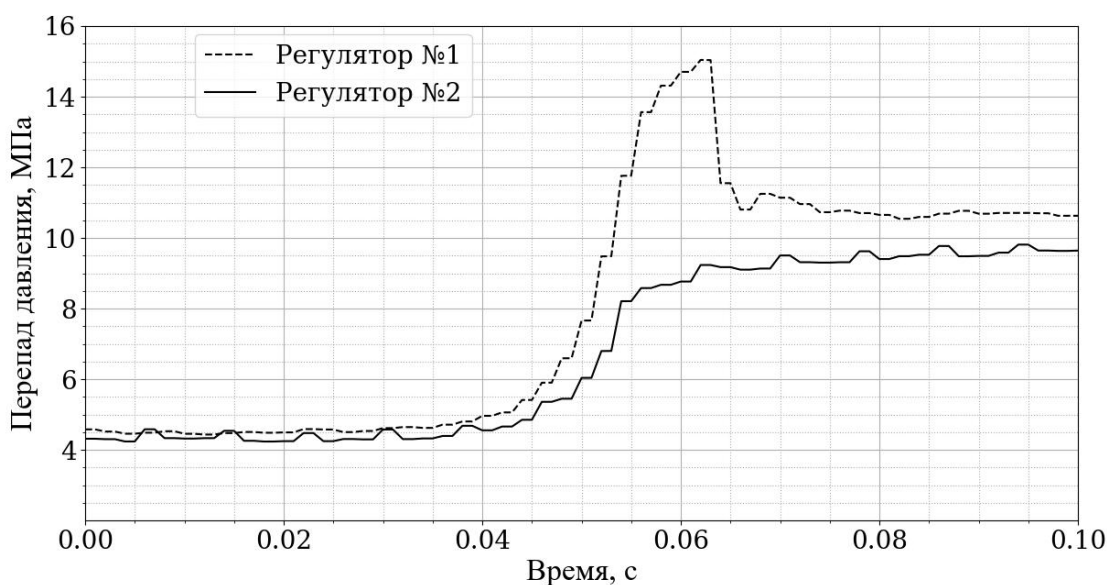


Рисунок 5.6 – Перепад давления на регуляторах

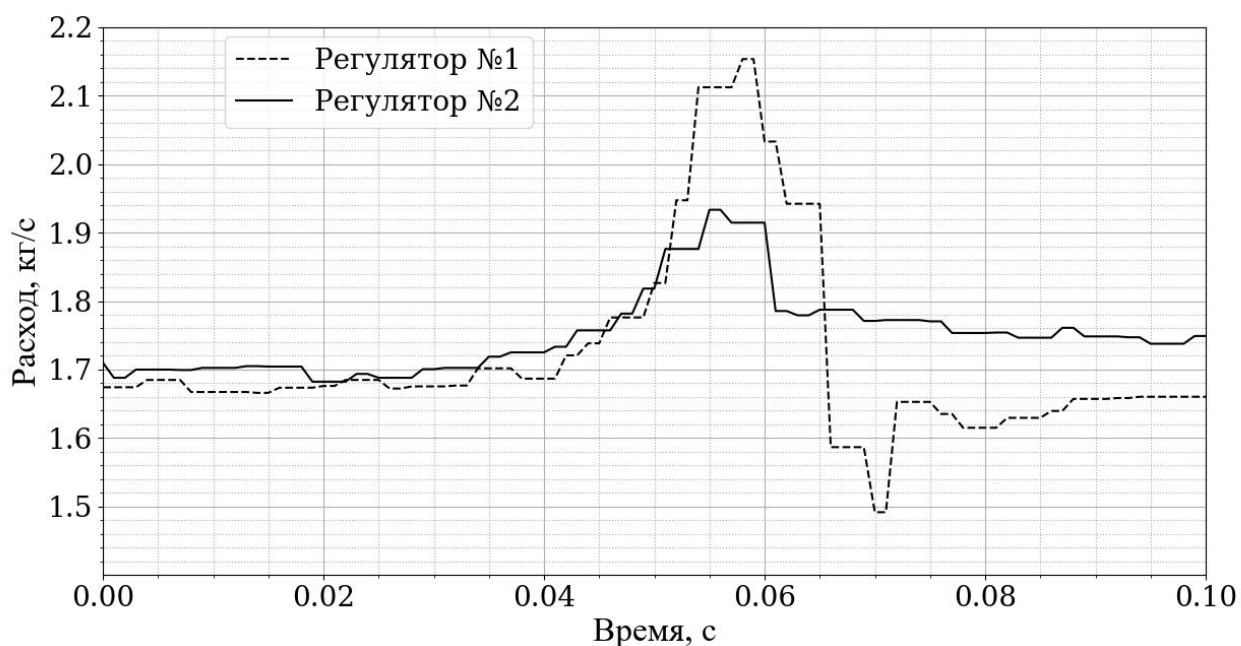


Рисунок 5.7 – Расход через регулятор при переходном процессе при открытии дополнительного стендового сливного клапана

В таблице 5.1 приведены величины заброса перепада давления на регуляторах от установившегося после переходного процесса значения и заброса расхода в сторону увеличения и уменьшения от установившихся после переходного процесса значений расхода.

Таблица 5.1. Экспериментальные характеристики регуляторов.

	Заброс перепада давления, МПа	Заброс расхода в сторону увеличения, кг/с	Заброс расхода в сторону уменьшения, кг/с
Регулятор №1	4,5	0,46	0,21
Регулятор №2	нет	0,24	нет

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.

Относительно заданного значения 1,7 кг/с отклонение расхода при переходном процессе для регулятора №1 составляет 27,1 %, а для регулятора №2 составляет 14,1 %.

Предложенный способ повышения точности поддержания расхода через регулятор при возмущениях по перепаду давления обеспечивает снижение отклонения расхода от заданного значения на 52,2 % в сравнении с регулятором штатной конструкции. Продемонстрированное повышение точности поддержания расхода через регулятор по расчётным оценкам приводит к повышению точности поддержания тяги на 2,95 % (согласно рисунку 4.1).

### **5.3. Методика оценки влияния нелинейности в стабилизирующей части регулятора на параметры автоколебаний тяги ЖРД**

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  $\alpha$  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 расхода.

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:  $\alpha$ ,  $\Delta \dot{m}$  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.

#### 5.4. Выводы по главе

1. Разработаны рекомендации по контролю атрибутов динамической нагрузочной характеристики регулятора: угол наклона переходного участка  $\alpha$  и разность расходов между ветвями  $\Delta \dot{m}$ . Данные атрибуты определяют устойчивость ЖРД, поэтому необходимо контролировать их в процессе автономных испытаний регуляторов расхода.

2. Предложены конструктивные мероприятия, направленные на снижение существенно нелинейных сил в стабилизирующей части регулятора с целью снижения заброса расхода через регулятор при переходных режимах. Эффективность данных мероприятий подтверждена в процессе автономных испытаний агрегатов и огневых испытаний ЖРД на стендах АО «НПО Энергомаш».

3. Предложен способ повышения точности поддержания расхода через регулятор при возмущениях по перепаду давления с целью недопущения возникновения автоколебаний тяги ЖРД.

4. Разработана методика оценки влияния нелинейности в стабилизирующей части регулятора на параметры автоколебаний тяги ЖРД.

## 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  $\alpha$  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  $\Delta \dot{m}$  0,116; 0,03; 0,04 кг/с и тангенсов угла наклона переходного участка  $\alpha$  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  $\alpha$ ,  $\Delta \dot{m}$  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  $\alpha$ ,  $\Delta \dot{m}$  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  $\alpha$ ,  $\Delta \dot{m}$  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.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Автоколебания в топливной магистрали с кавитирующим шнекоцентробежным насосом / В.Г. Кинелев, К.С. Колесников, С.Н. Курочкин – Текст : непосредственный // Кавитационные автоколебания в насосных системах; Сб. науч. трудов. – Киев: Наукова думка, 1976. – Ч.1. – С. 110-118.

2. **Алемасов, В.Е.** Теория ракетных двигателей : учебник для студентов / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегалин, А.П. Тишин ; под редакцией В.П. Глушко. – Москва : Машиностроение, 1980. – 533 с. : ил. – 6000 экз. – Текст : непосредственный.

3. Анализ нештатных ситуаций работы двигателей больших тяг при огневых испытаниях / П.С. Левочкин, И.В. Бурцев – Текст : непосредственный // Ракетно-космические двигательные установки. Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции. – Москва : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. – ISBN 978-5-907383-00-5. – С. 40-41.

4. «Ангара» — «Байкал» О разгонном ракетном модуле многоразового использования / В. Максимовский – Текст : непосредственный // Крылья родины. – 2002. – №4. – С.17-18, ISSN 0130-2701.

5. **Бабкин, А.И.** Основы теории автоматического управления ракетными двигательными установками : учебник для авиационных специальностей вузов – 2-е изд., перераб. и доп. / А.И. Бабкин, С.И. Белов, Н.Б. Рутовский [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1986. – 456 с. – 2750 экз. – Текст : непосредственный.

6. «Байкал», покоривший Париж / Ю. Журавин – Текст : непосредственный // Новости космонавтики. – 2001. – №8. – С. 34-35, ISSN 1561-1078.

7. **Баррер, М.** Ракетные двигатели / М. Баррер, А. Жомотт, Б.Ф. Весте [и др.]. ; [перевод с английского Б.И. Колтового]. — Москва : Оборонгиз, 1962. – 800 с. – 9000 экз. – Текст : непосредственный.

8. **Башта, Т.М.** Гидравлические приводы летательных аппаратов : справочное пособие 4-е изд., перераб. и доп. / Т.М. Башта. – Москва :

Машиностроение, 1967. –494 с. : ил. – Текст : непосредственный.

9. **Башта, Т.М.** Машиностроительная гидравлика : справочное пособие 2-е изд., перераб. и доп. / Т.М. Башта. – Москва : Машиностроение, 1971. –672 с. – 32000 экз. – Текст : непосредственный.

10. **Беляев, Е.Н.** Математическое моделирование рабочего процесса жидкостных ракетных двигателей : учебник. / Е.Н. Беляев, В.К. Чванов, В.В. Черваков ; под редакцией В.К. Чванова ; Министерство общего и профессионального образования Российской Федерации, Московский государственный авиационный институт (технический университет). – Москва : Издательство МАИ, 1999. – 228 с. : ил. 1000 экз. – ISBN 5-7035-2221-8. – Текст : непосредственный.

11. **Бутенин, Н.В.** Введение в теорию нелинейных колебаний / Н.В. Бутенин, Ю.И. Неймарк, Н.А. Фуфаев. – Москва : Наука, 1976. – 384 с. – Текст : непосредственный.

12. **Васильев, А.П.** Основы теории и расчёта жидкостных ракетных двигателей : учебник для авиационных специальностей вузов – 4-е изд., перераб. и доп. : в 2 книгах : книга 2 / А.П. Васильев, В.М. Кудрявцев, В.А. Кузнецов ; под редакцией В.М. Кудрявцева ; Федеральная целевая программа книгоиздания России. – Москва : Высшая школа, 1993. – 368 с. : ил. – 500 экз. – ISBN 5-06-002563-2. – Текст : непосредственный.

13. **Васютин, Ю.И.** Агрегаты регулирования жидкостных ракетных двигательных установок : учебное пособие / Ю.И. Васютин, И.А. Смирнов, Д.А. Ягодников [и др.]. ; под редакцией Д.А. Ягодникова. – Москва : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 223, [1] с. : ил. – ISBN 978-5-7038-4120-4. – Текст : непосредственный.

14. Верификация и валидация компьютерных моделей / А.В. Сальников, М.С. Французов, К.А. Виноградов [и др.]. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2022. – №9. – С. 100-115, ISSN 0536-1044.

15. Влияние конденсации высокотемпературного окислительного газа в зоне криогенного кислорода на низкочастотную устойчивость ЖРД / И.М. Кошелев, Д.С. Мартиросов, А.И. Колбасенков – Текст : непосредственный // Двигатель. – 2012. – №6. – С.24-27, ISSN 2500-0985.

16. Влияние конструктивных параметров регулятора расхода на его статические характеристики / Е.Н. Беляев, А.И. Коломенцев, Л.Б. Насименто [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2014. – №1 (53). – С.109-113, ISSN 1816-9724.

17. Влияние нелинейностей характеристик регулятора расхода на устойчивость ЖРД / И.В. Бурцев – Текст : непосредственный // Ракетно-космические двигательные установки. Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции. – Москва : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023. – ISBN 978-5-907612-53-2. – Т.1. – С. 34-36.

18. **Волков, Е.Б.** Жидкостные ракетные двигатели. Основы теории агрегатов ЖРД и двигательных установок / Е.Б. Волков, Л.Г. Головкин, Т.А. Сырицин. – Москва : Воениздат, 1970. – 592 с. – Текст : непосредственный.

19. **Волков, Е.Б.** Статика и динамика ракетных двигателей : в 2 книгах : книга 2. Динамика / Е.Б. Волков, Т.А. Сырицин, Г.Ю. Мазинг. – Москва : Машиностроение, 1978. – 320 с. – Текст : непосредственный.

20. **Володин, В.А.** Конструкция и проектирование ракетных двигателей – 2-е изд., перераб. и доп. / В.А. Володин, Ю.Н. Ткаченко ; под редакцией В.П. Советского. – Москва : Машиностроение, 1984. – 269 с. – Текст : непосредственный.

21. **Гимадиев, А.Г.** Автоматика и регулирование двигательных установок ракетных и космических систем : электронное учебное пособие / А.Г. Гимадиев ; Министерство образования и науки РФ, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева

(национальный исследовательский университет)». – Самара : Издательство Самарского государственного аэрокосмического университета, 2010. – 201 с. – Текст : электронный.

22. **Гимадиев, А.Г.** Выбор параметров, расчёт статических и динамических характеристик регулятора расхода топлива: учебное пособие / А.Г. Гимадиев ; Федеральное агентство по образованию, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева». – Самара : Издательство Самарского государственного аэрокосмического университета, 2007. – 64 с.: ил. – ISBN 978-5-7833-0641-4. – Текст : непосредственный.

23. **Гимадиев, А.Г.** Расчёт регулятора расхода компонента топлива ЖРД : учебное пособие / А.Г. Гимадиев, Н.Д. Быстров, А.И. Сафин ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет)». – Самара : Издательство Самарского государственного аэрокосмического университета, 2020. – 72с.: ил. – ISBN 978-5-7883-1515-7. – Текст : непосредственный.

24. **Гахун, Г.Г.** Конструкция и проектирование жидкостных ракетных двигателей : учебник / Г.Г. Гахун, В.И. Баулин, В.А. Володин [и др.]. ; под редакцией Г.Г. Гахуна. – Москва : Машиностроение, 1989. – 424 с. : ил. – ISBN 5-217-00360-X. – Текст : непосредственный.

25. **Гликман, Б.Ф.** Автоматическое регулирование ЖРД / Б.Ф. Гликман. – Москва : Машиностроение, 1974. – 396 с. – 2500 экз. – Текст : непосредственный.

26. **Горячкин, А.А.** Регуляторы расхода для топливных систем двигателей летательных аппаратов / А.А. Горячкин, А.Е. Жуковский, С.М. Игначков, В.П. Шорин ; под редакцией В.П. Шорина. – Москва :

Машиностроение, 2000. – 205 с. – ISBN 5-217-03058-5. – Текст : непосредственный.

27. **Губанов, Б.И.** Триумф и трагедия «Энергии» Размышления главного конструктора. Книга. В 3 томах. Том 3. «Энергия-Буран» / Б.И. Губанов. – Нижний Новгород : издательство НИЭР, 1998. – 657 с. : ил. – ISBN 5-93320-002-6. – Текст : непосредственный.

28. **Гуров, А.Ф.** Расчёты на прочность и колебания в ракетных двигателях / А.Ф. Гуров. – Москва : Машиностроение, 1966. – 456 с. – ISBN 5-696-00846-1. – Текст : непосредственный.

29. **Дегтярь, Б.Г.** Кавитация и РОГО-неустойчивость : учебное пособие / Б.Г. Дегтярь ; Министерство общего и профессионального образования Российской Федерации, Южно-Уральский государственный университет, Кафедра «Двигатели летательных аппаратов». – Челябинск : Издательство ЮУрГУ, 1997. – 100 с. – Текст : непосредственный.

30. Динамика топливной магистрали с учётом кавитационных явлений в шнекоцентробежном насосе / В.Г. Кинелев, К.С. Колесников, – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 1974. – №1. – С.82-86, ISSN 0579-2975.

31. **Дмитренко, А.И.** Агрегаты систем питания ракетных двигателей, разработанных в КБХА / А.И. Дмитренко – Текст : непосредственный // Научно-технический юбилейный сборник КБ химавтоматики. – Воронеж : ИПФ «Воронеж», 2001. – ISBN 5-89981-226-5. – С. 293-301, ISBN 5-89981-226-5.

32. **Добровольский, М.В.** Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования : учебник для высших учебных заведений – 3-е изд., доп. / М.В. Добровольский ; под редакцией Д.А. Ягодникова– Москва : Издательство МГТУ имени Н. Э. Баумана, 2016. – 461, [3] с. : ил. – ISBN 978-5-7038-4145-7. – Текст : непосредственный.

33. **Дорофеев, А.А.** Основы теории тепловых ракетных двигателей. Теория, расчёт и проектирование : учебник – 3-е изд., перераб. и доп./ А.А.

Дорофеев. – Москва : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, – 2014. – 571, [5] с. : ил. – ISBN 978-5-7038-3746-7. – Текст : непосредственный.

34. **Захаров, Н.Д.** Автоколебания в системе подачи жидкости с регулятором расхода прямого действия – В кн.: Динамика насосных систем. Сб. научн. тр. Киев: Наукова думка, 1960, с.14-21.

35. 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.

36. Исследование возможности получения стабильной формы напорной характеристики насоса ЖРД с глубоким дросселированием тяги / Ю.И. Каналин, В.Н. Кухарев, Е.Н. Ромасенко [и др.]. – Текст : непосредственный // Труды НПО Энергомаш. – 2012. – №29. – С. 86-97, ISSN 2079-0228.

37. 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.

38. **Каторгин, Б.И.** Прикладная газовая динамика / Б.И. Каторгин, А.С. Киселев, Л.Е. Стернин [и др.]. – Москва: Вузовская книга, 2009. – 340 с. ISBN 978-5-9502-0395-4. – Текст : непосредственный.

39. Кинетическая модель кавитационных колебаний в насосах / М.С. Натанзон – Текст : непосредственный // Известия академии наук СССР. Серия энергетика и транспорт. – 1975. – № 6. – С.112-121.

40. **Козлов, А.А.** Системы питания и управления жидкостных ракетных двигательных установок : учебник / А.А. Козлов, В.Н. Новиков, Е.В. Соловьев. – Москва : Машиностроение, 1988. – 352 с. : ил. – ISBN 5-217-00144-5. – Текст : непосредственный.

41. Колебания в топливной магистрали, вызванные кавитацией в шнекоцентробежном насосе/ В.Г. Кинелев, К.С. Колесников, – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 1974. – №2. – С.147-149, ISSN 0579-2975.

42. **Колесников, К.С.** Динамика ракет : учебник для вузов – 2-е изд., испр. и доп. / К.С. Колесников – Москва : Машиностроение, 2003. – 520 с.: ил. – ISBN 5-217-03149-2. – Текст : непосредственный.

43. **Колесников, К.С.** Динамика топливных систем ЖРД / К.С. Колесников, С.А. Рыбаков, Е.Ф. Самойлов ; под редакцией К.С. Колесникова. – Москва : Машиностроение, 1975. – 169 с. : ил. – Текст : непосредственный.

44. **Колесников, К.С.** Продольные колебания ракеты с жидкостным ракетным двигателем / К.С. Колесников – Москва : Машиностроение, 1971. – 259 с. – Текст : непосредственный.

45. **Колесников, К.С.** Теория колебаний : учебник для вузов – 2-е изд. / М.М. Ильин, К.С. Колесников, Ю.С. Саратов ; под редакцией К.С. Колесникова. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 272 с. : ил. – ISBN 5-7038-1371-9. – Текст : непосредственный.

46. **Лебединский, Е.В.** Компьютерные модели жидкостных ракетных двигателей / Е.В. Лебединский [и др.]. ; под редакцией академика РАН А.С. Коротева. – Москва : Машиностроение, 2009. 374, [1] с. : ил., табл. ; 25см. ; ISBN 978-5-217-03449-9. – Текст : непосредственный.

47. **Лебединский, Е.В.** Рабочие процессы в жидкостном ракетном двигателе и их моделирование / Е.В. Лебединский, Г.П. Калмыков, С.В. Мосолов [и др.] ; под редакцией академика РАН А.С. Коротева. – Москва : Машиностроение, 2008. – 512 с. : ил., [12] с. цв. вкл. – ISBN 978-5-217-03433-8. – Текст : непосредственный.

48. **Лихачев, В.А.** Техническая диагностика пневмогидравлических систем ЖРД / В.А. Лихачев, А.С. Васин, Б.Ф. Гликман. – Москва: Машиностроение, 1983. – 207 с. : ил. – Текст : непосредственный.

49. **Лойцянский, Л.Г.** Механика жидкости и газа : учебник для вузов. – 7-е изд., испр. / Л.Г. Лойцянский. – Москва : Дрофа, 2003. – 840 с., 311 ил., 22 табл. – ISBN 5-7107-6327-6. – Текст : непосредственный.

50. Математическая модель кавитационных явлений в шнекоцентробежном насосе / В.Г. Кинелев, К.С. Колесников, – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 1974. – №4. – С.87-92, ISSN 0579-2975.

51. Математическое моделирование низкочастотной динамики регулятора расхода жидкости при различных амплитудах гармонического возмущения / С.И. Долгополов, А.Д. Николаев – Текст : непосредственный // Техническая механика. – 2017. – №1. – С.15-25.

52. Математическое моделирование регуляторов ЖРД / Е.С. Зенин, О.М. Меньшикова, В.А. Федотчев – Текст : непосредственный // Полёт. – 2013. – №5. – С.20-24, ISSN 1684-1301.

53. Математическое моделирование регулятора расхода жидкостного ракетного двигателя во временной и частотной областях / К.М. Аунг, А.И. Коломенцев, Д.С. Мартиросов – Текст : непосредственный // Вестник Московского авиационного института. – 2021. – Т.28. – №1. – С.96-106, ISSN 0869-6101.

54. Механизм кавитации центробежного насоса на неустановившихся режимах / В.П. Козелков, А.Ф. Ефимочкин – Текст : непосредственный // Гидродинамика лопаточных машин и общая механика: Сб. науч. тр. / Воронеж: Изд. ВПИ, 1972. – Вып. 1, – С.17-29.

55. 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.

56. **Миленко, Н.П.** Моделирование испытаний ЖРД / Н.П. Миленко, А.В. Сердюк. – Москва : Машиностроение, 1974. – 184 с. – Текст : непосредственный.

57. **Михайлов, В.В.** Дросселируемые жидкостные ракетные двигатели / В.В. Михайлов, Б.Г. Базаров. – Москва : Машиностроение, 1985. – 168 с. – Текст : непосредственный.
58. Многоуровневое математическое моделирование регулятора расхода ЖРД / Е.В. Лебединский, Б.В. Зайцев, А.А. Соболев – Текст : электронный // Сайт ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша». 2011. – URL: <http://www.kerc.msk.ru/ipg/papers/model2.pdf> (дата обращения 18.09.2024).
59. **Мошкин, Е.К.** Динамические процессы в ЖРД / Е.К. Мошкин. – Москва : Машиностроение, 1964. – 256 с. – 3500 экз. – Текст : непосредственный.
60. **Мошкин, Е.К.** Нестационарные режимы работы ЖРД / Е.К. Мошкин. – Москва : Машиностроение, 1970. 336 с. – Текст : непосредственный.
61. **Натанзон, М.С.** Неустойчивость горения / М.С. Натанзон. – Москва : Машиностроение, 1986. – 248 с. : ил. – 2430 экз. – Текст : непосредственный.
62. **Натанзон, М.С.** Продольные автоколебания жидкостной ракеты / М.С. Натанзон. – Москва : Машиностроение, 1977. – 208 с. – Текст : непосредственный.
63. 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, посвящённые памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных учёных – пионеров освоения космического пространства (Москва, 29 января – 1 февраля) : сборник тезисов: в 2 т. / Российская академия наук, Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос», Комиссия РАН по разработке научного наследия пионеров освоения космического пространства; Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)». – Москва : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. – ISBN 978-5-7038-5094-7. – Т.1. – С. 72 – 73.

64. **Овсянников, Б.В.** Теория и расчет агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей : учебник. – 3-е изд., перераб. и доп. / Б.В. Овсянников Б.И. Боровский. – Москва : Машиностроение, 1986. – 376 с. : ил. – Текст : непосредственный.

65. Описание двигателя BE-3 : [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании Blue Origin. URL: <http://www.blueorigin.com/engines>. (Дата обращения: 28.08.2024).

66. Опыт разработки и применения схемы кислородного бустерного ТНА ЖРД со сбросом газа после турбины БТНА на вход в основной насос / Е.Н. Ромасенко – Текст : непосредственный // Конверсия в машиностроении. – 2004. – №2. – С.53-60, ISSN 0869-6772.

67. 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.

68. Оценка областей устойчивости жидкостного ракетного двигателя при дросселировании по тяге / И.В. Бурцев – Текст : непосредственный // Будущее ракетных двигателей и космических энергоустановок: II Ежегодная научно-техническая конференция молодых учёных и специалистов предприятий Госкорпорации «Роскосмос» (Москва, 20-21 ноября 2023 года): тезисы докладов / Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша». Москва : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. – ISBN 978-5-7038-3253-7. – С. 51 – 52.

69. **Пиллипенко, В.В.** Динамика насосных систем / В.В. Пиллипенко. – Киев : Наукова думка, 1980. – 172с. – Текст : непосредственный.

70. **Пиллипенко, В.В.** Кавитационные автоколебания и динамика гидросистем / В.В. Пиллипенко, В.А. Задонцев, М.С. Натанзон ; под редакцией академика АН УССР В.С. Будника. – Москва : Машиностроение, 1976. – 352 с. – Текст : непосредственный.

71. **Попов, Е.П.** Теория линейных систем автоматического регулирования и управления : учебное пособие для вузов – 2-е изд. перераб. и доп. / Е.П. Попов. – Москва : Наука, 1989. – 301 с. : ил. – ISBN 5-02-014112-7. – Текст : непосредственный.

72. Предложения по повышению конкурентоспособности ракет-носителей среднего и тяжёлого классов за счёт применения многофазовых элементов в отечественных средствах выведения / А.А. Медведев – Текст : непосредственный // Космонавтика и ракетостроение. – 2018. – №3. – С.111-121, ISSN 1994-3210.

73. Применение методов теории подобия для анализа стационарных рабочих процессов жидкостных ракетных двигателей / С.С. Каменский, Д.С. Мартиросов, А.И. Коломенцев – Текст : непосредственный // Вестник Московского авиационного института. — 2016. – Т.23. – №1. – С. 32-37, ISSN 0869-6101.

74. Разработка системного подхода к проектированию и созданию агрегатов регулирования ЖРД больших тяг и исследование влияния конструктивных параметров на работоспособность / Е.В. Цыганова – Текст : непосредственный // Сборник аннотаций конкурсных работ V Всероссийский межотраслевой молодёжный конкурс научно технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики». – Москва : Издательство Перо, 2013. – С.141-142.

75. **Семина, Е.Н.** Обеспечение высокой точности управления и регулирования многорежимных маршевых ЖРД : специальность 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» : диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук / Семина Елена Николаевна ; ОАО «НПО Энергомаш». – Химки, 2009. – 129 с. – Текст : непосредственный.

76. Система функциональной диагностики жидкостных ракетных двигателей в режиме реального времени / П.С. Левочкин, Д.С. Мартиросов, С.С.

Каменский [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник Московского авиационного института. – 2019. – Т.26. – №2. – С.147-154, ISSN 0869-6101.

77. Совместные колебания двигателя и конструкции ракеты на жидком топливе / Маккена, Уолкер, Винье. // ВРТ. – 1966. – № 1. – С. 36-41. – Текст : непосредственный.

78. **Солодовников, В.В.** Основы теории и элементы систем автоматического регулирования : учебное пособие для вузов. / В.В. Солодовников, В.Н. Плотников, А.В. Яковлев. – Москва : Машиностроение, 1985. – 536 с. : ил. – Текст : непосредственный.

79. Способы подавления низкочастотных колебаний в жидкостных ракетных двигателях на режимах глубокого дросселирования / Е.А. Гемранова, А.И. Колбасенков, П.С. Левочкин [и др.]. – Текст : непосредственный // Труды НПО Энергомаш. – 2013. – №30. – С.104-110, ISSN 2079-0228.

80. **Стернин, Л.Е.** Основы газовой динамики – 2-е изд. / Л.Е. Стернин. – Москва : Вузовская книга, 2008. – 232 с. : ил. – ISBN 978-5-9502-0360-2. – Текст : непосредственный.

81. **Сточек, Н.П.** Гидравлика жидкостных ракетных двигателей / Н.П. Сточек, А.С. Шапиро. – Москва : Машиностроение, 1978. – 125 с. : ил. – Текст : непосредственный.

82. **Стрелков, С.П.** Введение в теорию колебаний / С.П. Стрелков. – Москва : Наука, 1964. – 438 с. – Текст : непосредственный.

83. **Тарко, Л.М.** Волновые процессы в трубопроводах гидромеханизмов / Л.М. Тарко. Москва : Машгиз, 1963. – 184 с. – Текст : непосредственный.

84. **Тимнат, И.** Ракетные двигатели на химическом топливе / И. Тимнат ; [перевод с английского В.А. Вебера, С.М. Фролова]. – Москва : Мир, 1990. – 294 с. : ил. – ISBN 5-03-001354-7. – Текст : непосредственный.

85. Трёхпозиционный клапан окислителя ЖРД / Б.М. Громыко, В.А. Катрыш, А.А. Теленков [и др.]. — Текст : непосредственный // Труды НПО Энергомаш. — 2011. — №28. — С.142-151, ISSN 2079-0228.

86. Характеристики насосов и турбин на переходных режимах / В.А. Шерстянников – Текст : непосредственный // Автоматическое регулирование двигателей летательных аппаратов. Труды ЦИАМ. – 1972. – №519. – Вып. 13. – С.358-387.

87. Характерные особенности развития кавитационных автоколебаний в системе «шнекоцентробежный насос – трубопроводы» / В.А. Задонцев, В.В. Пилипенко – Текст : непосредственный // Космические исследования на Украине: Сб. Науч. трудов. – Киев: Наукова думка, 1976. – Вып. 8. – С.55-60.

88. **Харкевич, А.А.** Автоколебания – 2-е изд. / А.А. Харкевич – Москва : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 176 с. – ISBN 978-5-397-00341-4 – Текст : непосредственный.

89. **Хронин, Д.В.** Основы автоматизированного проектирования двигателей летательных аппаратов / Д.В. Хронин, В.И. Баулин, Ю.П. Кирипкин, [и др.]. ; под редакцией Д.В. Хрониной. – Москва : Машиностроение, 1984. – 183 с. : ил. – Текст : непосредственный.

90. **Челомей, В.Н.** Пневмогидравлические системы двигательных установок с жидкостными ракетными двигателями / В.Н. Челомей, Д.А. Полухин, Н.Н. Миркин [и др.]. ; под редакцией академика В.Н. Челомея. – Москва : Машиностроение, 1978. – 240 с. – Текст : непосредственный.

91. **Шевяков, А.А.** Теория автоматического управления ракетными двигателями / А.А. Шевяков, В.М. Калнин, Н.В. Науменкова, [и др.]. ; под редакцией А.А. Шевякова. – Москва : Машиностроение, 1978. – 288 с. : ил. – Текст : непосредственный.

92. **Шерстянников, В.А.** Гидродинамическое моделирование рабочего процесса ЖРД на режимах запуска / В.А. Шерстянников, В.М. Калинин. ; под редакцией В.Р. Левина. – Москва : Машиностроение, 1981. – 88 с. : ил. – Текст : непосредственный.

93. Экспериментальные исследования кавитационных автоколебаний / В.П.Козелков, А.Ф. Ефимочкин – Текст : непосредственный // Кавитационные

автоколебания в насосных системах: Сб. науч. трудов. – Киев: Наукова думка, 1976. – Ч.1. – С. 80-86.

94. Экспериментальный способ определения динамических свойств газовых потоков / Е.В. Лебединский, М.С. Натанзон, М.В. Никифоров – Текст : непосредственный // Акустический журнал. – 1982. – Т.28. – №2, ISSN 0320-7919.

95. Эффективность применения акустических колебаний в трактах распыления жидких топлив / Б.С. Пашковский, Л.В. Кулагин, Б.И. Тебеньков — Текст : непосредственный // Теплоэнергетика. – 1974. – №10. – С.28-31, ISSN 0040-3636.

96. Application of combustion time-lag theory to combustion stability analysis of liquid and gaseous propellant rocket engines / J. Fang – Текст : электронный // Сайт Aerospace Research Center. URL: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.1984-510>. (Дата обращения: 27.08.2024).

97. Casiano M., Hulka J., Yang V. Liquid-Propellant Rocket Engine Throttling: A Comprehensive Review / 45<sup>th</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2009 – №2009-5135.

98. Detter K., Huzel and David H. Huang. Design of liquid propellant rocket engine // National aeronautics and space administration, 1967, URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19710019929/downloads/19710019929.pdf>

99. Dranovsky M. Combustion Instabilities in Liquid Rocket Engines. Testing and Development Practices in Russia. — American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007. Vol. 221. – 285 p. DOI: 10.2514/4.866906.

100. Guiliano V., Leonard T., Lyda R. CECE: Expanding the Envelope of Deep Throttling Technology in Liquid Oxygen / Liquid Hydrogen Rocket Engines for NASA Exploration Missions / 46<sup>th</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2010, Vol. 3, P. 2045-2055.

101. Hill. P.G. and Peterson, C.P. (1965). Mechanics and Thermodynamics of Propulsion. Addison-Wesley, Reading, Mass.

102. Wynn J.A. Pressure regulator including a fixed valve ball and method of assembling the same. Patent US 7040344 B2, 09.05.2006.

103. Yamanishi N. Large Eddy Simulation of Unsteady Flow in the LE-7A Liquid Hydrogen Pump AIAA Paper 2007-5515 / N. Yamanishi, C. Kato, Meguro, K. Okita, T. Motomura // 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit 8-11 July 2007, Cincinnati, OH. 8 pp.

104. Yao Z., Qi Y., Bao W., Zang T. Thrust control method and technology of variable thrust liquid propellant rocket engine for reusable launch rocket J. Aerospace 2023, 10, p.1-17.