

На правах рукописи



**Царапкин Роман Александрович**

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЗАПАСА УСТОЙЧИВОСТИ РАБОЧЕГО  
ПРОЦЕССА К ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ КОЛЕБАНИЯМ ДАВЛЕНИЯ В  
КАМЕРАХ СГОРАНИЯ И ГАЗОГЕНЕРАТОРАХ ЖИДКОСТНЫХ  
РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Специальность 05.07.05

«Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных  
аппаратов»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва - 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент,  
**Бирюков Василий Иванович**

Официальные оппоненты: **Горохов Виктор Дмитриевич**, доктор технических наук, профессор, акционерное общество «Конструкторское бюро химавтоматики», главный конструктор

**Мосолов Сергей Владимирович**, кандидат технических наук, доцент, государственный научный центр Российской Федерации - федеральное государственное унитарное предприятие «Исследовательский центр имени М. В. Келдыша», начальник отделения № 1

Ведущая организация: акционерное общество «НПО Энергомаш имени академика В. П. Глушко»

Защита состоится «30» декабря 2020 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета Д 212.125.08, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» <https://mai.ru/upload/iblock/ed0/Dissertatsiya-TSarapkin-R.A..pdf>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.125.08  
д.т.н., профессор

Зуев Юрий Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследований

Проблема обеспечения устойчивости рабочего процесса в камерах сгорания и газогенераторах ЖРД по отношению к акустическим колебаниям была и до сих пор остается стадией, во многом определяющей содержание и объем отработки двигателей.

Акустические высокочастотные колебания в некоторых случаях возникают спонтанно из состояния режима горения со случайными малыми пульсациями давления (шумами) в состояние регулярных автоколебаний с амплитудой на порядок и более превышающей исходный шумовой уровень.

Возбуждение таких автоколебаний – существенно негативное явление для камеры сгорания, так как обычно приводит к потере работоспособности и утрате материальной части агрегатов и самого двигателя.

Основной задачей диагностики высокочастотной (ВЧ) неустойчивости горения в ЖРД является выявление склонности камеры сгорания к самопроизвольному возбуждению регулярных автоколебаний на тех или иных установившихся или неуставившихся функциональных режимах работы двигателя.

Используемые в практике отработки ЖРД методы диагностики высокочастотной неустойчивости горения можно разделить на «активный» и «пассивный».

Суть «активного» метода состоит в следующем. В камеру сгорания на исследуемом режиме ее работы вводятся искусственные (тестирующие) импульсные газодинамические возмущения от специального источника и проводятся наблюдения (с помощью датчиков) за реакцией процесса горения на внесенные возмущения. Процесс горения считается динамически устойчивым (или потенциально неустойчивым) в зависимости от того, возвращаются его характеристики (или не возвращаются) в исходное невозмущенное состояние. В качестве основной динамической характеристики обычно используется пульсационное давление в реакционном объеме камеры сгорания (или в предфорсуночных полостях) исследуется возможность перехода режима горения в камере в автоколебательный. При этом запас устойчивости исходного состояния определяется исходя из минимального возмущения давления, вызывающего возбуждение автоколебаний. Необходимость тестирования камер сгорания ЖРД на устойчивость горения по отношению к конечным возмущениям диктуется существенной нелинейностью процессов преобразования топлива в продукты сгорания.

В отличие от «активного», «пассивный» метод диагностики неустойчивости горения не требует ввода в камеру сгорания каких-либо искусственных возмущений. В данном случае источником возмущений являются собственные флуктуационные шумы камеры сгорания. Под шумами понимаются пульсации давления в камере сгорания не превышающие 5% от стационарного значения давления. Эти шумы условно

будто «прощупывают» камеру сгорания на динамическую устойчивость в окрестности реализованного стационарного состояния, а при случайных больших забросах может быть достаточной для «жесткого» возбуждения неустойчивости. В большинстве случаев диагностическая способность внутрикамерных шумов весьма ограничена из-за малости амплитуды. Она недостаточна для преодоления «потенциального барьера», отделяющего шумовое состояние от автоколебательного. Поэтому «пассивный» метод диагностики позволяет, на основе зарегистрированной датчиком временной реализации резонансного шума горения, проводить лишь оценку ряда показателей линейной (локальной) устойчивости процесса горения по отношению к собственным акустическим нормальным модам. А также выявлять тенденции изменения этих показателей в пространстве режимных параметров работы двигателя. В частности, осуществлять прогнозирование наличия или отсутствия границы устойчивости по тому или иному режимному параметру, и проводить совершенствование вариантов системы смесеобразования по степени демпфирования энергии акустических колебаний. Разработанная методика направлена на совершенствование технологии оценки динамической устойчивости рабочего процесса в камерах сгорания ЖРД, регламентированной отраслевым руководящим документом РД 92-0250-89.

**Объект исследования:** камеры сгорания и газогенераторы современных и перспективных высокоэнергонапряженных жидкостных ракетных двигателей (ЖРД)

**Предметом исследований** является изучение особенностей неустойчивости рабочего процесса в камерах сгорания и газогенераторах современных и перспективных ЖРД.

### **Цель исследований**

Разработка нового метода прогнозирования устойчивости рабочего процесса в камерах сгорания и газогенераторах ЖРД по отношению к акустическим колебаниям с целью сохранения материальной части.

### **Задачами диссертации являются:**

1. Разработка теоретических основ нового метода, позволяющего определить границу нижнего предельного цикла акустических автоколебаний при их наличии в испытываемых камерах сгорания и газогенераторах ЖРД по измеренным шумовым пульсациям давления и выполнить оценку запаса устойчивости рабочего процесса в плоскости режимных параметров.

2. Разработка алгоритма статистической обработки измеренных в камере сгорания, либо в форсуночной головке пульсаций давления для каждой нормальной акустической моды с целью определения вероятности существования автоколебаний для конкретного режима работы ЖРД.

3. Разработка методики прогнозирования устойчивости рабочего процесса в камерах ЖРД к акустическим колебаниям по измеренным шумам горения и тестирование алгоритма на модельной установке с искусственными сигналами;

4. Верификация методики путем обработки натуральных сигналов БМП при огневых стендовых испытаниях ЖРД и экспериментальной отработке рабочего процесса на модельных камерах.

5. Разработка принципиально новых перспективных электроимпульсных возмущающих устройств (ЭИВУ) для тестирования камер и газогенераторов ЖРД по отношению к «жесткому» возбуждению ВЧ-неустойчивости с целью исключения повреждения огневых стенок по сравнению с подрывом пиропатронов. Экспериментальное определение их эффективности.

#### **Методы исследования и средства**

В работе использовались следующие стандартные алгоритмы обработки измеренных сигналов быстропеременных процессов (входящие в пакет программ ПОС НПП «Мера»):

- оценки амплитудного спектра сигнала;
- оценки автокорреляционной функции сигнала;
- рекурсивной полосовой фильтрации сигнала;
- выделения огибающей фильтрованного сигнала (с использованием преобразования Гильберта);
- оценки плотности распределения вероятности, огибающей и мгновенных значений сигнала;
- дифференцирования функциональных зависимостей.

#### **Новизна приведенных результатов исследований**

В диссертации получены следующие новые научные результаты, выносимые на защиту:

- Разработана на основе теории Марковских процессов новая математическая модель, описывающая рабочий процесс в камерах ЖРД как вероятно автоколебательную систему с стохастическим шумом горения, где в качестве критерия устойчивости принят декремент затухания колебаний. Решено уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова и получены аналитические связи между параметрами режима работы ЖРД и границей нижнего предельного цикла автоколебаний при ее существовании для каждой нормальной акустической моды.

- Разработаны алгоритм статистической обработки экспериментально измеренных шумов горения при испытаниях камер и газогенераторов ЖРД и методика прогнозирования устойчивости к акустическим колебаниям рабочего процесса ЖРД конкретного исполнения. Методика позволяет экспериментально исследовать области устойчивости в плоскости режимных параметров и оценить влияние изменяемых конструктивных факторов.

- Для оценки запасов устойчивости по отношению к «жесткому» возбуждению акустических автоколебаний в камерах ЖРД разработаны перспективные ЭИВУ, использующие энергию взрыва электрических проводников. Экспериментально доказана их эффективность и безопасность для конструкции огневых стенок испытываемых камер.

**Практическая значимость полученных результатов:** разработанная новая «пассивная» методика диагностики устойчивости рабочего процесса в камерах сгорания и газогенераторах, позволяет уменьшить объем огневых испытаний и сохранить материальную часть. Разработанные новые перспективные внешние возмущающие устройства, могут обеспечивать проведение испытаний на устойчивость рабочего процесса в ЖРД, в соответствии с отраслевым руководящим документом РД 92-0250-89 и без возможных повреждений огневых стенок камер сгорания.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Методика прогнозирования границы нижнего предельного цикла (НПЦ) автоколебаний в фазовом пространстве рабочих параметров камеры сгорания, либо газогенератора ЖРД применительно к динамической модели горения, как потенциально автоколебательной системы.

2. Алгоритм оценки зависимости коэффициентов демпфирования на резонансных частотах реакционного объема камеры сгорания от амплитуды колебаний давления.

3. Метод шадящего «жесткого» возбуждения высокочастотных колебаний давления с применением новых перспективных ЭИВУ.

**Сведения об апробации результатов исследования**

Основные результаты исследований докладывались на 13-ти конференциях:

1. Молодёжная конференция «Новые материалы и технологии в ракетно-космической и авиационной технике», Звездный городок, июнь 2012 г.;

2. Конференция «Будущее российской космонавтики в инновационных разработках молодых специалистов РКП», ИПК «Машприбор», г. Королев, 01-03 апреля 2012 г.;

3. Конференция: «Прогрессивные технологии в РКП», ИПК «Машприбор», г. Королев, 02-04 декабря 2013 г.

4. 14-я Международная конференция «Авиация и космонавтика — 2015» Москва, 17-21 ноября 2015 г.;

5. XLII Международная молодежная научная конференция Гагаринские чтения – 2016, Москва, 12-15 апреля 2016;

6. 15-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» – 2016, Москва, МАИ 14-18 ноября 2016 г.

7. XLIII Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения – 2017», Москва, 5-19 апреля 2017 г.;

8. XIV Всероссийская конференция по новым технологиям, посвященная 70-летию Государственного ракетного центра им. академика В.П. Макеева, г. Миасс, Челябинской обл., 10-12 октября 2017 г.

9. XXI международная научно-практическая конференция «Решетневские чтения - 2017», г. Красноярск, 08 ноября 2017г.;

10. 16-ая Международная конференция «Авиация и космонавтика-2017», Москва, 20-24 ноября 2017 г.;

11. XII Международная конференция по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли, Алушта, 24-31 мая 2018 г.

12. XV Всероссийская конференция по новым технологиям, г. Миасс, Челябинской обл., 09-11 октября 2018 г.;

13. 17-ая Международная конференция «Авиация и космонавтика-2018», Москва, 19-23 ноября 2018 г.

#### **Личный вклад соискателя:**

При выполнении диссертационной работы соискатель принимал непосредственное участие в получении следующих результатов:

- Разработана новая модель, описывающая на основе теории Марковских процессов рабочий процесс в камерах ЖРД как вероятно автоколебательную систему, возбуждаемую стохастическим турбулентным шумом горения, где в качестве критерия устойчивости принят декремент затухания колебаний. Решено уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова и получены аналитические зависимости между параметрами режима работы конкретного исполнения ЖРД и границей нижнего предельного цикла автоколебаний при их существовании для каждой нормальной акустической моды.

- Разработан новый оригинальный алгоритм статистической обработки экспериментально измеренных шумов горения при испытаниях камер и газогенераторов ЖРД, позволивший выявить динамическую систему с двумя различными энергетическими состояниями: устойчивым и автоколебательным неустойчивым, и оценить вероятность ее перехода через потенциальный барьер в область автоколебаний.

- Разработана новая методика прогнозирования устойчивости к акустическим колебаниям рабочего процесса ЖРД конкретного исполнения. Она использует измеренные в процессе огневого испытания ЖРД пульсации давления в камерах сгорания и газогенераторах и после их статистической обработки дает численные взаимосвязи коэффициента затухания и амплитуды возможных автоколебаний с параметрами режима работы ЖРД. Методика позволяет экспериментально исследовать области устойчивости в плоскости режимных параметров и оценить влияние изменяемых конструктивных факторов. Алгоритм и методика протестированы на специально созданной модельной установке - аэродинамическом генераторе шума. Верификация метода выполнена на модельных камерах сгорания и при натуральных огневых испытаниях на экспериментальной базе ФКП «НИЦ РКП». Результаты подтверждают достоверность полученных количественных

расчетных оценок. НТС данного предприятия рекомендовал новую разработанную методику к практическому применению.

- Для оценки запасов устойчивости по отношению к «жесткому» возбуждению акустических автоколебаний в камерах ЖРД с гарантированным сохранением стенок камер разработаны перспективные ЭИВУ, использующие энергию взрыва электрических проводников. Экспериментально доказана их эффективность и безопасность для конструкции огневых стенок испытываемых камер.

#### **Публикации по теме диссертации**

По теме диссертации опубликовано 16 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 4 работы, получен 1 патент РФ на изобретение.

#### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из 193 страниц, 129 рисунков, 5 таблиц, 109 источников. Работа включает в себя: введение, 4 раздела, заключение, 1 приложение.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** показана актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, раскрыта новизна работы, теоретическая и практическая значимость результатов исследований.

**Первая глава** посвящена основам теории высокочастотных колебаний в камере сгорания ЖРД. Показана структурная модель явления, представляющая камеру сгорания ЖРД как совокупность двух линейных звеньев: звена рабочего процесса, описывающего совместную работу системы подачи и зоны горения, и акустического звена (системы отвода продуктов сгорания). Рассматривается устойчивость системы по отношению к малым возмущениям и используется линейная постановка задачи, что позволяет осуществить линеаризацию уравнений динамики звеньев вблизи стационарного режима. Показана феноменологическая модель, применяемая для получения амплитудно-фазовых частотных характеристик (АФЧХ) при помощи которых описываются динамические свойства линейных звеньев.

Представлена модель колебания в цилиндрическом канале с однородным потоком, динамические свойства акустического звена в которой, определяются волновыми процессами в газовом объеме, заполненном продуктами реакции.

Представлены расчетные методы прогнозирования характеристик вибрационного горения в ЖРД на основе методики оценки устойчивости рабочего процесса анализом значения динамического коэффициента усиления рабочего процесса « $n$ » по-теоретически (или экспериментально) определенной кривой выгорания компонентов топлива.

Сформулированы цели и задачи расчетно-экспериментального исследования

**Вторая глава** посвящена разработке нового метода диагностики неустойчивости горения в камерах и газогенераторах ЖРД по шумам горения. Целью является определение по экспериментально замеренным пульсациям давления склонности работающей камеры сгорания к самопроизвольному возбуждению регулярных высокочастотных колебаний давления по отношению к собственным нормальным резонансным частотам различных мод на установившихся или неуставившихся функциональных режимах работы двигателя. На основе теории Марковских процессов рассмотрено уравнение колебаний с стохастической правой частью. За диагностический критерий принят декремент затухания колебаний на каждой моде собственных резонансов. На основе решения уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова для стационарной плотности вероятности амплитуды колебаний найдены решения, связывающие параметры режима с границей возбуждения автоколебаний и трансформацию плотности вероятности амплитуды при переходе через нее. Определены коэффициенты сноса и диффузии для потенциальной функции автоколебательной системы. Исследованы области динамического гистерезиса системы. Выявлены признаки резонансного узкополосного шума горения. Сформулирована методика оценки состояния принципиально автоколебательной системы и ее

удаленность от границы неустойчивости, т.е. оценки запаса акустической устойчивости по отношению к нормальным модам собственных резонансов камер сгорания и газогенераторов в ЖРД.

Представлены иллюстрации возникновения высокочастотной (ВЧ) неустойчивости рабочего процесса в ЖРД при испытаниях как динамического режима «мягкого» самовозбуждения, происходящего плавно с уровня внутрикамерных шумов, рис. 1

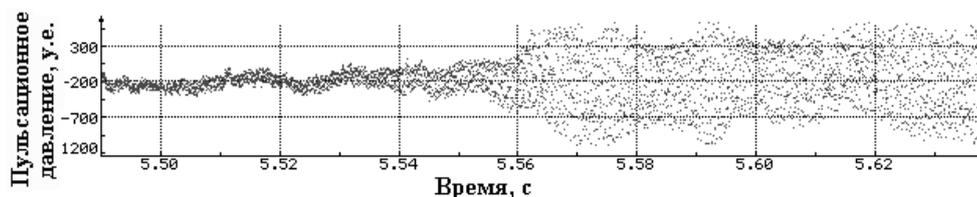


Рис. 1 - Мягкое самовозбуждение автоколебаний в камере сгорания

Так и наиболее опасного с точки зрения влияния на рабочий процесс в камерах сгорания - «жесткого» самовозбуждения, локально устойчивой потенциально автоколебательной системы, рис. 2.

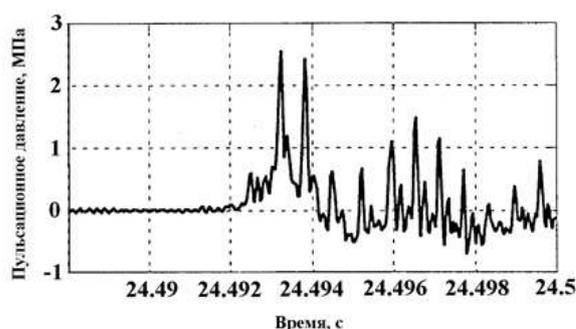


Рис. 2 – Жесткое самовозбуждение автоколебаний в камере сгорания

Разработанная на основе диагностических математических моделей методика оценки устойчивости рабочего процесса в камерах сгорания и газогенераторов ЖРД по отношению к «жесткому» возбуждению акустических нормальных колебаний давления. «Методика» реализует оценку зависимости коэффициента демпфирования исследуемой динамической системы (камеры сгорания) от амплитуды колебаний давления без использования стандартных внешних импульсных возмущающих устройств и применима в анализе стационарных сигналов датчиков пульсаций давления, идентифицированных в классе «резонансный узкополосный шум горения» (РУШГ).

Теоретические положения «методики» верифицированы на сигналах модельных экспериментальных камер сгорания.

При разработке «Методики» использовались следующие стандартные алгоритмы:

- оценки амплитудного спектра сигнала;
- оценки автокорреляционной функции сигнала;
- рекурсивной полосовой фильтрации сигнала;
- выделения огибающей фильтрованного сигнала (с использованием преобразования Гильберта);

- оценки плотности распределения вероятности огибающей и мгновенных значений сигнала;
- дифференцирования функциональных зависимостей.

Методика включает в себя следующую последовательность основных операций.

- Регистрация пульсационного давления в камере (газогенераторе) при проведении стендовых огневых испытаний двигателя.
- Визуальный анализ зарегистрированного сигнала датчика пульсаций давления, установленного в реакционном объеме камеры сгорания или в жидкостной предфорсуночной полости, на исследуемом установившемся режиме работы двигателя (камеры сгорания).
- Спектральный анализ временной реализации сигнала датчика пульсаций давления.
- Узкополосную фильтрацию сигнала на частотах, соответствующих собственным формам (модам) акустических колебаний реакционного объема камеры сгорания.
- Идентификацию узкополосных спектральных составляющих сигнала с выделением составляющих, соответствующих резонансным колебаниям реакционного объема камеры сгорания (составляющих, принадлежащих классу «резонансный узкополосный шум горения (РУШГ)»).
- Диагностическими признаками принадлежности сигнала к классу «РУШГ» являются следующие:
  - центральные частоты близки к собственным (расчетным) для нормальных мод акустических колебаний внутрикамерного объема;
  - автокорреляционная функция  $\rho(\tau)$  узкополосного процесса  $P'_v(t)$  является экспоненциально затухающей на частоте спектрального подъема  $f_v$ ;
  - плотность распределения вероятности  $W(P'_v)$  мгновенных значений процесса  $P'_v(t)$  близка к гауссовой (нормальной), т.е. имеет характерный одногорбый колоколообразный вид.
- Указанные признаки относятся к категории необходимых для составляющих класса «РУШГ».
- Оценку средних квадратических значений и коэффициентов демпфирования колебаний для составляющих, идентифицированных в классе «РУШГ».
- Выделение огибающих фильтрованных сигналов с использованием преобразования Гильберта.
- Оценку плотности распределения вероятности огибающих фильтрованных сигналов, идентифицированных в классе «РУШГ» и их производных.
- Оценку зависимостей коэффициентов демпфирования от амплитуды колебаний давления на исследуемых резонансных частотах по формуле

$$\delta(\lambda) = \delta_o \sigma^2 \left[ \frac{1}{\lambda^2} - \frac{\beta(\lambda)}{\lambda} \right], \text{ где } \beta(\lambda) = \frac{1}{W_{cm}(\lambda)} \cdot \frac{dW_{cm}(\lambda)}{d\lambda},$$

$\delta_0$  - коэффициент демпфирования колебаний при  $\lambda \rightarrow \sigma$ ;

$\sigma$  - среднее квадратическое значение фильтрованного сигнала.

- Цензурирование экспериментальной зависимости коэффициентов демпфирования от амплитуды колебаний.
- Полиномиальную (или экспоненциальную) аппроксимацию экспериментальной зависимости  $\delta = \delta(\lambda)$ .
- Оценку (по виду зависимости коэффициента демпфирования от амплитуды колебаний) принадлежности (или непринадлежности) исследуемой динамической системы классу потенциально автоколебательных систем с «жестким» самовозбуждением.
- Признаком принадлежности исследуемой системы к потенциально автоколебательным с «жестким» режимом самовозбуждения является падающий с увеличением амплитуды вид финальной зависимости  $\delta = \delta(\lambda)$ .
- Прогнозирование ожидаемого уровня неустойчивого предельного цикла автоколебаний в случае наличия признака принадлежности исследуемой динамической системы к потенциально автоколебательным с «жестким» режимом самовозбуждения. Прогноз осуществляется аналитическим продолжением сглаженной зависимости  $\delta = \delta(\lambda)$  до уровня амплитуды, соответствующего значению  $\delta = 0$ .
- Оценку достаточности запаса устойчивости к «жесткому» возбуждению автоколебаний. Запас устойчивости считается достаточным при выполнении условия

$$n^* = \frac{\lambda_{нпц}}{\lambda_{ш}} \geq 15, \text{ вне зависимости от вида функции } \delta = \delta(\lambda).$$

Представлена верификация теоретических положений методики на примере аэродинамического генератора узкополосного шума, рисунок 3.

Основными его элементами являются:

- форсунка 1 с тремя поясами струйного истечения воздуха (из центрального канала наружу);
- труба-резонатор 2.

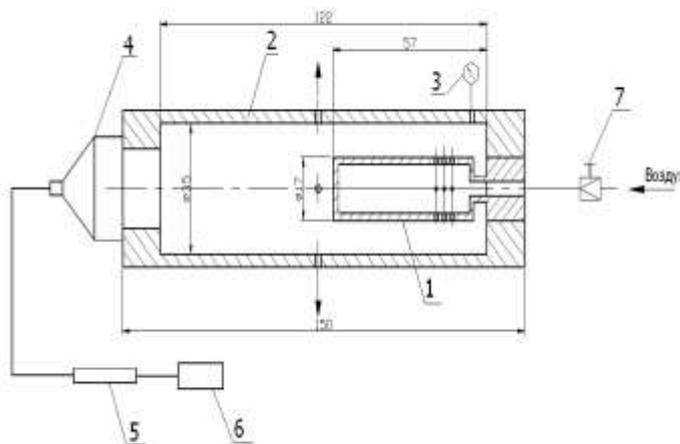


Рис.3.Схема аэродинамического генератора узкополосного шума  
1 – форсунка; 2 – труба - резонатор; 3 – манометр;  
4 – датчик; 5 – усилитель;  
6 – регистратор;  
7 – редуктор.

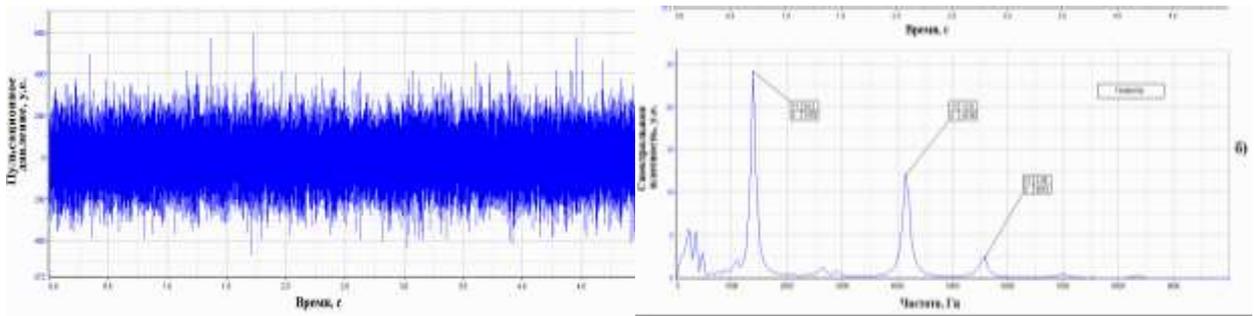


Рис. 4 – Сигнал (а) и спектральный состав пульсаций давления (б) в трубе - резонаторе

Генератор шума генерирует ряд узкополосных составляющих на частотах:  $f_1 \approx 1379$  Гц;  $f_3 \approx 4136$  Гц;  $f_4 \approx 5572$  Гц. Частоты возбужденных колебаний близки к расчетным для первой, третьей и четвертой акустических мод продольных колебаний воздуха в трубе-резонаторе.

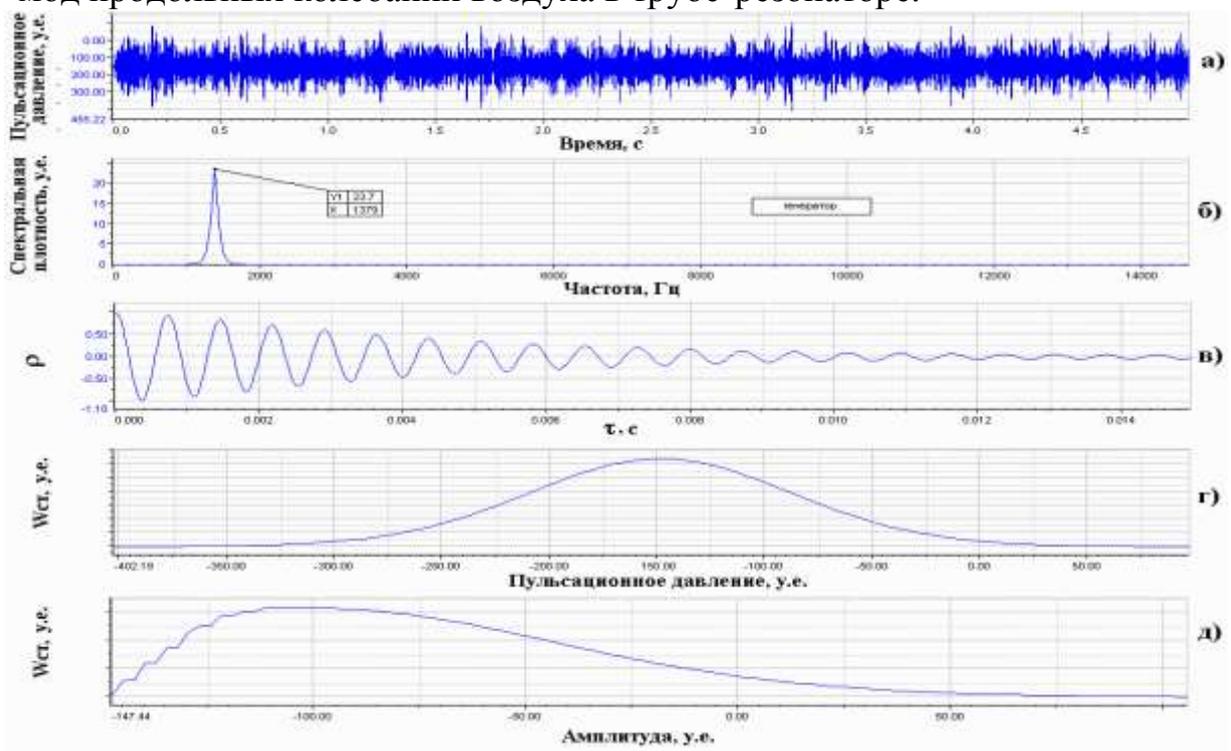


Рис. 5. Статистические характеристики оставяющей с частотой 1379 Гц. а) – сигнал, б) – спектр; в) – автокорреляционная функция; г) – плотность вероятности мгновенных значений; д) – плотность вероятности амплитуды.

Для данной спектральной составляющей:

- автокорреляционная функция затухает по закону, близкому к экспоненциально-косинусному;
- плотность распределения вероятности мгновенных значений сигнала близка к Гауссовой (нормальной);
- плотность распределения вероятности огибающей (амплитуды) близка к Релеевской.

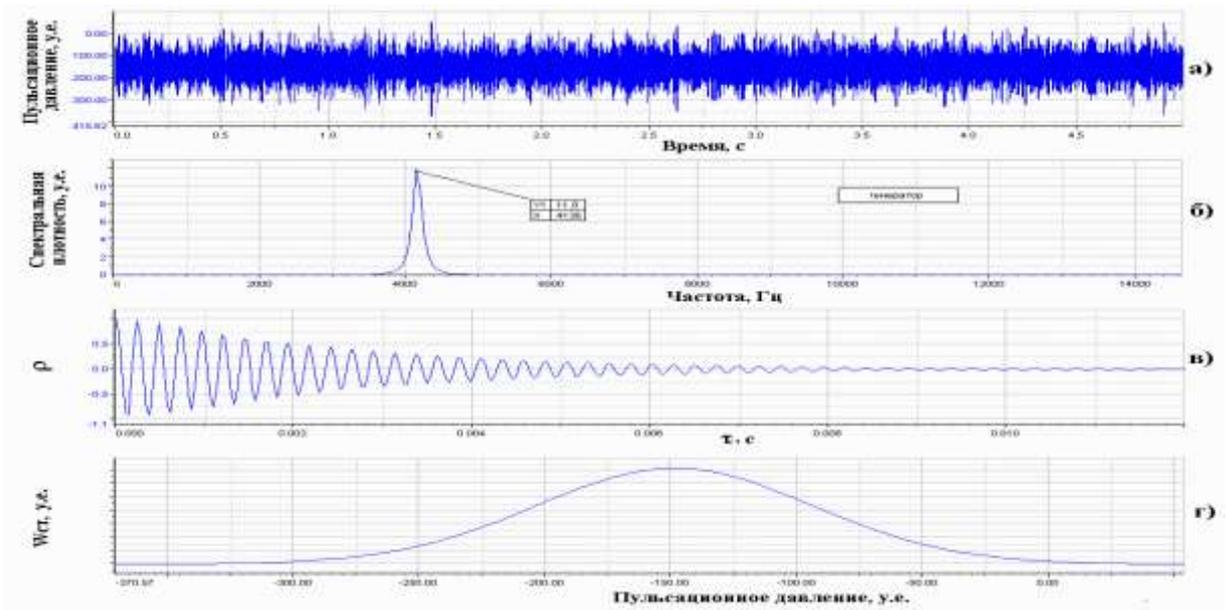


Рис. 6. Составляющая 4136 Гц. Статистические характеристики сигнала а) – сигнал, б) – спектр; в) – автокорреляционная функция; г) – плотность вероятности мгновенных значений.

Оценки декрементов колебаний по скорости затухания автокорреляционных функций дают следующие значения:  $f_1 \approx 1379$  Гц,  $d_1 \approx 0,17$ ;  $f_3 \approx 4136$  Гц,  $d_3 \approx 0,09$ ;

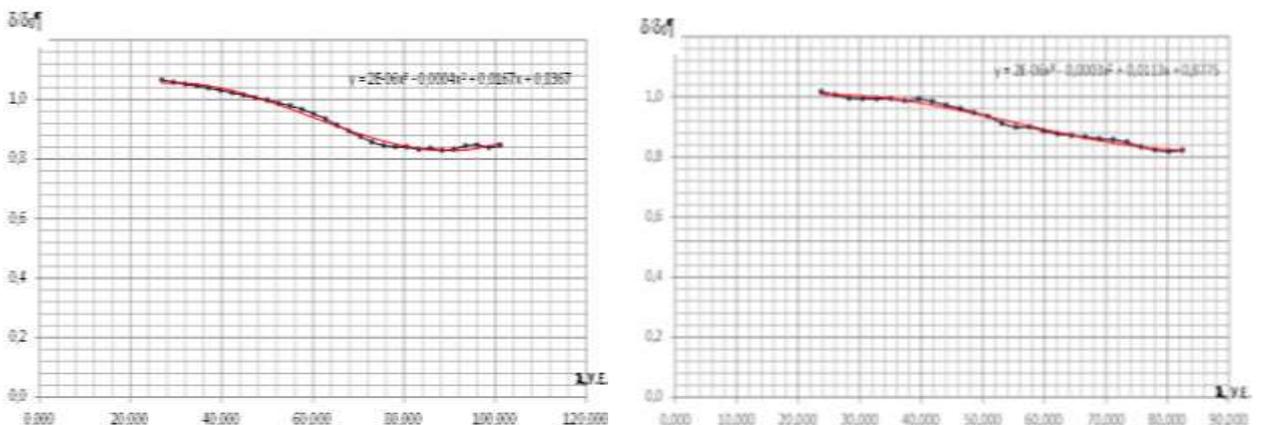


Рис. 7. Восстановленные зависимости коэффициентов демпфирования от амплитуды колебаний на частотах  $f_1$  и  $f_3$ .

● - вычисленные значения; ————— — полиномиально сглаженные значения.

При практическом использовании данного генератора в качестве источника узкополосных шумовых сигналов считалось, что последние принадлежат к классу «линейный узкополосный шум». (случаи самовозбуждения автоколебаний отсутствовали). Однако из приведенных на рис. 7 зависимостей  $\delta = \delta(\lambda)$  следует, что это не совсем так. Наблюдаются систематические отклонения от линейности ( $\delta(\lambda) \neq \text{const}$ ). Можно констатировать, что генератор шума не принадлежит к классу потенциально

автоколебательных систем с «жестким» режимом самовозбуждения: признаки наличия неустойчивого предельного цикла отсутствуют. Об этом говорит отсутствие нисходящей финальной части зависимостей  $\delta = \delta(\lambda)$

**Третья глава** посвящена исследованиям с целью совершенствования импульсных возмущающих устройств (ВУ), предназначенным в соответствии с РД92-0250-89 для практической реализации «активного» метода диагностики неустойчивости горения в ЖРД. Существующие на настоящий момент ВУ принцип действия которых основан на взрыве, отделенной от полости камеры сгорания металлической мембраной, насыпки взрывчатого вещества (ВВ) для генерации импульса давления обладают рядом недостатков, в частности недопустимому возможному повреждению огневых стенок камер сгорания.

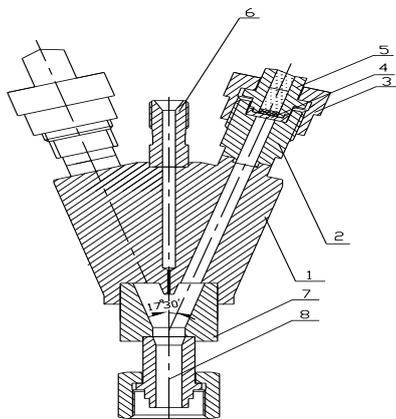


Рис. 8. Пятиимпульсное возмущающее устройство для камер:

1 – корпус; 2 – штуцер; 3 – гайка накидная; 4 – мембрана; 5 – зарядная камера; 6 – штуцер продувки; 7 – переходная втулка; 8 – наконечник

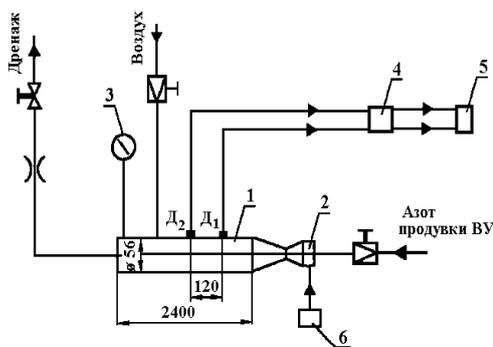


Рис. 9. Схема экспериментальной установки по отработке зарядов ВВ и возмущающих устройств: 1 – ударная труба; 2 – ВУ; 3 – манометр; 4 – усилитель сигнала; 5 – регистратор; 6 – источник напряжения;  $D_1$ ,  $D_2$  – датчики пульсаций давления



Рис. 10. Фотография трубы высокого давления (ударной трубы) с присоединённым к ней ВУ

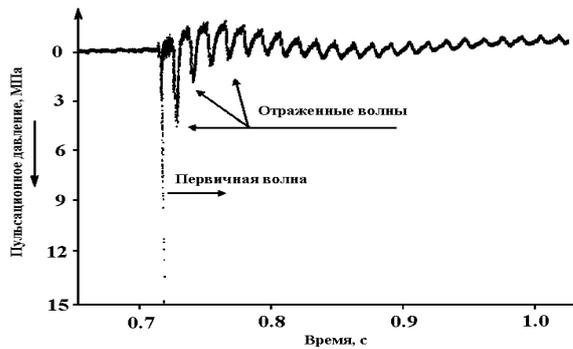


Рис. 11 - Характер колебательного процесса в ударной трубе, индуцированного импульсным возмущением (сжатая осциллограмма)

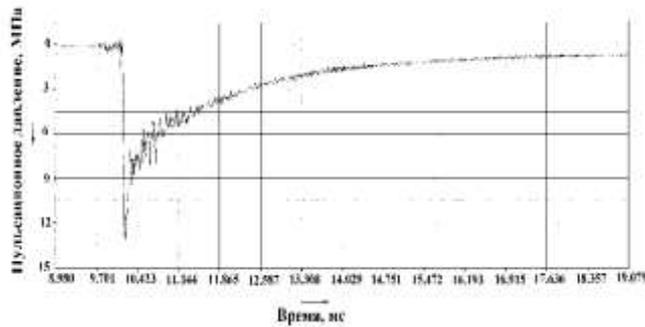


Рис. 12 - Реакция датчика на прямое прохождение первичной ударной волны

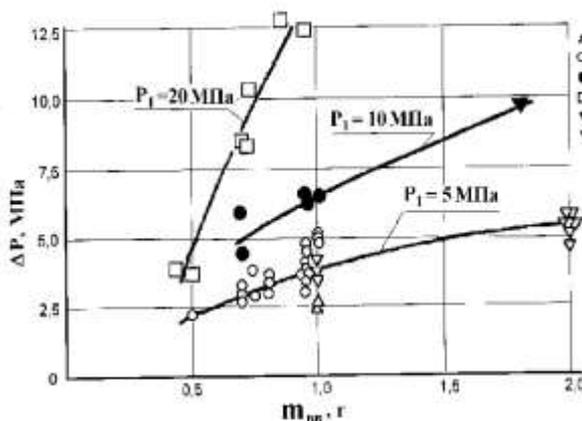


Рис. 13 - Экспериментальные зависимости величины возмущения от массы заряда и давления в ударной трубе

Представлена процедура оценки устойчивости рабочего процесса в камерах сгорания и газогенераторах ЖРД.

В главе также представлено разработанное в ФКП «НИЦ РКП», новое, перспективное электроимпульсное возмущающее устройство, позволяющее исключить основные недостатки традиционных ВУ, принцип действия которого основан на электрическом взрыве металлического проводника электрического тока при разряде через него заряженного конденсатора с накопленной энергией в несколько тысяч джоулей.

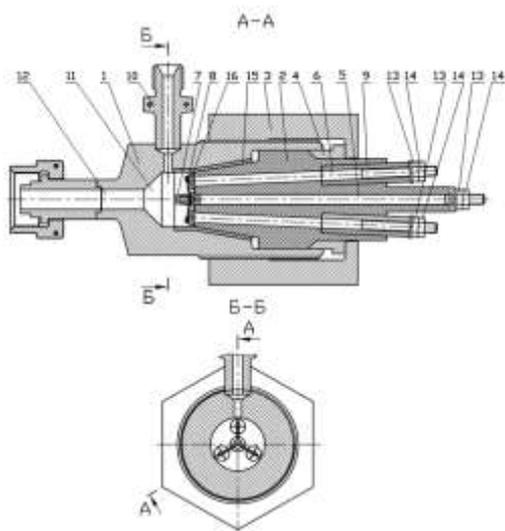


Рис. 14 - Схема многоимпульсного ЭИВУ



Рис. 15 - Фотография многоимпульсного ЭИВУ

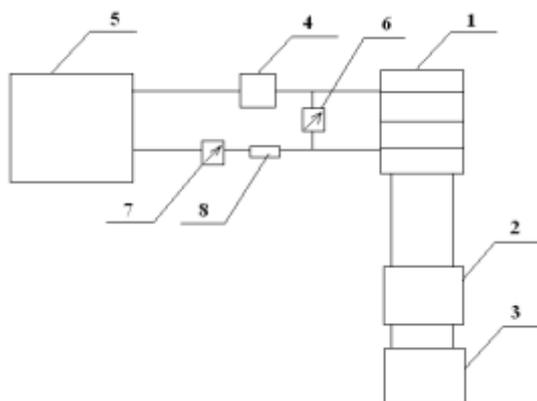


Рис. 16 - Электрическая схема накопления электрической энергии и осуществления взрыва электрических проводников (проволочек)

Схема содержит блок конденсаторов 1 присоединённых с помощью проводников через разрядник 2 к электродам ЭИВУ 3. К конденсаторам 1 в свою очередь через выключатель 4 подсоединён 5 источник высокого постоянного напряжения ИВН-7. Величина напряжения, до которого заряжался блок конденсаторов, определялась с помощью вольтметра 6. Процесс зарядки конденсаторов контролировался с помощью амперметра 7. Величина тока зарядки ограничивалась резистором 8.

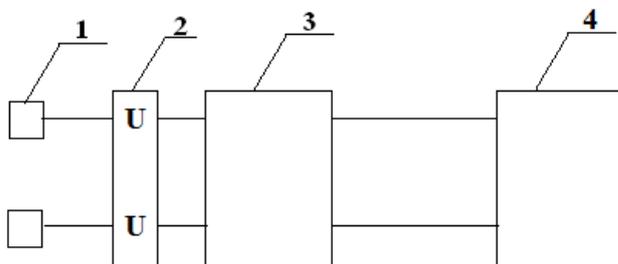


Рис. 17 - Схема регистрации импульсов давления. Позицией 1 обозначены датчики давления типа ЛХ-611, позицией 2 – усилитель заряда L-CARD «LE-41», позицией 3 - модуль L-CARD «LTR - U - 1», позицией 4 обозначена ПЭВМ.

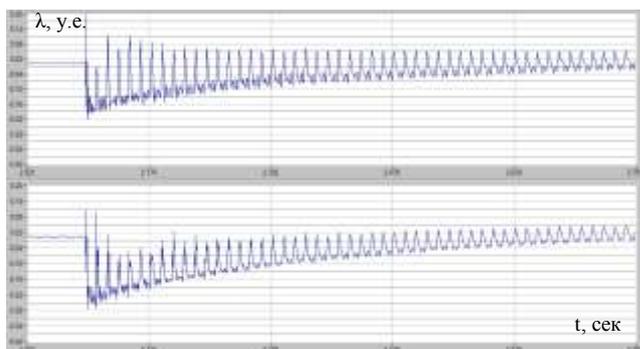


Рис. 18 - Полная запись затухающих колебаний давления после ввода в камеру высокого давления импульса при срабатывании ЭИВУ.

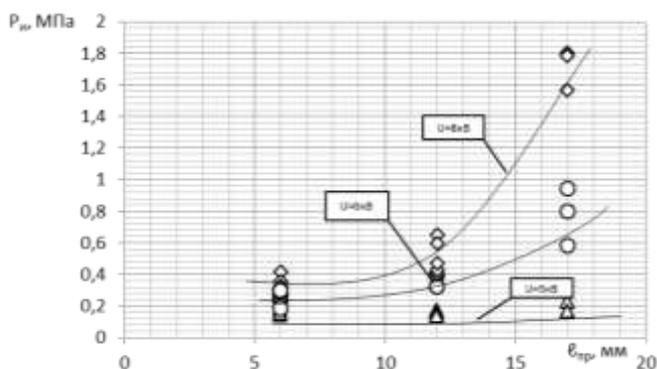


Рис. 19 - Зависимости величины импульса давления в модельной камере от длины взрывающегося проводника при различной величине напряжения на конденсаторе.

Давление в модельной камере  $P_k = 5,0 \text{ МПа}$ , ёмкость конденсатора  $C = 26 \text{ мкФ}$

Разработанные ЭИВУ по эффективности не должны были уступать традиционным ВУ, использующих взрывчатые вещества. По традиционным ВУ накоплен большой объём результатов экспериментальных исследований его эффективности. В этой связи важно было сравнить результаты экспериментов по отработке ЭИВУ с результатами, полученными при применении ВУ, использующего ВВ.

Для этой цели из ранее проведенных работ была заимствована зависимость (рис. 20) величины импульса (первого «пика») от величины навески взрывчатого вещества в граммах при давлении в модельной камере  $5,0 \text{ МПа}$ . На этот же график были нанесены крестиками полученные в сходных условиях (при давлении в модельной камере  $5,0 \text{ МПа}$ ) результаты экспериментов, полученные при использовании ЭИВУ, где в качестве эквивалента навески взрывающегося вещества использовался заряд конденсатора в тротиловом эквиваленте.

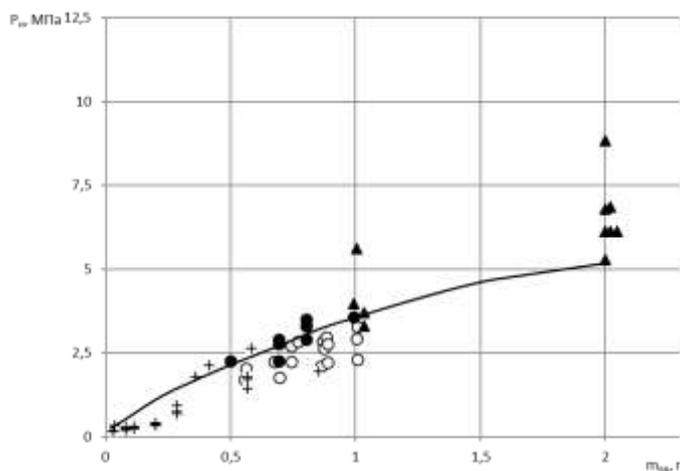


Рис. 20 зависимость величины импульса давления в камере сгорания от величины заряда возмущающего устройства при использовании взрывчатого вещества (в граммах) и тротилового эквивалента при взрыве проволочки.

Крестиком обозначены результаты, полученные при взрыве проволочки. Как следует из рисунка 20, полученные с помощью ЭИВУ результаты экспериментов хорошо согласуются с результатами экспериментов, полученных ранее с помощью традиционных ВУ.

Данный метод создания искусственных возмущений давления доведен до величин энергии взрыва сопоставимых с зарядом ВВ и проходит апробацию.

**Четвертая глава** посвящена экспериментальным исследованиям, с применением разработанных методики прогнозирования неустойчивости горения в ЖРД и метода оценки устойчивости горения в ЖРД с применением ЭИВУ.

Представлены примеры практического использования методики на примере модельной камеры сгорания с единичным смесительным элементом. Простейшей физической моделью (имеющей минимальное количество функциональных элементов) камеры сгорания ЖРД как потенциально автоколебательной системы является топливная форсунка с факелом пламени, помещенная в цилиндрическую камеру-резонатор. Компоненты топлива – газообразные «метан–кислород». Давление в камере-резонаторе атмосферное. Режимные управляющие параметры: массовый расход горючего – массовый расход окислителя. Как показывают результаты многочисленных экспериментальных исследований динамическое поведение подобных систем в качественном отношении во многом сходно с поведением натуральных камер сгорания ЖРД.

В соответствии с «Методикой» имеем:

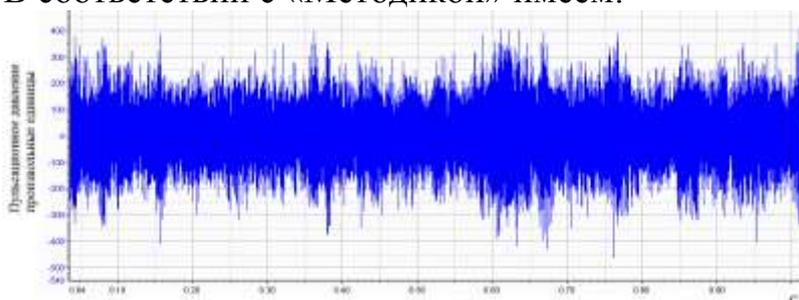


Рис. 21 – Фрагмент временной реализации суммарного сигнала

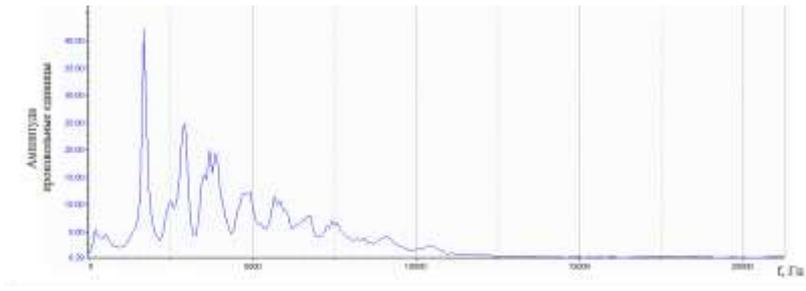


Рис. 22 – Спектральный состав суммарного сигнала. Основная составляющая спектра пульсаций давления  $f \approx 1670$  Гц.

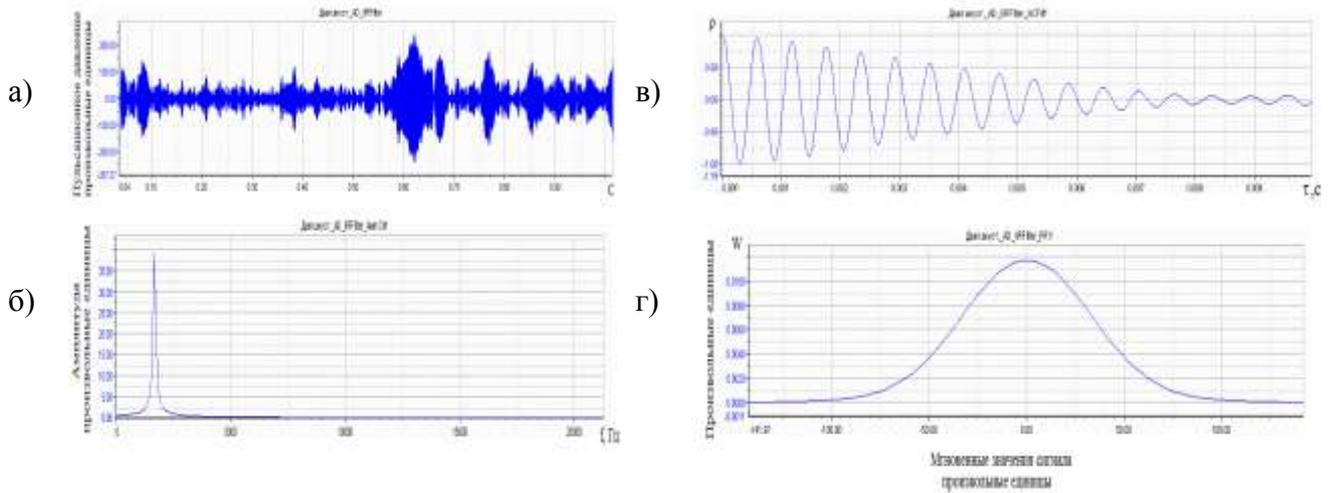


Рис. 23 – Статистические характеристики фильтрованного на частоте  $f \approx 1670$  Гц сигнала

а) – фильтрованный сигнал; б) – спектр фильтрованного сигнала; в) – АКФ фильтрованного сигнала; г) – ПРВ фильтрованного сигнала.

Затухающий вид автокорреляционной функции и близкая к гауссовой плотность распределения вероятности мгновенных значений сигнала дают основание к заключению о его принадлежности к классу «резонансный узкополосный шум горения».

Оценки коэффициента диссипации колебаний (по скорости затухания автокорреляционной функции) и среднего квадратического значения сигнала соответственно равны:

$$\delta = 250,5 \text{ 1/с}, \quad \sigma = 36 \text{ у.е.}$$

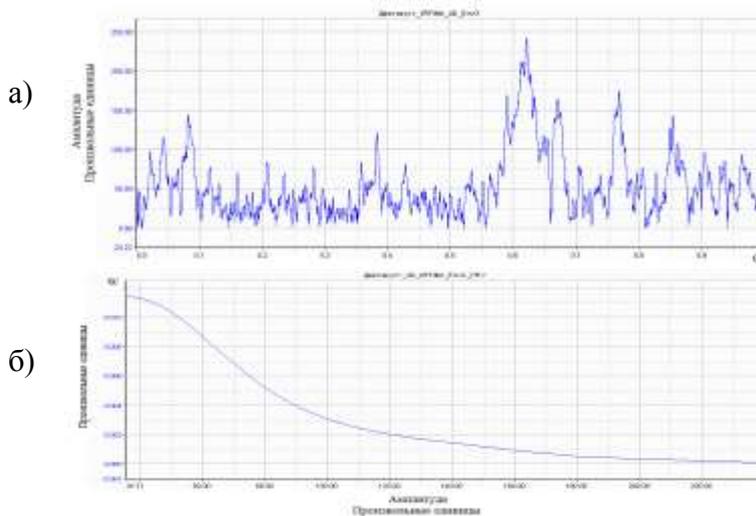
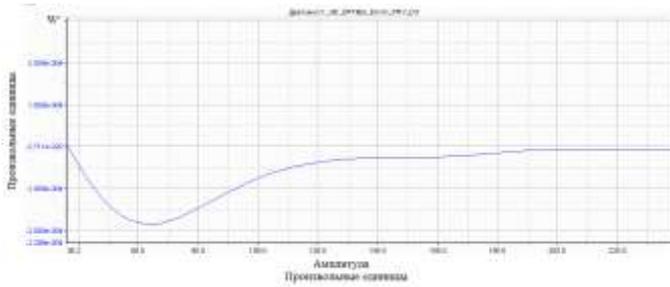


Рис. 24 – Графики огибающей фильтрованного на частоте  $f \approx 1670$  Гц сигнала, оценок плотности распределения вероятности огибающей и её производной а) – огибающая фильтрованного сигнала; б) – ПРВ амплитуды фильтрованного сигнала;

в)



в) – производная ПРВ амплитуды фильтрованного сигнала.

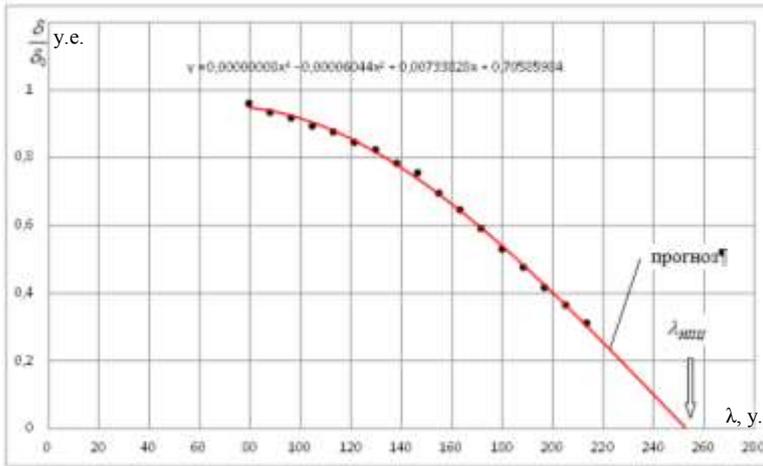


Рис. 25 – Зависимость коэффициента диссипации от амплитуды колебаний давления. Полиномиально сглаженная и продолженная зависимость  $\delta = \delta(\lambda)$  прогнозирует наличие НПЦ. В данном случае  $\lambda_{НПЦ} \approx 250 \text{ y.e.}$

Вывод. Исследованная динамическая система принадлежит к классу потенциально автоколебательных с «жестким» режимом самовозбуждения. Применимость рассмотренных гипотетических положений к реальным потенциально автоколебательным системам демонстрируется на примере аэродинамической трубы с установленной в ней тонкой пластиной (рис. 26)

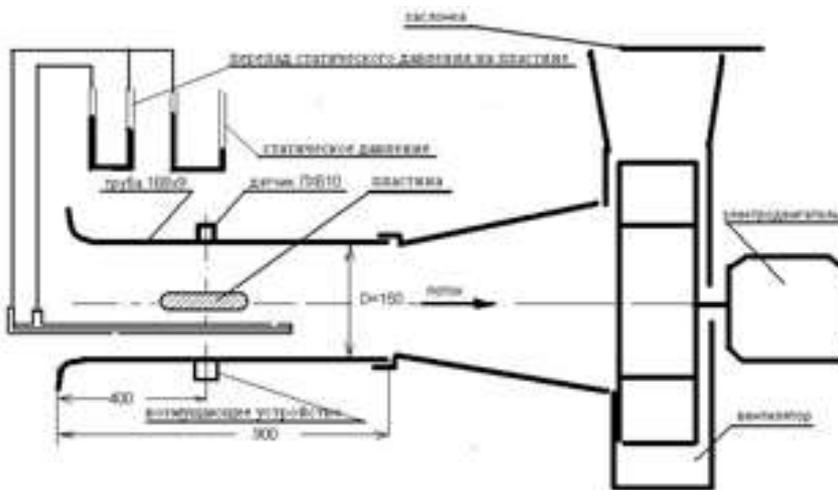


Рис. 26 - Схема аэродинамической трубы

Данная система относится к классу акустико-вихревых потенциально автоколебательных систем и реализует взаимодействие акустического поля с процессом вихреобразования на краях пластины. В рассматриваемом случае режимный управляющий параметр – скорость  $V$  потока воздуха в трубе. Исходное динамическое состояние колебательной системы – «шумовое» ( $V > 50 \text{ м/с}$ , акустический резонанс на частоте  $f > 1025 \text{ Гц}$ )

– первая тангенциальная мода поперечных колебаний с пучностью давления, проходящей через вертикальную ось симметрии пластины (рисунок 27)). Эксперименты показали, что при уменьшении скорости потока воздуха, обдувающего пластину, «шумовое» состояние сохранялось до  $V=47,3$  м/с.

При дальнейшем снижении скорости потока воздуха в трубе возбуждались регулярные автоколебания на частоте, близкой к резонансной ( $f \gg 927$  Гц). Характер самовозбуждения автоколебаний иллюстрирует рисунок 28.

При последующем изменении управляющего параметра в обратном направлении (увеличении скорости потока воздуха) автоколебания «держались» до значений  $V$ , больших, чем на границе их первоначального появления. При  $V=50$  м/с происходил срыв автоколебаний (система переходила в «шумовое» состояние, эквивалентное исходному).

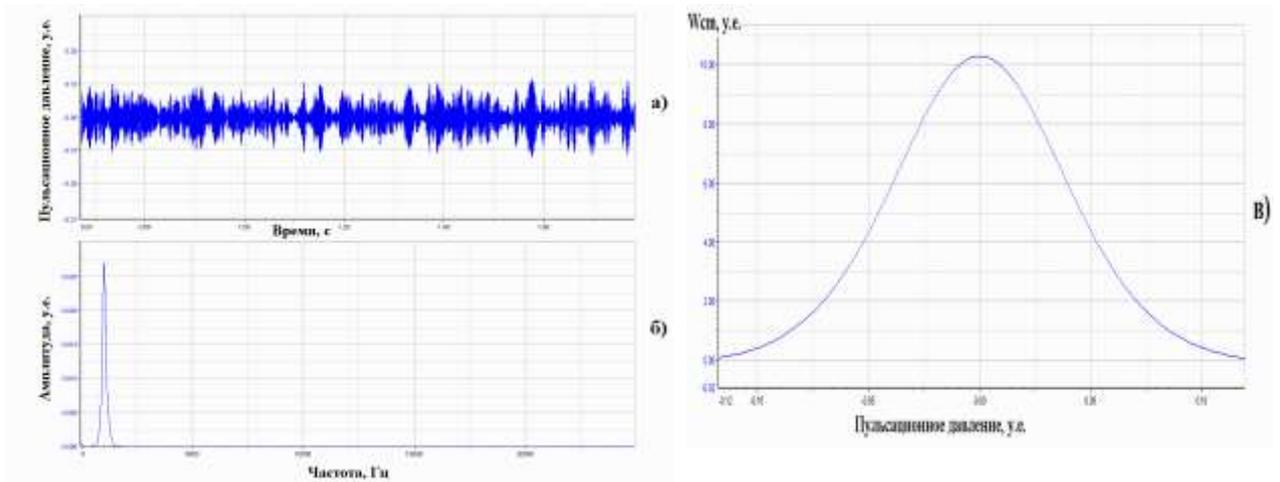


Рис. 27 - Исходное состояние динамической системы  
а – сигнал, б – спектр, в – плотность распределения вероятности мгновенных значений

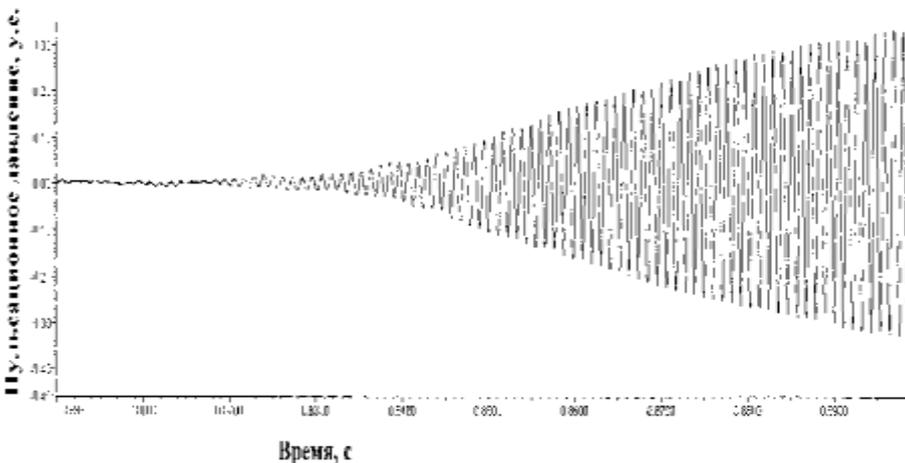


Рис.28  
Самовозбуждение автоколебаний

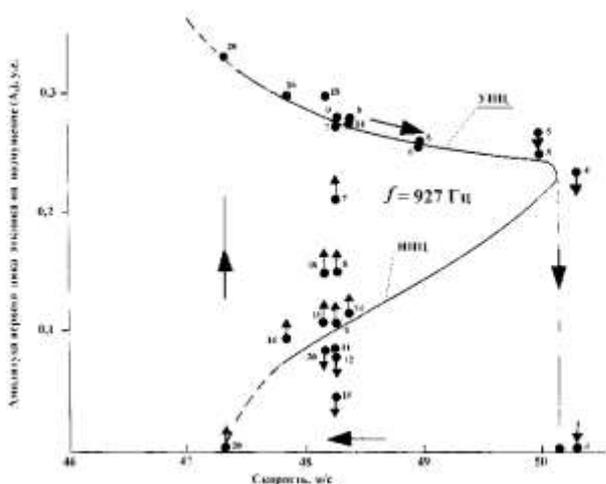


Рис. 29 - Диаграмма динамических переходов «шум» → «автоколебания» → «шум». Цифрами у точек обозначены номера экспериментов.

Наблюдается гистерезисная зависимость амплитуды автоколебаний от режимного управляющего параметра  $V$ . Наличие колебательного гистерезиса указывает на существование репеллера – неустойчивого предельного цикла автоколебаний. Для его обнаружения был использован метод импульсных возмущений. Источником возмущений служил генератор импульсов давления, принцип действия которого основан на эффекте «взрывающейся проволоочки» при прохождении через нее высокого напряжения. Импульсные возмущения вводились в соответствии со схемой, представленной на рис. 26.

Реакцию колебательной системы на ввод импульсных возмущений иллюстрируют рис. 30, 31, 32.

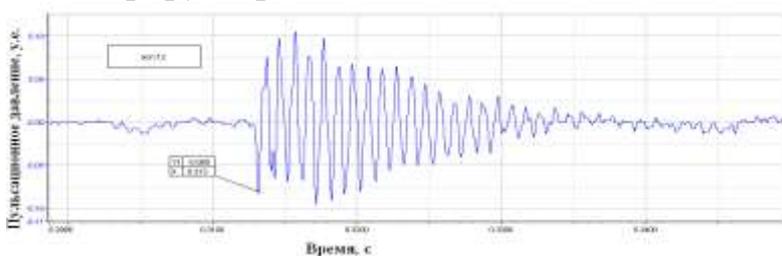


Рис. 30 - Затухающая реакция на импульсное возмущение

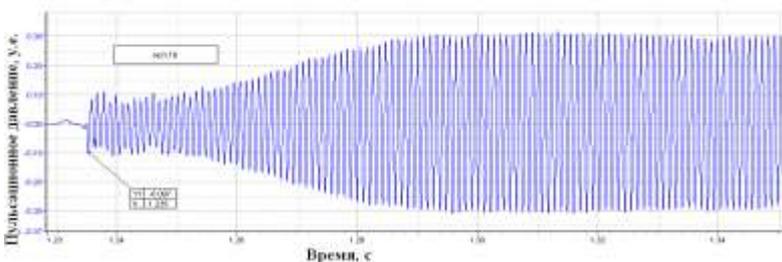


Рис. 31 - Незатухающая реакция на импульсное возмущение (с выходом на УПЦ «снизу»)

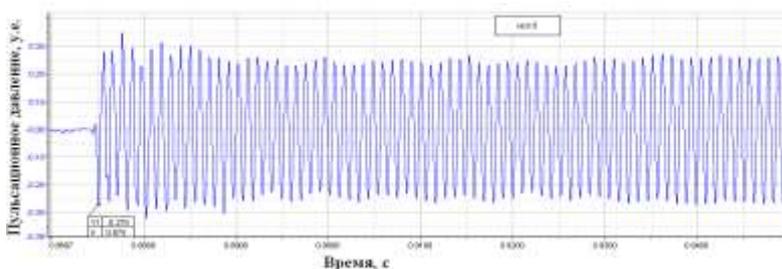


Рис. 32 - Незатухающая реакция на импульсное возмущение (с выходом на УПЦ «сверху»)

При вводе возмущений в зоне гистерезиса ( $V \in 48...50$  м/с) при исходном «шумовом» состоянии наблюдались:

- затухающие реакции (величина первого пика отклика на возмущение ниже  $\lambda_{\text{НПЦ}}$ , рис. 30);
- незатухающие реакции с выходом на УПЦ «снизу» (величина первого пика отклика на возмущение выше  $\lambda_{\text{НПЦ}}$ , рис. 31).
- незатухающие реакции с выходом на УПЦ «сверху» (величина первого пика отклика на возмущение выше  $\lambda_{\text{УПЦ}}$ , рис. 32).

Переходные процессы при вводе импульсных возмущений (огибающие амплитуд импульсных реакций) формально могут быть описаны уравнением:

$$\frac{d\lambda}{d\lambda} = -\lambda \cdot \delta(\lambda).$$

При этом зависимость  $\delta = \delta(\lambda)$  может быть восстановлена по осциллограммам откликов на импульсные возмущения. В частности, при

$V=48,38$  м/с имеем:

- $\delta_0 \approx 170$  1/с (значение  $\delta_0$  определено по шумам);
- $\lambda_{\text{НПЦ}} \approx 0,1$  у.е (амплитуда определена по диаграмме, рисунок 29);
- $\lambda_{\text{УПЦ}} \approx 0,28$  у.е (амплитуда определена по диаграмме, рисунок 29);
- максимальное значение коэффициента нарастания колебаний – 2,5 (определено по осциллограмме отклика на возмущение, испытание № 9).

Зависимость  $\delta = \delta(\lambda)$ , аппроксимированная по четырем точкам, представлена на рис. 33.

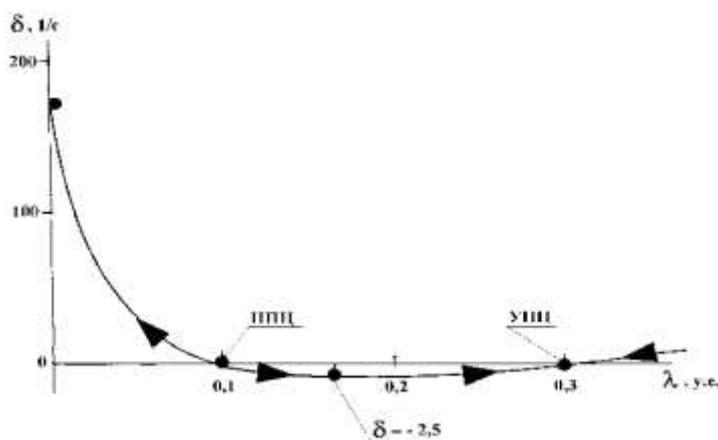


Рис.33 - Восстановленная зависимость коэффициента затухания от амплитуды колебаний

Основной вывод приведенного рассмотрения: метод искусственных импульсных возмущений позволяет обнаружить наличие (или отсутствие) неустойчивого предельного цикла в физической потенциально автоколебательной системе, оценить его амплитуду и, в конечном счете, оценить вероятность «жесткого» возбуждения автоколебаний.

## Заключение

При достижении поставленных в настоящей диссертации задач были получены следующие результаты:

1. Разработана новая математическая модель, описывающая на основе теории Марковских процессов рабочий процесс в камерах ЖРД как вероятно автоколебательную систему, возбуждаемую стохастическим турбулентным шумом горения, где в качестве критерия устойчивости принят декремент затухания колебаний. Решено уравнение Фоккера-Планка-Колмогорова и получены аналитические зависимости между параметрами режима работы конкретного исполнения ЖРД и границей нижнего предельного цикла автоколебаний при их существовании для каждой нормальной акустической моды.

2. Разработан новый оригинальный алгоритм статистической обработки экспериментально измеренных шумов горения при испытаниях камер и газогенераторов ЖРД, позволивший выявить динамическую систему с двумя различными энергетическими состояниями: устойчивым и автоколебательным неустойчивым, и оценить вероятность ее перехода через потенциальный барьер в область автоколебаний.

3. Разработана новая методика прогнозирования устойчивости к акустическим колебаниям рабочего процесса ЖРД конкретного исполнения. Она использует измеренные в процессе огневого испытания ЖРД пульсации давления в камерах сгорания и газогенераторах и после их статистической обработки дает численные взаимосвязи коэффициента затухания и амплитуды возможных автоколебаний. Методика позволяет экспериментально исследовать области устойчивости в плоскости режимных параметров и оценить влияние изменяемых конструктивных факторов. Алгоритм и методика протестированы на специально созданной модельной установке - аэродинамическом генераторе шума. Верификация метода выполнена на модельных камерах сгорания и при натуральных огневых испытаниях на экспериментальной базе ФКП «НИЦ РКП». Результаты подтверждают достоверность полученных количественных расчетных оценок. НТС предприятия рекомендовал новую разработанную методику к практическому применению.

4. Для оценки запасов устойчивости по отношению к «жесткому» возбуждению акустических автоколебаний в камерах ЖРД с гарантированным сохранением стенок камер разработаны перспективные ЭИВУ, использующие энергию взрыва электрических проводников. Экспериментально доказана их эффективность и безопасность для конструкции огневых стенок испытываемых камер.

Результаты проведенных работ могут быть использованы при проведении исследований рабочих процессов в камерах сгорания современных и перспективных ЖРД на этапах экспериментальной доводки камер сгорания и при огневых испытаниях двигателей.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в рецензируемых изданиях

1. Царапкин Р.А., Бирюков В.И., Назаров В.П. Алгоритм оценки запасов устойчивости рабочего процесса в камерах сгорания и газогенераторах жидкостных ракетных двигателей // Сибирский журнал науки и технологий (СибЖНТ). 2017. Т. 18, № 3. С. 558-566.
2. Царапкин Р.А., Бирюков В.И. Экспериментальное определение декрементов затухания в камерах сгорания жидкостных ракетных двигателей // Вестник машиностроения. 2018. № 10. С. 21-27.
3. Царапкин Р.А., Иванов В.Н. Бирюков В.И. Графический метод оценки запасов устойчивости по отношению к акустическим колебаниям в камерах ракетных двигателей по шумам горения // Вестник машиностроения. 2020. № 8. С. 15-21.
4. Царапкин Р.А., Бирюков В.И. Методика оценки запасов устойчивости рабочего процесса в камерах сгорания и газогенераторах жидкостных ракетных двигателей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 5. С. 19-33.

### Патенты

5. Патент №2523921 С1 Российская Федерация; МПК F02К 9/96, G01M 15/02, G01M 15/14. Генератор импульсов давления в акустических полостях камер сгорания и генераторов жидкостных ракетных двигателей. Царапкин Р.А., Нарижный А.А., Пикалов В.П.; заявитель и патентообладатель Федеральное казенное предприятие «Научно-испытательный центр ракетно-космической промышленности» (ФКП "НИЦ РКП") (RU) — № 2013125400/06; заявл. 31.05.2013; опубл. 27.07.2014, Бюл. № 21.

### Другие публикации

6. Царапкин Р.А., Нарижный А.А., Пикалов В.П. Исследование возможности применения генератора импульсов давления, использующего эффект взрывающихся проводников для оценки высокочастотной устойчивости рабочего процесса в предфорсуночных полостях камер сгорания ЖРД. // Сборник материалов молодежной конференции «Новые материалы и технологии для ракетно-космической и авиационной техники» (г. Королев, 01-03 апреля 2012). - Изд. ИПК «Машрибор» 2012, - С. II, - С. 278-287.
7. Царапкин Р.А., Нарижный А.А., Пикалов В.П. Использование явления взрыва металлических проводников при оценке устойчивости рабочего процесса в камерах сгорания жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) к "жесткому" возбуждению высокочастотных колебаний давления // Сборник тезисов докладов 14-й Международной конференции «Авиация

- и космонавтика» – 2015 (Москва, МАИ 16-20 ноября 2015). – М.: изд. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). 2015, - С. 159-160.
8. Царапкин Р.А., Нарижный А.А., Пикалов В.П. Модернизация системы генерации импульсов давления в полости смесительной головки с использованием электроимпульсного возмущающего устройства. // Сборник тезисов докладов XLII Международной молодёжной научной конференции «Гагаринские чтения» – 2016, (Москва, МАИ 12-15 апреля 2016 г.). – М.: изд. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). 2016, - Т. 3, - С. 708-709.
  9. Царапкин Р.А., Нарижный А.А., Пикалов В.П. Использование явления взрыва металлических проводников при оценке устойчивости рабочего процесса в камерах сгорания жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) к "жесткому" возбуждению высокочастотных колебаний давления // Сборник тезисов докладов 15-й Международной конференции «Авиация и космонавтика» – 2016. (Москва, 14-18 ноября 2016). - М.: изд. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). 2016, - С. 330-331.
  10. Царапкин Р.А., Нарижный А.А., Пикалов В.П. Разработка модельных камер сгорания для проведения огневых испытаний с целью отработки технологии применения электроимпульсного возмущающего устройства. // Сборник тезисов докладов XLIII Международной молодёжной научной конференции «Гагаринские чтения – 2017» (Москва, 5-19 апреля 2017). - М.: изд. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). 2017, - 576.
  11. Царапкин Р.А., Бирюков В.И. Методические основы оценки запаса устойчивости рабочего процесса в камерах сгорания и газогенераторах жидкостных ракетных двигателей. // Материалы XIV Всероссийской конференции по новым технологиям, посвященной 70-летию Государственного ракетного центра им. академика В.П. Макеева (Миасс, Челябинская обл. 10-12 октября 2017). - 2017, - Т. 2. - стр. 27-39.
  12. Царапкин Р.А., Бирюков В.И., Назаров В.П. Экспериментальная и аналитическая оценка устойчивости рабочего процесса в камерах сгорания и газогенераторах жидкостных ракетных двигателей. // Материалы XXI международной научно-практической конференции «Решетневские чтения - 2017» (Красноярск, 08-11 ноября 2017). - Электронное издание, 2017, - Т. 1. - С. 197-199.
  13. Царапкин Р.А., Иванов В.Н. Методика прогнозирования высокочастотной неустойчивости горения в ЖРД тягой более 4КН. // Сборник тезисов докладов 16-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика-2017» (Москва, 20-24 ноября 2017). - М.: Изд. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). 2017, - 135 с.
  14. Царапкин Р.А., Иванов В.Н., Бирюков В.И. Методика прогнозирования высокочастотной неустойчивости горения в камерах ЖРД тягой более 4КН. // Сборник материалов XII Международной конференции по

- прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (Алушта 24-31 мая 2018). - М.: Изд. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). 2018, — С. 152-154.
15. Царапкин Р.А., Иванов В.Н., Ананьев Е.Д. Методика прогнозирования высокочастотной неустойчивости горения в ЖРД тягой более 4КН. // Материалы XV Всероссийской конференции по новым технологиям (Миасс, Челябинской обл., 09-11 октября 2018). – 2018, - С. 27-24.
16. Царапкин Р.А., Иванов В.Н. Методика прогнозирования высокочастотной неустойчивости горения в ЖРД тягой более 4КН. // Сборник тезисов докладов 17-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика-2018» (Москва, 19-23 ноября 2018). - М.: Изд. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). 2018, - С. 120-121.