



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

**федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение  
высшего образования**

**«Балтийский государственный технический  
университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»  
(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова)**

Санкт-Петербург, 190005, 1-я Красноармейская ул., д. 1  
Тел.: (812) 316-2394, Факс: (812) 316-2409  
E-mail: komdep@bstu.spb.su. www.voenmeh.ru  
ИНН 7809003047

08.12.2020 № 3/485

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Ученому секретарю диссертационного  
совета Д 212.125.08 на базе Московского  
авиационного института (национального  
исследовательского университета)  
д. т. н., проф. Ю.В. Зуеву

Волоколамское ш., д.4, г. Москва А-80,  
ГСП-3, 125993, МАИ, Ученый совет  
Тел./факс: +7(499) 158-43-33

Уважаемый Юрий Владимирович!

Направляем Вам отзыв официального оппонента профессора кафедры А8 «Двигатели и энергоустановки летательных аппаратов» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Пинчука Владимира Афанасьевича на диссертацию и автореферат Царапкина Романа Александровича на тему: «Методика оценки запаса устойчивости рабочего процесса к высокочастотным колебаниям давления в камерах сгорания и газогенераторах жидкостных ракетных двигателей», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Приложение: Отзыв на диссертацию и автореферат на 10 стр. в 2-х экз.

Проректор по научной работе и  
инновационному развитию

 / С.А. Матвеев/

Исп. Пинчук В.А.  
Тел.: (812) 495-77-33

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

10.12.2020

## ОТЗЫВ

официального оппонента Пинчука Владимира Афанасьевича  
профессора кафедры А8 «Двигатели и энергоустановки летательных  
аппаратов» БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

на диссертацию Царапкина Романа Александровича на тему:  
«Методика оценки запаса устойчивости рабочего процесса к  
высокочастотным колебаниям давления в камерах сгорания и  
газогенераторах жидкостных ракетных двигателей», представленную на  
соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности  
05.07.05 - «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки  
летательных аппаратов».

Диссертационная работа посвящена разработке методики  
прогнозирования проявления неустойчивости горения в камерах и  
газогенераторах жидкостных ракетных двигателей по отношению к  
нормальным модам акустических колебаний на основе анализа шумов  
горения и оценки критериев вероятности, а также совершенствованию  
конструкции внешних возмущающих устройств, применяемых на  
промышленных образцах ЖРД при испытаниях по оценке устойчивости  
рабочего процесса.

### **Актуальность избранной темы диссертации.**

Не смотря на длительную историю изучения, издание большого  
количество научных работ в России и за рубежом, посвященных  
исследованию физических механизмов возбуждения акустических колебаний  
при вибрационном горении и разработке методов их подавления, проблема  
неустойчивости горения в ЖРД продолжает проявляться при автономных  
испытаниях новых конструкций камер сгорания и газогенераторов, при этом  
рабочий процесс склоняется в область неустойчивости и при комплексных  
испытаниях мощных ЖРД, чаще на режимах форсирования тяги. Основными  
причинами этого считаются как желание достичь оптимальных  
энергетических характеристик рабочего процесса в камерах сгорания,  
зачастую на режимах близких к автоколебательным, так и отсутствие  
стандартизированных методов прогнозирования запасов устойчивости  
рабочего процесса к высокочастотным пульсациям давления для конкретного  
конструктивного исполнения. С учетом того, что **огневые испытания с**

10.12.2020

оценкой рабочего процесса камер сгорания и газогенераторов ЖРД сложна, требует значительных финансовых затрат и достаточно длительна по времени, то диссертационная работа Р.А. Царапкина представляет как теоретический, так и практический интерес, и является весьма актуальной.

**Оценка содержания работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 109 наименований и одного приложения. Диссертация представлена на 193 страницах основного текста и приложения на 10 страницах. В работе представлены 7 таблиц и 129 рисунков. Содержание представленной работы достаточно точно соответствует теме исследования. Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цель и основные задачи работы, описываются методы исследования, приводится краткое содержание по главам, а также излагаются выносимые на защиту положения.

Первая глава посвящена описанию динамического процесса горения в камерах и газогенераторах ЖРД, анализу известных феноменологических моделей внутрикамерной неустойчивости с чувствительным к давлению переменным временем запаздывания и кривой выгорания. В главе представлены соотношения, связывающие показатель взаимодействия с амплитудно-частотной характеристикой звена горения для модели внутрикамерных колебаний. На основе уравнений сохранения материального баланса для цилиндрической камеры сгорания в полярных координатах в главе построены соотношения, описывающие собственные акустические нормальные резонансы. Также приведены расчетные зависимости АФЧХ для акустического звена. Рассмотрены практические подходы для определения характеристик вибрационного горения в камерах ЖРД на основе оценок показателя взаимодействия скорости горения, как функции давления газа по экспериментально определенной кривой выгорания.

Вторая глава посвящена основам диагностики высокочастотной акустической неустойчивости процессов горения в камерах сгорания и газогенераторах ЖРД. В главе показано, что явление самовозбуждения автоколебаний часто обладает низкой воспроизводимостью, носит статистический, случайный характер. В главе представлена математическая модель автоколебаний в виде системы дифференциальных уравнений второго порядка с учетом емкости, инерционности и диссипации энергии

колебаний, а также с правой частью, учитывающей стохастические возмущения. По уравнению на каждую моду собственных акустических резонансов цилиндрической камеры. В качестве диагностического признака принят декремент или коэффициент затухания для каждой моды колебаний. Коэффициент затухания учитывает разницу между подведенной и диссипированной энергией за период колебаний. После преобразований автором получена система уравнений огибающих амплитуд для нормальных мод, с моделированием стохастических воздействий посредством спектральной интенсивности случайных турбулентных шумовых воздействий в окрестности резонансной частоты и коррелированной функции с нулевым средним. Далее, рассматриваются и анализируются с использованием графических иллюстраций различные случаи решений уравнений динамики в зависимости от величины коэффициента демпфирования колебаний. При изменении параметров рабочего процесса ЖРД, приводящих к уменьшению коэффициента затухания, показан возможный переход от устойчивого состояния системы к автоколебательному. В работе уравнения динамики преобразованы к виду уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова для вероятности плотности статистического распределения значений огибающей амплитуды пульсаций. Решение этого уравнения дает искомую связь между плотностью вероятности и коэффициентом затухания, а также амплитудой колебательного процесса. Различные случаи решений иллюстрированы графиками. В том числе показано, каким образом реализуется переход через потенциальный барьер из области устойчивости в автоколебательное состояние динамической системы при изменении параметров режима работы камеры. В главе делаются оценки времени достижения Марковским процессом границы неустойчивого предельного цикла в зависимости от амплитуды колебаний. Одним из признаков наличия границы предельного цикла является вид функции декремента затухания, уменьшающейся с ростом амплитуды колебаний. Другой важный фактор удаленность границы нижнего предельного цикла по давлению от значений шумовых турбулентных пульсаций, определяемый ныне экспериментально. В работе предложено определение его расчетным путем. Для этого разработан эмпирико-теоретический алгоритм и методика расчета амплитуды нижнего предельного цикла автоколебаний в камерах и газогенераторах ЖРД, при его

наличии, и оценка запаса устойчивости по отношению к собственным модам акустических колебаний для конкретного конструктивного исполнения в плоскости режимных управляющих параметров. Разработанная автором методика включает следующие процедуры:

1. Регистрацию пульсационного давления в камере сгорания (реакционном объеме газогенератора) или в полости коллектора перед форсунками, на исследуемом установившемся режиме работы двигателя.

2. Спектральный анализ временной реализации сигнала датчика пульсаций давления, включающий:

- узкополосную фильтрацию сигнала на частотах, соответствующих собственным формам (модам) акустических колебаний реакционного объема в окрестности исследуемого резонансного спектрального подъема. Резонансные частоты камер достаточно идентифицируемы;

- выделение огибающей  $\lambda(t)$  сигнала на исследуемой резонансной частоте  $f_v$  (демодуляция);

- сглаженную оценку плотности распределения вероятности огибающей  $W_{ст}(\lambda)$  и её производной. При этом автокорреляционная функция  $\rho(\tau)$  узкополосного процесса  $\bar{p}'_v$  должна быть экспоненциально затухающей на частоте спектрального подъема  $f_v$ , а плотность распределения вероятности  $W(p'_v)$  мгновенных значений процесса  $\bar{p}'_v$  близка к гауссовой (нормальной), т.е. график имеет характерный колоколообразный вид. (Приведенные признаки характеризуют резонансный узкополосный шум горения «РУШГ»);

- оценку средних квадратичных 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 (3.33);

- цензурирование экспериментальной зависимости коэффициентов демпфирования от амплитуды колебаний;
- полиномиальную (или экспоненциальную) аппроксимацию экспериментальной зависимости  $\delta = \delta(\lambda)$ ;
- оценку (по графику зависимости коэффициента демпфирования от амплитуды колебаний) принадлежности исследуемой динамической системы классу потенциально автоколебательных систем с «жестким» самовозбуждением.

Признаками принадлежности исследуемой системы к потенциально автоколебательным являются: затухающий вид автокорреляционной функции, близкая к Гауссовой плотность распределения вероятности мгновенных значений сигнала и обязательно уменьшающаяся с увеличением амплитуды финальная зависимость декремента затухания  $\delta = \delta(\lambda)$ . В этом случае, прогнозирование ожидаемого уровня неустойчивого предельного цикла автоколебаний осуществляется аналитическим продолжением сглаженной зависимости  $\delta = \delta(\lambda)$  до нулевого значения  $\delta = 0$ . При этом определяется амплитуда колебаний, соответствующая границе нижнего предельного цикла. Конечной оценкой достаточности запаса устойчивости по отношению к «жесткому» возбуждению автоколебаний является выполнение 15-кратного превышения амплитуды границы нижнего предельного цикла средней амплитуды шумовых пульсаций.

Приведены результаты тестирования методики на модельной камере и на специальной установке с генерируемыми автоколебаниями газа в камере. Выполнена верификация методики на натурной камере при модельных испытаниях, результаты однозначно подтверждают соответствие расчета и эксперимента.

Третья глава диссертации посвящена диагностике неустойчивости рабочего процесса в ЖРД с применением методов организации искусственных импульсных или гармонических возмущений давления или расхода в камерах, введенных определенным образом, и исследовании реакции процесса горения на него. Запас устойчивости для случая импульсных возмущений давления при промышленных испытаниях камер и газогенераторов определяется, исходя из минимального возмущения, вызывающего переход горения в автоколебательный режим. Необходимость

тестирования камер сгорания ЖРД на устойчивость горения по отношению к конечным возмущениям обусловлена существенной нелинейностью процессов преобразования топлива в продукты сгорания. Метод импульсных возмущений является одним из основных при промышленных испытаниях для оценок устойчивости рабочего процесса. Его практическая реализация потребовала разработки разнообразных многоимпульсных генераторов возмущений давления, подключенных к реакционному объему камер сгорания. В главе описаны работы по совершенствованию импульсных возмущающих устройств, применяемых при испытаниях для экспериментального определения наличия нижнего предельного цикла автоколебаний рабочего процесса в камерах и газогенераторах ЖРД. Такие испытания проводятся в соответствии с методикой оценки высокочастотной устойчивости рабочего процесса по ОСТ В92-9000-78. В работе представлены, известные конструкции двух-, трех-, пятизарядных экспериментальных возмущающих устройств (ВУ), с различной массой взрывчатого вещества и соответственно с различным значением импульса давления. Судя по графикам импульсы давления, генерируемые такими ВУ достигают величин 15 МПа и более. Серия импульсов позволяет создать возмущения, сдвинутые по фазе и исследовать реакцию процесса горения на данном режиме. Тестирующие импульсные возмущения обычно реализуют в пределах проверочного квадрата функциональных установившихся режимов работы двигателя, при запуске и на переходных неустановившихся режимах. Регистрация пульсаций давления отклика горения на внесенное возмущение осуществляется датчиками, разнесенными в соответствии с регистрируемой собственной модой. В главе отмечаются недостатки известных ВУ, связанные с повреждением огневой стенки камер мембранами пиропатронов и не возможностью обеспечения необходимой величины импульса или разбросом параметров взрыва. Обосновывается возможность создания новых перспективных возмущающих устройств, использующих энергию взрыва электрических проводников. Представлены разработанные при непосредственном участии автора новые перспективные электроимпульсные возмущающие устройства. Для оценки их эффективности было проведено математическое и физическое моделирование процессов, а для верификации результатов создана модельная экспериментальная установка. Результаты расчетов и многочисленных экспериментов позволили подобрать нужные

режимы работы, оптимизировать характеристики и геометрию реакционного объема устройства, и подтвердили практическую эффективность новых электроимпульсных возмущающих устройств, обеспечивающих целостность при испытаниях материальной части камер сгорания.

Четвертая глава посвящена верификации разработанной методики оценки запаса устойчивости рабочего процесса по отношению к акустическим колебаниям давления в камерах и газогенераторах ЖРД на основе статистического анализа шумов горения. Для подтверждения достоверности результатов, полученных по разработанной методике, автором диссертации приводятся эксперименты испытаний модельной камеры сгорания с единичной форсункой на компонентах метан и кислород. Конструктивно форсунка смещена относительно оси к периферии, таким образом, что зона горения оказывается в пучности давления по отношению к первому тону тангенциальной моды. Представлены спектральные характеристики измеренных и фильтрованных на частоте  $f \approx 1670$  Гц колебаний давления: его амплитудный спектр, автокорреляционная функция и плотность распределения вероятности мгновенных значений сигнала, которые однозначно характеризуют систему как автоколебательную с численными значениями коэффициента затухания и величиной дисперсии. Построенная зависимость коэффициента затухания от амплитуды позволяет определить амплитуду предельного цикла и оценить запас устойчивости. Приведены результаты апробации разработанной новой методики при испытании газогенератора РД 14Д14 РН «Протон» на натуральных компонентах АТ и НДМГ. Расчеты убедительно показывают отсутствие в системе возбуждения автоколебаний, что рабочий процесс в газогенераторе устойчив. Интересные результаты были получены при испытании экспериментальной камеры сгорания Д1418 с четырьмя эмульсионными форсунками на компонентах газообразный кислород и жидкий керосин. Рабочий процесс в этом случае характеризовался двумя устойчивыми стационарными режимами, но с разными шумовыми характеристиками. На основании обработки результатов испытаний была показана возможная нестабильность рабочего процесса и как следствие, смесеобразование камеры подверглось конструктивной доработке. Надежность результатов эмпирико-теоретических оценок существования автоколебательных режимов работы по



разработанной методике убедительно показали при испытаниях изделия Д4. Полученные численные величины однозначно характеризуют амплитуду нижнего предельного цикла автоколебаний и удаленность режима работы от границы. В главе также приводятся экспериментальные данные эффективности разработанных автором новых конструкций ИЭВУ, что является значительным научным вкладом в теорию и практику организации устойчивого рабочего процесса в камерах сгорания и газогенераторах ЖРД.

#### **Новизна проведенных исследований и полученных результатов.**

Научная новизна проведенных исследований и полученных результатов диссертационной работы заключается:

в разработке на основе теории Марковских процессов новой математической модели, описывающей рабочий процесс в камерах ЖРД как вероятно автоколебательную систему с стохастическим шумом горения.

в разработке алгоритма статистической обработки экспериментально измеренных шумов горения при испытаниях камер и газогенераторов ЖРД и методики прогнозирования устойчивости к акустическим колебаниям рабочего процесса ЖРД конкретного исполнения.

в разработке и исследовании новых перспективных электроимпульсных возмущающих устройств для испытаний камер сгорания и газогенераторов ЖРД.

Практическая значимость работы определяется возможностью использования результатов, полученных в диссертации при испытаниях новых конструкций камер сгорания и газогенераторов перспективных ЖРД. Работа носит комплексный и законченный характер, включает важные и сложные теоретические исследования с использованием Марковских процессов, а также верифицирующие результаты многочисленных модельных и натурных экспериментов. Разработанные методы позволяют снизить затраты на экспериментальную отработку новых перспективных ЖРД, а также значительно уменьшают время обработки результатов.

Достоверность экспериментальных результатов, полученных при апробации методики, подтверждается проведенными модельными и натурными испытаниями в ФКП «НИЦ РКП», а также сравнением с известными данными, представленными в различных источниках.

Апробация работы. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 16 работах, из них 4 в рецензируемых научных

изданиях. Результаты исследований неоднократно обсуждены на 13 научно-технических конференциях. Автором получен один патент РФ на изобретение.

Автореферат полностью соответствует диссертации и в полной мере отражает ее содержание.

**Недостатки и замечания** по диссертационной работе:

- недостаточно полно рассмотрен вопрос влияния «шумовых» помех на выделение истинных мод акустических колебаний, вероятность появления которых существует при математической обработке исходного вибрационного сигнала.
- присутствует ряд стилистических и грамматических ошибок;
- допущены пропуски букв в некоторых словах, часто встречается слитное написание различных слов, что затрудняет чтение текста;
- в работе отсутствуют данные оценки погрешности применяемых в ходе испытаний средств измерения.

В совокупности, данные недостатки не снижают научной и практической ценности приведенных в работе исследований.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация Р.А. Царапкина полностью соответствует паспорту научной специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

**Общая оценка работы.** Представленная диссертация является завершенной и квалификационной научно-исследовательской работой, самостоятельно выполненной автором. Работа включает в себя новые теоретические и методологические положения, написана на высоком научном уровне. Полученные результаты можно квалифицировать как научное достижение в области организации устойчивости рабочего процесса в камерах сгорания и газогенераторах как новых, так и дорабатываемых образцов ЖРД. Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений. Выносимые автором на защиту положения диссертации обоснованы и являются новыми. Царапкин Р. А. имеет достаточное количество публикаций по основным результатам диссертационной работы. Не маловажным критерием ценности результатов работы является то, что соискатель не ограничился лишь теоретическими исследованиями, но

разработал необходимые для экспериментальных исследований новые, перспективные возмущающие устройства. Без сомнения, диссертация «Методика оценки запаса устойчивости рабочего процесса к высокочастотным колебаниям давления в камерах сгорания и газогенераторах жидкостных ракетных двигателей» по значимости научных и практических результатов удовлетворяет всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, а ее автор, Царапкин Роман Александрович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

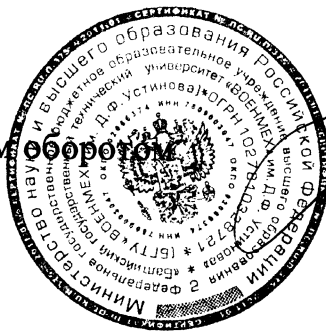
**Официальный оппонент:**

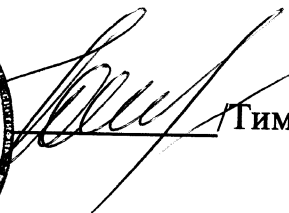
Профессор кафедры А8 «Двигатели и энергоустановки летательных аппаратов», доктор технических наук, профессор

 Пинчук В. А. /  
08.12.2020 г.

Подпись официального оппонента д.т.н. Пинчука Владимира Афанасьевича заверяю:

Начальник управления персоналом и документом



 Тимофеева Ю.В./

Почтовый адрес: 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, д.1  
Телефон: (812) 495-77-33  
Эл. почта: Pinchuk\_VA@voenmeh.ru

*С отзывом ознакомлен Царапкин Р.А. Цар*  
11.12.2020