



Государственная корпорация
по космической деятельности «Роскосмос»
Государственный научный центр Российской Федерации –
федеральное государственное унитарное предприятие

**«Исследовательский центр
имени М.В.Келдыша»**

(ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»)

Онежская ул, д. 8, Москва, Россия, 125438
Тел. +7 (495) 456-4608 Факс: +7 (495) 456-8228
ОКПО 07547339 ОГРН 1027700482303 ИНН/КПП 7711000836/774301001
kerc@elnet.msk.ru; http://www.kerc.msk.ru

14.12.2020 № 5-05/607

на № _____ от _____

Ученому секретарю диссертационного
совета Д 212.125.08
на базе Московского авиационного
института (национального
исследовательского университета)
доктору технических наук, профессору
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 начальника отделения 1
ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» Мосолова Сергея Владимировича 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 официального оппонента ..» на 9 л. в 2-х экз.

Ученый секретарь

Ю.Л. Смирнов

Отдел документационного
обеспечения МАИ

«14» 12 2020

ОТЗЫВ

официального оппонента Мосолова Сергея Владимировича
начальника отделения №1 ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша»
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,
электрические двигатели и энергетические установки летательных
аппаратов».

Диссертационная работа посвящена развитию методических основ
экспериментальной диагностики акустической неустойчивости горения в
камерах и газогенераторах жидкостных ракетных двигателей больших тяг.

Актуальность темы диссертации.

Совершенствование экспериментальных методов диагностики по
определению склонности рабочего процесса к возникновению
высокочастотных колебаний в камерах сгорания и газогенераторах мощных
ЖРД обусловлена необходимостью обеспечения надежности двигательной
установки в составе средств выведения, так как стоимость выводимых
полезных нагрузок в настоящее время весьма велика, не говоря уже о
престижности выполнения той или иной миссии. Физика процессов
смешения, испарения, горения в камерах до конца не изучена, как до сих пор
не существует стройной теории возникновения автоколебательного процесса
при горении. В этой связи прогнозные оценки на основании опыта
применения различных схем смесеобразования, в сочетании со статистикой
отработки двигателей могут дать полезную информацию относительно
устойчивости рабочего процесса. Одним из способов определения свойств
зоны горения как колебательной системы является испытание на так
называемое «жесткое возбуждение», когда в камере сгорания формируется
искусственный импульс давления определенной величины, а по отклику
всего процесса, в первую очередь по величине декремента затухания, можно
судить, в том числе, о запасах устойчивости процесса горения. Импульсные
возмущения, создаваемые специальными пиротехническими средствами,
могут превышать давление номинального режима, а их мембраны могут

воздействовать на целостность огневой стенки камер. Поэтому, разработка новой конструкции устройства для реализации методики огневых акустических испытаний на устойчивость процесса горения в ЖРД является важной для практики и актуальной для науки горения и устойчивости темой диссертации.

Содержание работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 109 наименований и приложения. Диссертация представлена на 193 страницах основного текста. В работе представлено 7 таблиц и 129 графических иллюстраций. Содержание работы достаточно точно соответствует наименованию темы исследования. Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цели и задачи работы, приводятся методы исследования, изложено краткое содержание по главам, а также представлены основные положения работы, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен обзор известных математических моделей динамики процессов горения с чувствительным к давлению переменным временем запаздывания. Выполнен учет влияния на процесс выгорания топлива деформирования кривой выгорания в зависимости от различных условий. Рассмотрены волновые процессы в цилиндрических трактах и приведены основные соотношения для продольных и поперечных мод акустических резонансов. Внутрикамерные автоколебаний представлены взаимодействием нелинейного звена горения и акустического звена, связанных между собой положительной обратной связью. Динамические свойства звеньев описаны амплитудно-частотными характеристиками. Приведены расчетные зависимости АЧХ для звена горения и акустического звена, соотношения для проводимости на границах камеры сгорания. Изложена методика для экспериментального определения параметрических характеристик рабочего процесса в камерах двигателей, на основе оценок коэффициента усиления возмущений скорости звена горения, как функции давления газа по экспериментально определенной кривой выгорания.

Во второй главе рассмотрены основы диагностики акустической автоколебаний процессов горения в камерах и газогенераторов ЖРД. Для модового анализа высокочастотной неустойчивости рабочего процесса в ЖРД используются различные методы внесения возмущений в процесс

горения, включая гармонические и (или) импульсные воздействия. Динамическая реакция или отклик горения на различные возмущения дает количественную оценку декрементов затухания, границ автоколебаний и запасов устойчивости. Существующие методы импульсных искусственных возмущений могут приводить к повреждению конструкции камер и обладают рядом недостатков, из-за которых, возникает необходимость в разработке пассивных методов диагностики неустойчивости горения. В работе рассматривается нелинейная диссипативная модель внутрикамерных автоколебаний давления с учетом стохастического воздействия интенсивных турбулентных пульсаций (шумов), возбуждаемых процессом горения. Диссипация колебательной энергии реализуется через потери трения из-за вязкости реального газа и путем интенсивной теплопередачи. Следует отметить, что примеры описания колебательных систем со стохастическим воздействием в технике единичны, например, в электронной технике. Однако в целом неплохо развит математический аппарат теории Марковских процессов. Из условия малости амплитуд и фазы пульсаций уравнения колебаний для огибающих амплитуд преобразованы к виду Фоккера-Планка-Колмогорова для стационарной плотности вероятности распределения амплитуд. Для исключения времени в уравнениях используется метод преобразования координат фазового пространства. Коэффициенты сноса и диффузии в этом случае получают простой вид. Граничные условия сформулированы для потока вероятности через границы. Полученное решение связывает стационарную плотность вероятности, огибающей амплитуд узкополосного спектрального процесса в диапазоне собственных резонансных частот с коэффициентом диссипации колебательной энергии и величиной амплитуды. В работе приведено численное параметрическое исследование динамического состояния системы, показан вероятный переход через потенциальный барьер из устойчивого состояния в автоколебательное. Сформулированы вероятностные критерии, характеризующие принадлежность динамических систем к потенциально автоколебательным. Признаками принадлежности исследуемой системы к потенциально автоколебательной являются: затухающий вид автокорреляционной функции, близкая к Гауссовой плотность распределения вероятности мгновенных значений сигнала и обязательно уменьшающаяся с увеличением амплитуды финальная зависимость декремента затухания. Прогнозирование ожидаемого уровня неустойчивого предельного цикла автоколебаний

осуществляется аналитическим продолжением сглаженной зависимости декремента затухания до нулевого значения. При этом определяется амплитуда колебаний, соответствующая границе нижнего предельного цикла. В главе приводятся результаты апробации разработанной методики на модельных и натуральных камерах сгорания. Показано соответствие результатов численного расчета и экспериментальных данных.

В третьей главе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований новых импульсных возмущающих устройств, основанных на взрыве электрических проводников в высоковольтной линии при коротком замыкании. При взрыве образуется плазма с большим выделением тепловой энергии, которая инициирует ударную волну в газовом объеме. Автором проведена кропотливая работа на созданной им модельной установке по совершенствованию ударных импульсов на основе ЭИВУ. Для ряда созданных новых конструкций удалось добиться максимальных значений амплитуды и крутого фронта ударной волны сравнимых с промышленными пиротехническими ВУ. Положительным отличием от промышленных устройств является возможность точно запланированного воздействия. Экспериментально доказана возможность применения при автономных испытаниях для экспериментальной оценки запасов устойчивости горения в камерах и газогенераторах ЖРД по нормативному документу ОСТ В92-9000-78.

Четвертая глава целиком посвящена практическому применению предложенной автором методики оценки запаса устойчивости рабочего процесса по отношению к акустическим колебаниям давления в камерах и газогенераторах ЖРД на основе статистического анализа шумов горения. Статистическая обработка измеренных узкополосных шумовых пульсаций осуществляется с использованием пакета программ «Мера». Апробация оригинальной методики выполняется на модельной камере сгорания с единичной форсункой на компонентах метан и кислород. Конструктивно форсунка смещена относительно оси к периферии, таким образом, что зона горения возбуждает тангенциальные колебания. Результаты расчетов спектральных характеристик на частоте первой тангенциальной моды $f \approx 1670$ Гц: 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, амплитудой нижнего предельного цикла. 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. Особенностью этой камеры было то, что в зависимости от условий запуска рабочий процесс реализовывался неоднозначным образом двумя состояниями с разной амплитудой пульсаций и разными декрементами. Статистический анализ шумов позволил выявить и устранить причину неустойчивости рабочего процесса в камере. Надежность экспериментально-теоретического прогноза автоколебательных режимов работы изделия было подтверждено по разработанной методике при огневых испытаниях. Полученные экспериментальные значения амплитуды, приводящие к возбуждению автоколебаний, и амплитуды нижнего предельного цикла автоколебаний, определенные по шумам на основе расчета сопоставимы. 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.

Научная новизна исследований и достоверность полученных результатов.

В работе получены следующие новые научные и практические 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.

Практическая значимость работы определяется возможностью использования результатов, полученных в диссертации при испытаниях и практической отработке новых конструкций камер сгорания 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 подходы снижают затраты и уменьшают время на экспериментальную отработку перспективных изделий.

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

Апробация работы. Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 16 работах автора, из них 4 работы в журналах рекомендованных ВАК, а одна работа с международным цитированием. Результаты исследований неоднократно обсуждены на 13 международных научно-технических конференциях. Автором получен один патент РФ на изобретение.

Автореферат соответствует диссертации и в полной мере отражает ее содержание.

Недостатки и замечания по диссертационной работе:

1. В обзоре работ не достаточно выделен вклад в теорию и практику обеспечения устойчивости рабочего процесса в ЖРД выдающихся ученых НИИ ТП (Центр Келдыша), таких как: Иевлев В.М., Натанзон М.С., Артамонов К.И., Лебединский Е.В. и многих др. Однако их работы в списке литературы в диссертации представлены в полной мере.
2. Разработанная автором методика использует вероятностные критерии оценивания стохастического воздействия турбулентных шумов, однако не менее интересны и статистические характеристики с квантильными критериями.

3. Решение уравнений Фоккера-Планка-Колмогорова с коэффициентами сноса и диффузии для каждой моды акустических резонансов, требует задания краевых условий. От корректного задания условий отражения и (или) проницаемости границ, зависит точность вероятностных оценок прогнозирования устойчивости рабочего процесса.
4. Несомненно, значимым достижением для практики являются разработанные автором диссертации новые электрические импульсные возмущающие устройства. В представленном виде они хороши для лабораторных исследований, но их применение для промышленных испытаний требует усложнения оборудования и дальнейшей доработки до серийного изготовления.
5. Немаловажным является фактор безопасности работы с этим устройством из-за возможного высоковольтного пробоя диэлектрика.
6. В диссертации встречаются стилистические и грамматические ошибки.

Следует заметить, что отмеченные недостатки не снижают научной и практической ценности приведенных в работе результатов исследований.

Заключение. Представленная диссертация является завершенной научно-квалификационной работой. В работе получены новые, актуальные теоретические и практические методологические результаты, которые можно оценивать, как существенное научное достижение в области обеспечения устойчивости рабочего процесса в ЖРД по отношению к акустическим колебаниям при огневых испытаниях. Достоверность полученных результатов в полной мере обоснована и подтверждается, приведенными материалами. Все представленные к защите научные положения достаточно обсуждены. Царапкин Р.А. имеет достаточное количество публикаций по основным результатам диссертационной работы. Ценность работы состоит также в том, что соискатель не ограничился только созданием и апробацией методики, но и разработал новые и перспективные электрические импульсные возмущающие устройства, необходимые для проведения щадящих конструкцию испытаний ЖРД.

По значимости научных и практических результатов диссертация «Методика оценки запаса устойчивости рабочего процесса к высокочастотным колебаниям давления в камерах сгорания и газогенераторах жидкостных ракетных двигателей» удовлетворяет требованиям (п.9-14) «Положения о порядке присуждения ученых степеней ...», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09. 2013 г., 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.

Начальник отделения 1, Государственного научного центра Российской Федерации - Федерального государственного унитарного предприятия «Исследовательский центр имени М. В. Келдыша».

Кандидат физико-математических наук по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы» (доцент кафедры Московского физико-технического института (национального исследовательского университета)).

Мосолов Сергей Владимирович

« 09 » декабря 2020 г.

Почтовый адрес: 125438, Россия, Москва, Онежская ул., д.8

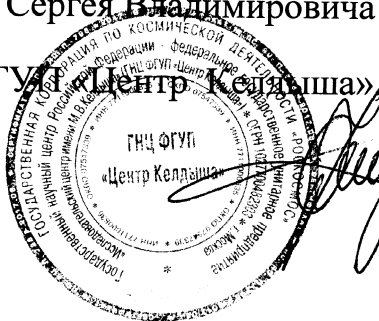
Телефон: +7(495)456-05-93, :+7(495)456-64-85,

Эл. почта: mosolov@list.ru

Подпись к.ф.м.н Мосолова Сергея Владимировича удостоверяю:

Ученый секретарь ГНЦ ФГУП «Исследовательский центр имени М. В. Келдыша»

кандидат военных наук



Ю.Л. Смирнов

С отзывом ознакомлен Цар / Царапкин /
15.12.2020