

Акционерное общество  
«НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко»

Бурденко ул., д. 1, г. Химки, Московская область, 141400  
Тел.: (495) 286-91-13; Факс: (495)286-91-36; (495)286-91-37  
E-mail: energo@proem.ru  
http://engine.space  
ИНН/КПП 5047008220/509950001

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Заместитель генерального директора-  
Главный конструктор,  
кандидат технических наук



Лёвочкин П.С.

«10» 12 2020 г.

## **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

на диссертационную работу

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 энергетические установки летательных аппаратов».

### **Актуальность темы диссертации**

Тема диссертации посвящена решению важной и сложной проблемы для ракетного двигателестроения – прогнозированию устойчивости рабочего процесса в камерах сгорания и газогенераторах мощных двигателей по отношению к акустическим колебаниям.

В настоящее время одним из основных методов определения запаса устойчивости в камерах и газогенераторах ЖРД по отношению к «жесткому» возбуждению автоколебаний является создание импульсного возмущения процесса горения путем подрыва пиропатронов в соответствии с РД 92-0250-89. Ввод возмущений с заранее заданной последовательностью и интенсивностью возмущений позволяет сократить объем испытаний и уменьшить избыточное ударное нагружение камеры. Для достоверной оцен-

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

«14» 12 2020

ки устойчивости важен выбор места ввода импульсных возмущений и насколько точно воспроизводится реальный механизм импульсного возбуждения неустойчивости. Немаловажно, что в некоторых случаях результаты экспериментальных исследований оказываются мало предсказуемы, а иногда и трудно воспроизводимы. Так при проведении стендовых испытаний ЖРД 11Д55 камера сгорания была разрушена из-за возникновения высокочастотных колебаний, инициированных тестирующим импульсом давления с минимальной навеской взрывчатого вещества 0,6 г. Ранее этот двигатель неоднократно запускался, и рабочий процесс в камере сгорания был устойчив.

В этой связи, тема диссертации Царапкина Р. А., посвященная разработке нового метода пассивной диагностики акустической неустойчивости в камерах и газогенераторах ЖРД на основе экспериментально измеренных шумов горения, является особо актуальной и востребованной ракетным двигателестроением.

### **Оценка содержания работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 109 наименований и приложения. Диссертация представлена на 193 страницах текста, включая 7 таблиц, 129 графиков и иллюстраций. Содержание работы полностью соответствует теме исследования.

Во введении обоснованы актуальность, новизна, практическая полезность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, описаны основные методы исследования, приведено краткое содержание по главам, а также изложены положения работы, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор известных работ, посвященных внутрикамерной неустойчивости рабочего процесса в камерах и газогенераторах ЖРД. Рассмотрена модель горения с переменным к давлению временем запаздывания в линейной постановке с учетом деформации кривой выгорания. Приведены соотношения для передаточных функций звена горения и акусти-

ческого звена, замкнутых обратной положительной связью по давлению. Изложены основы определения акустических резонансов нормальных мод в цилиндрических камерах сгорания ЖРД. Рассмотрен расчетно-экспериментальный метод определения кривых выгорания, амплитудно-фазочастотных характеристик звена горения и акустического звена, а также прогнозирования величины динамического коэффициента усиления вибрационного горения и резонансной частоты, на которой система теряет устойчивость.

Во второй главе выполнено физическое и математическое моделирование процесса нестационарного процесса горения в виде автоколебательной системы с диссипацией колебательной энергии и правой частью, учитывающей стохастические турбулентные пульсации давления - шум горения. Система неоднородных дифференциальных уравнений второго порядка описывает колебательный процесс для каждой моды на частотах собственных резонансов. Основным диагностическим показателем принят декремент затухания, определяемый экспериментально для каждой нормальной моды акустических колебаний в камере сгорания. На основе проведенного тщательного исследования законов распределения случайных факторов разработана модель колебательной стохастической системы с вероятностными критериями. Найдены вероятностные характеристики при статистической обработке измеренных шумовых пульсаций горения в окрестности частот собственных акустических резонансов камер, однозначно выделяющие автоколебательный режим с «жестким» возбуждением и квазистационарное горение. Такие автоколебательные системы характеризуются следующими признаками: затухающим видом автокорреляционной функции, графиком плотности распределения вероятности мгновенных значений сигнала, близким по форме к нормальному распределению и зависимостью декремента затухания от амплитуды, обязательно уменьшающейся с ростом амплитуды возмущений. В этом

случае, прогнозирование ожидаемого уровня неустойчивого предельного цикла автоколебаний осуществляется аналитическим продолжением сглаженной зависимости коэффициента затухания от амплитуды возмущений до нулевого значения, при котором определяется амплитуда колебаний, соответствующая границе нижнего предельного цикла. Приведены результаты тестирования методики на специальной установке с искусственным генерированием акустических колебаний в камере. Получено полное соответствие расчета и эксперимента.

В третьей главе диссертации исследованы различные методы и устройства искусственного импульсного возбуждения ВЧ-неустойчивости, в том числе и выборочного, наиболее опасных мод, чаще тангенциальных, на номинальном режиме работы ЖРД. Экспериментально полученный спектр ударного импульса при подрыве взрывчатого вещества, как и величина самого импульса, не всегда соответствует расчету. Кроме того, нередки случаи ударного повреждения огневых стенок камеры и сопел форсунок мембраной пиротехнических устройств. Автором предложена концепция применения новых импульсных устройств, основанных на взрыве электрических проводников с выделением большого количества тепла и с образованием мощной ударной волны. Представлены разработанные автором новые перспективные электроимпульсные возмущающие устройства. Математическое и физическое моделирование процессов в импульсных электрических возмущающих устройствах позволило оптимизировать их характеристики. На основе проведенных исследований на вновь созданной экспериментальной установке, была показана высокая эффективность ИЭВУ для акустического моделирования и применимость для испытаний по ОСТ В92-9000-78.

Четвертая глава посвящена практическому использованию разработанной методики на модельных и натуральных камерах сгорания и газогенераторах ЖРД. Статистическая обработка измеренных сигналов датчиков с использо-

ванием пакета компьютерных программ «Мера» позволяет с высокой точностью анализировать динамическое состояние процессов горения. В главе приведены результаты испытаний устойчивости рабочего процесса в газогенераторе РД 14Д14 РН «Протон» на натуральных компонентах АТ и НДМГ. Показано отсутствие резонансов в плоскости режимных параметров, как в установившемся состоянии, так и на переходных режимах. Убедительны результаты огневых испытаний модельной камеры сгорания, являющейся генератором колебаний, настроенным на частоту первой тангенциальной моды. Спектральная обработка фильтрованных сигналов по предложенной автором методике (от датчика давления в сечении фронта пламени на периферии камеры) характеризует режим как узкополосный резонансный шум горения на частоте первой тангенциальной моды равной 1670 Гц. Из расчетов получены значения пороговых амплитуд давления, вызывающих переход горения в автоколебательный режим. Использование предложенной новой методики по результатам испытаний и расчетов позволяет выполнять конструктивную доработку камер с целью расширения диапазонов устойчивой работы. Это убедительно показано на примере огневых испытаний экспериментальной камеры сгорания Д1418 с четырьмя эмульсионными форсунками на компонентах газообразный кислород и жидкий керосин. Особенностью рабочего процесса в этой камере было то, что горение могло реализовываться на одном из двух равновероятных режимах, характеризующихся разными декрементами затухания и средними амплитудами шумовых пульсаций на частоте первой тангенциальной моды. Была доработана камера и устранена причина параметрических колебаний. В главе доказана эффективность, разработанных новых конструкций электрических импульсных возмущающих устройств, приведены убедительно подтверждающие экспериментальные данные.

## **Научная новизна проведенных исследований и полученных результатов**

В диссертационной работе Царапкина Р.А. приведен новый оригинальный метод оценки запасов устойчивости рабочего процесса в камерах и газогенераторах ЖРД по стохастическим шумовым пульсациям, измеренным при огневых автономных испытаниях, на частотах собственных акустических резонансов. Статистическая обработка сигналов на основе вероятностных критериев по разработанному впервые автором алгоритму, позволяет заключить является ли режим горения принципиально автоколебательным, т.е. резонансным узкополосным шумом горения или устойчивым. Одновременно расчетным путем определяются декремент колебаний, амплитуда неустойчивого предельного цикла и запас устойчивости к акустическим колебаниям при номинальных режимах работы ЖРД. Не менее важной научной составляющей является разработка новых электрических импульсных возмущающих устройств, обеспечивающих запланированную точность ударного импульса и отсутствие повреждений огневых стенок и форсуночной головки.

### **Практическая значимость**

Постановка научного исследования, достигнутые результаты являются важными и направлены на практическое применение при огневых автономных и комплексных испытаниях ЖРД. Огневая доводка устойчивости рабочего процесса в камерах и газогенераторах ЖРД связана со значительными экономическими затратами и длительна по времени. Внедрение результатов диссертации Царапкина Р.А. в практику испытаний позволит отрасли сократить сроки экспериментальной отработки изделий и существенно уменьшить экономические затраты.

## **Обоснованность и достоверность научных результатов**

Обоснованность и достоверность полученных научных результатов подтверждена большим объёмом экспериментальных данных, полученных в разнообразных условиях проведения огневых испытаний модельных и натурных камер сгорания и газогенераторов на стендах ФГУП «НИЦ РКП».

### **Подтверждение основных результатов диссертации в научной печати**

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 16 печатных работах автора, из них 4 работы в изданиях рекомендованных ВАК и 1 работа с цитированием в Скопус. Результаты исследований обсуждены на 13 международных научно-технических конференциях. Автором получен один патент РФ на изобретение.

Автором представлены к защите следующие научные 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 автоколебатель-

ным 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 апробированы на специально созданной модельной установке - аэродинамическом генераторе шума. Верификация метода выполнена на 170 модельных камерах сгорания и при натуральных огневых испытаниях на экспериментальной базе ФГУП «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.



## Недостатки и замечания по диссертационной работе

1. В работе приведены примеры прогнозирования тангенциальных высокочастотных автоколебаний, однако нет случаев испытаний с анализом комбинированных мод высокочастотных колебаний.

2. Разработанная методика применима для диагностики акустической неустойчивости рабочего процесса только для натуральных конструкций камер сгорания и газогенераторов при автономных испытаниях. Она практически бесполезна на этапах проектирования.

3. Разработанные конструкции ЭИВУ для создания тестовых возмущений рабочего процесса в камерах сгорания используют высокое электрическое напряжение, что создает дополнительные ограничения по технике безопасности при проведении испытаний.

4. В списке литературы присутствуют достаточное количество работ зарубежных авторов, однако в диссертации нет анализа их достижений по схожим научным направлениям.

5. Есть замечания редакционного характера и по небрежностям оформлению диссертации.

6. В диссертации присутствуют незначительные по объему разделы, фразы и обороты, включенные из собственных публикаций автора, которые могут быть засчитаны как заимствования из чужих источников.

В целом, приведенные недостатки не снижают практической и научной ценности результатов теоретических и экспериментальных исследований, представленных в диссертации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации и основные её положения.

Полученные автором диссертации новые научные результаты имеют важное значение для науки и практики и могут быть рекомендованы к использованию на предприятиях: АО «НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко, АО «КБХА», ФГУП «НИЦ РКП», Исследовательский центр имени М.В. Келдыша, «КБ Химмаш имени А.М. Исаева» и других предприятиях отрасли.

Представленная диссертация является завершённой научно-исследовательской, квалификационной работой, самостоятельно выполненной автором.

Работа написана на высоком научном уровне и включает в себя новые методологические достижения.

Обоснованность и достоверность полученных результатов подтверждена экспериментальными исследованиями.

Полученные результаты можно квалифицировать как новое научное достижение в области обеспечения устойчивости рабочего процесса в ЖРД.

Все защищаемые автором положения обоснованы и в достаточном объёме опубликованы.

По содержанию, научной новизне, по значимости научных и практических результатов диссертация соответствует требованиям (п. 9-14) «Положения о порядке присуждения ученых степеней ...» ВАК Министерства науки и образования РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Царапкин Роман Александрович, заслу-

живает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».


Диссертационная работа заслушана и обсуждена на заседании специалистов расчетно-теоретического отдела, протокол № 769-197-2020.

Главный специалист, доктор технических наук

Д.С. Мартиросов

Начальник сектора, кандидат технических наук

В.Д. Гапонов

С отзывом ведущей организации ознакомлен  
  
14.12.2020