



**ФЕДЕРАЛЬНОЕ КАЗЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КАЗЕННЫЙ  
НАУЧНО-ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ ПОЛИГОН  
АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ»  
(ФКП «ГкНИПАС»)**

г. Белоозерский, Воскресенский р-н, Московская обл.,  
Россия, 140250, тел.(495) 5560709, факс(495) 5560740,  
E-mail: info@fkpgknipas.ru, сайт: www.fkpgknipas.ru  
ОКПО 07536117, ОГРН 1035001302160  
ИНН/КПП 5005020218/500501001



**УТВЕРЖДАЮ**

Директор ФКП «ГкНИПАС»

кандидат технических наук

С.А. Астахов

08.12. 2020 г.

08.12.2020 № 000/3919  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

### ОТЗЫВ

на автореферат диссертации 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».

#### Актуальность темы диссертации

Высокочастотная неустойчивость горения в ракетных двигателях приводит к вибрациям конструкции, уменьшению полноты горения и к снижению тяги, а в худших случаях к разрушению камеры сгорания или газогенератора. В этой связи, тема диссертации Царапкина Р.А. является весьма актуальной и необходимой для практики.

Диссертационная работа Царапкина Р.А. посвящена прогнозированию возможных неустойчивых режимов рабочего процесса ЖРД по измеренным во время испытания шумам горения. В настоящее время запасы устойчивости по отношению к продольным и поперечным модам акустических колебаний определяются путем подрыва пиропатронов в камере, для создания импульсного возмущения фронта пламени или серии импульсов для инициирования гармонических возмущений. Пиротехнические устройства, несмотря на ловушки для мембран, часто оставляют на огневых стенках, выполненных из БРХ-08 с покрытием, раковины. Другая проблема, это небольшой разброс в пределах долей грамма взрывчатого вещества при снаряжении пиропатрона приводит к значительному превышению от запланированной величины взрывного импульса.

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

10 12 2020

Поэтому диссертация Царапкина открывает новое направление в практике исследования высокочастотной неустойчивости рабочего процесса в ЖРД, её содержание обладает новизной и практической полезностью.

В работе четко поставлена цель и сформулированы задачи исследования. Приведены методы решения проблемы и средства для достижения цели.

**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 5 таблиц, 129 рисунков. Судя по автореферату содержание работы полностью соответствует теме исследования.

Во введении обоснованы актуальность, новизна, практическая полезность темы диссертации, приведены цели и задачи работы, изложены положения работы, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена основам теории высокочастотных колебаний в камерах сгорания ЖРД. Представлена известная модель внутрикамерной неустойчивости рабочего процесса ЖРД, представляющая процесс горения в виде динамической системы, из звена горения и акустического звена, замкнутых между собой положительной обратной связью. Динамические свойства звена горения описаны моделью чувствительного к давлению переменного времени запаздывания. Характеристическое уравнение, описывающее границу неустойчивости, представлено амплитудно-частотными характеристиками. Такая связь удобна для анализа экспериментальных данных.

Вторая глава посвящена разработке нового метода диагностики неустойчивости горения в камерах и газогенераторах ЖРД по шумам горения. По экспериментально измеренным пульсациям давления шумов горения статистическая обработка сигналов, отфильтрованных в узкой полосе частот, соответствующих акустическим резонансам камер, определяется декремент затухания по автокорреляционной функции. При исследовании акустических резонансов декремент затухания является критерием для оценок прогноза. В работе представлена модель автоколебаний системой уравнений для собственных акустических мод камеры, зависимостью гармонического осциллятора с трением и правой частью, учитывающей стохастическое воздействие турбулентных шумов горения. Важным достижением теоретического раздела диссертации является приведение диагностической модели к виду уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова для стационарной плотности вероятности амплитуды колебаний и получения решения, в виде зависимости, связывающей параметры режима с

границей нижнего предельного цикла автоколебаний. Анализ решения позволяет выполнить диагностику запасов устойчивости рабочего процесса в камерах ЖРД для номинального или исследуемого переходного режима. Представлена верификация теоретических положений методики на основе специально разработанного аэродинамического генератора узкополосного шума.

Третья глава посвящена совершенствованию конструкции импульсных возмущающих устройств, используемых при испытаниях неустойчивости горения в ЖРД. В ней представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований на модельной установке, созданной автором работы, принципиально новых конструкций устройств, использующих явление высоковольтного электрического взрыва при коротком замыкании проволоки. Новизна устройств подтверждена патентом с участием автора диссертации. Показана высокая эффективность, достаточная для промышленного применения, новых многоимпульсных электрических возмущающих устройств.

Четвертая глава посвящена экспериментальной верификации результатов прогнозирования автоколебаний, определенной расчетным путем по вероятностным критериям на основе разработанной методики. Приведены результаты испытаний модельной камеры с одной форсункой на компонентах метан и кислород. Конструктивно форсунка размещена таким образом, что при горении компонентов, камера становится генератором резонансных акустических колебаний с частотой первой тангенциальной моды. Результаты убедительно подтверждают справедливость теоретической основы методики, определены численные значения коэффициента затухания, дисперсии, амплитуду границы автоколебаний и запас устойчивости. Апробация результатов, полученных на базе положений методики, также выполнена на примере аэродинамической трубы с установленной в ней тонкой пластиной. Приведенная на примере труба, является акустико-вихревой потенциально автоколебательной системой с гистерезисной зависимостью амплитуды автоколебаний от режимного управляющего параметра. Наличие колебательного гистерезиса указывает на существование неустойчивого предельного цикла автоколебаний. Для экспериментального определения его параметров был использован разработанный автором новый электроимпульсный генератор возмущений давления. Сопоставительный анализ, приведенный на графике, убедительно показывает удовлетворительное согласие экспериментальных данных и результатов статистической обработки шумовых сигналов.

### **Личный вклад автора и основные положения, выносимые на защиту:**

- 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. 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 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.

**Новизна проведенных исследований и практическая значимость полученных результатов.**

Отсутствие подобных методик при экспериментальном исследовании запасов устойчивости по отношению к высокочастотным колебаниям рабочего процесса в камерах сгорания и газогенераторах ЖРД подтверждают новизну и практическую полезность результатов, представленных в данной диссертации. В полной мере это относится к теоретическим исследованиям и практическим достижениям автора. Разработка новых электрических импульсных возмущающих устройств, обеспечивающих запланированную точность ударного импульса и отсутствие повреждений тепловых покрытий огневых стенок и форсуночной головки. Внедрение достигнутых новых результатов в практику огневых испытаний позволит сократить сроки экспериментальной отработки изделий и существенно снизить затраты.

**Достоверность** представленных в автореферате научных результатов подтверждена приведенными многочисленными экспериментальными данными, полученными при огневых испытаниях модельных и натурных камер сгорания и газогенераторов на стендах ФГУП «НИЦ РКП».

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 16 печатных работах автора, из них 4 работы в изданиях рекомендованных ВАК. Автором получен один патент РФ на изобретение. Результаты исследований обсуждены на различных международных научно-технических конференциях в достаточной мере.

**Недостатки и замечания** по диссертационной работе:

1. Размещение датчиков на камере сгорания серийного ЖРД, для идентификации конкретной моды акустических колебаний не всегда возможно. Из автореферата непонятно, каким образом могут быть связаны пульсации в форсуночной головке или вибрация конструкции со стохастическими характеристиками, в предлагаемой методике.
2. В работе не приведены примеры сравнения результатов для случаев возбуждения комбинированных продольно-поперечных колебательных взаимодействий, стоячих и бегущих волн и др. . Неясно насколько применима для анализа в этих случаях разработанная методика.

В целом, данные недостатки не снижают научной и практической значимости, а также ценности приведенных в работе результатов.

Р. А. Царапкин имеет достаточное количество публикаций по основным результатам диссертационной работы.

**Заключение** Судя по автореферату, диссертационная работа представляет собой новое научное исследование, выполненное на высоком теоретическом уровне. Полученные научные результаты имеют большое значение для практического применения. Сама диссертация является завершенной научно - квалификационной работой, самостоятельно выполненной автором. Достоверность полученных результатов убедительно подтверждено. Их значимость можно квалифицировать как научное достижение в области организации устойчивости рабочего процесса в ЖРД. Все защищаемые автором положения диссертации являются новыми и достаточно обоснованы.

Считаю, что 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» соответствует требованиям (п.9-14) «Положения о порядке присуждения ученых степеней...», № 842 от 24 сентября 2013 г. , предъявляемым к кандидатским диссертациям, 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».

Главный советник ФКП «ГкНИПАС»,  
заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук,  
научная специальность: 05.07.05 –  
«Тепловые, электроракетные двигатели  
и энергоустановки летательных аппаратов»



В.Я. Ниязов

Федеральное казенное предприятие «Федеральный казенный научно испытательный полигон авиационных систем»

Почтовый адрес: 140250, Россия, Московская область, п. Белоозерский,

Телефон: +7(495)556-07-46, +7(495)556-07-09

Эл. почта: info@fkpgknpas.ru