

Отзыв научного руководителя

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 к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»

Царапкин Роман Александрович, 1988 года рождения, в 2011 году окончил государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный индустриальный университет» по специальности «Физика». В 2016 году Царапкин Р.А. поступил в очную аспирантуру МАИ по кафедре 202 «Ракетные двигатели». Во время обучения в аспирантуре Царапкин Р.А. успешно выполнил всю запланированную программу подготовки, существенно повысил научно-квалификационный уровень, и одновременно совмещал с научной работой в ФГУП «НИЦ РКП», где занимался разработкой, расчетами и проектированием, а также испытаниями модельных и натурных камер сгорания и газогенераторов ЖРД. Перед аспирантом была поставлена цель, разработать методику оценки запаса устойчивости рабочего процесса по отношению к акустическим колебаниям давления в камерах сгорания и газогенераторах по шумам горения. Для решения данной цели необходимо было провести системное обобщение известных работ по устойчивости горения в ЖРД и сформулировать задачи теоретического и экспериментального исследования. Для теоретического анализа оценки состояния процесса горения в камерах ЖРД был выбран в качестве критерия декремент затухания колебаний, а для анализа эмпирико-теоретический комплексный подход. Описание возбужденного автоколебательно-го состояния рабочего процесса как, динамической системы с учетом стохастического воздействия турбулентных пульсаций давления газа (шума горения) на основе теории Марковских процессов с одной стороны. А с другой стороны, экспе-

риментально измеренные датчиками значения пульсаций шума в окрестности собственных резонансных частот цилиндрической камеры после статистической обработки позволяют определить декремент затухания колебаний, а также вероятность существования автоколебательного режима и спрогнозировать параметрическую связь параметров режима рабочего процесса с переходом от стабильного горения до неустойчивого. В результате сведения математической модели к уравнению Фоккера-Планка-Колмогорова и его решения, был разработан достаточно сложный новый математический алгоритм, включающий детализацию условий, характеризующих процесс горения в камере как потенциально автоколебательный по отношению к нормальным модам акустических колебаний. Он включает спектральный анализ пульсаций давления в камере на установившемся режиме при стендовых испытаниях в окрестности собственных акустических резонансов камеры, а именно: оценку амплитудного спектра пульсаций давления, выделение и оценки автокорреляционной функции сигнала. Выделение огибающей фильтрованного сигнала с использованием преобразования Гильберта и оценки плотности распределения вероятности, огибающей и мгновенных значений сигнала, и дифференцирование функциональных зависимостей. Данная обработка формирует необходимые условия для существования вероятности потенциально автоколебательного режима работы камеры, иначе узкополосный резонансный шум горения (РУШГ). При этом, центральные частоты близки к собственным (расчетным) для нормальных мод акустических колебаний, автокорреляционная функция $\rho(\tau)$ узкополосного процесса является экспоненциально затухающей на частоте спектрального подъема f_v , а плотность распределения вероятности $W(P'_v)$ мгновенных значений процесса $P'_v(t)$ близка к гауссовой (нормальной), т.е. имеет характерный вид колокола. Алгоритм нахождения границы нижнего предельного цикла автоколебаний включает в себя оценку средних квадратичных значений и коэффициентов демпфирования колебаний. Выделение огибающих фильтрованных сигналов с использованием преобразования Гильберта. Оценку плотности распределения вероятности огибающих фильтрованных сигналов и их производ-

ных. Оценку зависимостей коэффициентов демпфирования от амплитуды колебаний давления на исследуемых резонансных частотах. Используя асимптотическое продолжение полученных зависимостей, для каждой моды определяется амплитуда колебаний нижнего предельного цикла при значениях коэффициента демпфирования равного нулю. Разработанный алгоритм и созданная методика оценки стабильности режима горения в камерах ЖРД по измеренным пульсациям шумов и его удаленности от численно определенной границы устойчивости для каждой моды собственных резонансов является новым научным достижением. Актуальность и практическая значимость полученного в диссертации Царапкина Р.А. результата обусловлены огромными материальными затратами и большим временем на экспериментальную доводку камер сгорания и газогенераторов. Достоверность результатов, полученных на основе разработанной им методики, подтверждена на модельных экспериментах и при натурных испытаниях. Методика рекомендована НТС ФКП «НИЦ РКП» для использования при промышленных испытаниях камер сгорания и газогенераторов ЖРД. Не менее значимой в работе диссертанта является другая составляющая, а именно научная разработка новых способов и устройств инициирования внешних импульсных возмущений процесса горения в камерах сгорания и газогенераторах ЖРД. Реакция отклика или переходная функция рабочего процесса в этом случае характеризует запас устойчивости или его отсутствие по отношению к «жесткому» возбуждению акустических колебаний в камерах. В отличие от известных пиропатронов разработанные им внешние импульсные устройства, основаны на тепловом эффекте, выделяемом при взрыве электрических проводников (ЭИВУ). Мгновенный выброс плазмы инициирует ударную волну в потоке газа в специальной камере и создает возмущение процесса горения. Такие устройства, по сравнению с известными, не повреждают огневые стенки камер сгорания. Царапкиным Р.А. были проведены теоретические и экспериментальные исследования, направленные на достижения достаточной для практического применения эффективности новых ЭИВУ.

Практическая ценность работы Царапкина Р.А. заключается в том, что разработанные алгоритм и методика позволяют обоснованно дать оценку запасов ус-

тойчивости рабочего процесса в камерах сгорания и газогенераторах ЖРД по экспериментально замеренным и статистически обработанным значениям шумов горения.

Для достижения поставленной цели лично автором диссертации:

- 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 ФГУП «НИЦ РКП» Результаты подтверждают достоверность полученных ко-

личественных 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.

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.

В июле 2020 года Царапкин Р.А. успешно прошел государственную аттестацию и защитил на «отлично» научно-исследовательскую работу на тему " Методика оценки запаса устойчивости рабочего процесса к высокочастотным колебаниям давления в камерах сгорания и газогенераторах жидкостных ракетных двигателях ". 9 июля 2020 г. он получил Диплом об окончании аспирантуры (регистрационный номер 2020/2О-0266) с присвоением квалификации «Исследователь. Преподаватель-исследователь» по направлению подготовки 24.06.01 «Авиационная и ракетно-космическая техника».

За период обучения в аспирантуре результаты проводимых исследований были опубликованы аспирантом в 16 работах, 3 из которых входят в перечень ВАК, 1 статья в международных базах цитирования, получен 1 патент. Результаты работы докладывались аспирантом на 13-х российских и международных конференциях. В публикациях отражены все основные научные аспекты.

Во время обучения в аспирантуре Царапкин Р.А. принимал участие в учебном процессе кафедры "Ракетные двигатели": проводил практические занятия со студентами по курсам "Теория ЖРД", "Теория ДЛА".

В ходе работы над диссертацией Царапкин Р.А. проявил себя творческим и зрелым исследователем. Он способен формулировать цели и задачи, глубоко осмысливать и анализировать полученные результаты, самостоятельно определять

