

Председателю диссертационного совета Д212.125.08 Московского авиационного института (научно-исследовательского университета),
доктору технических наук,
профессору **Ю.А. Равиковичу**

125993, Москва, А-80, ГСП-3
Волоколамское шоссе, дом 4

Отзыв

официального оппонента, доктора технических наук **Бершадского Виталия Александровича** на диссертационную работу **Каменского Сергея Станиславовича** на тему «Прогнозирование результатов повторных испытаний ЖРД на основе расчётно-экспериментальной математической модели», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05.

Диссертационная работа Каменского Сергея Станиславовича посвящена исследованию расчётно-экспериментальной модели (РЭМ) параметров рабочего процесса ЖРД и разработке методов прогнозирования результатов повторных испытаний ЖРД.

В настоящее время важной научно-технической проблемой является обеспечение надежной работы мощных ЖРД при расширении диапазонов режимов работы и условий эксплуатации, что обуславливает необходимость совершенствования ранее разработанных методов математического моделирования для достоверного прогнозирования параметров рабочего процесса ЖРД.

Подтверждение характеристик двигателя при повторных испытаниях связано с необходимостью совершенствования РЭМ в случаях, когда функционирование двигателя реализуется на новых границах диапазонов условий эксплуатации, как по уровню достигаемых значений тяги и соотношения компонентов топлива в камере сгорания, так и по температурам и давлениям компонентов топлива на входе в двигатель.

В связи с этим диссертация С.С. Каменского, в которой решается научно-техническая задача прогнозирования повторных испытаний ЖРД на основе совершенствования расчётно-экспериментальной модели (РЭМ), представляет научный и практический интерес, а тема является актуальной.

Диссертационная работа Каменского С.С. выполнена на 128 страницах текста с рисунками и таблицами, состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы, включающего 57 наименований работ.

Во введении приведена общая характеристика диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований.

Первая глава. Рассмотрен ЖРД как объект математического моделирования и приведена иерархия РЭМ. Выбрана РЭМ для проведения исследований, главной особенностью которой является использование характеристик агрегатов конкретного экземпляра двигателя, верифицированных при автономных испытаниях и скорректированных по результатам его огневого контрольно-технологического испытания (КТИ). Результатом коррекции РЭМ после КТИ двигателя является мультиплексивное введение корректирующих коэффициентов в уравнения напорных, мощностных характеристик бустерных и основных турбонасосных агрегатов, а также коэффициентов сопротивления тракта охлаждения камер и магистралей питания турбин.

Вторая глава. Проведено исследование свойств и возможностей РЭМ, скорректированной по результатам испытаний двигателей при КТИ, и предложено её применение в качестве метода для прогнозирования параметров двигателя при повторных испытаниях.

В работе полагается, что конкретный двигатель прошел огневое испытание по цикограмме КТИ и в дальнейшем планируется проведение цикла испытаний этого же двигателя при различных сочетаниях условий при стендовых испытаниях и лётной эксплуатации.

Установлены преимущества РЭМ, скорректированной по результатам КТИ: согласование результатов расчёта с экспериментальными данными с достаточной точностью, достоверная экстраполяция результатов расчёта вне границ, характерных для условий проведенных испытаний. По мнению автора это даёт возможность сделать результаты прогнозирования более точными, а диапазоны адекватного прогнозирования – более широкими.

Оценка преимуществ метода прогнозирования производилась по относительной величине невязки следующих параметров: температура газа за турбиной, обороты валов основных и бустерных насосов, тяга двигателя и соотношение компонентов топлива. Для этого были использованы уникальные результаты: стендовых испытаний двигателя РД191 и его испытаний в составе РН «Ангара», стендовых испытаний РД181, лётных испытаний РД180 в составе РН «Атлас-5».

В работе подчеркивается, что основное отличие предлагаемого метода, определяющее преимущество в достоверности результатов, заключается в использовании для прогнозирования повторных испытаний конкретного двигателя его реальных, экспериментально подтвержденных характеристик.

В результате автором сделан вывод о том, что разработанный метод прогнозирования повторных испытаний на основе РЭМ обеспечивает надежное адекватное прогнозирование практически во всем рабочем диапазоне условий эксплуатации современных мощных ЖРД и точность результатов прогнозирования достаточна для большинства задач, решаемых при доводке и эксплуатации таких двигателей.

Третья глава. Представлен разработанный автором метод оперативного прогнозирования результатов повторных испытаний ЖРД, использующий результаты расчетов, выполненных с использованием РЭМ в широком диапазоне условий работы двигателей. Метод основан на аппроксимации результатов расчетов с использованием РЭМ в виде полиномиальных зависимостей.

Для определения состава и числа независимых параметров в этих зависимостях автором исследована обобщенная математическая модель двухкомпонентного ЖРД, работающего по схеме с дожиганием окислительного генераторного газа в камере. При этом обосновано, что зависимости, используемые для прогнозирования параметров, можно однозначно определить функциями шести переменных – уровня тяги, соотношения компонентов топлива, а также температур и давлений компонентов на входе в двигатель.

В главе 3 приведены разработанные автором диссертации алгоритм оперативного прогнозирования и программно-математическое обеспечение метода прогнозирования на основе РЭМ.

В результате анализа представительной выборки экспериментальных данных повторных огневых испытаний двигателей РД181 и РД191 подтверждено, что экспериментальные данные с высокой точностью согласуются с зависимостями в виде полинома как функции от 6 выбранных параметров. При этом аппроксимации от 6 выбранных параметров были сформированы для каждого из указанных двигателей на основе результатов их испытаний при КТИ.

Автором диссертации сделан вывод о том, что разработан метод оперативного прогнозирования результатов повторных испытаний ЖРД, использующий расчёты, выполненные с использованием РЭМ в широком диапазоне условий работы двигателей. Применение этого метода позволит обеспечить высокую достоверность и оперативность прогнозирования параметров рабочих процессов ЖРД в различных ожидаемых и физически реализуемых условиях повторных испытаний.

Четвёртая глава. Сформулированы рекомендации по возможному применению разработанных методов в адаптивных алгоритмах систем аварийной защиты при стендовых испытаниях ЖРД.

Приведен способ формирования алгоритма регулирования ЖРД в зависимости от углов приводов агрегатов регулирования и шести переменных (например, уровня режима работы, давлений и температур

компонентов на входе в двигатель) с использованием аппроксимации в виде полинома.

В заключении приведены основные результаты работы, выводы и рекомендации.

Автореферат диссертации правильно отражает её содержание и основные положения.

По теме диссертации автором опубликовано 4 работы в рецензируемых научных изданиях.

Оценивая в целом содержание диссертационной работы следует отметить, что при выполнении работы Каменский С.С. продемонстрировал способность к проведению самостоятельных исследований и обобщений в области отработки ракетных двигателей.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующих результатах, имеющих важное значение для решения задач по отработке ЖРД:

- установлено, что применение РЭМ для прогнозирования результатов конкретного экземпляра двигателя, скорректированной по результатам КТИ, позволяет достоверно и с достаточной точностью определить значения параметров двигателя для планируемых повторных испытаний;

- показано, что прогнозируемые с помощью РЭМ параметры двигателя, выполненного по схеме с дожиганием генераторного газа, могут быть аппроксимированы в виде полинома, в котором изменяемыми значениями могут быть 6 параметров: тяга двигателя, соотношение компонентов топлива, температура и давление на входе в двигатель;

- разработан метод оперативного прогнозирования результатов повторных испытаний на основе РЭМ с сохранением точности определения параметров двигателя в более широких диапазонах изменений режимов работы и внешних условий, чем испытания двигателя при КТИ;

- разработан алгоритм регулирования ЖРД в виде зависимости углов привода агрегатов регулирования тяги и соотношения компонентов топлива указанных выше 6 переменных, который представлен в виде полинома с аппроксимацией 6-мерным массивом точек, определяемых в требуемых диапазонах работы двигателя.

Достоверность результатов исследований автора не вызывает сомнений, поскольку они, в основном, получены в процессе выполнения ответственных промышленных работ, связанных с подтверждением работоспособности двигателей большой мощности, создаваемых ОАО «НПО Энергомаш». В диссертационной работе продемонстрировано совпадение результатов расчётного прогнозирования с данными стендовых испытаний двигателей РД191, РД180 и РД181 и лётных испытаний двигателей РД191 и РД 180 с точностью достаточной для решения практических задач.

В целом по диссертационной работе Каменского С.С. можно сказать, что основные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертационной работе, обоснованы.

Вместе с тем следует отметить следующие **недостатки диссертационной работы:**

1. В диссертации отсутствует анализ степени разработанности научно-технической проблемы другими специалистами для обоснования необходимости решения задач исследований и разработок, сформулированных автором.
2. Методика исследований в диссертации основана на оценке невязок параметров ЖРД при сравнении расчётных и экспериментальных значений. Однако при этом не указаны характерные моменты на режимах функционирования двигателя, принятые для сравнения, а также не определены погрешности результатов расчёта и измерений параметров.
3. Диссертация имеет прикладной характер, но в ней не приведены сведения о практическом использовании полученных автором научно-технических результатов.

Диссертационная работа Каменского С.С., несмотря на отмеченные недостатки, заслуживает положительной оценки, она является законченной научной работой, в которой изложены новые технические решения, способствующие качественному проведению экспериментальной отработки современных мощных ЖРД.

Диссертация Каменского Сергея Станиславовича является научно-квалификационной работой, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении учёных степеней. Автор диссертации заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05. – «Тепловые электроракетные двигатели и энергетические установки летательных аппаратов».

Официальный оппонент, доктор технических наук Бершадский Виталий Александрович, главный научный сотрудник Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (ФГУП ЦНИИмаш).

141070, г. Королёв Московской обл., ул. Пионерская д.4, тел. (495)-513-4180.

Подпись *Бершад* В.А. Бершадский
09.06.17

Подпись д.т.н. Бершадского В.А. удостоверяю.

Главный учёный секретарь НТС ФГУП ЦНИИмаш,
доктор технических наук, профессор

Ю.Н. Смагин

