



Госкорпорация «РОСКОСМОС»
Федеральное казенное предприятие
«Научно-испытательный центр
ракетно-космической промышленности»



ФКП «НИЦ РКП»

Бабушкина ул., 9 д., г.Пересвет, Сергиево-Посадский
р-н, Московская обл., Россия, 141320,

Тел. (496)546-3321, Телекс 846246 АГАТ

Факс (496)546-7698, (495)221-6282(83)

E-mail: mail@nic-rkp.ru

ОГРН 1025005328820 ОКПО 07540930

ИНН/КПП 5042006211/504201001

От 07.06.17 № 520-195

На № _____ от _____

Председателю диссертационного совета Д 212.125.08
на базе Московского авиационного института
(национального исследовательского университета)
доктору технических наук профессору

Равиковичу Ю.А.

Уважаемый Юрий Александрович!

Направляю Вам отзыв ведущей организации на диссертационную работу С.С. Каменского "Прогнозирование результатов повторных испытаний ЖРД на основе расчетно-экспериментальной математической модели", представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – "Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов".

Приложение: 1. «Отзыв...», 2экз. на 6 листах каждый.

2. Диссертация, 1 книга.

Первый заместитель генерального
директора по испытаниям

Кучкин В.Н.

Исполнитель: Кадишевич А.С.

Тел.: (496) 546-3623

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ
Вх. № 14 06 2017



Госкорпорация «РОСКОСМОС»
Федеральное казенное предприятие
«Научно-испытательный центр
ракетно-космической промышленности»



ФКП «НИЦ РКП»

Бабушкина ул., 9 д., г.Пересвет, Сергиево-Посадский
р-н, Московская обл., Россия, 141320.
Тел. (496)546-3321. Телекс 846246 АГАТ
Факс (496)546-7698, (495)221-6282(83)
E-mail: mail@nic-rkp.ru
ОГРН 1025005328820 ОКПО 07540930
ИНН/КПП 5042006211/504201001

От _____ № _____

На № _____ от _____

Утверждаю

Первый заместитель генерального

директора по испытаниям

кандидат технических наук, доцент

В.Н.Кучкин

07 июня

2017 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу С.С. Каменского "Прогнозирование результатов повторных испытаний ЖРД на основе расчетно-экспериментальной математической модели", представленную на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – "Тепловые, электrorакетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов"

Актуальность темы диссертационной работы

Современные мощные ЖРД как правило проходят не менее двух огневых испытания: при контрольном стендовом испытании при сдаче в эксплуатацию и непосредственно при проведении лётного испытания в составе ракеты-носителя. При отработке двигателей отдельные экземпляры проходят многократные огневые испытания без съёма со стенда. Такие испытания проводятся в широких диапазонах изменения режимов работы и внешних факторов, а особо ответственные – подвергаются специальным испытаниям – в условиях, которые выходят за границы штатных условий эксплуатации. Таким образом, повторные испытания являются неотъемлемой и составной частью жизненного цикла ЖРД.

Для повышения точности реализации прогнозируемых значений тяги и соотношения компонентов при проведении повторного испытания, особенно, когда условия его проведения отличаются от предыдущего, в настоящее время используются разнообразные статистические методы и методы математического моделирования. Тем не менее, в ряде случаев эти методы не обеспечивают надежного расчетного прогнозирования параметров двигателя при расширении границ рабочих диапазонов режимов его работы, что зачастую приводит к аварийным исходам при огневых испытаниях.

Одному из возможных направлений повышения точности прогнозирования параметров ЖРД с применением методов математического

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ
Вх. № 14 06 2017

моделирования и посвящена диссертационная работа С.С. Каменского, основная идея которой состоит в совмещении процесса совершенствования математического моделирования с процессом всей экспериментальной отработки двигателя.

Таким образом, тема диссертационной работы, несомненно, является актуальной для всей ракетно-космической отрасли.

При анализе содержания диссертационной работы С.С. Каменского было установлено следующее.

Общие сведения

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, условных обозначений и списка литературы, включающего 57 наименований. Она содержит 123 страницы основного текста, 97 рисунков и 26 таблиц.

По теме диссертации автором опубликовано 4 научных работы в изданиях, входящих в список ВАК, в том числе одна работа без соавторов.

Во **введении** диссертации обосновывается актуальность, цели и решаемые в диссертационной работе задачи, основная оценка которых проанализирована и приведена в данном отзыве.

В первой главе автор проводит анализ ЖРД как объекта математического моделирования и дает обзор разработанных ранее и используемые на разных этапах жизненного цикла двигателя математических моделей стационарных рабочих процессов двигателя, отмечая методическую преемственность различных моделей и соответствие моделей тому, или иному этапу жизненного цикла ЖРД.

В результате делается вывод о том, что для проведения дальнейших исследований предпочтителен выбор расчетно-экспериментальной математической модели (РЭМ), как модели, преимущества которой определяются тем, что она формируется в результате накопления всей возможной информации о конкретном экземпляре двигателя, начиная со стадии проектирования до его огневых испытаний включительно.

Во второй главе представлен разработанный автором диссертации метод прогнозирования результатов повторных испытаний ЖРД на основе РЭМ.

Согласно постановке задачи, сформулированной автором, конкретный экземпляр двигателя должен сначала пройти огневое испытание, например, по циклограмме КТИ, после чего планируется проведение цикла повторных испытаний этого двигателя в более широких диапазонах режимов работы и внешних условий, например КВИ или СПИ.

Целью работы являются разработка такого метода прогнозирования результатов повторных испытаний ЖРД, который должен обеспечить повышенную достоверность прогноза в широком диапазоне, как изменений

режимов работы, так и внешних условий. Такой метод позволит не только составлять и уточнять программы повторных испытаний, но и избежать ошибок в назначении допустимых значений параметров рабочих процессов, что очень важно не только для эффективной работы САЗ, но и позволит повысить качество проводимых испытаний.

Автором исследованы и подтверждены экспериментальным путём свойства РЭМ. Результаты расчетов по РЭМ успешно коррелируются с результатами расчетов по моделям, разработанным и используемым ранее, в которых были использованы лишь характеристики автономных испытаний агрегатов.

Доказано, что повышение точности и расширение диапазонов расчетного прогнозирования в разработанном методе достигается за счет того, что в РЭМ используются характеристики двигателя, полученные при автономных испытаниях, но при этом и скорректированные по результатам предшествующего испытания. Это позволяет, в свою очередь, учитывать нелинейность характеристик двигателя, влияние которой становится значимой при расширенных диапазонах изменения режимов работы и условий на входе в двигатель.

Приведено подробное описание алгоритма метода прогнозирования по РЭМ, который включает в себя последовательность процедур, проводимых до и после огневого испытания двигателя, по которым идентифицируется и уточняется расчетно-экспериментальная модель.

Представлен сравнительный анализ получаемых по РЭМ прогнозных и реализованных в условиях повторного испытания значений основных контролируемых параметров с использованием экспериментальных данных циклов повторных стендовых испытаний двигателей РД181, РД191 и результатов работы двигателя РД180 при 25-и лётных испытаниях в составе РН «Атлас-В». Каждый цикл повторных испытаний проводился и прогнозировался во всем диапазоне условий эксплуатации данного двигателя. Для двигателя РД180 прогнозирование учитывало смену марки горючего при работе в составе РН.

В результате автором показано, что разработанный метод прогнозирования повторных испытаний на основе РЭМ обеспечивает надежное и адекватное прогнозирование практически во всем рабочем диапазоне условий эксплуатации современных мощных ЖРД. Точность результатов прогнозирования при этом достаточна для большинства задач, решаемых при отработке и эксплуатации таких двигателей.

В третьей главе автором представлен метод оперативного прогнозирования результатов повторных испытаний ЖРД.

Результаты многопараметрических расчетов по РЭМ предлагаются аппроксимировать полиномиальными зависимостями, которые удобно и целесообразно использовать для оперативных прогнозных расчетов, проводимых без сложных вычислительных средств.

Автор представил и исследовал обобщенную символическую математическую модель двухкомпонентного ЖРД, работающего по схеме с дожиганием окислительного генераторного газа в камере, и доказал, что расчетные зависимости, используемые для аппроксимации расчетных данных, однозначно определяются функциями шести переменных (основных параметров, измеряемых при огневых стендовых испытаниях ЖРД) – уровня тяги, соотношения компонентов топлива, температур и давлений компонентов на входе в двигатель.

Экспериментальные данные огневых испытаний двигателей РД181 и РД191, которые проводились в широком диапазоне условий работы, в диссертации успешно аппроксимированы в виде предложенных полиномиальных зависимостей.

Достоверность результатов метода оперативного прогнозирования для практических задач во всем диапазоне условий эксплуатации исследуемых ЖРД подтверждена в работе сравнением результатов огневых испытаний с прогнозными значениями, определенных расчетами по получаемым полиномиальным зависимостям, в соответствующих экспериментам условиях.

Алгоритм формирования полиномиальных зависимостей, как функций шести выбранных переменных, реализован в виде программы для персонального компьютера.

В четвертой главе предлагается применение разработанных методов прогнозирования на основе РЭМ в адаптивных стендовых и бортовых САЗ ЖРД, что позволит повысить безопасность проводимых огневых испытаний и эксплуатации при проведении лётных испытаний.

Предлагается формировать алгоритмы регулирования ЖРД в виде полиномиальных зависимостей углов приводов агрегатов регулирования от выбранных в главе 3 шести переменных. Преимущества такого алгоритма регулирования перед существующими по диапазонам применимости и точности иллюстрируются данными, представленными также в главе 3.

В заключении диссертации приведены основные результаты работы, выводы и рекомендации.

На основании анализа результатов исследований, приведенных в диссертации С.С. Каменского можно сделать следующие выводы и рекомендации.

Научная новизна и практическая значимость работы

В представленной диссертации разработаны и подтверждены экспериментально методы расчетного прогнозирования результатов повторных испытаний ЖРД, отличающиеся от существующих тем, что они обеспечивают более достоверное расчетное прогнозирование параметров ЖРД во всем диапазоне режимов работы и условий на входе в двигатель.

Следует особо отметить, что в качестве основного инструмента расчетного прогнозирования автором впервые выбрана расчетно-экспериментальная математическая модель ЖРД – математическая модель, в которой использованы коэффициенты коррекции, полученные с использованием значений параметров (давлений, расходов, температур, компонентов топлива, оборотов валов турбонасосных агрегатов, положений приводов агрегатов регулирования и т.д.), измеренных на всех режимах предшествующего огневого испытания. Использование коэффициентов коррекций в РЭМ позволяет максимально приблизить характеристики основных агрегатов, полученные при автономных испытаниях, к характеристикам, реализовавшимся при огневом испытании. Уникальным свойством такой модели, предложенной автором для прогнозных расчетов является ее способность существенно расширить границы применяемости, так как в ней учтены особенности, выявленные при предшествующем огневом испытании конкретного экземпляра двигателя.

Важное прикладное значение для проведения инженерных расчетов имеет также разработанный автором метод оперативного прогнозирования, обеспечивающий существенное уменьшение размерности математической модели до количества непосредственно прогнозируемых параметров с использованием полиномиальной регрессии. Полученные автором полиномиальные зависимости могут быть использованы для проведения оперативных расчетов без применения сложной вычислительной техники.

На практике разработанные методы могут быть применены при планировании повторных стендовых и летных испытаний, включая определение пороговых значений контролируемых параметров системы аварийной защиты двигателя.

Результаты диссертационной работы внедрены в штатную документацию АО «НПО Энергомаш им. акад. В.П. Глушко» и успешно используются при проведении повторных огневых испытаний ЖРД РД191.

Степень достоверности и обоснованности научных положений диссертации обеспечена согласованием прогнозируемых по разработанным методикам и реализовавшихся значений основных контролируемых параметров и подтверждена более чем 60 огневыми стендовыми и летными испытаниями двигателей РД181, РД191 и РД180.

Рекомендации по использованию результатов диссертации

Результаты диссертационной работы имеют большую практическую значимость для ракетно-космической отрасли и могут быть использованы при планировании циклов повторных огневых испытаний современных мощных ЖРД на предприятиях-разработчиках и испытателях ракетных двигателей: АО «НПО Энергомаш», АО Кузнецова, АО КБХА и ФКП «НИЦ РКП», включая работу при испытаниях ступеней ракет, двигательных установок и в составе ракет-носителей при одно- и многоразовом применении.

Методы прогнозирования, разработанные автором, могут быть использованы также при разработке и испытании разнообразных управляемых сложных технических систем.

Считаем необходимым сделать по содержанию диссертации следующие замечания:

1. Не рассмотрена возможность распространения полученных результатов на исследования ЖРД, иных схем, кроме схемы с дожиганием в камере сгорания окислительного генераторного газа.

2. Отсутствует оценка интегральной погрешности предложенного метода, действующей в системе «двигатель-система измерения – математическая модель – аппроксимирующий полином».

Замечания носят рекомендательный характер и могут быть учтены автором при проведении дальнейших исследований.

Заключение

Диссертация Каменского С.С. является завершённой научно-квалификационной работой, содержащей совокупность новых научных результатов и положений, их обоснование и применение к практическим задачам доводки, эксплуатации и модернизации современных мощных ЖРД, имеющим большое значение для дальнейшего развития отечественного ракетного двигателестроения.

Диссертация отвечает всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а Каменский С.С. заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – "Тепловые, электrorакетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов".

Диссертационная работа С.С. Каменского рассмотрена на заседании собрания специалистов научно-исследовательского отдела (НИО-520), протокол № 520/01-2017 от «05» июня 2017 г.

Начальник НИО-520

/А.С. Кадишевич/

Главный научный сотрудник,
доктор технических наук, профессор

/А.Г. Галеев/

Начальник лаборатории НИО-520,
кандидат технических наук

/В.А. Парфенников/