



Федеральное космическое агентство  
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](mailto:mail@nic-rkp.ru)

ОГРН 1025005328820 ОКПО 07540930

МИН/КПП 5042006211/504201001

От 30.12.15 № 1-36-1209

На № 010/475 от 9.11.2015г.

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Первый заместитель генерального  
директора по испытаниям и контролю  
качества канд. техн. наук, доцент



В.Н. Кучкин

2015 г.

### ОТЗЫВ

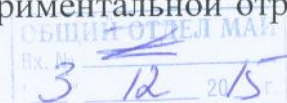
ведущей организации – Федерального казенного предприятия «Научно-  
испытательный центр ракетно-космической промышленности»

на диссертационную работу  
Хохлова Алексея Николаевича

«Совершенствование технологии уточняющих испытаний ракетных  
двигателей малых тяг»,

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

В настоящее время в отечественной космической отрасли ведутся  
опытные разработки двигательных установок средств выведения, разгонных  
блоков и космических аппаратов (КА), работающих на перспективных  
высокоэнергетических экологически безопасных компонентах ракетного  
топлива (КРТ) (кислород+водород, кислород+метан, кислород+керосин).  
Однако в нашей стране нет летных образцов двигателей малых тяг для  
реактивных систем управления на таких компонентах. Поэтому тематика  
рецензируемой работы, содержащей усовершенствованную технологию  
уточняющих испытаний как одного из этапов экспериментальной отработки



(ЭО) ракетных двигателей малой тяги (РДМТ) на перспективных КРТ для сокращения стоимости и времени испытаний, является весьма актуальной.

Автором предложена усовершенствованная технология уточняющих испытаний РДМТ на жидких и газообразных КРТ с использованием рационального планирования экспериментов и построением адекватных регрессионных моделей с оценкой работоспособности двигателей по полученным значениям удельного импульса тяги и температуры конструкции камеры сгорания двигателя. Разработанная технология позволяет уменьшить объем испытаний и формировать регрессионные модели для оценки технических характеристик и оперативной оценки работоспособности РДМТ, что повышает информативность и качество результатов экспериментальной отработки двигателей.

Также автором разработан комплекс программ для построения планов экспериментов при испытаниях РДМТ и статистической обработки результатов испытаний с построением регрессионных моделей. Обоснован способ подтверждения адекватности регрессионных моделей по результатам испытаний РДМТ с использованием F-критерия.

Степень достоверности и обоснованности научных положений предлагаемой технологии обеспечена:

- использованием современных физико-технических методов для решения инженерных задач по определению характеристик РДМТ;
- получением и обоснованием данных по результатам испытаний РДМТ на натурном стенде с сертифицированными средствами измерений;
- согласованием результатов теоретических и экспериментальных исследований с точностью, необходимой для определения характеристик РДМТ конкретной конструкции.

Диссертационная работа имеет традиционную структуру: состоит из введения, основной части, включающей пять глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка использованных источников из

82 наименований, приложения на 38 страницах. Общий объем диссертации составляет 172 страницы.

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, ставится цель работы и задачи исследования, отражены научная новизна, практическая значимость и приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрено состояние вопроса по методологии испытаний РДМТ. Выделены основные проблемы получения информации, рассмотрены существующие методы планирования и обработки результатов испытаний. Определены выходные параметры двигателя (удельный импульс тяги и температура конструкции) и входные факторы (массовые расходы окислителя и горючего) для построения планов экспериментов при испытаниях РДМТ. Подробно рассмотрен вопрос применения экологически безопасных КРТ в ракетно-космической отрасли. Сформулированы основные задачи исследования для достижения цели работы:

- проведение анализа существующих методов математического планирования испытаний, регрессионного анализа и экспериментальных исследований для определения рационального объема параметров и определяющих факторов, на основе которых может быть установлена работоспособность РДМТ;

- определение вида функциональных зависимостей и коэффициентов регрессии выбранных параметров, позволяющих установить работоспособность двигателей, испытанных в лаборатории Московского авиационного института (национального исследовательского университета);

- обобщение результатов исследований с использованием собственных и результатов других авторов для подтверждения возможности использования разработанной технологии стендовых испытаний РДМТ;

- разработка технологии уточняющих испытаний для повышения качества экспериментальной отработки РДМТ.

Во второй главе разработана методика проведения исследования. Описан стенд для огневых испытаний РДМТ на кафедре «Ракетные

двигатели» МАИ, который был модернизирован при участии автора. Для огневых испытаний разработана методика проведения и анализа испытаний РДМТ. При разработке методики испытаний были выбраны РДМТ, работающие на компонентах газообразный кислород+газообразный метан (ДМТ-МАИ-200М) и высококонцентрированная перекись водорода (ВПВ)+керосин (ДМТ-МАИ-500П), тягой 500 Н и 200 Н, соответственно. Также составлены планы проведения испытаний для данных двигателей. Для построения квазинелинейной регрессионной модели температуры стенки необходимо проведение 8 опытов, а для модели второго порядка удельного импульса тяги – 18. Приведена методика обработки результатов испытаний. Автором для планирования и обработки результатов испытаний создано программное обеспечение (ПО). Программа предназначена для построения планов полного факторного эксперимента, дробного факторного эксперимента, плана Хартли, плана Бокса-Вилсона для испытаний ракетных двигателей малых тяг и построения регрессионных моделей: линейной, квазинелинейной, 2-го порядка. Программа разделена на два основных, связанных между собой модуля, и два вспомогательных.

В третьей главе приведены результаты исследований разработанной методики анализа испытаний двигателей на экологически безопасных компонентах топлива: ВПВ+керосин и газообразные кислород+метан. Сформированы регрессионные модели по результатам испытаний и проведен их анализ. Проведена оценка соответствия параметров (удельного импульса тяги и температуры стенки) двигателя заданным требованиям с помощью разработанной методики испытаний. Стоит отметить, что относительная ошибка полученных регрессионных моделей не превышает 2,5%.

В четвертой главе приведены результаты применимости разработанной технологии для испытаний двигателей на КРТ газообразный кислород+газообразный водород и АТ+ММГ. Для подтверждения применимости разработанной технологии, помимо своих собственных результатов, были использованы результаты испытаний, выполненных на

других предприятиях: ГНЦ ФГУП «Исследовательский центр имени М.В.Келдыша» и EADS Astrium. Сделан вывод о том, что для различных видов топлив, модели имеют одинаковый вид.

На основе анализа полученных данных подтверждена применимость разработанной методики для оценки результатов испытаний РДМТ на экологически безопасных и токсичных КРТ.

В пятой главе представлена технология уточняющих испытаний для вновь разрабатываемых РДМТ на жидких и газообразных экологически безопасных КРТ для сокращения объема испытаний и построения регрессионных моделей основных параметров двигателей. Выделены основные преимущества усовершенствованной технологии:

- технологию можно использовать для испытаний различных РДМТ по компонентам и уровням тяг;

- в отличие от существующих технологий, разработанная базируется на оптимизации количества параметров и факторов. Основными параметрами двигателя являются удельный импульс тяги, который показывает энергетическую эффективность двигателя, и температура стенки для оценки теплового состояния конструкции, а факторами являются массовые расходы КРТ. Также, в отличие от существующих технологий, предложенная автором позволяет:

- сократить количество испытаний, сохраняя при этом оптимальный уровень отработки РДМТ; для удельного импульса тяги количество экспериментов составляет 18, а для температуры стенки – 8;

- по результатам экспериментов составляются регрессионные модели, которые в дальнейшем используются для подтверждения требований на двигатель и оперативной оценки параметров РДМТ, что, в свою очередь, повышает информативность и качество результатов испытаний.

В заключении подведены итоги проведенного исследования.

По теме диссертации опубликовано 26 работ, из них 6 статей в рецензируемых журналах и изданиях, рекомендованных ВАК и 1 статья в

зарубежном научно-техническом журнале, получено 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, 17 материалов докладов были представлены в трудах международных и всероссийских конференций. Автореферат диссертации и публикации автора достаточно полно отражают содержание диссертационной работы.

Результаты исследований и разработок запланированы к применению на нашем предприятии при проведении испытаний ЖРДМТ в части составления циклограмм испытаний и планов экспериментов, а также при проведении статистической обработки результатов испытаний. Разработанная методика позволит оперативно оценивать полученные результаты и, в некоторой степени, спрогнозировать характеристики двигателей на начальных этапах экспериментальной отработки.

Методика формирования планов и статистической обработки результатов, а также полученные регрессионные модели могут быть использованы на предприятиях ракетно-космической отрасли (КБХиммаш им. А.М. Исаева, ФГУП «НИИМАШ» и др.) при проведении испытаний РДМТ.

Работа имеет практическую значимость для ракетного двигателестроения. Предложенная усовершенствованная технология испытаний РДМТ позволяет сократить объем наземной экспериментальной отработки, а полученные на ее основе регрессионные модели могут использоваться при прогнозировании параметров двигателей, в системах управления стендами и КА.

Положительно оценивая работу в целом, считаем необходимым высказать замечания, которые не касаются сущности диссертационного исследования и его главных результатов.

Автор рассматривает только стационарный режим работы РДМТ. В работе приведены основные параметры РДМТ – удельный импульс тяги и температура конструкции, но исходя из того, что основным режимом работы РДМТ импульсный, не раскрываются такие параметры, как время импульса,

скважность импульса и т.д. В работе не рассмотрен такой параметр как ресурс работы РДМТ, который является одним из основных для такого рода двигателей.

Отмеченные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы и не влияют на основные результаты.

Диссертационная работа «Совершенствование технологии уточняющих испытаний ракетных двигателей малых тяг» является завершенной научно-квалификационной работой, в которой представлено решение важной технической задачи сокращения объема экспериментальной отработки РДМТ, работающих на жидких и газообразных КРТ, и отвечает требованиям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Хохлов Алексей Николаевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании секции «С» научно-технического совета ФКП «НИЦ РКП», протокол № 4 от 30 ноября 2015 г.

Главный научный сотрудник  
доктор технических наук, профессор

А.Г. Галеев

Начальник комплекса стендовых  
испытаний

В.В. Борисов

Подписи А.Г. Галеева и В.В. Борисова заверяю  
Ученый секретарь



Г.С. Лещенко