

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, профессора

Ягодникова Дмитрия Алексеевича

на диссертационную работу **Хохлова Алексея Николаевича** на тему **«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 имеется тенденция разработки средств выведения, разгонных блоков и космических аппаратов, с учетом применения в качестве топлив высокоэнергетических и экологически безопасных компонентов, в частности кислород+водород, кислород+метан. Однако в нашей стране отсутствует практика использования маршевых ЖРД и ракетных двигателей малой тяги (РДМТ) на таких компонентах. Тем не менее российскими организациями, например, КБ Химмаш им. А.М. Исаева, НИИМаш, ИЦ им. М.В. Келдыша проводятся научно-исследовательские работы по проектированию и наземной стендовой отработке такого рода двигателей. Поэтому тематика диссертационной работы, содержащей усовершенствованную технологию уточняющих испытаний РДМТ - одного из этапов экспериментальной отработки, является актуальной.

Во введении рассмотрены ключевые проблемы использования экологически чистых компонентов топлива в ракетном двигателестроении, отражается актуальность научного исследования, формулируются цель и задачи работы, отражены научная новизна, практическая значимость, 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

Вх. №  
" 3 " 12 2015г.

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 топлив в ракетно-космической отрасли. Сформулированы основные задачи исследования для достижения цели работы, которые сочетают в себе проведение экспериментальных исследований и разработку математического аппарата для обработки большого объема экспериментальных данных.

Во второй главе рассмотрены методика проведения экспериментального исследования РДМТ, стенд для огневых испытаний РДМТ, который был модернизирован при участии автора на кафедре «Ракетные двигатели» МАИ (НИУ). Для проведения 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 высококонцентрированный пероксид водорода+керосин (ДМТ-МАИ-500П) тягой 500 Н и 200 Н соответственно. Также составлены планы проведения испытаний данных двигателей. Для построения квазинелинейной регрессионной зависимости температуры стенки с удовлетворительной точностью автором было показано, что необходимо 8 огневых испытаний, а для удельного импульса тяги – 18. Далее приведена методика обработки экспериментальных данных. Автором для планирования и обработки результатов испытаний РДМТ создано специализированное программное обеспечение, предназначенное для построения планов полного факторного эксперимента, дробного факторного эксперимента, плана Хартли, плана Бокса-Вилсона и построения регрессионных моделей: линейной, квазинелинейной, 2-го порядка.

В третьей главе приведены результаты апробации разработанной методики анализа испытаний двигателей на экологически безопасных

компонентах топлива: высококонцентрированного пероксида водорода и керосина, а также газообразных кислорода и метана. Сформированы регрессионные модели по результатам испытаний и проведен их анализ. Выполнена 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 газообразных кислороде и водороде, а также на штатных компонентах: азотном тетраоксиде и несимметричном диметилгидразине (АТ+ММГ). Для подтверждения применимости разработанной методологии помимо своих собственных результатов были использованы результаты испытаний ИЦ им. М.В.Келдыша и EADS Astrium.

На основе анализа полученных данных подтверждена применимость разработанной методики для оценки результатов испытаний на экологических безопасных и токсичных компонентах ракетного топлива.

В заключение исследования, которое автор не вполне удачно выделил в отдельную главу №5, представлена методология проведения уточняющих испытаний для вновь разрабатываемых РДМТ на жидких и газообразных компонентах топлива, позволяющая в определенной степени сократить объем огневых стендовых испытаний.

Достоверность и обоснованность полученных в результате экспериментальных исследований и вторичной обработки данных обеспечена автором за счет использования современных физико-технических методов решения инженерных задач по определению характеристик РДМТ; использованием в процессе проведения экспериментальной отработки сертифицированного оборудования и поверенных средств измерений; согласованием результатов вторичной обработки с точностью, необходимой для определения характеристик РДМТ конкретной конструкции.

Работа имеет практическую значимость для дальнейшего усовершенствования методик испытаний РДМТ, что в перспективе позволяет сократить объем наземной экспериментальной отработки последних.

Опубликованные работы достаточно полно отражают содержание диссертации. Работа апробирована на Всероссийских и Международных научно-технических семинарах и конференциях; по теме диссертации имеется восемнадцать публикаций, шесть из которых представлены в изданиях, входящих в список рекомендуемых ВАК научных журналов. Кроме того, Хохлов А.Н. является соавтором двух официально зарегистрированных программных продуктов для ЭВМ, используемых для автоматизации огневых испытаний ЖРД МТ и обработки их результатов.

Автореферат написан грамотным техническим языком и соответствует содержанию диссертации.

В качестве замечаний и недостатков можно указать следующие.

1. В главе №1 приводятся общеизвестные положения, определения и данные по разработке, экспериментальной отработке жидкостных ракетных двигателей и математической статистике.

2. В экспериментальной части работы отсутствует информация о первичных измерительных преобразователях, алгоритмах вторичной обработки, предельной погрешности регистрируемых величин (давлений, температур, расходов и т.д.) и погрешности характеристик РДМТ (удельный импульс), определяемых косвенным способом. Кроме того, не рассмотрен вопрос влияния погрешности измерений на точность регрессионного анализа.

3. В регрессионной модели удельного импульса не учтена зависимость коэффициента избытка окислителя (в работе расхода варьируемого компонента) от полноты сгорания топлива, которая является сильно нелинейной.

4. В работе практически отсутствует сравнение собственных данных (например, значений удельного импульса) с результатами экспериментальной

отработки РДМТ и ЖРДМТ КБХиммаш им. А.М. Исаева и НИИМаш- только обработка данных ИЦ им. М.В. Келдыша, EADS.

Отмеченные замечания не снижают общего положительного впечатления о диссертационной работе.

Считаю, что диссертационная работа А.Н. Хохлова «Совершенствование технологии уточняющих испытаний ракетных двигателей малых тяг» является завешенной научно-квалифицированной работой, в которой представлено решение задачи сокращения объема экспериментальной отработки РДМТ, работающих на жидких и газообразных топливах. Диссертационная работа полностью отвечает требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, 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».

Официальный оппонент, заведующий кафедрой

«Ракетные двигатели»

МГТУ им. Н.Э. Баумана,

д.т.н., профессор

*Д.А. Ягодников*  
27/11 2015 г.

Д.А. Ягодников

Почтовый адрес: 105005, г. Москва,

2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Тел.: 8499-267-89-03

e-mail: [daj@bmstu.ru](mailto:daj@bmstu.ru)

Подпись Д.А. Ягодникова удостоверяю



А. Г. МАТВЕЕВ

УПРАВЛЕНИЯ КАДРОВ

ТЕЛ 8499-263 67-69