На правах рукописи

Каменский Сергей Станиславович

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПОВТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ЖРД НА ОСНОВЕ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Специальность 05.07.05

Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки

летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Химки – 2017

Работа выполнена в АО «НПО ЭНЕРГОМАШ им. академика В.П.Глушко»

Научный руководитель:	Доктор технических наук Мартиросов Давид Суренович
Официальные оппоненты:	Бершадский Виталий Александрович – доктор технических наук, старший научный сотрудник, федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения», главный научный сотрудник. Бобров Александр Николаевич – кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана (национальный исследовательский университет)», доцент кафедры «Ракетные двигатели».
Ведущая организация:	Федеральное казенное предприятие «Научно-испытательный центр ракетно-космической промышленности»

Защита состоится « 11 » сентября 2017 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д212.125.08, созданного на базе Московского авиационного института (национального исследовательского университета) по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского авиационного института (национального исследовательского университета) http://www.mai.ru/upload/iblock/704/diss_kamensky.pdf

Автореферат разослан «____»_____2017г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.125.08,
д.т.н., профессор Зуев Юрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Современный ЖРД является сложной технической системой, трудоемкой при проектировании, изготовлении, испытании и эксплуатации, имеет разветвленную пневмогидравлическую схему и высокую степень функциональной взаимосвязи между агрегатами. Отличительной особенностью современного ЖРД является огромная мощность, приходящаяся на единицу его массы, и основные процессы протекают с большими скоростями переноса энергии и массы, с большими градиентами температур в компонентах топлива и напряжений в металле конструкций.

В настоящее время к существующим и вновь проектируемым ЖРД предъявляются высокие требования по надежности, многократности использования и экономичности.

Реализация таких требований становится возможной с применением математического моделирования рабочих процессов на всех этапах жизненного цикла двигателя – разработки, доводки и эксплуатации в составе ракеты-носителя.

По мере доводки вновь разрабатываемого двигателя возрастает объем информации о нем, и с учетом ее совершенствуются математические модели.

Все это объясняет постоянное внимание специалистов к совершенствованию методов моделирования рабочих процессов ЖРД.

В настоящее время существует и активно используется ряд математических моделей, уровень детализации и достоверности которых соответствуют конкретным этапам жизненного цикла двигателя.

Однако, как показала практика, использование ранее разработанных и апробированных методов решения проблемных задач, возникших в связи с модернизацией существующих двигателей, обеспечением их нормальной работы на режимах форсирования, глубокого дросселирования и в расширенных диапазонах условий работы может привести к недостоверному прогнозированию параметров двигателя в цикле повторных огневых испытаний. При таких испытаниях, в ряде

случаев, двигатель в соответствии с циклограммой функционирует на границах диапазонов условий эксплуатации, заданных тактико-техническими требованиями 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. Всё это повышает вероятность возникновения нештатных ситуаций в случае ошибок в назначении допустимых значений параметров рабочих процессов на планируемом испытании.

В настоящее время задача прогнозирования решается с использованием модели конкретного экземпляра двигателя, формируемой на базе штатной математической модели ЖРД, отражающей его схему и дополненной характеристиками агрегатов, полученных при автономных испытаниях. Однако, как показывает практика, такая модель полностью не обеспечивает надежный расчетный прогноз для испытаний, проводимых на границах и за границами рабочих диапазонов условий эксплуатации двигателя.

Таким образом, повышение достоверности расчетного прогнозирования параметров рабочих процессов в широких диапазонах изменения условий испытаний на основе адекватных математических моделей для повышения безопасности повторных огневых испытаний ЖРД является актуальной задачей.

Цель и задачи исследования

Цель работы – повышение достоверности расчетного прогнозирования результатов планируемых испытаний в широких диапазонах изменений режимов работы и внешних условий с целью обеспечение безопасности повторных огневых испытаний ЖРД. Для достижения этой цели решены следующие основные задачи:

1. Исследована иерархия математических моделей рабочих процессов ЖРД с целью определения и классификации особенностей их структуры на разных стадиях жизненного цикла двигателя.

2. Определены и подтверждены экспериментальными данными свойства математической модели ЖРД, откорректированной по телеметрии испытания, предшествующего прогнозируемому, – расчетно-экспериментальной модели (РЭМ)

как модели, наиболее полно отражающей индивидуальные характеристики функционирования конкретного экземпляра двигателя.

3. Показано, что зависимости, используемые для прогнозирования параметров ЖРД, выполненного по схеме с дожиганием генераторного газа, можно однозначно определить как функции шести переменных: уровня тяги, соотношения компонентов топлива, а также температур и давлений компонентов на входе в двигатель. Выводы подтверждены экспериментальными данными огневых испытаний.

4. Разработан метод прогнозирования результатов повторных испытаний ЖРД на основе РЭМ. Показано, что этот метод отличается от существующих повышенной точностью, которая подтверждается в широких диапазонах изменений режимов работы и внешних условий, а также при изменении марки горючего.

5. Разработан метод прогнозирования на основе аппроксимации результатов расчетов по РЭМ в виде полиномиальных зависимостей – метод оперативного прогнозирования результатов повторных испытаний. Эти зависимости могут применяться при необходимости оперативного прогнозирования в цикле повторных огневых испытаний ЖРД без привлечения сложных электронно-вычислительных средств.

6. Разработано программно-математическое обеспечение оперативного прогнозирования параметров рабочих процессов ЖРД в цикле повторных огневых испытаний.

7. Проведены обработка и анализ представительной выборки результатов огневых стендовых и летных испытаний ЖРД, доказывающие преимущества разработанных методов прогнозирования.

Научная новизна

1. Доказано, что применение для прогнозирования результатов повторных испытаний расчетно-экспериментальной математической модели (РЭМ) конкретного экземпляра двигателя, отражающей не только описание рабочих процессов в двигателе конкретной сборки, но и особенности его функционирования

в процессе огневых испытаний, повышает достоверность результатов прогнозирования.

2. Показано, что прогнозируемые по РЭМ параметры ЖРД, выполненного по схеме с дожиганием генераторного газа, могут быть аппроксимированы в виде полиномиальных функций шести переменных: уровня тяги, соотношения компонентов топлива, температур и давлений компонентов топлива на входе в двигатель.

3 Разработаны и подтверждены экспериментально методы прогнозирования результатов повторных испытаний на основе РЭМ, отличающиеся от существующих сохранением повышенной точности в более широких диапазонах изменений режимов работы и внешних условий.

4. Разработан и подтвержден экспериментально алгоритм регулирования ЖРД в виде зависимостей углов приводов агрегатов регулирования от 6 переменных: уровня тяги, соотношения компонентов топлива, температур и давлений компонентов топлива на входе в двигатель. Алгоритм регулирования представлен полиномами, аппроксимирующими 6-мерномые массивы точек, определенных по РЭМ в требуемых диапазонах работы двигателя.

Теоретическая и практическая значимость работы

Применение разработанных методов прогнозирования обеспечивает высокую точность определения параметров рабочих процессов ЖРД для планируемых огневых испытаний, снижая, тем самым, вероятность возникновения аварийных ситуаций. Расчет прогнозируемых параметров с использованием полиномиальных зависимостей от уровня тяги, соотношения компонентов топлива, температур и давлений компонентов топлива на входе в двигатель может производиться без использования сложной электронно-вычислительной техники и не требует привлечения специалистов высокой квалификации.

Кроме того, разработанные методы прогнозирования могут быть применены для повышения точности определения положений приводов агрегатов управления при настройке двигателя на повторное испытание, а также повышения точности

определения пороговых значений контролируемых параметров двигателя для САЗ в широком диапазоне условий эксплуатации двигателя.

Методология и методы исследования

Методической основой исследований являются работы отечественных ученых в области математического моделирования сложных систем, а также опыт практического моделирования рабочих процессов ЖРД, накопленный в АО «НПО Энергомаш им. академика В.П.Глушко».

Основная особенность предлагаемого метода состоит в том, что он в полной мере учитывает нелинейности, проявляющиеся во взаимосвязях между параметрами рабочих процессов, заложенных в математической модели, при расширении диапазонов условий испытания, обеспечивая при этом необходимую точность расчетов.

Следствием этого является достоверное прогнозирование параметров двигателя в случаях, когда условия прогнозируемого испытания, например, по значениям тяги, соотношениям компонентов, температурам и давлений компонентов на входе в двигатель существенно отличаются от условий предшествующего испытания.

Предлагаемый метод отличается от существующих методов прогнозирования тем, что все процедуры непротиворечиво связаны в едином универсальном алгоритме, который может быть применен для ЖРД, работающих в широком диапазоне изменения условий на входе в двигатель.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработанные методы прогнозирования результатов повторных испытаний ЖРД: метод прогнозирования на основе РЭМ и метод оперативного прогнозирования на основе аппроксимации результатов РЭМ.

2. Свойства РЭМ, обеспечивающие повышение точности прогнозирования результатов повторных огневых испытаний и расширение диапазонов адекватного

прогнозирования за счет уточнения характеристик агрегатов двигателя, полученных при автономных испытаниях, с помощью телеметрической информации огневого испытания, предшествующего прогнозируемому.

3. Преимущества предлагаемых методов, основанные на свойствах РЭМ отражать индивидуальные нелинейные характеристики двигателя, влияние которых становится значимым при расширении диапазонов режимов и условий на входе в двигатель.

4. Результаты расчетных и экспериментальных исследований, подтверждающие эффективность предлагаемых методов.

Достоверность результатов исследования

обеспечена совпадением результатов расчетных прогнозов с данными стендовых и летных испытаний ЖРД РД181, РД191 и РД180 с точностью, достаточной для решения практических задач сопровождения доводки, контрольно-технологических испытаний и эксплуатации двигателя.

Апробация результатов

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на 65-м Международном Конгрессе Астронавтики (IAC) в Торонто, 29 сентября – 03 октября 2014 г. : IAC-14, C4, P, 29, x21461 Каменский С.С., Мартиросов Д.С., Скибин С.А., Судаков В.С. Система функциональной диагностики ЖРД.

Реализация результатов работы

Методика, созданная на основе разработанных методов прогнозирования, применяется штатно при проведении повторных огневых испытаний ЖРД РД191 в АО «НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко», а также при анализе КТИ и ЛИ двигателей РД 180.

Личное участие

Личное участие автора заключается в

- определении и подтверждении экспериментальными данными свойств РЭМ, обеспечивающие повышение точности прогнозирования результатов повторных огневых испытаний и расширение диапазонов адекватного прогнозирования,

- разработке методов и алгоритмов прогнозирования результатов повторных испытаний ЖРД на основе РЭМ, отличающихся от существующих повышенной точностью, которая подтверждается в широких диапазонах изменений режимов работы и внешних условий,

- проведении анализа представительной выборки экспериментальных данных, подтверждающих эффективность разработанных методов и алгоритмов.

Публикации

По теме диссертации автором опубликовано 4 научных работы в изданиях, входящих в список ВАК, из них 1 без соавторов.

Структура и объем диссертации

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

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, излагаются цели и задачи диссертационной работы.

Первый раздел посвящен выбору математической модели ЖРД, обеспечивающей повышение достоверности прогнозирования результатов повторных испытаний двигателя, в иерархии, отражающей виды и назначения математических моделей стационарных рабочих процессов ЖРД, табл.1.

Таблица 1 - Иерархия математических моделей стационарных рабочих процессов ЖРД

Этап отработки ЖРД	Вид модели	Назначение модели
Начальный уровень - создание блоков, из которых по агрегативному принципу будут построены последующие модели	Уравнения, описывающие основные рабочие процессы	Моделирование процессов в отдельных агрегатах
Первый уровень – проектирование, подготовка к изготовлению двигателей	Математическая модель типа двигателя, объединяющая модели агрегатов в соответствии с выбранной ПГС	Выбор оптимальной схемы ЖРД и расчет основных параметров, энергетическая увязка параметров
Второй уровень (начало идентификации) - планирование экспериментальной отработки конкретного экземпляра двигателя	Математическая модель конкретного экземпляра двигателя: коррекция математической модели двигателя по результатам автономных испытаний конкретных агрегатов	Прогноз параметров рабочих процессов данного двигателя на требуемых установившихся режимах работы до начала испытаний
Третий уровень (продолжение идентификации) - проведение огневых испытаний и их анализ	РЭМ - коррекция математической модели конкретного экземпляра двигателя по результатам огневого испытания	Анализ результатов проведенного огневого испытания, прогноз результатов повторного испытания

Анализ иерархии существующих моделей стационарных рабочих процессов и их информационной емкости на разных стадиях жизненного цикла ЖРД показал,

что для прогнозирования результатов повторных испытаний наибольший интерес представляет РЭМ, в которой заложена информация, накопленная, начиная со стадии проектирования двигателя до его огневого испытания. Главной особенностью РЭМ является то, что в ней характеристики агрегатов конкретного экземпляра двигателя, полученные при автономных испытаниях, скорректированы по результатам огневого испытания, предшествующего прогнозируемому.

Рассмотрены основные положения метода коррекции модели, результатом которого является мультипликативное введение корректирующих коэффициентов в уравнения напорных, мощностных характеристик основных и бустерных турбонасосных агрегатов, а также в коэффициенты сопротивления трактов охлаждения камер, магистралей питания турбин бустерных агрегатов.

Полученные результаты позволяют определить РЭМ как расчетно-экспериментальный «портрет» конкретного экземпляра двигателя, отражающий не только описание рабочих процессов в двигателе конкретной сборки, но и особенности его функционирования в процессе огневых испытаний.

Во втором разделе представлен разработанный метод прогнозирования результатов повторных испытаний ЖРД на основе РЭМ.

Метод разработан с целью обеспечения безопасности проведения повторных огневых испытаний за счет снижения вероятности возникновения аварийных ситуаций, т.е. устранения ошибок в назначении допустимых значений параметров рабочих процессов на планируемых испытаниях.

Областью применения предлагаемого метода являются не только повторные стендовые, но и летные испытания, включая испытания, проводимые со сменой марки топлива.

Повышение достоверности прогнозирования достигается за счет использования в РЭМ характеристик конкретного экземпляра двигателя, скорректированных по результатам огневого испытания, предшествующего планируемому. Именно эта особенность РЭМ позволяет отразить индивидуальные нелинейные характеристики модели, проявляющиеся во взаимосвязях параметров, описываемых математической моделью, при расширении диапазонов изменения

режимов и условий на входе в двигатель и, следовательно, обеспечивает необходимую точность расчетного прогнозирования.

Все эти свойства РЭМ выявлены и подтверждены данными огневых испытаний.

Например, на рисунке 1 приводятся сравнение невязок Δ (в процентах) данных телеметрии основных параметров рабочих процессов двигателя РД191, зафиксированных во время его работы в составе РН «Ангара» и расчетных данных, полученных по РЭМ и математической модели ЖРД, уточненной только характеристиками автономных испытаний агрегатов (модель 2-го уровня).

Используемые на рисунке 1 сокращения обозначают следующие параметры : КПВ – обороты вала турбонасосного агрегата, КБО – обороты вала бустерного насоса окислителя, КБГ – обороты вала бустерного насоса горючего, ДГПН-2 – давление после второй ступени насоса горючего, ДГПН-1 – давление после первой ступени насоса горючего, ДГПД – давление после дросселя горючего, ДГПР – давление после регулятора расхода горючего, ТГДК – температура горючего на входе в смесительную головку камеры, ДГДК – давление горючего на входе в смесительную головку камеры.

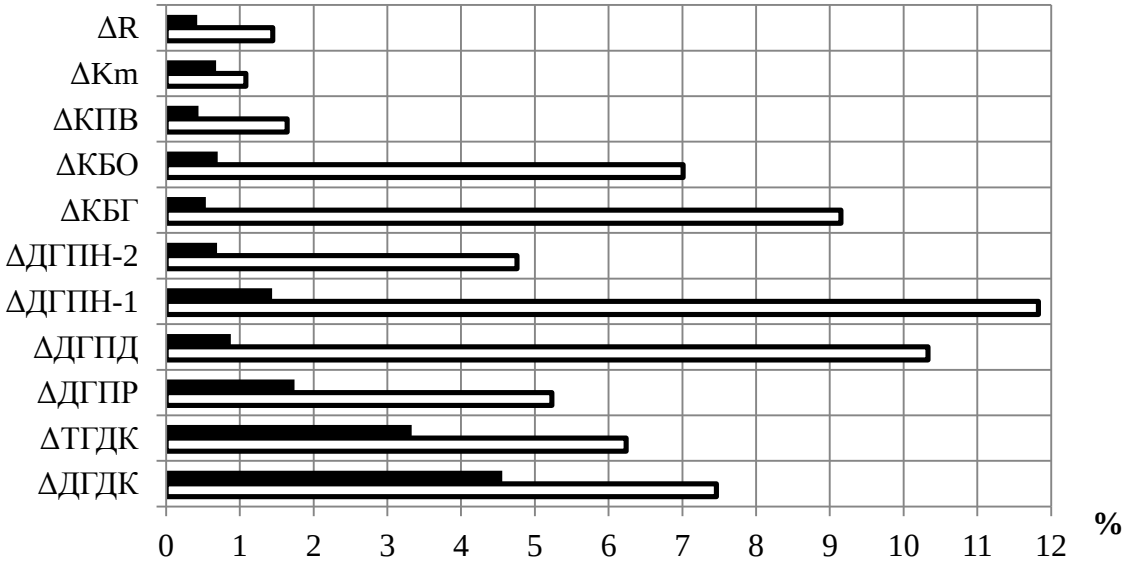


Рисунок 1 - Сравнение невязок Δ (в процентах) измеренных при работе двигателя РД191 в составе РН «Ангара» и расчетных значений параметров на режиме R=1,00, K_m =2,78 по РЭМ (■) и по математической модели 2-го уровня (□).

Расчеты, рисунок 1, производились для полетных значений условий на входе в двигатель, отличных от условий КТИ двигателя, по которому сформирована РЭМ. Тем не менее, расчетные значения по РЭМ наиболее близки к измеренным в полете по сравнению с данными модели 2-го уровня и находятся в пределах от 0,5% до 4,5%.

Этот пример, наряду со многими другими, приведенными в работе, иллюстрирует свойство РЭМ рассчитывать параметры рабочих процессов с большей точностью, чем по другим математическим моделям при расширении диапазонов изменения условий на входе.

Для оценки точности результатов и диапазона адекватности разработанного метода прогнозирования повторных испытаний на основе РЭМ использованы результаты циклов повторных стендовых испытаний двигателей РД181, РД191 и результатов работы двигателя РД180 в составе 25-и РН «Атлас-V». Каждый цикл повторных испытаний представляет собой совокупность экспериментальных данных, полученных во всем диапазоне условий эксплуатации данного двигателя.

Отметим, что в случае двигателя РД180 прогнозирование проводилось с учетом смены марки горючего при работе в составе РН.

В работе проведено сравнение получаемых прогнозируемых и реализованных значений параметров в условиях циклов повторных испытаний и подтверждено преимущество предлагаемого метода по точности расчетных оценок и реализуемому диапазону достоверного прогнозирования.

С точки зрения обеспечения безопасности повторных испытаний можно считать наиболее важным надежное прогнозирование таких параметров, как

- параметры, определяющие экстремальные условия испытаний,

- основные контролируемые параметры при всевозможных сочетаниях режимов работы и условий на входе в двигатель.

Исходя из этого, для анализа точности прогнозирования и сравнения экспериментальных и прогнозных значений были выбраны следующие параметры: температура газа за турбиной (КТГ), обороты валов основных и бустерных насосов (КПВ, КБГ, КБО) а также R и K_m.

Оценки точности результатов метода прогнозирования, полученные сравнением экспериментальных данных и ожидаемых значений, определенных методом прогнозирования на основе РЭМ, приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Диапазон отклонений (в %) прогнозируемых значений основных контролируемых параметров от их экспериментальных значений, полученных в цикле повторных испытаний

диапазон отклонений	ΔКТГ	ΔКПВ	ΔКБГ	ΔКБО	ΔR	ΔK_m
Двигатель РД 181						
от	-0,86	-0,81	-1,32	-1,53	-1,27	-1,24
до	1,26	0,32	0,28	2,60	0,48	0,83
Двигатель РД 191						
от	-2,50	-0,82	-0,29	-2,39	-0,64	-1,80
до	3,05	1,34	2,74	5,28	2,50	0,52
Двигатель РД 180 (25 полетов РН «Атлас-V»)						
от	-2,68	-1,16	-3,12	-2,64	-0,18	-3,10
до	3,92	1,81	2,72	1,26	2,22	1,81

Показано, что предложенный метод прогнозирования повторных испытаний на основе РЭМ адекватен практически во всем диапазоне условий эксплуатации двигателей РД181 и РД191, а также практически во всем диапазоне эксплуатации двигателя РД180 в составе РН «Атлас-V» с точностью, достаточной для большинства задач, решаемых при доводке и эксплуатации двигателя.

В третьем разделе представлен разработанный метод оперативного прогнозирования результатов повторных испытаний ЖРД, использующий результаты расчетов, выполненных по РЭМ в широком диапазоне условий работы двигателей.

Очевидно, что прямое применение РЭМ для оперативных расчетов – достаточно сложная и трудоемкая процедура, требующая сопровождения специалистами высокой квалификации.

С другой стороны, при экспериментальной доводке двигателя для решения ряда инженерных задач необходим метод, позволяющий оперативно и без

привлечения сложных вычислительных средств осуществлять адекватное прогнозирование.

Для решения этой задачи разработан метод оперативного прогнозирования в цикле повторных испытаний ЖРД, основная идея которого заключается в аппроксимации расчетов по РЭМ полиномами специального вида по методу наименьших квадратов.

В данном разделе показано, что задача аппроксимации однозначно решается описанием параметров рабочих процессов ЖРД, выполненного по схеме с дожиганием генераторного газа, как функций шести параметров – уровня тяги R, соотношения компонентов топлива K_m, температур и давлений компонентов топлива на входе в двигатель

$$X = F\,(R, K_m, T_{\text{ок вх}}, T_{\text{г вх}}, p_{\text{ок вх}}, p_{\text{г вх}}), \qquad (1)$$

где X – прогнозируемый параметр.

Такой вывод сделан на основе анализа структуры функциональных связей параметров рабочих процессов, описываемых математической моделью, и подтвержден с необходимой точностью экспериментальными данными, полученными в цикле повторных огневых испытаний ЖРД РД181, РД191. При этом для аппроксимации измеренных значений параметров X использовались полиномы вида

$$F(x_1, x_2, \dots, x_6) = a_0 + \sum_{i=1}^{6} a_i\, x_i + \sum_{i=1}^{6} a_{ii}\, x_i^2 + \sum_{\substack{i=1 \\ j=2>i}}^{6} a_{ij}\, x_i\, x_j, \qquad (2)$$

где произведения $x_i x_j$ – неповторяющиеся пары переменных. Общее число коэффициентов – 28, а в качестве независимых переменных – измеренные значения параметров, указанные в (1) в скобках.

Удачная аппроксимация экспериментально полученных данных полиномами (2) как функций от экспериментальных значений шести переменных, определенных выше, подтверждает выводы о достоверности такого представления.

Например, в таблице 3 приводятся оценки точности аппроксимации полиномами вида (2) экспериментальных данных цикла повторных данных ЖРД РД181 1А.

Таблица 3 - Диапазон отклонений (в %) экспериментальных данных от аппроксимирующего полинома во всем диапазоне условий цикла повторных испытаний РД181 1А

диапазон отклонений	ΔКТГ	ΔКПВ	ΔКБГ	ΔКБО	ΔR	ΔKm
от	-0,42	-0,21	-0,93	-0,27	-0,82	-1,94
до	0,60	0,35	1,04	0,36	+0,82	+0,80

В третьем разделе также представлен алгоритм метода оперативного прогнозирования и оценки точности результатов и диапазонов адекватности.

Примером последовательности расчетных процедур, составляющих алгоритм метода оперативного прогнозирования, могут служить описанные в данном разделе работы этапы оперативного прогнозирования параметров двигателя РД181.

Согласно алгоритму метода оперативного прогнозирования исходная математическая модель РД181, предварительно, до КТИ, уточняется характеристиками автономных испытаний агрегатов конкретного экземпляра двигателя. Затем, по результатам проведенного КТИ эта модель корректируется с целью формирования РЭМ. Диапазоны изменения 6-и независимых переменных (например, R, K_m и условий на входе в двигатель) разбиваются на k_i интервалов каждый, где i – номер переменной и проводятся расчеты по РЭМ прогнозируемых значений параметров рабочих процессов данного двигателя при различных сочетаниях указанных независимых переменных. В результате получаем таблично заданную функцию – таблицу размером $6(k_1+1)(k_2+1)\ \dots(k_6+1)$, каждой строчке которой значениям переменных соответствует расчетное значение прогнозируемого по РЭМ параметра, аппроксимируемое затем полиномом вида (2).

Получаемые расчетные зависимости дают возможность оперативно и с необходимой точностью прогнозировать значения параметров двигателя при любых физически реализуемых сочетаниях режимов работы и условий на входе в двигатель.

Подчеркнем, что для получения этих результатов используется только следующая информация о конкретном экземпляре двигателе:

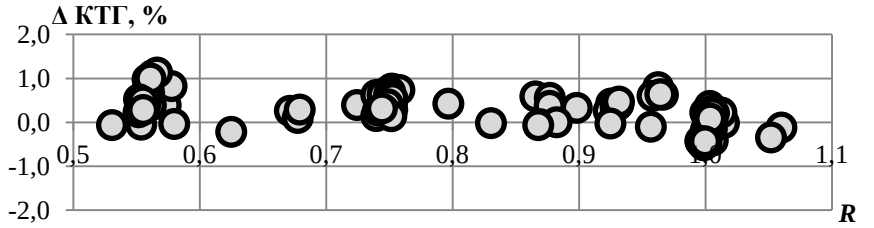
-характеристики агрегатов, полученные при автономных испытаниях;

-результаты КТИ;

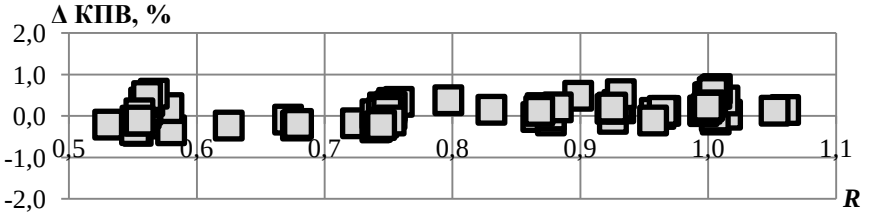
-диапазоны условий проведения цикла повторных огневых испытаний.

Оценка точности метода оперативного прогнозирования произведена по каждому параметру путем сравнения его экспериментальных значений с результатами прогнозирования.

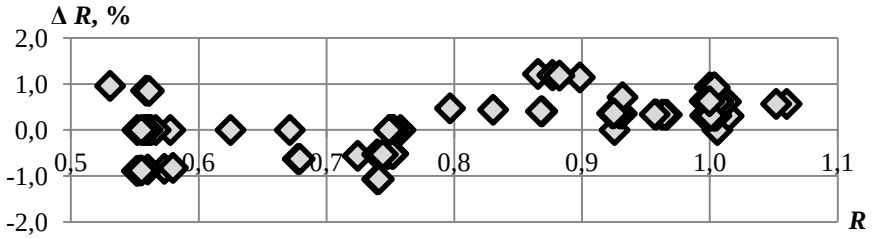
На рисунках 2(а, б, в, г) показаны оценки точности метода оперативного прогнозирования для основных контролируемых параметров двигателя РД181 1А, по отклонениям их экспериментальных значений от прогнозируемых. Для каждого параметра отклонения приводятся в зависимости от значения уровня тяги.



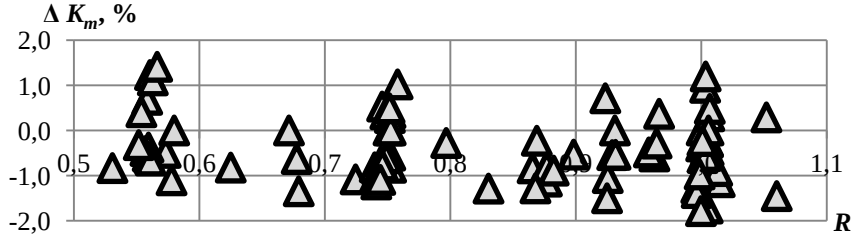
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2 - РД181. Точность оперативного прогнозирования параметра

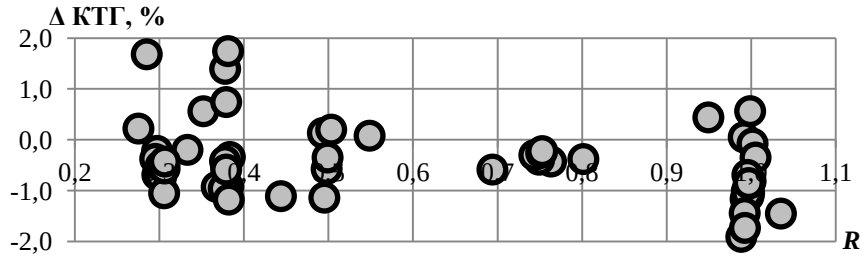
а) КТГ, б) КПВ, в) R , г) K_m

Полученные результаты позволяют сделать выводы о достаточном для большинства практических задач уровне точности метода оперативного прогнозирования во всем диапазоне изменений условий эксплуатации ЖРД РД181 1А, таблица 4.

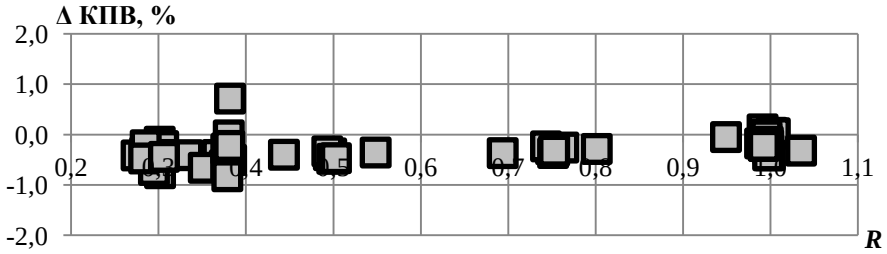
Таблица 4 – Диапазон отклонений (в %) расчетных по методу оперативного прогнозирования значений параметров от экспериментальных во всем диапазоне условий цикла повторных испытаний двигателя РД181 1А

диапазон отклонений	ΔКТГ	ΔКПВ	ΔКБГ	ΔКБО	Δ*R*	Δ*Km*
от	-0,52	-0,36	-1,11	-0,93	-1,07	-2,07
до	+1,13	+0,65	+0,51	+2,57	+1,22	+2,16

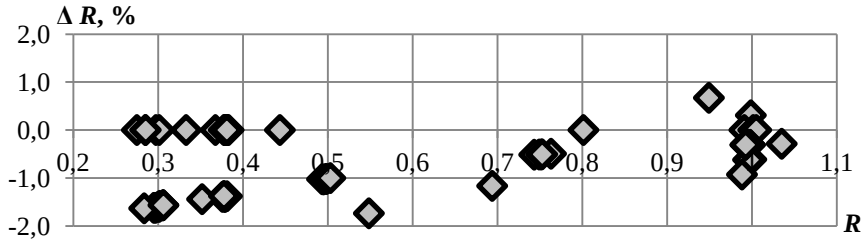
Для двигателя РД191 Д027 точность по методу оперативного прогнозирования оценивалась по данным 7-и испытаний, составляющих цикл повторных испытаний, в условиях каждого из 62 выбранных режимов, рисунки 3(а, б, в, г).



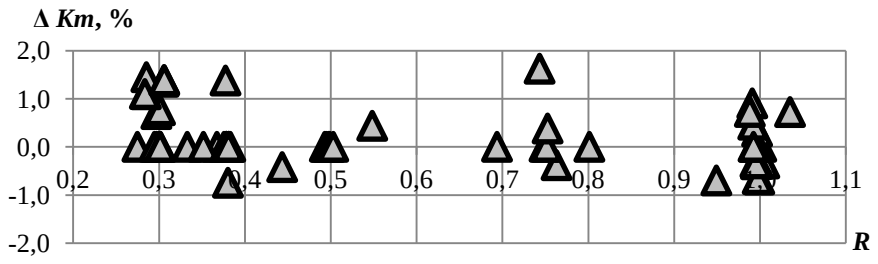
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3 - РД191 Д027. Точность оперативного прогнозирования параметра а) КТГ, б) КПВ, в) R , г) K_m

Полученные результаты позволяют сделать выводы о уровне точности метода оперативного прогнозирования, достаточном для большинства инженерных задач во всем диапазоне изменений условий эксплуатации ЖРД РД191, таблица 5.

Таблица 5 - Диапазон отклонений (в %) расчетных по методу оперативного прогнозирования значений параметров от экспериментальных , полученных в цикле повторных испытаний РД191 Д027

Для $R > 0{,}38$

диапазон отклонений	ΔКТГ	ΔКПВ	ΔКБГ	ΔКБО	ΔR	ΔKm
от	-1,91	-0,48	-0,57	-1,86	-1,74	-0,70
до	+0,56	0,10	+0,16	+0,90	+0,67	1,62

Для $R \leq 0{,}38$

диапазон отклонений	ΔКТГ	ΔКПВ	ΔКБГ	ΔКБО	ΔR	ΔKm
от	-2,35	-0,83	-0,92	-2,95	-1,63	-0,75
до	+2,45	0,71	+2,25	+3,94	+0,00	+1,45

В третьем разделе также приводится описание программно-математического обеспечения, реализующего алгоритм метода оперативного прогнозирования в виде комплекса компьютерных программ на языке программирования Фортран для персонального компьютера с операционной системой Windows.

Четвертый раздел посвящен рекомендациям по применению разработанных методов прогнозирования для решения задачи определения пороговых значений в адаптивных алгоритмах систем аварийной защиты ЖРД при стендовых испытаниях и при работе двигателя в составе РН.

Также показано, что алгоритм регулирования, сформированный по методу оперативного прогнозирования как полиномиальная зависимость углов приводов агрегатов регулирования от 6 переменных (например, уровня режима работы, давлений и температур компонентов на входе в двигатель) имеет преимущества перед существующими алгоритмами по диапазонам и точности управления

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена классификация математических моделей ЖРД, используемых для анализа рабочих процессов на разных стадиях жизненного цикла двигателя, включающая расчетно-экспериментальную модель (РЭМ), которая формируется в результате накопления информации по моделированию, начиная со стадии проектирования до огневого испытания его конкретного экземпляра включительно

Установлено, что расчетно-математическая модель ЖРД (РЭМ) – модель, полученная коррекцией модели рабочих процессов конкретного экземпляра двигателя по результатам его огневого испытания, может быть использована для решения задачи повышения достоверности прогнозирования результатов повторных испытаний.

Разработан метод прогнозирования результатов повторных испытаний ЖРД на основе РЭМ и показано, что этот метод отличается от существующих повышенной точностью, которая подтверждается в более широких диапазонах изменений режимов работы и внешних условий, а также при изменении марки горючего. Отклонения прогнозируемых значений параметров двигателя от измеренных, полученные по представительной выборке огневых стендовых и летных испытаний не превышает 2,..,4%.

Разработан метод оперативного прогнозирования результатов повторных испытаний на основе аппроксимации результатов расчетов по РЭМ в виде

полиномиальных зависимостей. Доказано, что для прогнозирования параметров ЖРД, выполненного по схеме с дожиганием генераторного газа, такие зависимости можно однозначно определить как функции шести переменных: уровня тяги, соотношения компонентов топлива, а также температур и давлений компонентов на входе в двигатель. Полиномиальные зависимости получены аппроксимацией 6-мерных массивов значений параметров, рассчитанных по РЭМ. Разработано программно-математическое обеспечение метода оперативного прогнозирования. Метод может применяться при необходимости оперативного прогнозирования в цикле повторных огневых испытаний ЖРД без снижения точности и без привлечения сложных вычислительных средств.

На основе метода оперативного прогнозирования предложен алгоритм регулирования ЖРД, определяемый как полиномиальные зависимости углов приводов агрегатов регулирования от уровня тяги, соотношения компонентов и условий на входе в двигатель. Анализ экспериментальных данных показал, что основным преимуществом такого алгоритма регулирования перед существующим является расширенные диапазоны адекватности по изменению значений тяги, соотношений компонентов топлива и внешних условий при эксплуатации двигателя.

Результаты сравнения прогнозируемых и измеренных при повторных стендовых испытаниях ЖРД РД181, РД191 и при работе в составе РН РД180 значений параметров подтверждают преимущества предлагаемых методов прогнозирования перед существующими по точности расчетных оценок и реализуемому диапазону достоверного прогнозирования.

Применение разработанных методов прогнозирования обеспечит высокую точность прогнозирования параметров ЖРД, работающих в условиях форсирования и глубокого дросселирования, снижая, тем самым, вероятность возникновения аварийных ситуаций.

Рекомендуется использовать разработанные методы прогнозирования на основе РЭМ для формирования адаптивных алгоритмов контроля в системах аварийной защиты ЖРД при стендовых испытаниях и при работе двигателя в составе РН.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации в изданиях, входящих в список ВАК

1. Буканов В.Т., Каменский С.С., Мартиросов Д.С. Применение расчетно-экспериментальной модели для прогноза параметров рабочих процессов ЖРД в цикле повторных испытаний. // Труды НПО «Энергомаш имени академика В.П.Глушко».- 2015.- № 32. – С.91-99.

2. Каменский С.С. Алгоритм регулирования ЖРД на основе расчетно-экспериментальной математической модели по результатам контрольно-технологического испытания. // Вестник Московского авиационного института. - 2016.-Т.23 №4. – С.55-60.

3. Каменский С.С., Мартиросов Д.С., Коломенцев А.И. Применение методов теории подобия для анализа стационарных рабочих процессов ЖРД. // Вестник Московского авиационного института.- 2016.-Т.23 №1. - С.32-37.

4. Белова Ю.Н., Каменский С.С., Буканов В.Т., Колбасенков А.И., Мартиросов Д.С. Функциональное диагностирование ЖРД по отклонениям характеристик агрегатов и элементов конструкции. // Труды НПО «Энергомаш имени академика В.П.Глушко».- 2012.-№ 29. – С.188-197.