

Гемранова Екатерина Анатольевна

МЕТОДИКА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ  
ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ  
С АВТОМАТОМ РАЗГРУЗКИ И СТОЯНОЧНЫМ УПЛОТНЕНИЕМ  
ТУРБОНАСОСНОГО АГРЕГАТА

2.5.15. Тепловые, электроракетные  
двигатели и энергоустановки летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Химки - 2026

Работа выполнена в акционерном обществе «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко».

Научный руководитель: Мартиросов Давид Суменович, доктор технических наук, главный специалист, акционерное общество «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко».

Официальные оппоненты:

Алтунин Виталий Алексеевич, доктор технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, кафедра Теплотехники и энергетического машиностроения, профессор.

Ягодников Дмитрий Алексеевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», кафедра «Ракетные двигатели», заведующий кафедрой.

Ведущая организация: федеральное казённое предприятие «Научно-испытательный центр ракетно-космической промышленности», г. Пересвет.

Защита диссертации состоится 17 апреля 2026 года в 12:00 на заседании диссертационного совета 24.2.379.10 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» по адресу 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», и на сайте: [https://ssau.ru/resources/dis\\_protection/gemranova](https://ssau.ru/resources/dis_protection/gemranova).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 года.

Учёный секретарь  
диссертационного совета 24.2.379.10

А.С. Виноградов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Одним из направлений в обеспечении надёжности и безопасной работы жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) является создание эффективных систем контроля и диагностирования их технического состояния. Главная задача, решаемая такими системами, – своевременное обнаружение отказов, возникающих в процессе работы двигателя (онлайн диагностика), и выдача сигнала системе управления для его выключения или перевода на безопасный режим работы. Кроме того, полученная после огневого испытания (ОИ) диагностическая информация может быть использована экспертами для прогноза состояния двигателя на последующих испытаниях.

Одними из первых работ по функциональной диагностике сложных пневмогидравлических объектов с привлечением математического моделирования рабочих процессов и систем измерения явились работы Ф.М. Дедученко, А.С. Васина и Э.В. Венгерского. Результаты этих работ применительно к ЖРД развивались на научно-экспериментальной базе Акционерного общества «НПО Энергомаш» имени академика В.П. Глушко» Д.С. Мартиросовым, которым были разработаны диагностические модели двигателей большой тяги, применяемые с 1985 г. Эти модели включали в себя рабочие процессы в основных агрегатах ЖРД. Однако, на практике при доводке и товарных поставках двигателя возникла необходимость диагностики технического состояния контура автомата разгрузки (АР) и стояночного уплотнения (СУ) основного турбонасосного агрегата (ТНА) ЖРД, которые ранее не входили в общую математическую модель. В работах А.И. Белоусова и А.И. Иванова изложены методы моделирования узлов насосов и турбин, а Ю.И. Канапиным, В.И. Видишевым и Н.П. Полетаевым исследовались локальные гидравлические модели и модели нагружения контура АР и СУ. Основные идеи, изложенные в этих работах, использованы автором при разработке модели контура АР и СУ. Эти работы, а также дальнейшее развитие методов диагностирования открыли возможность существенно увеличить глубину диагностирования, дополнив математическую модель двигателя контуром АР и СУ ТНА. Как показала практика ОИ, в ряде случаев, именно в этом контуре возникали и развивались во времени отказы, приводящие к разрушению элементов конструкции двигателя, таких как радиально-упорные подшипники (РУП), установленные на валу турбины, стояночные уплотнения, ступицы крыльчатки центробежного насоса. Ранее задачи диагностики данного контура решались с помощью применения упрощённых локальных математических моделей, в которых граничные условия, связывающие эту модель с моделью двигателя, назначались с помощью эмпирических или аппроксимационных зависимостей.

Кроме того, существующая система аварийной защиты (САЗ) в большинстве случаев отключает двигатель, когда отказ уже приводит к разрушениям материальной части двигателя, а зачастую и стенда. Это связано с тем, что САЗ настраивается на предельные значения ограниченного количества параметров: температуру генераторного газа, соотношение компонентов топлива в камере сгорания (КС), частоту вращения и осевое перемещение вала ТНА и не может обнаружить отказы на ранней стадии их развития. Предлагаемая методика диагностирования состояния ЖРД решает задачу обнаружения отказов на ранней стадии развития с

использованием измерений всех медленно меняющихся параметров и с учётом их взаимосвязей, представленных в математической модели рабочих процессов.

**Степень разработанности темы.** Разработка темы в рассматриваемой постановке задачи является оригинальной и в отрасли проведена впервые. Данные о зарубежных исследованиях по функциональной диагностике ЖРД, близких к теме, представляют справочную информацию и не позволяют достоверно оценить уровень разработки. В ряде источников отмечается, что технология диагностики ЖРД продемонстрировала свою эффективность при выполнении миссий SpaceX Falcon (США) и Long March (КНР).

Многие предприятия отрасли, такие как Государственный научный центр Российской Федерации «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша», Ракетно – космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева, а так же Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Казанский национальный исследовательский технический университет в основном занимались исследованиями бесконтактных методов диагностирования и методами неразрушающего контроля. Данных об отечественных работах по функциональной диагностике ЖРД в открытых периодических изданиях не обнаружено.

**Цель работы.** Обеспечение безопасности огневых испытаний ЖРД за счёт раннего обнаружения неисправности или отказа до наступления аварийного выключения двигателя с помощью многоуровневой диагностики состояния двигателя с контуром автомата разгрузки и стояночного уплотнения ТНА.

Под безопасностью понимается раннее обнаружение отказа для своевременного останова двигателя с целью сохранения материальной части двигателя и стенда.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи.**

1 Разработана объединённая математическая модель стационарных процессов ЖРД, обеспечивающая интеграцию контура автомата разгрузки и стояночного уплотнения ТНА в состав штатной модели двигателя.

2 Разработана методика диагностирования, обеспечивающая многоуровневый контроль технического состояния ЖРД при огневых испытаниях на основе объединённой математической модели.

3 Разработано программно-математическое обеспечение методики расчётно-экспериментального анализа характеристик элементов конструкции, гидравлических процессов и силового нагружения в контуре автомата разгрузки и стояночного уплотнения ТНА.

4 Проведена верификация объединённой математической модели по результатам ОИ.

5 Представлены результаты диагностирования ЖРД при огневых испытаниях, показавшие эффективность применения разработанной методики и программно-математического обеспечения.

**Предмет исследования** – ЖРД с контуром автомата разгрузки и стояночного уплотнения ТНА на компонентах топлива кислород-керосин, выполненный по

схеме с дожиганием окислительного генераторного газа в камере.

**Объект исследования** – диагностика технического состояния ЖРД, реализующегося в процессе огневого испытания и определяемого на основе телеметрии, взаимосвязей параметров рабочих процессов, характеристик агрегатов и элементов конструкции, включая АР и СУ ТНА.

#### **Научная новизна работы**

1 Разработана объединённая математическая модель стационарных процессов ЖРД, которая отличается от штатной математической модели наличием в ней контура автомата разгрузки и стояночного уплотнения ТНА, параметры которых функционально связаны с параметрами двигателя.

2 Введены дополнительные, по отношению к штатной методике, диагностические признаки, контролирующие относительные отклонения измеренных значений параметров от среднего и отклонения характеристик агрегатов, определённых при модельных испытаниях от реализованных при ОИ. На основании этих признаков определяется момент времени возникновения отказа, его развитие и локализация.

3 Разработана методика диагностирования, которая отличается от ранее используемой наличием многоуровневого контроля состояния двигателя, при котором каждый последующий уровень подтверждает результат, полученный на предыдущем уровне диагностирования. Реализована возможность определять параметры проточной части и силовые нагрузки в контуре автомата разгрузки и стояночного уплотнения ТНА ЖРД в составе объединённой математической модели стационарных процессов, недоступные для прямых измерений в процессе огневого испытания.

**Теоретическая значимость работы.** Результаты работы верифицированы и подтверждают корректность поставленных задач и их решения, подтверждают и дополняют существующие теоретические положения в области диагностирования сложных технических систем.

**Практическая значимость работы.** Результаты работы и разработанное программное обеспечение (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021667684 от 01.11.2021, патент № 2800833 о настройке параметров САЗ) используются в Акционерном обществе «НПО Энергомаш» имени академика В.П. Глушко при анализе состояния двигателей в процессе ОИ, что подтверждается «Актом № 271 о внедрении в АО «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко» результатов диссертационной работы Гемрановой Екатерины Анатольевны " Методика диагностирования жидкостных ракетных двигателей с автоматом разгрузки и стояночным уплотнением турбонасосного агрегата» от 23.10.2025. Результаты работы могут быть использованы при контроле и диагностировании состояния мощных ЖРД в процессе эксплуатации в составе ракеты-носителя.

Результаты исследования изменения характеристик агрегатов ЖРД и нагружения РУП ТНА на основе разработанной методики диагностирования могут быть использованы для совершенствования элементов конструкции двигателя. Разработанная методика диагностирования применена в опытно-конструкторских рабо-

тах по созданию системы функциональной диагностики (СФД) в режиме реального времени.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач использован системный подход, включающий методы математического моделирования физических процессов в технических системах, методы проблемного программирования, численные методы решения систем нелинейных алгебраических уравнений, метод структурного исключения и методы экспериментального анализа.

**На защиту выносятся:**

1 Объединённая математическая модель стационарных процессов ЖРД, включающая контур автомата разгрузки и стояночного уплотнения ТНА, верифицированная по результатам огневого испытания.

2 Методика диагностирования ЖРД.

3 Результаты контроля и диагностирования состояния ЖРД при огневых испытаниях.

**Достоверность результатов подтверждается:**

- применением апробированных методов контроля технического состояния ЖРД, основанных на корректном синтезе измерений параметров и математических моделей, описывающих гидравлические, теплофизические и механические процессы в контурах двигателя, а так же, методов вычислительной математики, методов принятия решения;

- количественным и качественным совпадением расчётных и измеряемых значений параметров;

- совпадением результатов диагностирования по разработанной методике с результатами дефектации материальной части двигателя после ОИ.

Область исследования диссертационной работы по содержанию, объекту и предмету соответствует пунктам 13, 18, 19 направлений исследований паспорта научной специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов, технические науки.

**Личное участие автора:**

1 Модернизация штатной и разработка объединённой математической модели стационарных процессов ЖРД, включающей контур АР и СУ ТНА.

2 Разработка методики многоуровневого диагностирования ЖРД на основе математической модели и измеряемых параметров рабочих процессов.

3 Разработка программно-математического обеспечения методики диагностирования.

4 Верификация процедур диагностирования состояния ЖРД при ОИ.

**Апробация работы.** Результаты проведённых исследований докладывались и обсуждались на: VIII конгрессе молодых учёных Университета ИТМО (Санкт-Петербург, 2019г.); 18-й международной конференции «Авиация и космонавтика» (Москва, 2019г.); научном семинаре «Лопаточные насосы и турбонасосные агрегаты» (Москва, 2021г.); Всероссийской научно-технической конференции «Ракетно-космические двигательные установки» (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020г.); научно – техническом совете предприятия АО «НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко» (Химки, 2023г.).

**Опубликованные работы.** Основные результаты работы изложены в 10 пу-

бликациях, приведённых в списке литературы, в том числе в 6 статьях в изданиях, входящих в перечень ВАК, свидетельстве о регистрации программ для ЭВМ и патенте на изобретение.

**Структура и объём работы.** Работа представляет собой рукопись объёмом 126 страниц печатного текста, состоящего из введения, 5 глав, включает 46 иллюстраций, 8 таблиц, список литературы, содержащий 120 наименований.

#### КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, отмечены научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

**В первой главе** поставлена задача функционального диагностирования ЖРД, выполненного по схеме с дожиганием генераторного газа в камере сгорания, представлены пневмогидравлическая схема двигателя и соответствующая ей структурно-функциональная схема, являющаяся основой для составления математической модели рабочих процессов. Сформулированы принципы функциональной диагностики ЖРД на основе математической модели и измеряемых параметров. Они сведены, в основном, к определению момента времени возникновения отказа с последующим определением контура или элемента конструкции, правильное функционирование которых нарушено. При этом математическая модель нормально функционирующего двигателя принимается в качестве эталона, отклонение от которого рассматривается как признак отказа.

Выполнен ретроспективный обзор патентных и литературных источников, анализ и выбор методов диагностирования, решающих поставленную задачу. В разделе результатов патентных исследований представлено описание способов контроля и диагностирования, которые наиболее приближены к решению задач данной работы, но обладают рядом недостатков. К ним можно отнести недостаточную информативность единичных измеряемых параметров для решения задачи локализации отказа, отсутствие учёта взаимосвязей между параметрами, используемыми для определения характеристик двигателя, ограничения видов диагностируемых отказов.

Кроме этого, рассмотрен ряд методов диагностирования, которые успешно зарекомендовали себя при диагностике двигателей на огневом стенде. К этим методам следует, прежде всего, отнести метод структурного исключения, метод коэффициентов пропорциональности, метод контроля характеристик конструкции. Отмечены преимущества и недостатки, присущие этим методам.

Исходя из приведённого обзора, установлено, что в основу методов диагностирования, используемых для решения поставленных задач, может быть положена многоуровневая процедура контроля, включающая в себя:

- 1 Определение момента времени возникновения отказа;
- 2 Подтверждение момента времени возникновения отказа;
- 3 Локализация отказа по отклонениям характеристик агрегатов двигателя при ОИ от характеристик, полученных при автономных испытаниях;
- 4 Подтверждение локализации отказа с помощью метода структурного исключения.

На основании вышеизложенного сформулированы задачи исследования.

**Во второй главе** контур АР и СУ ТНА анализируется как объект диагностирования. В основном контур АР и СУ ТНА представляет собой систему гидравлических магистралей, обеспечивающих охлаждение РУП, работу АР и СУ. Рассмотрены конструкция и принципы работы АР и СУ, определены отказы, приведшие к нарушению нормального функционирования двигателя при ОИ.

**В третьей главе** разработаны расчётные гидравлическая схема и схема силовых нагрузок на элементы конструкции контура АР и СУ. В соответствии с этим составлена математическая модель, представляющая собой систему 270-и нелинейных алгебраических уравнений стационарных рабочих процессов двигателя, которая дополнена 87-ю уравнениями контура АР и СУ, включая модифицированные уравнения локальной математической модели контура для обеспечения её «стыковки» со штатной математической моделью двигателя. Определены параметры, по которым обеспечивается «стыковка» математической модели контура со штатной моделью двигателя. Например:

1) Связь давления в АР с давлением окислителя на выходе из насоса (обозначения и индексы параметров соответствуют обозначениям в тексте диссертационной работы):

$$p_5 = p_6 - \left( \frac{\xi_{5-6}}{\rho_{5-6}} \right) \cdot \dot{m}_{4-6}^2, \quad (1)$$

где  $p_5$  - давление в АР,  $p_6$  - давление перед коллектором перепуска,  $\xi_{5-6}$  – сопротивление в АР,  $\rho_{5-6}$  - плотность компонента в АР,  $\dot{m}_{4-6}$  - расход в автомате разгрузки,

$$p_2 = p_5 + \Delta p_{\omega(2-4)} + \left( \frac{\xi_{4-5}}{\rho_{4-5}} \right) \cdot \dot{m}_{4-6}^2, \quad (2)$$

где  $p_2$  - давление на входе в лабиринтное уплотнение насоса,  $\Delta p_{\omega(2-4)}$  - перепад давления от периферии до бурта на заднем диске ЦБК,  $\xi_{4-5}$  - сопротивление в АР,  $\rho_{4-5}$  - плотность компонента в АР,

$$p_3 = p_2 - \left( \frac{\xi_{2-3}}{\rho_{2-3}} \right) \cdot \dot{m}_{2-3}^2, \quad (3)$$

где  $p_3$  - давление окислителя на выходе из насоса,  $\xi_{2-3}$  - сопротивление на выходе из насоса,  $\rho_{2-3}$  - плотность окислителя на выходе из насоса,  $\dot{m}_{2-3}$  - расход окислителя на выходе из насоса.

2) Связь параметров СУ с давлением газа на входе в турбину:

$$p_{10} = p_{3cy} - \left( \frac{\xi_{3cy-10}}{\rho_{3cy-10}} \right) \cdot \dot{m}_{3cy-10}^2, \quad (4)$$

где  $p_{10}$  – давление на выходе из СУ,  $p_{3cy}$  – давление в СУ,  $\xi_{3cy-10}$  - сопротивление в полости за СУ,  $\rho_{3cy-10}$  - плотность компонента в полости за СУ,  $\dot{m}_{3cy-10}$  - расход через отверстия СУ.

$$p_{10} = p_{2cy} - \left( \frac{\xi_{2cy-10}}{\rho_{2cy-10}} \right) \cdot \dot{m}_{2cy-10}^2, \quad (5)$$

где  $p_{2cy}$  – давление перед лабиринтом СУ,  $\xi_{2cy-10}$  - сопротивление в лабиринте СУ,  $\rho_{2cy-10}$  - плотность окислителя в лабиринте СУ,  $\dot{m}_{2cy-10}$  - расход через лабиринтное уплотнение СУ.

$$p_{10} = p_{\text{Газ вх т кор}} + k \cdot \dot{m}_{9-10}, \quad (6)$$

где  $p_{\text{Газ вх т кор}}$  – давление в корневом сечении на входе в лопатки турбины ТНА,  $k$  – коэффициент аппроксимации,  $\dot{m}_{9-10}$  – расход через СУ.

В локальной модели контура АР и СУ давления и температуры газа на входе и выходе из турбины ТНА; давления окислителя на входе и выходе из насоса, на входе в газогенератор; напор насоса окислителя и расходы окислителя через насос и газа через турбину определяются по измеренным параметрам или по эмпирическим зависимостям, полученным по статистике испытаний. Для совмещения локальной модели со штатной эти зависимости заменены на классические уравнения гидрогазодинамики. Введение указанных уравнений модели контура АР и СУ в штатную модель двигателя обеспечивает при диагностике ОИ в каждый момент времени информацию не только о прямо измеряемых параметрах, но и о параметрах, непосредственное измерение которых в процессе испытания не проводится. К этим параметрам относятся расходы окислителя и давления в контуре АР и СУ; коэффициенты гидросопротивления в зазорах АР и СУ; силы, действующие на элементы конструкции насоса окислителя, рабочее колесо турбины, радиально-упорный подшипник и ползун стояночного уплотнения; величина перемещения вала ТНА.

Предложен способ коррекции математической модели двигателя по результатам ОИ, основанный на методе контроля характеристик двигателя. При штатной диагностике ЖРД контролируются мощностные и напорные характеристики основных и бустерных насосов, мощностная, расходная и температурная характеристики турбины ТНА, перепады давления в магистралях гидротурбины горючего, дросселя горючего и в рубашке камеры сгорания (КС), расходный комплекс КС. В разработанной методике контролю так же подвергаются: изменение зазора в стояночном уплотнении, перепад давления АР насоса окислителя и баланс сил, действующих на подвижные части ТНА. Количество контролируемых характеристик равно количеству контролируемых медленно меняющихся параметров двигателя (26 параметров), используемых при диагностировании: положения регулирующих органов, частоты вращения основного и бустерных ТНА, температуры, расходы и давления компонентов топлива на входе в двигатель и на входе в основные и бустерные насосы, давление окислителя перед форсунками газогенератора, давления и температуры компонентов топлива в форсуночной головке КС, давления горючего на выходе из регулирующих органов. При разработке данной методики добавлены, не учитываемые ранее, измерения давлений окислителя в полостях АР, в коллекторе перепуска и перед РУП, осевое перемещение вала ТНА.

**В четвёртой главе** для решения поставленной задачи разработаны методика и программное обеспечение диагностирования, реализующее численные и логические методы диагностирования. Методика реализует многоуровневый способ принятия решения. Решение, принятое на каждом предыдущем уровне должно быть подтверждено на последующем уровне. В таком случае снижается риск принятия недостоверного решения и ложного срабатывания системы диагностики. Разработанная методика регламентирует последовательность действий и их реализацию при диагностировании состояния двигателя:

1 Контроль отклонения текущих средних значений параметров двигателя от среднего измеренного значения в начале режима;

2 Контроль отклонений измеренных значений параметров от расчётных по математической модели;

3 Контроль отклонений характеристик агрегатов, полученных при автономных испытаниях, от реализованных при ОИ;

4 Локализация отказа по методу структурного исключения.

Определён состав диагностических признаков, по которым проводится процедура принятия решения на каждом уровне:

- признаки 1-го вида – отклонения текущих измеренных значений параметров от эталонных среднеарифметических в начале режима. Контролируются параметры: частоты вращения основного и бустерных ТНА, расходы компонентов топлива на входе в двигатель, давления окислителя на входе в насос и ГГ, давления горючего на входе и выходе из ступеней насоса, за регулируемыми органами, давления и температуры в форсуночной головке КС, температура генераторного газа, давления окислителя в полостях АР, в коллекторе перепуска и перед РУП, а так же осевое перемещение вала ТНА;

- признаки 2-го вида – отклонения измеренных значений параметров от расчётных, определённых по скорректированной математической модели. Контролируются те же параметры, что на первом уровне диагностирования;

- признаки 3-го вида – отклонения характеристик агрегатов, реализованные при ОИ от характеристик при автономных испытаниях. Контролируются мощностные и напорные характеристики основных и бустерных насосов, мощностная, расходная и температурная характеристики турбины ТНА, перепады давления в магистралях гидротурбины горючего, дросселя горючего и в рубашке (КС), расходный комплекс КС и температура в рубашке охлаждения, изменение зазора в стояночном уплотнении, перепад давления АР насоса окислителя и сила, действующая в насосе окислителя;

- признаки 4-го вида – нарушение взаимосвязей параметров, описываемых исключаемыми уравнениями математической модели, определяемое с помощью подстановки в эти уравнения и расчётных, и измеренных значений параметров.

Признаки 1-го вида позволяют определить момент отказа на ранней стадии его развития даже по тем параметрам, прямое измерение которых не производится в процессе ОИ. Ранее момент времени возникновения отказа определялся только по анализу измеряемых параметров. Признаки 2-го вида подтверждают предыдущее решение, что позволяет не допустить ложного срабатывания СФД и необоснованного отключения двигателя. Признаки 3-го вида позволяют определить агрегат, в котором произошёл отказ. Признаки 4-го вида подтверждают решение о локализации отказа.

Признаки 1-го и 3-го видов являются вновь введенными по сравнению со штатной методикой диагностирования, применяемой ранее.

Методика диагностирования состояния ЖРД включает следующие уровни.

На первом уровне в начале каждого стационарного режима работы двигателя выделяется диапазон времени, на котором измеряют значения каждого параметра и определяют его среднее значение. Эти средние значения принимаются за эталонные. Затем производят коррекцию объединённой математической модели. Для этого средние значения измеренных параметров подставляют в систему уравнений математической модели и из её решения определяют коэффициенты коррекции, представляющие собой поправки на характеристики, перечисленные в 3-ей

главе. Эти коэффициенты вводят в исходную систему уравнений и получают эталонные характеристики модели, адекватной двигателю конкретной сборки при ОИ - объединённой скорректированной модели (ОСМ). По полученной ОСМ рассчитывают эталонные значения параметров, включая параметры контура АР и СУ, прямые измерения которых не производится в процессе ОИ. Далее в каждый момент времени проводится сравнение измеренных параметров с эталонными измерениями и, таким образом, формируются диагностические признаки первого вида. Если три и более признака, начиная с момента времени  $t_0$ , одновременно или последовательно пересекут границы своих допусков, рассчитанных для нормально функционирующих двигателей, то принимается решение о возможном отказе в работе двигателя, возникшем в момент времени  $t_0$ . Решение о возникновении отказа принимается по трём параметрам для минимизации вероятности принятия ложного решения из-за возникновения недостоверности измерений. За время возникновения отказа принимается время выхода последнего из трёх параметров за границу допуска. Для подтверждения достоверности принятого решения переходят ко второму уровню диагностирования.

На втором уровне определяют отклонения измеренных параметров, вышедших за пределы допуска, от их расчётных значений, полученных по ОСМ и проводят контроль этих отклонений от допустимых значений и формируются диагностические признаки второго вида. Если допуск превышен, то принимается решение о возможности отказа в работе двигателя и переходят к следующему уровню – локализации отказа, т. е. выявлению элементов конструкции или агрегатов двигателя, в котором произошёл отказ.

На третьем уровне по ОСМ рассчитывают контролируемые характеристики двигателя, включая не измеряемые в процессе ОИ, и вычисляют диагностические признаки третьего вида – отклонения значений характеристик от эталонных. Если один из этих признаков выходит за границы допуска, значит характеристика данного агрегата при ОИ не соответствует характеристике, полученной при его автономном испытании и принимают решение, что отказ локализован в данном агрегате. Если таких признаков несколько, то принимается решение, что отказ не локализован.

На четвёртый уровень следует переходить при пост-диагностике двигателя, т.е. после огневого испытания, когда возникает необходимость локализации неисправности в пределах контура двигателя, определяемого совокупностью элементов конструкции. Обычно, при пост-диагностике выделяются версии в каком контуре двигателя содержится отказ. Поэтому можно выделить соответствующие подсистемы уравнений математической модели, описывающие рабочие процессы в том или ином контуре двигателя, и для локализации отказа в нём использовать модифицированный метод структурного исключения, в котором при поиске отказа применяется множественное исключение уравнений. При этом формируются диагностические признаки четвертого вида. Указанная процедура выполняется до тех пор, пока отказ не будет локализован.

Достоверность принятия решения достигается за счёт перехода на каждый последующий уровень в зависимости от решения, принятого на предыдущем, тем самым снижая вероятность ложного срабатывания и пропуска отказа.

Основные отличия новой методики диагностирования от штатной:

1 В штатной методике контроль состояния двигателя проводится по осреднённым значениям параметра на режиме ОИ. В новой методике контролируются текущие значения параметров с заданной дискретностью по времени. Это даёт возможность определить момент времени возникновения отказа.

2 В разработанной методике, помимо основных агрегатов двигателя, контролем охвачен контур АР и СУ.

3 Введена коррекция математической модели ЖРД в начале каждого режима, учитывающая особенности экземпляра двигателя конкретной сборки применительно к условиям проведения ОИ.

4 В штатной методике используются два вида диагностических признаков – относительные отклонения измеренных значений параметров от расчётных по математической модели и нарушение взаимосвязей параметров, описываемых уравнениями математической модели, для каждого режима работы двигателя. Кроме этих признаков в новой методике используются два новых вида диагностических признаков: относительные отклонения измеренных значений параметров от среднего значения, определённого в начале каждого режима и отклонения характеристик агрегатов, реализованных при ОИ, от характеристик автономных испытаний, что обеспечивает достоверность локализации отказа.

Внедрение разработанной методики диагностирования позволило проводить анализ параметров двигателя, недоступных для прямого измерения в процессе ОИ и повысить безопасность и качество проведения ОИ за счёт раннего обнаружения отказа до наступления аварийного выключения двигателя.

В пятой главе представлены результаты диагностирования по разработанной методике конкретных двигателей с контурами АР и СУ, прошедших ОИ на стенде. Показано, что после проведения коррекции объединённой математической модели, измеренные и расчётные значения параметров, определённые по скорректированной математической модели, практически совпадают до долей процентов с параметрами ОИ.

На рисунке 1 представлено расчётное определение осевой силы на турбине тремя способами: по исходной модели двигателя (А), по скорректированной модели двигателя при ОИ (В) и по локальной модели контура АР и СУ (С). Существенное отличие результатов расчётов по разработанной модели от расчётов по локальной модели контура АР и СУ обусловлено тем, что граничные условия для замыкания локальной модели контура не отражают реальную взаимосвязь агрегатов при работе двигателя.

На всех рисунках по оси абсцисс откладывается время.

Проведён расчёт допустимых значений диагностических признаков. Средние

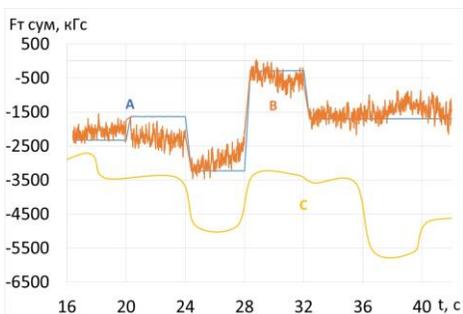


Рисунок 1 – Осевая сила  $F_{T \text{ сум}}$ , действующая на рабочее колесо турбины, определённая по различным моделям

значения диагностических признаков близки к нулю, причём, регламентированная погрешность измерения составляет для большинства параметров около 2 % шкалы датчика. Это достигнуто за счёт коррекции математической модели в процессе ОИ. Исходя из среднеарифметических значений диагностических признаков и погрешностей каналов измерения параметров на данном этапе разработки, нижняя граница допустимых значений диагностических признаков первого и второго вида принята  $\pm 3,0\%$ .

Представлены результаты диагностирования двух двигателей, ОИ которых завершились аварийным отключением. В одном из двигателей произошло нарушение работы в контуре дросселя горючего, а во втором отказ возник в лабиринтном уплотнении насоса на входе в автомат разгрузки. Диагностирование проводилось в соответствии с разработанной методикой. На первом уровне диагностирования определён момент времени нарушения правильности функционирования двигателя (рисунок 2) путём контроля отклонений текущих измеренных значений параметров двигателя от эталонных значений - средних измеренных значений в начале режима (давлений, расходов, температур компонентов топлива, оборотов роторов основного и бустерных ТНА). При этом зафиксировано, что параметры функционирования контура АР и СУ - в пределах допуска. Для подтверждения этого диагноза необходимо перейти на второй уровень диагностирования.

На втором уровне диагностирования для подтверждения решения, принятого на первом уровне, определены отклонения измеренных значений параметров от расчётных, полученных по математической модели. Эти диагностические признаки имеют один и тот же физический смысл, что и признаки, полученные на первом уровне, и, тем самым, подтверждают возникновение предполагаемого отказа. Локализация отказа проводится на третьем уровне, для чего определены отклонения характеристик агрегатов двигателя, реализовавшихся при ОИ, от характеристик, полученных на автономных испытаниях. Во всех графиках  $\delta_{1,2,3}$  – величина отклонения, соответствующая диагностическому признаку на каждом этапе.

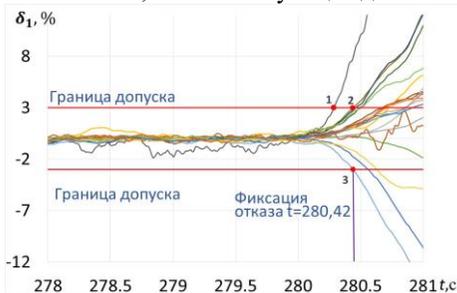


Рисунок 2 – Контроль отклонений текущих средних значений параметров двигателя от средних измеренных значений в начале режима

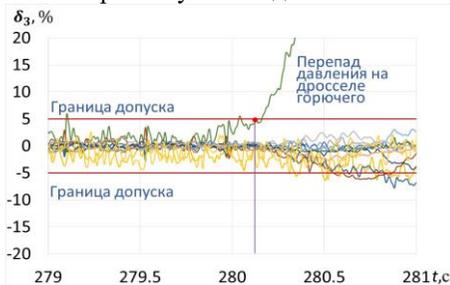


Рисунок 3 – Локализация отказа по отклонению характеристики дросселя горючего

На рисунке 3 показано, что локализация отказа определена по недопустимому отклонению рабочей характеристики дросселя горючего в процессе ОИ (зависимости перепада давления от положения привода дросселя) от характерис-

тики, полученной на автономных испытаниях. При этом отклонения характеристик других агрегатов в пределах допуска. Для повышения достоверности решения, принятого на третьем уровне диагностирования, следует перейти на четвёртый уровень, где проверяется, вызывает ли отказ нарушение взаимосвязей параметров двигателя, описываемых именно уравнением рабочего процесса в дросселе горючего. Действительно, в момент времени  $t=280,15$  с произошло нарушение взаимосвязей параметров в уравнении перепада давления на дросселе горючего, что подтверждает диагноз, поставленный на третьем уровне.

При диагностировании другого двигателя, когда все основные параметры двигателя были в пределах допуска, отказ был обнаружен в контуре АР и СУ. Процедуры контроля иллюстрируются рисунками 4 и 5.



Рисунок 4 – Контроль отклонений текущих средних значений параметров двигателя от средних измеренных значений в начале режима

Это подтверждает необходимость интегрирования в штатную модель двигателя контура АР и СУ, так как основные параметры двигателя могут быть не чувствительны к отказам в этом контуре.

Как показано в рассматриваемых случаях, диагностирование в процессе ОИ позволяет сформировать команду системе управления на выключение или перевод двигателя на безопасный режим работы существенно раньше, чем САЗ: в первом случае на 1,15 секунды, во втором – на 26 секунд.

Таким образом, показана эффективность разработанной методики диагностирования для определения момента времени возникновения отказа и его локализации.

В заключении каждой главы приведены выводы и рекомендации по использованию полученных результатов.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе содержится решение научной задачи, имеющей значение для технической диагностики сложных систем, направленное на совершенствование методов диагностирования ЖРД с целью обеспечения повышения безопасности и качества огневых испытаний. Решение этой задачи определяется следующими основными результатами работы:

1 Впервые штатная математическая модель ЖРД дополнена уравнениями процессов в контуре АР и СУ ТНА, параметры которого функционально связаны

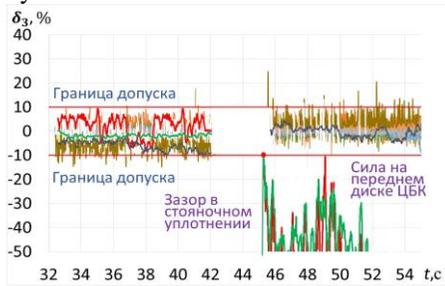


Рисунок 5 - Локализация отказа по отклонению характеристик АР и СУ

с основными параметрами двигателя. Это позволило проводить анализ параметров двигателя, недоступных для прямого измерения в процессе огневого испытания.

2 Разработана методика многоуровневого диагностирования ЖРД, которая содержит, дополнительно к штатной методике, диагностические признаки для контроля относительных отклонений: измеренных значений параметров от среднего в начале стационарного режима и отклонения характеристик агрегатов, определённых при модельных испытаниях от реализованных при огневом испытании. Многоуровневый контроль повышает качество проведения испытаний за счёт снижения вероятности ложного срабатывания системы функциональной диагностики или пропуска отказа.

3 Диагностирование на основе разработанной методики, проведённое при реальных огневых испытаниях ЖРД, показало, что сигнал о возникновении отказа может быть сформирован в одном случае на 1,15 секунды, в другом - на 26 секунд раньше, чем срабатывает штатная система аварийной защиты. Это обеспечивает возможность предотвратить разрушение материальной части двигателя и стенда, повышая тем самым безопасность проведения испытаний.

4 Результаты работы и разработанное программное обеспечение (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021667684 от 01.11.2021, патент № 2800833 о настройке параметров САЗ) используются в Акционерном обществе «НПО Энергомаш» имени академика В.П. Глушко при анализе состояния двигателей в процессе ОИ, что подтверждается «Актом № 271 о внедрении в АО «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко» результатов диссертационной работы Гемрановой Екатерины Анатольевны "Диагностика жидкостных ракетных двигателей с автоматом разгрузки и стояночным уплотнением турбонасосного агрегата» от 23.10.2025.

Перспективой дальнейшего развития результатов работы является их применение для системы функциональной диагностики ЖРД при огневых испытаниях, работающей в режиме реального времени.

Результаты работы могут быть также использованы для разработки систем диагностики других сложных технических систем

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

##### **Публикации в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК**

1 Мартиросов, Д.С. Применение системы функциональной диагностики и системы аварийной защиты жидкостного ракетного двигателя при огневых испытаниях / Д.С. Мартиросов, **Е.А. Гемранова**, С.С. Каменский и др. // «Вестник машиностроения» – М.: «Инновационное машиностроение», 2024 – №11 том 103 – С. 898 - 901, ISSN 0042-4633 [Перечень ВАК от 10.06.2024г., п. 530].

2 **Гемранова, Е.А.** Масштабирование диагностических признаков при контроле технического состояния ЖРД / Е.А. Гемранова, С.С. Каменский, Д.С. Мартиросов // Труды НПО Энергомаш. – М.: НПО Энергомаш – 2022. –№ 38-39. – С. 71-79, ISSN 2079-0228 [Перечень ВАК от 10.06.2024г., п. 2753].

3 **Гемранова, Е.А.** Диагностирование состояния контура автомата разгрузки и стояночного уплотнения турбонасосного агрегата жидкостного ракетного двига-

теля // Вестник МАИ, – М.: МАИ, 2021, – Т. 28, № 3, С. 24-30, ISSN 0869-6101 [Перечень ВАК от 10.06.2024г., п. 545].

4 **Гемранова, Е.А.** Влияние кавитации в насосе ТНА на параметры работы ЖРД / Е.А. Гемранова., Ю.И. Каналин, Н. П. Полетаев, А. А. Фролов // Труды НПО Энергомаш. – М.: НПО Энергомаш – 2019. – № 36. – С. 51-66, ISSN 2079-0228 [Перечень ВАК от 10.06.2024г., п. 2753].

5 **Гемранова, Е.А.** Вероятностные оценки достоверности принятия решения в системе диагностики ЖРД / Е.А. Гемранова, М.И. Завьялова, Д.С. Мартиросов // Труды НПО Энергомаш. – М.: НПО Энергомаш – 2023. – № 40. – С. 29-39, ISSN 2079-0228 [Перечень ВАК от 10.06.2024г., п. 2753].

6 **Гемранова, Е.А.** Алгоритм управления по соотношению компонентов топлива с "нелинейным" регулированием / Е.А. Гемранова, А.И. Колбасенков, С.Н. Семенов. // Труды НПО Энергомаш. – М.: НПО Энергомаш – 2016. – № 33. – С. 141-147, ISSN 2079-0228 [Перечень ВАК от 10.06.2024г., п. 2753].

7 **Гемранова, Е.А.**, Д.С. Мартиросов, Программа диагностирования технического состояния жидкостного ракетного двигателя в процессе огневых испытаний. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021667684 от 01.11.2021, заявка №2021660304 от 30.06.2021.

8 Патент № 2800833 Российская Федерация МПК F02K 9/38(2023.05). Способ адаптивной настройки контролируемых параметров системы аварийной защиты жидкостного ракетного двигателя на первое огневое испытание / И.Б. Давыдов, И.С. Барашков, **Е.А. Гемранова**; заявитель АО «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко». №2022127287; заявл. 20.10.2022; опубл. 28.07.2023. - 9 с.

#### Прочие публикации

1 **Гемранова, Е.А.** Корректировка математической модели ЖРД, содержащей модель контура автомата разгрузки ТНА, по результатам ОИ двигателя / Е.А. Гемранова, Д.С. Мартиросов // Тезисы докладов Всероссийской научно – технической конференции «Ракетно-космические двигательные установки» – Москва, 22-23 октября 2020г., – М. МГТУ им. Н.Э. Баумана, – 2020. – С.38-40, ISBN 978-5-907383-00-5.

2 **Гемранова, Е.А.** Диагностическая модель контура автомата разгрузки и стояночного уплотнения ТНА ЖРД // Тезисы докладов VIII Конгресса молодых учёных Университета ИТМО – СПб, 15-19 апреля 2019 г., <https://kmu.itmo.ru/digests/article/1070>. Электронное издание.

3 **Гемранова, Е.А.** Анализ состояния ЖРД после огневого испытания с использованием диагностической модели, содержащей контур автомата разгрузки и стояночного уплотнения ТНА / Е.А. Гемранова, Д.С. Мартиросов // Тезисы докладов 18-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика», Москва, 18-22 ноября 2019г., – М: «Логотип». – 2019. – С. 46, ISBN 978-5-907383-00-5.

4 Мартиросов, Д.С. Сравнение эффективности систем функциональной диагностики и аварийной защиты жидкостного ракетного двигателя при огневых испытаниях / Д.С. Мартиросов, **Е.А. Гемранова**, С.С. Каменский и др. // Тезисы докладов 23-ей Международной конференции «Авиация и космонавтика», Москва, 18-22 ноября 2024г. – М. «Перо», – 2024. – С. 59, ISBN 978-5-907383-00-5. Электронное издание.