

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

доктора технических наук, доцента

Алтунина Виталия Алексеевича,

на диссертацию Гемрановой Екатерины Анатольевны на тему:

«Методика диагностирования жидкостных ракетных двигателей с автоматом разгрузки и стояночным уплотнением турбонасосного агрегата», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15 - «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»

### **Актуальность темы диссертации**

Диссертация посвящена решению важной научно-технической задачи - обеспечению контроля технического состояния жидкостных ракетных двигателей большой тяги в процессе доводки, огневых испытаний и эксплуатации в составе ракеты-носителя с целью обнаружения отказа на ранней стадии развития. Такой контроль дает возможность не только подтвердить основные характеристики двигателя, такие, как тяга и удельный импульс, но и оценить правильность функционирования отдельных агрегатов, гидравлических и газовых магистралей. Оценка состояния материальной части двигателя по его измеряемым параметрам является сложной задачей, решение которой требует привлечения современных знаний из различных областей науки и техники. Эта задача усложняется из-за ограниченности состава измерений и отсутствия прямых измерений давлений, расходов, температур рабочего тела, в частности, в контуре агрегата разгрузки и стояночного уплотнения, обеспечивающих работоспособность конструкции турбонасосного агрегата. Поэтому, актуальность темы диссертации не вызывает сомнения.

### **Научная новизна и полученные результаты**

В диссертации для решения данной задачи автором была впервые разработана методика диагностирования, основанная на применении математических моделей, прямо и косвенно измеряемых параметрах рабочих процессов двигателя,

Входящий № *206-1311*  
Дата **19 МАР 2026**  
Самарский университет

алгоритмах и программном обеспечении для определения момента времени и места возникновения неисправности, развитие которой может привести к отказу. При этом открывается возможность проводить контроль не только в процессе огневого испытания двигателя, но и определять его техническое состояние при межполетном обслуживании двигателей многоразового применения.

### **Значимость для науки и практики**

В представленной диссертационной работе можно выделить следующие **новые научные результаты**:

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 диагностические признаки: относительные отклонения измеренных значений параметров от среднего и отклонения характеристик агрегатов, определённых при модельных испытаниях, от характеристик, 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 методики наличием многоуровневого контроля состояния двигателя, при котором каждый последующий уровень подтверждает результат, полученный на предыдущем уровне диагностирования.

4 Реализована возможность определения параметров 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**

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 радиально-упорного подшипника ТНА на основе разработанной методики диагностирования могут быть использованы для совершенствования элементов конструкции двигателя. Разработанная методика диагностирования применена в опытно-конструкторских работах отрасли по созданию системы функциональной диагностики, работающей в режиме реального времени.

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

### **Обоснованность и достоверность результатов**

Достоверность результатов подтверждается применением апробированных методов контроля технического состояния ЖРД, основанных на измерениях параметров и математических моделях, описывающих гидравлические, теплофизические и механические процессы в контурах двигателя, а так же количественным и качественным совпадением расчётных и измеряемых значений параметров и совпадением результатов диагностирования по разработанной методике с заключениями протоколов штатных ОИ.

### **Апробация работы**

Результаты проведённых исследований докладывались и обсуждались на: VIII конгрессе молодых учёных Университета ИТМО (СанктПетербург, 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, 2020 г. Основные результаты работы изложены в 10 публикациях, 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.

Достоверность выводов представлена результатами диагностирования ЖРД конструкции НПО «Энергомаш».

### **Оценка содержания и завершенности диссертации**

Работа имеет четкую структуру и включает введение, пять глав, список литературных источников из 120 наименований, изложена на 126 страницах, достаточно хорошо структурирована и проиллюстрирована.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации. На основе анализа зарубежных и отечественных источников определен общий подход к решению задачи диагностики ЖРД, включающих контур автомата разгрузки стояночного уплотнения для своевременного обнаружения неисправности в двигателе с целью обеспечения безопасности проведения огневых испытаний. Сформулирована цель работы и выделены основные задачи, решенные в данной работе, её научная новизна, практическая значимость, выделены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** на основе анализа литературных и патентных источников, выделены основные принципы функциональной диагностики ЖРД на основе математической модели и измеряемых параметров: определение момента времени возникновения неисправности, затем – контура или элемента конструкции, правильное функционирование которых нарушено в результате неисправности. Обсуждается 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. Во всех этих методах математическая модель нормально функционирующего двигателя принимается в качестве эталона, отклонение от которого рассматривается как признак неисправности. Это важное положение лежит в основе методики диагностирования, разрабатываемой в четвертой главе

**Во второй главе** для составления математической модели контур автомата разгрузки и стояночного уплотнения ТНА анализируется как объект диагностирования. Показано, что этот контур представляет собой систему гидравлических магистралей, обеспечивающих охлаждение радиально-упорного подшипника и

функционирование контура в целом. Рассмотрены особенности конструкция и принципы работы автомата разгрузки и стояночного уплотнения, отмечены неисправности, приведшие к нарушению нормального функционирования двигателя при огневых испытаниях.

**В третьей главе** разработана диагностическая модель двигателя. Эта модель включает в себя математическую модель двигателя с контуром автомата разгрузки и стояночного уплотнения, систему измерений медленноменяющихся параметров и алгоритмы методов локализации неисправности. Составлена математическая модель, представляющая собой систему нелинейных уравнений, описывающих стационарные рабочие процессы в контуре. Математическая модель представляет собой систему 270-и нелинейных алгебраических уравнений стационарных рабочих процессов двигателя, которая дополнена 87-ю уравнениями контура контуром автомата разгрузки и стояночного уплотнения. Обеспечена «склейка» общей математической моделью двигателя с контуром. Определены параметры, по которым обеспечивается «стыковка» математической модели контура с полноразмерной моделью двигателя. В локальной модели контура авторазгрузки и стояночного уплотнения расходы окислителя через насос и газа через турбину определяются по измеренным параметрам или по эмпирическим зависимостям, полученным по статистике испытаний. Для совмещения локальной модели контура с общей эти зависимости заменены на классические уравнения гидродинамики. Введение указанных уравнений модели контура АР и СУ в общую модель двигателя обеспечивает информацию не только о прямо измеряемых параметрах, но и о параметрах, непосредственное измерение которых в процессе испытания не проводится: силы, действующие на элементы конструкции насоса окислителя, рабочее колесо турбины, радиально-упорный подшипник и ползун стояночного уплотнения; величины гидросопротивлений магистралей.

**В четвертой главе** для решения поставленной задачи разработаны методика и программное обеспечение, реализующее численные и логические методы диагностирования. Методика регламентирует: контроль отклонения текущих средних значений параметров двигателя от среднего измеренного значения в начале

режима; контроль отклонений измеренных значений параметров от расчётных по математической модели; контроль отклонений характеристик агрегатов, полученных при автономных испытаниях, от реализованных при ОИ; поиск неисправности по методу структурного исключения.

Определен состав 4-х видов диагностических признаков, по которым проводится процедура принятия решения на каждом уровне диагностирования. 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 дефекта.

Приведены расчётные показатели достоверности диагностирования. При достоверности измерений не ниже 0,97 и надёжности двигателя 0,99 априорная оценка вероятности пропуска неисправности равна 0,00365, а ложного срабатывания - 0,0726.

**В пятой главе** представлены результаты диагностирования по разработанной методике конкретных двигателей с контурами автомата разгрузки и стояночного уплотнения, прошедших огневые испытания на стенде и завершившиеся аварийным выключением.

В одном из двигателей произошло нарушение работы в контуре дросселя горючего, а во втором неисправность возникла в лабиринтном уплотнении насоса на входе в автомат разгрузки. Диагностирование проводилось в соответствии с разработанной методикой.

При диагностировании другого двигателя неисправность была обнаружена в контуре автомата разгрузки и стояночного уплотнения в то время, когда все основные параметры двигателя были в норме. Это подтверждает необходимость интегрирования в диагностическую модель двигателя контура автомата разгрузки и стояночного уплотнения, так как основные параметры двигателя оказались не чувствительны к неисправности в этом контуре.

Показано, что в рассматриваемых случаях диагностирование в процессе ОИ позволяет сформировать команду системе управления на выключение или пере-

вод двигателя на безопасный режим работы существенно раньше, чем САЗ: в первом случае на 12 с, во втором – на 26 с.

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

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

### **Замечания, вопросы и рекомендации по диссертационной работе.**

По данной диссертации можно сделать следующие замечания:

1. Отсутствует описание полной математической модели ЖРД.
2. Нет примера обработки испытания безаварийной работы.
3. Не указано, как определять границы допусков для каждого параметра.
4. Не представлены доказательства правомочности применения корректирующего коэффициента, мультипликативно вводимого в уравнения, содержащие характеристики агрегатов.

5. Возможно ли использовать разработанные в диссертации методики и алгоритмы - при испытаниях и доводках метановых ЖРД и ЖРД многофазового использования (ЖРДМИ), когда возможно применение: а) метанового горючего в газообразном состоянии; б) метанового горючего в сжиженном состоянии (СПГ), когда в наружной рубашке регенеративного охлаждения ЖРД и ЖРДМИ происходит его частичная конверсия, и к предфорсуночному пространству метановое горючее поступает уже в двухфазном состоянии?

6. Замечания по оформлению диссертации:

а) текст диссертации должен быть оформлен нежирным шрифтом №14, включая все заголовки всех глав, всех подпунктов и основных разделов, где названия глав, подпунктов и разделов должны начинаться с заглавной буквы; заголовки подпунктов каждой главы в тексте диссертации - сверху и снизу от текста – должны выделяться пробелом (пустой строкой);

однако в тексте диссертации: раздел «Оглавление» – полностью представлен жирным шрифтом, название раздела написано прописными буквами, некото-

рые пункты раздела – зашли в область нумерации страниц (см. стр. 2-3), а некоторые подпункты, почему-то, оформлены уменьшенным шрифтом №10-12; все заголовки всех глав и разделов – оформлены с нарушениями и отклонениями от принятых правил; также в тексте диссертации встречаются предложения и словосочетания, выделенные жирным шрифтом (см. стр. 19-21, 25, 26, 56);

б) текст диссертации, кроме всех заголовков, должен иметь автопереносы, чтобы расстояния между словами были одинаковыми и уменьшался объём напечатанного текста на поле каждой страницы;

однако, в тексте диссертации эти автопереносы отсутствуют;

в) в конце раздела «Введение» написано предложение: «В заключении каждой главы приведены выводы», наверное, было бы правильнее написать так: «В конце каждой главы приведены выводы»;

г) рисунки в диссертации должны быть оформлены следующим образом: сам рисунок должен быть расположен по центру листа, а его подрисуночная надпись – по ширине листа, без красной строки, т.е. слева от левой границы листа, точка в конце не ставится; расположение рисунка в тексте: после текста должен быть пробел (пустая строка), потом идёт рисунок, потом - снова пробел, потом - подрисуночная надпись, потом снова пробел; потом – продолжение текста диссертации; если рисунок состоит из нескольких рисунков, то под каждым рисунком ставится обозначение (буква со скобкой), например, а), б), а после последнего рисунка оформляется одна общая подрисуночная надпись, после которой ставится двоеточие, потом – буква со скобкой, например, а), с текстом индивидуальных особенностей этого первого рисунка, потом ставится точка с запятой, потом – буква б) (тоже со скобкой), с текстом особенностей второго рисунка, в конце этого последнего предложения точка не ставится; если у рисунка (или графика) есть цифровые или буквенные обозначения, то их расшифровка производится: или в тексте диссертации (до рисунка или после него), или после основной подрисуночной надписи в её составе, в этом случае – после основной подрисуночной надписи надо поставить или запятую и потом написать слово «где», или поставить двоеточие, а далее – через запятую или точку с запятой - перечислять, например, где 1 –

осевой вал; 2 – лопатка турбины и т.д., в конце последнего слова - точка не ставится;

однако в тексте диссертации, практически во всех её пяти главах, расположение рисунков и подрисуночных надписей оформлены с нарушениями и отклонениями от принятых правил (см. стр. 14, 15, 31, 33, 35, 44, 45, 52, 61, 73, 75-81, 84, 90 -92, 97 – 101, 103 – 106);

д) внизу, на страницах 6, 17, 22, 30, 34, 86, диссертант разместил дополнительную литературу со своей индивидуальной нумерацией с уменьшенным шрифтом (№10-12), обычно такой способ особого привлечения внимания читателей на какую-либо локальную и важную информацию используется в некоторых журналах, монографиях и других публикациях, но в диссертации это делать было необязательно, т.к. вся эта информация уже была включена в основной Список литературы, достаточно было бы просто указать эти источники информации в квадратных скобках после каждого важного предложения, тем более, что размещение литературы внизу страницы дополнительно отнимает рабочую площадь листа, а мелкий шрифт – весьма затрудняет чтение текста;

е) таблицы в диссертации должны быть оформлены следующим образом: после текста надо сделать пробел (пустую строку), потом – по ширине, слева без красной строки написать табличную надпись, например, Таблица 1.1 – Характеристики ТНА ЖРД, потом снова сделать пробел, после чего разместить по центру листа саму таблицу, после таблицы сделать пробел, потом – размещать дальнейший текст; в конце табличной надписи – точка не ставится; внутри таблицы разрешается делать уменьшенный шрифт, например, №12; если таблица большая и переходит на другую страницу, то на другой странице необходимо сверху и справа в скобках написать, например, (Продолжение таблицы 1.1), а только потом размещать оставшуюся часть таблицы;

однако, в тексте диссертации практически все таблицы размещены с нарушениями и отклонениями от принятых правил (см. стр. 59-60, 62-63, 67-68, 90, 93-96);

ж) математические знаки, например, «знак равенства», знаки «больше» - «меньше», «минус», «плюс», «тире» - в тексте диссертации должны слева и справа выделяться пробелами, т.е. эти знаки не должны быть расположены слитно с другими знаками, буквами или цифрами; это же относится и к буквенным размерностям величин, например, значение давления в МПа или времени в секундах не должно сливаться с цифрой, например,  $p = 15,0$  МПа,  $t = 121,5$  с и т.д.; математические формулы сверху и снизу, а также между собой – должны быть выделены в общем тексте пробелами (пустыми строками); предлог «где», который обычно пишут после формулы перед расшифровкой входящих в неё символов, необходимо располагать после пробела, строго слева, без красной строки; размер шрифта всех формул должен быть таким же, как и весь текст, т.е. №14 (или приближен к нему);

однако, в тексте практически всех глав диссертации при написании математических формул, равенств и неравенств, различных технических и физико-технических данных - есть отклонения от принятых правил; а формулы, написанные диссертантом почему-то очень мелким размером шрифта №8-10, весьма затрудняют чтение текста диссертации (см. стр. 47, ф. (3.28), (3.29); см. стр. 48, ф. (3,36); см. стр. 50, ф. (3.42) – (3.46); см. стр. 51, ф. (3.47), (3.49), (3.50); см. стр. 53, ф. (3.51) – (3.54); см. стр. 54, ф. (3.58) – (3.61); см. стр. 57, ф. (3.87);

з) в диссертациях при оформлении столбиком перечислений каких-либо данных необходимо ставить перед каждым предложением тире, а в конце каждого предложения - или запятую, или точку с запятой, или точку, в конце последнего предложения – нужно ставить точку; это же относится к случаю, когда перечисление идёт через цифровую нумерацию (без скобки или со скобкой);

однако, в тексте диссертации многие такие перечисления оформлены с отклонениями от принятых правил, где вместо тире ставится знак в виде чёрного кружка, что часто применяется в статьях научных журналов (см. стр. 32,36,56, 59, 92), а в конце каждой информационной строчки - ничего нет;

и) на стр. 56 диссертант, скорее всего, наверное, не до конца дописал формулу (3.81)?

к) раздел «Список сокращений и условных обозначений» - оформлен с нарушением принятых правил: отсутствуют тире после больших сокращённых букв, отсутствуют точки с запятыми после каждой информационной строчки, некоторые обозначения имеют очень малый размер (№8-9); сам заголовок этого раздела – тоже оформлен неправильно, т.к. его нужно писать с заглавной буквы не жирным шрифтом №14;

л) раздел «Список литературы» - оформлен с небольшими нарушениями принятых правил: сам заголовок должен называться следующим образом: «Список используемых источников информации», его надо писать с заглавной буквы не жирным шрифтом №14; в некоторых публикациях отсутствует интервал после номера страниц - перед буквой «с», а также – после большой буквы «С» - перед номерами страниц (см. стр. 113 – 126).

Диссертация написана очень грамотным научно-техническим и доступным языком. Необходимо отметить, что в диссертации не обнаружено ни одной орфографической и стилистической ошибки, что является большой редкостью в наше время!

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки работы и не ставят под сомнение достоверность основных результатов, а некоторые вопросы оппонента, скорее всего, войдут в дальнейшие научные планы соискателя по написанию докторской диссертации!

В целом, несмотря на сделанные замечания, диссертация выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет законченную научно-квалификационную работу, выполненную на актуальную тему, связанную с созданием перспективных методик диагностирования, имеющую огромную значимость для современной отечественной Российской аэрокосмической и космической науки и практики.

#### **Соответствие автореферата содержанию работы**

Автореферат диссертации выполнен на 16-и страницах, адекватно и достаточно полно отражает содержание диссертации и корректно передает суть научных положений, новизну и значимость результатов. Он также написан грамотным

и доступным научно-техническим языком. Однако следует отметить некоторые замечания и рекомендации.

Замечания и рекомендации по автореферату:

1) В пункте «Задачи исследования» – все пункты нужно было писать по форме: что нужно сделать, например, Разработать..., Провести..., Представить... и т.д., а автор оформил этот пункт по принципу: что уже сделано, что уже получено, обычно в такой форме, как правило, оформляются итоги работы: например, Выводы по главе, Заключение диссертации.

2) В разделе «Практическая значимость работы» есть информация о том, что в ходе работы над диссертацией автором разработано программное обеспечение, на что были получены: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021667684 от 01.11.2021, патент на изобретение РФ № 2800833 о настройке параметров САЗ. Необходимо отметить, что зарегистрированная в ФИПС Программа для ЭВМ – приравнивается к патенту на изобретение и тоже обладает научной новизной, как и патент на изобретение. Поскольку в разделе «Научная новизна» почему-то нет даже упоминания об этих двух очень важных документах, поэтому в тексте этого раздела нужно было добавить ещё два пункта: про полученное диссертантом Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ; про полученный диссертантом патент на изобретение РФ.

Следует отметить, что диссертацию такого уровня и объёма смогли сделать только настоящие учёные и патриоты нашей Родины, преданные отечественной космонавтике и её развитию, преданные великому учёному и конструктору - Валентину Петровичу Глушко и самой передовой и единственной в мире организации, которая носит его имя – это поистине настоящие герои нашей Великой России: доктор технических наук Давид Суренович Мартиросов и его ученица – Екатерина Анатольевна Гемранова!

### **Заключение**

Диссертация Гемрановой Екатерины Анатольевны является завершённым научно-квалификационным исследованием, в котором содержится решение акту-

альной научной задачи по обеспечению 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.

По своей актуальности, научной новизне, теоретической и практической значимости работа соответствует требованиям п. п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, а автор, Гемранова Екатерина Анатольевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности: 2.5.15 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

#### Официальный оппонент:

профессор кафедры «Теплотехника и энергетическое машиностроение», доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КЛИ».

В.А. Алтунин

10.03.2026 г.

Подпись В.А. Алтунина  
заверяю. Начальник управления  
делопроизводства и контроля

Александрова Е. И.



Контактные данные оппонента:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КЛИ (КНИТУ-КАИ), 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10. Тел.: (843) 238-41-10 Факс: (843) 236-60-32. E-mail: [kai@kai.ru](mailto:kai@kai.ru), <http://www.kai.ru>