

УТВЕРЖДАЮГенеральный конструктор
ПАО «ОДК-Сатурн»
кандидат технических наук
Р.В. Храмин

«__» _____ 2023 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу
Сметанина Сергея Анатольевича «Компенсация ухудшения характеристик
авиационного газотурбинного двигателя в эксплуатации средствами
автоматического управления», представленную на соискание ученой степени
кандидата технических наук по специальности 2.5.15. – «Тепловые,
электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»

Актуальность темы диссертации

Сохранение требуемых характеристик авиационного газотурбинного двигателя (ГТД) в эксплуатации при воздействии на его узлы различных внешних факторов является одним из необходимых условий поддержания летной годности силовой установки и летательного аппарата в целом. Летчик обладает ограниченными возможностями регулирования двигателя для получения требуемой величины тяги на максимальных режимах его работы, определяемых выбранными программами управления.

В процессе эксплуатации ГТД характеристики его узлов ухудшаются вследствие износа, эрозии, загрязнения и обледенения. Оптимизация управления таким ГТД с целью обеспечить поддержание его тяги на взлетных режимах за счет использования имеющихся запасов по параметрам рабочего процесса – способ обеспечения соответствия двигателя предъявляемым к нему требованиям, повышения эффективности применения и безопасности эксплуатации самолета.

Одним из опасных внешних воздействий на ГТД является кристаллическое обледенение, которое может приводить к быстрому и заметному ухудшению характеристик узлов и возможному отказу двигателя

Отдел документационного
обеспечения МАИ

«07» 08 2023

из-за формирования наледи в его проточном тракте. В настоящее время отсутствуют подходы по защите двигателей от такого вида обледенения, а проводимые в мире работы находятся на начальном этапе поисковых исследований.

Важность решения отмеченных проблем свидетельствует об их актуальности. Их исследованию посвящена диссертация Сметанина С.А., в которой рассматриваются возможности сохранения характеристик двигателя в эксплуатации средствами автоматического управления.

Общая характеристика работы

Диссертация содержит 105 страниц, состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и двух приложений.

В первой главе выполнен обзор применяемых в современных ГТД методов управления и направлений их развития. Рассмотрен перспективный способ управления величиной тяги, получаемой расчетом в бортовой математической модели двигателя, работающей в реальном времени в составе электронного регулятора. По результатам анализа состояния работ по разработке методов управления, направленных на сохранение характеристик двигателя в эксплуатации, сформулированы задачи исследования.

Во второй главе выполнен анализ изменения характеристик узлов двигателя в эксплуатации при воздействии внешних факторов. Впервые систематизированы данные по влиянию разных видов износа на характеристики лопаточных машин и двигателя в целом. Рассмотрены особенности влияния кристаллического обледенения на изменение характеристик узлов ГТД при нарастании на них наледи. Определено направление оптимизации методов управления ГТД для повышения стойкости двигателя к кристаллическому обледенению.

В третьей главе на основе результатов выполненного анализа разработана динамическая математическая модель турбореактивного двухконтурного двигателя (ТРДД), позволяющая имитировать износ отдельных узлов, выработку ресурса двигателя и кристаллическое обледенение, а также воспроизводить изменение параметров рабочего процесса в двигателе при воздействии различных факторов на установившихся и переходных режимах его работы. Термогазодинамическая математическая модель построена по модульному принципу с использованием статических характеристик лопаточных машин. Для моделирования износа в математическую модель введена возможность изменения характеристик узлов, имеющих место в эксплуатации. Кристаллическое обледенение моделируется посредством монотонного изменения характеристик подпорных ступеней, определенного по

имеющимся материалам экспериментальных работ и адаптированного применительно к рассматриваемому в работе двигателю.

В четвертой главе представлены результаты моделирования работы современного ТРДД при износе и кристаллическом обледенении, при управлении наиболее распространенным способом – по частоте вращения вентилятора.

Выполнена верификация модели, позволившая получить удовлетворительную точность разработанной математической модели по отношению к экспериментальными данным об основных параметрах рабочего процесса в двигателе при выработке ресурса и кристаллическом обледенении, полученных в испытаниях с забросом на вход в двигатель ледяных кристаллов.

По результатам расчетов в диссертации показано, что рассмотренный способ управления ТРДД не позволяет поддерживать требуемую величину максимальной тяги при изменении характеристик его узлов в процессе износа в эксплуатации. При этом, если в двигателе сохраняются запасы по параметрам рабочего процесса, то они могут быть использованы для оптимизации управления.

Анализ результатов моделирования кристаллического обледенения в двигателе, возникающего обычно на крейсерском режиме полета, где имеются запасы по температуре газа, показал значительное влияние выбранного способа управления на чувствительность двигателя к ледяным кристаллам и наличие возможности защиты от такого вида обледенения средствами системы управления.

В пятой главе проводится разработка математической модели системы автоматического управления, позволяющей выбирать различные регулируемые параметры для управления двигателем на дроссельных режимах, а также выполняется сравнение различных методов управления с предлагаемым способом управления рассчитываемой величиной тяги при износе и кристаллическом обледенении. Показано, что наилучшими для поддержания тяги двигателя в эксплуатации являются прямое регулирование тяги и управление степенью повышения давления в двигателе, имеющие погрешность менее 1% по величине тяги при выработке ресурса. Повышению стойкости двигателя к кристаллическому обледенению способствует регулирование степени повышения давления в двигателе, не допускающее значительного нарастания наледи во внутреннем контуре двигателя. Разработан способ фиксации кристаллического обледенения, позволяющий идентифицировать возникновение обледенения по разнице между измеренными и рассчитанными в бортовой математической модели

величинами температуры и давления воздуха за подпорными ступенями или температуры воздуха за компрессором. Предложен способ интегрированного управления двигателем, при котором регулируемый параметр изменяется в зависимости от режима полета и условий эксплуатации для получения наилучших характеристик силовой установки.

В шестой главе представлены результаты экспериментальных исследований регулятора тяги на двигателе-демонстраторе с системой автоматического управления (САУ), содержащей бортовую математическую модель двигателя. Для проведения испытаний выполнена идентификация бортовой математической модели двигателя-демонстратора и ее введение в микроконтроллер демонстрационной САУ. Погрешность расчета тяги в модели на установившихся режимах не превышала 1 %. Разработаны алгоритмы регулятора тяги двигателя-демонстратора и введены в его систему управления. Применена методика испытаний, позволяющая исследовать работу двигателя при изменении характеристик компрессора посредством прикрытия входных направляющих аппаратов на повышенных режимах работы и приводящая к уменьшению тяги двигателя на 8 %. По результатам испытаний показана работоспособность разработанного регулятора тяги и возможность поддержания требуемой величины тяги двигателя при изменении характеристик компрессора путем автоматического увеличения частоты вращения ротора высокого давления на 2 % и температуры газа за турбиной на 20 К.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Систематизированы данные по изменению характеристик узлов двигателя при износе и при кристаллическом обледенении.
2. Разработана динамическая математическая модель газотурбинного двигателя, позволяющая рассчитывать изменение параметров рабочего процесса в двигателе на установившихся и переходных режимах его работы при ухудшении характеристик узлов в эксплуатации.
3. Разработаны методы автоматического управления, позволяющие сохранить характеристики двигателя в эксплуатации и повысить стойкость двигателя к кристаллическому обледенению.
4. Впервые разработан и экспериментально проверен на двигателе-демонстраторе метод управления величиной тяги, рассчитываемой в бортовой математической модели двигателя.

Обоснованность научных положений и достоверность полученных результатов подтверждается корректным использованием математических методов описания ухудшения характеристик узлов двигателя в эксплуатации,

основанных на результатах экспериментальных исследований и данных эксплуатации, а также удовлетворительной сходимостью результатов численных и экспериментальных исследований.

Практическая значимость результатов работы состоит в том, что разработанные методы управления ГТД позволят поддерживать требуемую величину максимальной тяги двигателя при выработке ресурса, повысить безопасность эксплуатации и эксплуатационную технологичность за счет исключения подрегулировок системы управления в процессе эксплуатации. Предложенные способы повышения стойкости двигателя к кристаллическому обледенению позволят повысить безопасность работы двигателя в условиях полета в облаке ледяных кристаллов и могут быть использованы для выполнения доказательства соответствия требованиям Норм летной годности при сертификации двигателя.

Рекомендации по использованию результатов диссертации

Полученные результаты могут быть использованы при разработке системы автоматического управления нового перспективного двигателя ПД-8, а также других ТРДД, для улучшения их эксплуатационных характеристик.

Замечания по работе:

1. В бортовой математической модели двигателя при расчете величины тяги не учитываются эффекты тепловой нестационарности элементов конструкции двигателя, приводящие к появлению тепловых потоков между ними и рабочим телом и способные оказывать на переходных режимах заметное влияние на условия совместной работы элементов.

2. В работе недостаточно обоснована возможность снижения средствами САУ удельного расхода топлива при износе либо повреждении элементов проточной части двигателя.

3. При математическом моделировании кристаллического обледенения не оценен эффект снижения температуры воздушного потока из-за таяния ледяных кристаллов во внутреннем контуре двигателя.

Отмеченные замечания не снижают научной и практической значимости диссертации и общей высокой оценки работы. Они могут рассматриваться как рекомендации для дальнейших исследований.

Заключение по диссертационной работе

Диссертационная работа Сметанина Сергея Анатольевича является законченной научно-квалификационной работой, которая посвящена актуальной научной задаче, имеющей практическое и теоретическое значение. Тема и содержание соответствуют паспорту специальности 2.5.15.

«Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Основные научные результаты диссертации опубликованы в 16 печатных работах, в том числе в 5 статьях в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК и в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus.

По научному уровню, полученным результатам, актуальности, практической и теоретической значимости, оформлению и содержанию диссертация полностью соответствует всем требованиям п.п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Сметанин Сергей Анатольевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Диссертационная работа и отзыв обсуждены и одобрены на заседании научно-технического совета ПАО «ОДК-Сатурн», протокол № 7 от 12.07.2023.

Начальник бригады термодинамики
доктор технических наук,
старший научный сотрудник



Лещенко И.А.

17.07.2023

Телефон +7-4855-328-413, e-mail igor.leschenko@uec-saturn.ru

Главный специалист КО САУ
кандидат технических наук,



Добродеев А.В.

Телефон +7-4855-326-692, e-mail andrey.dobrodeev@uec-saturn.ru
152903, Ярославская обл., г. Рыбинск, проспект Ленина, д. 163

Подпись начальника бригады термодинамики Лещенко И.А. и главного специалиста КО САУ Добродеева А.В. удостоверяю:

Начальник конструкторского отдела композиционных материалов и выходных устройств, ученый секретарь НТС ПАО «ОДК-Сатурн», к.т.н.



Левитова О.Н.

С отзывом ознакомлен
07.08.2023

