

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

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**

Одним из наиболее перспективных направлений развития авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) является их интеллектуализация. Интеллектуальные системы автоматического управления ГТД, адаптирующиеся к изменению объекта регулирования при ухудшении характеристик узлов двигателя в эксплуатации, позволят улучшить основные характеристики ГТД и поддерживать требуемые параметры рабочего процесса в двигателе при его износе и воздействии внешних факторов. Кандидатская диссертация Сметанина С.А. посвящена решению актуальной задачи интеллектуализации ГТД путем разработки способов управления двигателем, направленных на сохранение требуемой величины тяги в эксплуатации при ухудшении его характеристик в процессе выработки ресурса и обеспечивающих стойкость двигателя к критическим внешним воздействиям.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка условных обозначений, списка литературы из 80 наименований и двух приложений. Основное содержание работы изложено на 105 страницах.

**В первой главе** дана оценка состояния разработки вопросов, связанных с предметом исследования диссертации. Рассмотрены особенности применения традиционных и перспективных методов управления ГТД. Выполнен обзор работ, посвященных оптимизации управления ГТД в эксплуатации, и сформулированы задачи исследования.

**Во второй главе** проведен анализ влияния выработки ресурса двигателя на изменение характеристик его узлов. Обобщены и систематизированы данные по изменению характеристики лопаточных машин при износе. Исследовано влияние на характеристики узлов двигателя малоизученного

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

«23 08 2023»

явления – кристаллического обледенения, образующегося во внутреннем контуре двигателя и способного привести к повреждениям и отказу двигателя.

**В третьей главе** разрабатывается математическая модель двигателя, позволяющая воспроизводить износ и кристаллическое обледенение путем соответствующего изменения характеристик лопаточных машин. Такая модель строится на базе термогазодинамической поузловой динамической математической модели турбореактивного двухконтурного двигателя (ТРДД), дающей возможность осуществлять расчет параметров рабочего процесса на установившихся и переходных режимах его работы. Коэффициенты деградации характеристик узлов в математической модели выбраны посредством осреднения имеющихся экспериментальных данных о воздействии внешних факторов на работу отдельных узлов и двигателя в целом.

**В четвертой главе** с использованием разработанной математической модели выполнены расчеты изменения характеристик ТРДД с большой степенью двухконтурности, управляемого по частоте вращения вентилятора, на дроссельных режимах при выработке ресурса и кристаллическом обледенении. По результатам моделирования показано, что регулирование частоты вращения вентилятора может приводить к снижению взлетной тяги на величину более 10 % при ухудшении характеристик узлов двигателя в течение жизненного цикла. Выполнен анализ изменения температуры газа на входе в турбину и запасов газодинамической устойчивости компрессоров в эксплуатации и определена возможность оптимизации управления для сохранения требуемой величины тяги с использованием имеющихся запасов по параметрам рабочего процесса двигателя.

**В пятой главе** для определения оптимального способа управления при износе и кристаллическом обледенении проведено исследование эффективности традиционных регуляторов измеряемых параметров и интеллектуального метода управления величиной тяги, получаемой расчетом в бортовой математической модели двигателя (БММД). Продемонстрирована возможность сохранения требуемого уровня тяги в эксплуатации при управлении рассчитываемой в БММД величиной тяги и высокая точность поддержания тяги двигателя при регулировании степени повышения давления в двигателе. Управление степенью повышения давления в двигателе также позволит снизить чувствительность двигателя к воздействию ледяных

кристаллов. Предложен алгоритм фиксации образования наледи во внутреннем контуре двигателя и способ адаптации управления двигателем к режиму полета и условиям эксплуатации.

**В шестой главе** проведено экспериментальное исследование разработанного способа управления рассчитываемой величиной тяги. Выполнен синтез регулятора тяги и его введение в программное обеспечение САУ двигателя-демонстратора. Проведены испытания на двигателе-демонстраторе с имитацией ухудшения характеристик компрессора в эксплуатации, по результатам которых регулятор тяги позволил компенсировать снижение тяги на 8 %, получаемое при применении штатного способа управления частотой вращения ротора высокого давления.

**В заключении** диссертации приведены основные результаты выполненного исследования.

**Научная новизна и теоретическая значимость работы** заключается в определении влияния различных видов износа и кристаллического обледенения на характеристики лопаточных машин; разработке математических моделей, позволяющих воспроизводить ухудшение характеристик узлов двигателя в эксплуатации; разработке методов управления, сохраняющих тягу двигателя при выработке ресурса и обеспечивающих безопасную работу двигателя в условиях кристаллического обледенения; разработке и экспериментальной отработке интеллектуального метода управления величиной тяги, рассчитываемой в бортовой математической модели двигателя.

**Практическая ценность результатов работы** определяется тем, что разработанные методы управления могут быть использованы при создании интеллектуального двигателя, позволят улучшить характеристики двигателя в эксплуатации и могут быть использованы как при модернизации существующих, так и при проектировании новых двигателей.

**Достоверность полученных результатов** обосновывается корректным использованием математических подходов при выполнении расчетных исследований и их удовлетворительной сходимости с результатами эксперимента.

### **Соответствие паспорту специальности**

Диссертация соответствует пунктам 1, 2, 10, 11, 13, 21, 22 паспорта научной специальности 2.5.15. «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях из перечней ВАК и Scopus, а также представлены и обсуждены на авторитетных международных конференциях.

**Автореферат** соответствует и в полном объеме отражает основное содержание диссертации.

### **Замечания и рекомендации по работе**

1. В работе не дана оценка эффективности применения перспективных методов предиктивного управления двигателем, описанных в обзорной части диссертации (глава 1), в сравнении с традиционным регулятором частоты вращения вентилятора.

2. Моделирование износа двигателя выполняется путем ухудшения характеристик лопаточных машин, но при этом не рассматривается изменение характеристик камеры сгорания, вызванное, например, коксованием форсунок.

3. Расчетные исследования влияния кристаллического обледенения на характеристики двигателя выполнены для крейсерского режима работы двигателя, хотя такое обледенение может происходить и на режиме полетного малого газа.

4. Рекомендовать опробовать результаты настоящей работы при стендовых испытаниях двигателя ПД-14, реализовав бортовую математическую модель двигателя в отдельной вычислительной машине.

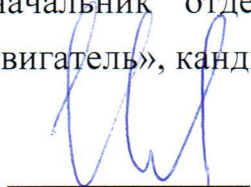
### **Заключение по диссертации**

Диссертация Сметанина Сергея Анатольевича «Компенсация ухудшения характеристик авиационного газотурбинного двигателя в эксплуатации средствами автоматического управления» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой впервые предложены новые технические решения, имеющие существенное значение для развития авиадвигателестроения. Работа выполнена на высоком научно-техническом уровне и 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 работам на соискание ученой степени кандидата наук.

Считаю, что Сметанин С.А. заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Официальный оппонент, начальник отделения систем автоматического управления АО «ОДК-Авиадвигатель», кандидат технических наук



Лисовин Игорь Георгиевич

«15» августа 2023 г.

Адрес: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-кт, д. 93

Тел.: 8 (342) 240-97-64

e-mail: lisovin@avid.ru

Подпись Лисовина Игоря Георгиевича удостоверяю

*Заместитель начальника  
отдела кадров  
АО «ОДК-Авиадвигатель»*



*И.С. Дятковский*

*С отзывом ознакомлен  
23.08.2023*

