

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, доцента, профессора кафедры «Авиационные двигатели» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологии» Бадамшина Ильдара Хайдаровича на диссертационную работу Андросович Ирины Вячеславовны «Методика выбора оптимальных конструктивных параметров лабиринтных уплотнений газотурбинного двигателя», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов  
(технические науки)

Диссертационное исследование Андросович И. В. посвящено решению задачи выбора оптимальных параметров лабиринтных уплотнений газотурбинных двигателей.

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью снижения утечек воздуха в узлах газотурбинных двигателей для повышения их удельных параметров и подтверждается рядом диссертационных исследований, выполненных по данной тематике.

**Обоснованность и достоверность полученных результатов** научных положений и выводов диссертации обусловлена: применением теоретически обоснованных и подтвердивших свою работоспособность методов; проверкой выполнения физических законов сохранения; и валидацией по опубликованным данным, полученных в результате численных и экспериментальных исследований. При моделировании уплотнений использован метод конечных элементов. Результаты диссертации были учтены в работах ПАО «ОАК» «ОКБ Сухого», акт внедрения № 1/451084/1027 от 27.03.2023.

В диссертации представлены следующие **новые научные результаты**.

1. Методика выбора оптимальных параметров лабиринтных уплотнений газотурбинных двигателей (ГТД), включающая математическую модель лабиринтных уплотнений и позволяющая учесть влияние уплотнения на работу ГТД;

2. Результаты численных исследований лабиринтных уплотнений.

**Теоретическая и практическая значимость результатов исследований.**

1. Разработанная методика позволяет выполнить оптимизацию лабиринтного уплотнения как части системы двигателя.

2. Разработанная математическая модель позволяет учесть взаимное влияние и изменение в процессе работы параметров лабиринтного уплотнения, теплового состояния элементов конструкции двигателя,

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

«21» 11 2023.

термогазодинамических параметров в изолированных уплотнениях полостях и частоты вращения ротора.

**Содержание** диссертации и автореферата выполнено в соответствии с ГОСТ Р 8. 0.1 - 2011. Диссертация и автореферат оформлены аккуратно, но содержат небольшое количество опечаток, орфографических и пунктуационных ошибок. Диссертационная работа изложена на 130 страницах машинописного текста, включает в себя 64 рисунка, 14 таблиц, а также список литературы, содержащий 92 наименования. Работа разделена на введение, 4 главы содержательной части, заключение, список сокращений и условных обозначений, список источников.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы.

В первой главе выполнен краткий аналитический обзор источников по теме диссертации. По результатам проведенного анализа сформулированы задачи данного исследования и выбрана методика их решения. Сделан вывод о возможности разработки дифференциальной математической модели бесконтактных уплотнений, учитывающей влияние уплотнения на термогазодинамические процессы, тепловое состояние моделируемой системы и механическое взаимодействие потока газа с ротором.

Во второй главе рассмотрена методика выбора оптимальных параметров лабиринтных уплотнений газотурбинного двигателя, которая включает в себя алгоритм, математическую модель лабиринтного уплотнения, для моделирования работы уплотнения совместно с двигателем и постановку задачи оптимизации с ограничениями, решить которую позволяет разработанная математическая модель.

В третьей главе рассмотрены математические модели течения вязкого газа в уплотнении, модели турбулентности, теплообмена и модель механических характеристик для расчета запаса прочности. Выполнено параметрическое исследование, анализ механизма и степени влияния геометрических параметров лабиринтного уплотнения на расход воздуха через него.

В четвертой главе рассмотрен пример применения предлагаемой методики. Разделы главы соответствуют этапам методики выбора оптимальных параметров уплотнения.

**В заключении** приведены основные выводы по результатам диссертационной работы. Применение всех этапов разработанной методики рассмотрено на примере прямого лабиринтного уплотнения с тремя гребнями, определены оптимальные геометрические параметры уплотнения в соответствии с поставленной задачей оптимизации. Снижение расхода через уплотнение в результате оптимизации составило до 28%. При решении задачи оптимизации проверялось выполнение ограничения на запас статической прочности уплотнения по пределу текучести. Разработанная автором методика позволяет найти оптимальные параметры уплотнения в соответствии с поставленной задачей оптимизации и с учетом его работы как части системы двигателя, что может позволить повысить

качество уплотнительных узлов газотурбинных двигателей. Разработанная математическая модель может позволить: повысить точность моделирования динамических процессов в роторных системах газотурбинных двигателей с учетом работы уплотнительных узлов; повысить точность моделирования теплового состояния газотурбинного двигателя и термогазодинамических процессов в тракте газотурбинного двигателя; учесть взаимное влияние вышеперечисленных процессов.

### **Основание выбранной специальности и отрасли науки диссертации**

Диссертация «Методика выбора оптимальных конструктивных параметров лабиринтных уплотнений газотурбинного двигателя» соответствует паспорту специальности 2.5.15 Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов. При этом работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности

п.2. Характеристики тепловых, электроракетных двигателей летательных аппаратов и их энергетических установок, отдельных узлов и систем при различных условиях их использования.

п.6. Методы конструирования тепловых и электроракетных двигателей летательных аппаратов, их узлов и систем, включая методы и системы автоматизированного проектирования двигателей с помощью ЭВМ.

п.13. Математическое моделирование рабочих процессов, характеристик, динамических процессов, рабочих состояний двигателей и энергетических установок, стадий и этапов их жизненного цикла (создания, производства, эксплуатации и утилизации).

п.17. Прогнозирование развития конструкции, технологии производства, формирование перспективных уровней электродинамического, термодинамического и эксплуатационно-технологического совершенства двигателей летательных аппаратов и их агрегатов, а также технико-экономических процессов их создания, производства и эксплуатации. Математические основы формирования требований к перспективным двигателям и энергетическим установкам летательных аппаратов.

п.23. Разработка методов расчета термогазодинамических и теплофизических процессов в двигателях и энергосиловых установках летательных аппаратов, их элементах.

По результатам анализа материалов диссертационной работы следует отметить следующие **замечания**.

1. Для апробации работы желательно проведение натуральных экспериментов. Это трудоемкая и дорогостоящая задача. В этих условиях достаточно приемлемым является проверка адекватности модели с помощью уже известных методик расчета, численных экспериментов, а также использование результатов экспериментов других авторов.

2. В задаче оптимизации лабиринтных уплотнений с точки зрения прочности рассматривается только статическое нагружение. Однако

наибольшее количество дефектов связано с циклическим нагружением. Поэтому в дальнейших исследованиях необходимо оценивать долговечность лабиринтных уплотнений с учётом мало- и многоциклового усталости.

3. Объектом исследования являются малогабаритные детали с небольшими радиусами закруглений. Последние являются концентраторами напряжений, а они, в свою очередь, одной из причин возникновения трещин. Учет концентрации напряжений требует более детальной проработки.

### **Заключение по диссертационной работе.**

В целом, диссертационное исследование Андросович Ирины Вячеславовны является законченной и выполненной самостоятельно научно-квалификационной работой. Автором разработана новая методика, позволяющая решить задачу оптимизации лабиринтного уплотнения с учетом его работы как части системы двигателя, имеющая существенное значение для развития машиностроительной отрасли.

Тематика и содержание диссертации соответствуют специальности 2.5.15 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Непосредственно по теме диссертационной работы основные результаты изложены в 21 публикациях, в том числе 5 в изданиях, включенных в перечень ВАК, из них 2 индексируемые в международной наукометрической базе «Scopus». Результаты работ прошли апробацию на 21 научно-технической конференции. Автореферат и опубликованные работы в полной мере отражают содержание диссертации и полученные автором основные научные результаты.

Представленная диссертационная работа по уровню полученных результатов, содержанию и оформлению удовлетворяет требованиям п.п. 9-14 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, а ее автор – Андросович Ирина Вячеславовна заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергетические установки летательных аппаратов».

Профессор кафедры «Авиационные двигатели» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологии», доктор технических наук, доцент



Подпись *Бадамшин И. А.*  
Удостоверяю « *13* » *11* 20*23*.  
Наименование должности *И. А. Бадамшин*  
Наименование организации *Уфимский университет науки и технологии*

*И. А. Бадамшин*

Бадамшин Ильдар  
Хайдарович

Кандидатская диссертация защищена по специальности 05.07.05  
Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных  
аппаратов.

Докторская диссертация защищена по специальности 01.02.06  
Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры.



С отяван ожекошине

И.А.А. - Андреевский  
21.11.2023