

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и цифровой
трансформации ФГБОУ ВО
«Рыбинский государственный
авиационный технический
университет имени

П.А. Соловьева», к.т.н., доцент



 А.Н. Сутягин

10 2023 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Андросович Ирины Вячеславовны на тему «Методика выбора оптимальных конструктивных параметров лабиринтных уплотнений газотурбинного двигателя», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Актуальность темы.

Постоянно повышающиеся требования к авиационным двигателям требуют развития существующих и создания новых подходов к их проектированию. При проектировании современных авиационных двигателей рассматриваются не только их удельные характеристики, такие как удельная тяга и удельный расход топлива, но и приемистость, критерии надежности, усталостные характеристики узлов, роторная динамика и устойчивость протекающих процессов. Решение актуальных задач двигателестроения требует

Отдел документационного
обеспечения МАИ

«21» 11 2023.

создания комплексных подходов и междисциплинарных математических моделей.

Характеристики современных газотурбинных двигателей в настоящее время приблизились к своему пределу. Их развитие достигается прежде всего за счет повышения КПД узлов, снижения утечек рабочего тела за счет более совершенных уплотнительных узлов и дополнительного учета даже слабо влияющих факторов при анализе работы двигателя, как единой системы.

Снижение утечек воздуха является одним из перспективных путей совершенствования авиационных двигателей, а возможность учесть при проектировании двигателя влияние работы уплотнительных узлов на термодинамические процессы в газотурбинном двигателе, его тепловое состояние и динамику переходных процессов позволит более качественно увязать параметры газотурбинного двигателя и оценить выполнение предъявляемых к нему требований.

Вышесказанное подтверждает актуальность работы, посвященной созданию многодисциплинарной методики проектирования и оптимизации лабиринтных уплотнений.

Научная новизна.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана математическая модель бесконтактных уплотнений в сосредоточенных параметрах, учитывающая инерционность процессов в уплотнении, процессы теплообмена, а также силовое взаимодействие ротора и статора с потоком газа;
- разработана методика выбора оптимальных параметров и поставлена задача оптимизации лабиринтных уплотнений в системе газотурбинного двигателя;
- определены требования и сформулированы рекомендации для численного моделирования рабочих процессов в лабиринтных уплотнениях и установлены эмпирические коэффициенты в математической модели лабиринтного уплотнения;

Общая характеристика работы.

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

В первой главе выполнен аналитический обзор литературных источников по теме исследования, показано современное состояние научной проблемы, проанализированы существующие методы ее решения. 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 протечки воздуха.

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

В заключении диссертационного исследования были сформулированы выводы, суть которых заключается в следующем. Применение всех этапов разработанной методики рассмотрено на примере прямоточного 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. В дальнейшем постановка задачи может быть модифицирована так, чтобы при решении задачи оптимизации учитывались также ограничения динамической прочности или малоциклового усталости уплотнения. Несмотря на уменьшение радиусов скругления в основании гребней уплотнения, которые могли оказаться концентраторами напряжений, запас прочности уплотнения после оптимизации увеличился за счет уменьшения суммарного изгибающего момента. Выполнено моделирование совместной работы уплотнений до и после оптимизации с учетом момента инерции ротора и тепловых масс ротора и статора, показано влияния крутящего момента от сил вязкого трения на торможение ротора и влияние теплового потока через уплотнение на нагрев ротора и статора в течение 70 секунд моделирования работы уплотнения.

Разработанная методика позволяет найти оптимальные параметры уплотнения в соответствии с поставленной задачей оптимизации и с учетом его работы, как части системы двигателя, что позволяет повысить качество уплотнительных узлов газотурбинных двигателей. Разработанная математическая модель позволяет: 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.

Значимость полученных автором диссертации результатов для развития соответствующей отрасли науки заключается в разработке методики определения оптимальных конструктивных параметров уплотнительных узлов в системе авиационного двигателя.

Практическая ценность результатов работы заключается в возможности их непосредственного использовать в конструкторских бюро и научно-исследовательских организациях:

- разработанную методику использовать для оптимизации лабиринтного уплотнения по критериям двигателя;

- разработанную математическую модель использовать для выполнения проектировочных и поверочных расчетов бесконтактных уплотнений как в изолированной постановке, так и в системе двигателя;

Научная ценность работы заключается в разработанной математической модели бесконтактного уплотнения, сформулированной в постановке задачи оптимизации лабиринтного уплотнения и полученных зависимостях для влияния геометрических параметров лабиринтного уплотнения на расход воздуха через уплотнение.

Достоверность результатов диссертации обусловлена применением теоретически обоснованных методов, проверкой выполнения законов сохранения и валидацией методик, которые показали высокую сходимость результатов расчетов с известными литературными источниками и опубликованными результатами численных и экспериментальных исследований. Результаты диссертации были учтены в работах ПАО «ОАК» «ОКБ Сухого», акт внедрения № 1/451084/1027 от 27.03.2023. Достоверность результатов также подтверждается их всесторонним обсуждением на научных конференциях и семинарах и большим количеством публикаций в рецензируемых изданиях.

Апробация работы и полнота опубликованных результатов.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 21 научно-технической конференции, в том числе 15 международных и 6 всероссийских конференциях. Тематика выступлений отражает все основные разделы диссертационной работы.

Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации.

Полученные результаты и выводы, приведенные в диссертации рекомендуется использовать при разработке и модернизации авиационных силовых установок, в частности при проектировании и доводке уплотнительных узлов.

Замечания по работе.

По диссертации имеется ряд замечаний, не снижающих общую положительную оценку работы:

1. Разработанная математическая модель бесконтактного уплотнения позволяет моделировать динамические процессы в уплотнительных узлах роторов газотурбинных двигателей и нагрев элементов конструкции, но не учитывает теплового расширения и характера изменения зазора бесконтактного уплотнения, хоть и допускает при незначительных изменениях использование в качестве зазора функции, а не константы.

2. В работе описано два метода оптимизации, при настройке математической модели уплотнения применяется метод NLPQL, приведены соответствующие уравнения, но не указаны преимущества данного метода. При постановке задачи оптимизации не даны рекомендации по методу оптимизации уплотнения. При оптимизации геометрии лабиринтного уплотнения применяется метод *adaptivesingleobjective*, при этом в работе не приведено описание данного метода.

3. При настройке математической модели применяется критерий минимизации среднеквадратичных отклонений, а при сравнении математических моделей критерий корреляции Пирсона, который в свою очередь также основан на значении среднеквадратичных отклонений, в тексте диссертации не дано пояснений о необходимости применения именно таких критериев.

4. Разработанная модель лабиринтного уплотнения не учитывает особенности конструктивного исполнения статорной поверхности (наличия прирабатываемого покрытия или сотовой вставки, а также возможности врезания гребешков лабиринта в эти поверхности).

5. Модель уплотнения разработана для воздушных полостей. При этом не понятно можно ли её использовать для двухфазных сред, которые имеют место в масло - воздушных полостях опор двигателей.

6. Предложенная в работе методика предусматривает возможность отсутствия существующего решения с необходимостью уточнения требований и проектных параметров, но в рамках диссертации данный пункт не рассмотрен.

7. Читаемость работы осложнена за счет использования автором обозначений как из отечественной, так и из зарубежной литературы.

8. Сделанные в работе выводы не подтверждены натурными испытаниями, автор ограничивается численным исследованием.

Заключение.

Диссертационная работа Андросович Ирины Вячеславовны представляет собой законченную и выполненную самостоятельно научно-квалификационную работу, которая посвящена актуальной научной проблеме и имеет практическое и теоретическое значение. Работа выполнена на высоком научно-техническом уровне. Диссертация и автореферат написаны ясным и понятным научным языком. Содержание диссертации последовательно и связно отражает порядок и суть проведённых исследований. Применяемые в работе методы и порядок их использования описаны достаточно подробно. Автореферат по содержанию и структуре изложения в полном объеме отражает содержание диссертации. Судя по автореферату и диссертации основные результаты принадлежат лично автору.

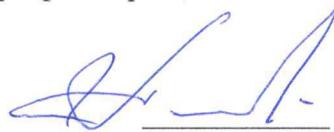
Научные положения и результаты, выносимые на защиту, полностью отражены в работе и публикациях и соответствуют паспорту специальности 2.5.15 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Несмотря на отмеченные недостатки, по содержанию, научному уровню, полученным результатам, актуальности, практической и теоретической

значимости диссертационная соответствует требованиям пунктов 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 энергоустановки летательных аппаратов».

Отзыв на диссертацию Андросович Ирины Вячеславовны «Методика выбора оптимальных конструктивных параметров лабиринтных уплотнений газотурбинного двигателя» обсужден и утвержден на заседании кафедры "Авиационные двигатели" ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева, протокол № 4 от 30.10.2023г., результаты голосования – единогласно.

Заведующий кафедрой "Авиационные двигатели"
ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный
технический университет имени П.А. Соловьева»,
доктор технических наук, профессор



Ремизов Александр Евгеньевич

С отзывом ознакомлена 21.11.2023


/Андросович ИВ