

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, профессора Евдокимова Алексея Иннокентьевича 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 диссертационной работы**

Известно, что уплотнения предназначены для уменьшения вредных утечек воздуха (газа). При наличии вращающихся и не вращающихся деталей газотурбинного двигателя (ГТД) избежать утечек не удастся. Задача стоит в их минимизации.

Актуальность проблемы по снижению потерь на утечки воздуха не вызывает сомнений, ибо уменьшение утечек и перетекания воздуха (газа) в газоздушном тракте ГТД способствует повышению эффективности его работы: увеличению КПД, тяги двигателя, уменьшению удельного расхода топлива и т. п.

Создание герметичных полостей (наддува, думисных, рессиверных и т. п.), снижение утечек воздуха и газа по проточной части двигателя решается за счет специальных уплотнений различного типа: лабиринтных, графитовых, щеточных, пальчиковых, их комбинаций, уплотнительных колец и др.

Опыт создания современных и перспективных ГТД свидетельствует о непрерывном поиске и выборе не только того или иного типа уплотнения, но и повышении эффективности работы выбранного уплотнения за счет назначения рациональных его конструктивных параметров.

Важно еще на ранней стадии, этапе ОКР иметь возможность оценить правильность выбранного конструктивного решения по уплотнению.

Наличие в арсенале конструктора программного продукта по выбору рациональных конструктивных параметров уплотнения позволит существенно упростить и ускорить решение данной задачи с наибольшей эффективностью.

Диссертационную работу И.В. Андросович стоит рассматривать как разработку отечественного программного продукта по оптимизации конструктивных параметров широко распространенного лабиринтного уплотнения (ЛУ) для широкого ряда типоразмеров и большого диапазона значений параметров рабочего тела (воздуха, газа). В ней решена важная актуальная научная задача по разработке методики выбора оптимальных параметров лабиринтных уплотнений в системе газотурбинного двигателя.

Актуальность выбранной темы – очевидная.

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

«14» 11 2023г.

**Общая характеристика диссертации**, изложенной на 130 стр. в 4 главах.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, отмечены научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Указан вклад автора в проведенные исследования. Приводятся объем и структура работы. Формулируются положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен обзор существующих типов (классификация) уплотнений, применяемых для снижения вредных утечек рабочего тела (воздуха, газа) в узлах авиационных двигателей. Приводится анализ исследований, выполняемых в России и за рубежом, по моделированию процессов в лабиринтных уплотнениях.

Определяя актуальность проблемы, автор справедливо отмечает о длительном и непрекращающемся поиске теоретических подходов по изучению процессов, происходящих в лабиринтных уплотнениях, необходимости снижения расхода воздуха (газа) через них с целью улучшения газодинамических характеристик и параметров двигателя. Указывается, что наиболее эффективным считается направление, предусматривающее оптимизацию конструктивных параметров лабиринтного уплотнения, с возможностью учета теплового состояния и взаимодействия потока рабочего тела в лабиринтном уплотнении с ротором. Отмечается необходимость выбора параметров лабиринтного уплотнения с учетом работы его узла в системе ГТД. Сформулированы основные направления работы по достижению поставленной цели.

**Во второй главе** представлены основные положения методики выбора оптимальных конструктивных параметров лабиринтного уплотнения в системе ГТД. Ее основу составляют математическая модель лабиринтного уплотнения и алгоритм выбора оптимальных параметров. Автор грамотно подошел к выбору базовой модели ЛУ, проведя сравнительный анализ точности различных существующих моделей с использованием коэффициента корреляции Пирсона. За основу разработанной им математической модели лабиринтного уплотнения принята известная энергетическую модель Веннарда и Стрита, в которую введены дополнительные коэффициенты, позволяющие учитывать особенности геометрии уплотнения, а также особенности течения при различных перепадах давления и различных частотах вращения. Дополнительно автор в унифицированную математическую модель определения расхода воздуха через уплотнение включает зависимости, позволяющие учет теплового и механического взаимодействия элементов уплотнения с ротором двигателя. Это весьма важно при выборе конструктивных параметров лабиринтных уплотнений для современных и перспективных высокооборотных роторов с частотами вращения 25 000 об/мин и более. Сравнение результатов расчета по предложенной математической модели с

результатами вычислительной гидрогазодинамики и ранее разработанными моделями показали удовлетворительную сходимость. Глава логично завершается формулировкой задачи оптимизации уплотнения по критерию минимального расхода воздуха через лабиринтное уплотнение.

**Третья глава** посвящена изучению механизмов течения и физических причин уменьшения расхода потока через лабиринтное уплотнение, а также анализу влияния геометрических параметров ЛУ на его эффективность. При этом автором справедливо рассмотрены математические модели течения вязкого потока в лабиринтном уплотнении с использованием фундаментальных законов неразрывности, сохранения массы, сохранения импульса, сохранения энергии, а также модели турбулентности и прочностного анализа – величина деформации и запас прочности. Реализация принятых математических моделей осуществляется методом конечных элементов с использованием современных программных комплексов, предусматривающих создание оптимальной вычислительной сетки различной степени детализации. Доказательство возможности использования (валидация) математической модели выполнено на примере влияния зазора в лабиринтном уплотнении на расход воздуха через него. Получено удовлетворительное согласование с ранее выполненными расчетными и экспериментальными исследованиями.

Важной частью данной главы являются параметрические исследования с сравнительной оценкой влияния каждого конструктивного параметра (количество гребней, высота, углы наклона, расстояние между гребнями, зазор и др.) ЛУ на величину расхода воздуха через лабиринтное уплотнение. Отмечено, что значительное влияние на эффективность работы лабиринтного уплотнения оказывают зазор, количество гребней, расстояние между ними, углы наклона.

Установлено, что при работе ЛУ реализуются два основных механизма уменьшения расхода потока через уплотнение: диссипация (из-за образования вихревых структур между гребнями) энергии и уменьшение эффективной площади поперечного сечения в зазоре.

Проведенные исследования легли в основу решения автором оптимизационной задачи, при этом они представляют самостоятельную ценность для конструкторов при выборе и проектировании лабиринтных уплотнений.

**Четвертая глава** – важная составляющая диссертационной работы с представлением практического использования разработанного программного продукта – методики оптимизации конструктивных параметров лабиринтного уплотнения. Представлена пошаговая реализация предложенного алгоритма оптимизации. Показаны направления выполнения подготовительных этапов в части выбора типа ЛУ, вводимых ограничений и граничных условий, определения параметров расчетной сетки. Проведенные параметрические исследования

позволили автору дать конкретные рекомендации по выбору значений расчетной сетки, учету переходных процессов, частоты вращения ротора, необходимости оценки и применению подходов по удовлетворению условий прочности ЛУ в составе узла двигателя. Важно отметить, что предлагаемые автором рекомендации имеют достаточные расчетные обоснования для их принятия с оценкой достоверности получаемых результатов. Приведены конкретные примеры результатов оптимизации конструктивных параметров лабиринтного уплотнения по расходу воздуха через него. Задача решается с использованием программного комплекса ANSYS с применением метода адаптивной однокритериальной оптимизации. Сравнительные результаты расчета уплотнения до оптимизации и после оптимизации убедительно свидетельствуют о целесообразности проведения такой оптимизации: по оценкам автора снижение расхода воздуха через оптимизированное ЛУ может составлять до 28 %. Трудно не согласиться с мнением автора, подкрепленное расчетами, что положительные результаты при оптимизации достигаются, прежде всего, за счет увеличения турбулентной кинетической энергии и как следствие – увеличения потерь полного давления, снижения скорости потока в зазорах на каждом гребне оптимизированного уплотнения. Кроме того, автор обращает внимание конструкторов на то, что в оптимизированном уплотнении имеет место более интенсивный теплообмен между потоком и элементами конструкции.

**Научная новизна** выполненной диссертационной работы заключается в разработке:

- математической модели функционирования лабиринтного уплотнения с учетом процессов теплообмена, режима работы двигателя;
- методики выбора оптимальных конструктивных параметров лабиринтного уплотнения в системе авиационного газотурбинного двигателя;

**Лично автором были разработаны:**

- методика выбора оптимальных конструктивных параметров лабиринтного уплотнения;
- математические модели, описывающие рабочие процессы в лабиринтных уплотнениях;
- рекомендации по определению параметров лабиринтных уплотнений для настройки математических моделей;
- выполнены параметрические исследования влияния основных параметров на расходные характеристики лабиринтного уплотнения;
- проведена оценка эффективности (по величине утечек воздуха) оптимизированного лабиринтного уплотнения в системе узла ГТД.

### **Практическая значимость полученных в диссертации результатов**

состоит в том, что разработанная методика выбора оптимальных конструктивных параметров лабиринтного уплотнения позволяет на любом этапе создания и совершенствования ГТД получить рекомендации по конструктивным значениям уплотнения с наименьшим уровнем вредных утечек воздуха (газа). Создан важный для конструктора программный продукт.

Важно отметить, что результаты диссертационной работы уже нашли свое практическое применение и реализованы в промышленности на предприятии «ОКБ Сухого». Расчетными оценками показано, что при применении оптимизированного уплотнения в ГТД для изделий ОКБ «Сухого» вместо исходного представляется возможность снизить потери тяги до 2 % (акт от 27.03.2023 г. представлен).

**Степень достоверности полученных результатов, положений и заключений, содержащихся в диссертации,** подтверждается удовлетворительным совпадением ряда результатов диссертации с результатами стендовых экспериментальных исследований, проведенных другими авторами, по оценке эффективности прямоточного лабиринтного уплотнения.

Предложенная в работе методика выбора оптимальных конструктивных параметров уплотнения базируется на апробированных известных подходах, математических моделях, современном методе конечных элементов.

**Автореферат** отражает основные подходы и положения математического моделирования, методик расчетов, результаты, заключения и **соответствует содержанию диссертационной работы.**

**Диссертация соответствует паспорту специальности 2.5.15 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».**

### **Подтверждение опубликования полученных результатов в печати**

По теме диссертации опубликовано 21 печатная работа, в том числе 5 – в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК при Министерстве образования и науки РФ. Материалы работы широко представлены и обсуждены на 21 международных и всероссийских научно-технических конференциях.

Диссертация написана грамотным языком с употреблением общепринятого в данной предметной области понятийного аппарата, изложение текста характеризуется как логическое и убедительное.

Поставленные в работе задачи решены в полном объеме. Цель достигнута.

### **Недостатки работы**

По диссертационной работе можно выделить следующие недостатки.

1. До этапа внедрения предложенной методики выбора оптимальных конструктивных параметров лабиринтных уплотнений в реальных узлах ГТД недостаточно качественно выполнены расчетно-аналитических

исследований, требуется проведение цикла специальных лабораторных и стендовых натурных экспериментальных исследований.

2. В работе слабо представлены примеры конкретных конструктивных узлов двигателя с использованием лабиринтных уплотнений. При этом автор не указывает граничные условия в многообразии типов и конструкций уплотнений, что затрудняет оценить область возможного применения разработанного математического аппарата в задачах выбора оптимальных параметров лабиринтного уплотнения. Отсутствие конструктивной схемы конкретного узла с лабиринтным уплотнением затрудняет оценить получаемый эффект при замене применяемого уплотнения на оптимальное, кроме того не позволяет оценить результаты расчета запаса прочности выбранного варианта ЛУ.
3. К сожалению, в работе не делается оценка принципиальной возможности технологического изготовления лабиринтного уплотнения с выбранными расчетными оптимальными конструктивными параметрами, прежде всего с возможностью использования традиционных технологических процессов или разработкой новых принципов изготовления.
4. В настоящее время и в перспективе широкое применение получают лабиринтные уплотнения с сотовыми вставками. К сожалению, автор ограничивается конструктивной схемой ЛУ с гладкой поверхностью и не указывает на возможные особенности течения потока и оптимизации конструктивных параметров таких вариантов исполнения лабиринтных уплотнений.

#### **Заключение о соответствии диссертационной работы критериям, установленным Положениям о порядке присуждения учёных степеней**

Несмотря на указанные выше недостатки, диссертация И.В. Андросович заслуживает положительной и высокой оценки.

По своему содержанию диссертация является завершённой научно-квалификационной работой, в которой на основе теоретических, расчетно-параметрических исследований предложен новый подход по выбору оптимальных конструктивных параметров лабиринтного уплотнения для узлов ГТД, реализация которого позволит снизить вредные утечки воздуха (газа), тем самым повысить эффективность работы современных и перспективных двигателей.

Диссертационная работа выполнена автором самостоятельно, содержит новые научные результаты, имеющие практическую значимость, и отражает положения, которые выносятся на защиту.

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

По степени актуальности, научной новизне и практической значимости работа отвечает критериям ВАК для кандидатских диссертаций, указанным в пункте 9 «Положение о присуждении ученых степеней», а ее автор, АНДРОСОВИЧ ИРИНА ВЯЧЕСЛАВОВНА заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

### Официальный оппонент

Доктор технических наук, профессор,

главный специалист отдела конструкторско-технологического перспективных проектов филиала АО «Объединенная двигателестроительная корпорация» «Научно-исследовательский институт технологии и организации производства двигателей» (филиал АО «ОДК» «НИИД»)

А.И. Евдокимов

117393, г. Москва, улица Академика Пилюгина, д. 8, к. 1, кв. 333  
тел. 8-910-400-48-59  
eai47@mail.ru

Подпись профессора А.И. Евдокимова заверяю

начальник бюро управления персоналом  
филиала АО «ОДК» «НИИД»



Т.В. Докторова

25.10.2023

14.11.2023

С отзывом

онокашлена И.В.  
Андрасович И.В.