

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Александра Олеговича Пугачёва «Щеточные уплотнения в роторных системах авиационных двигателей», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергетические установки летательных аппаратов.

Актуальность

Уплотнительные условия определяют эффективность современных авиационных двигателей. Требования обеспечения минимальных зазоров в газодинамическом тракте, системе вторичных потоков и маслосистеме двигателя, уменьшения утечек и проблемы герметизации полостей привели к появлению новых конструкций уплотнений, среди которых следует отметить гибкие саморегулируемые уплотнения – щёточные, пальчиковые и комбинированные. Применение этих уплотнений в несколько раз снижает утечки и потери в газодинамическом тракте, повышая КПД узлов. Отметим, что проблема расчета параметров гибких уплотнений относится к задачам многодисциплинарного математического моделирования. Методы расчета и проектирования таких уплотнений в настоящее время находятся в стадии разработки. Однако, законченная методика, позволяющая получить проект уплотнительного узла со щеточным уплотнением, отсутствует. В связи с этим тему диссертационной работы А.О. Пугачёва следует считать актуальной.

Содержание работы

Диссертационная работа, изложенная на 498 страницах, включает: общую характеристику работы, семь глав, заключение, 44 страницы списка литературы из 399 наименований и 4 приложения на 33 страницах.

Во введении приведена общая характеристика; указаны: актуальность работы, цели и задачи исследования, научная новизна, методы исследования, достоверность и практическая значимость результатов работы, сведения об апробации и публикациях, результаты и положения, которые автор выносит на защиту.

В первой главе приведен обзор литературы, посвященной различным конструкциям уплотнений и современному состоянию вопроса. Отмечается, что щеточные уплотнения являются весьма перспективными, так как позволяют существенно снизить утечки по сравнению с традиционными типами бескон-

тактных уплотнений. Так же автор сформулировал основные проблемы, стоящие перед разработчиками уплотнительных узлов. Причем, наибольшее внимание уделяется динамическим эффектам в системе ротор-корпус, вызванным как аэродинамическим демпфированием, так и неравномерным распределением температур в материале вала. Приведенный автором обзор позволил ему сформулировать основные направления исследования и структуру диссертационной работы.

Во второй главе приведены классификация и принципы функционирования уплотнений в турбомашинах. Анализируя конструктивные особенности и параметры уплотнений автор, по сути дела, продолжает и развивает положения обзора литературы из первой главы. По моему мнению, материалы первой и второй главы можно было бы объединить в одну главу, что позволило бы исключить повторы. Кроме этого, на ряде рисунков, заимствованных из цитируемой литературы обозначения, часто не полные, приведены на языке оригинала, что затрудняет чтение работы.

Третья глава посвящена обзору опубликованных в литературе различными авторами и разработанных автором теоретических моделей и методов расчета параметров уплотнений. Автор отмечает, что использование методов вычислительной гидродинамики является наиболее перспективным для расчета параметров щеточного уплотнения. Основываясь на известных соотношениях уравнений Навье-Стокса, автор разработал различные расчетные схемы применительно к расчету лабиринтных и щёточных уплотнений. Причем, щеточное уплотнение моделирует дискретный набор волокон. Наряду с этим, автор рассмотрел возможность применения для расчета параметров щеточных уплотнений модели пористой среды и модели упругого деформирования волокна. Пористая среда включена как элемент в общую ВГД модель уплотнения. При этом автор модифицировал, основанную на законе Дарси, общепринятую модель пористой среды таким образом, чтобы учесть особенности течения газа через ряды волокон. Результатом этой главы являются: модель трёхмерного сегмента щеточного уплотнения, которая в Главе 5 и далее используется для определения расхода; полноохватная модель уплотнения, предназначенная для исследования влияния эксцентриситета и определения динамических коэффициентов уплотнения; дискретная модель малого сегмента уплотнения, предназначенная для исследования особенностей течения газа через щеточный пакет. Автор рассматривает методику калибровки модели пористой среды для выбора адекватных эмпирических коэффициентов модели. Эта глава носит, в основном, методический характер – автор разработал основные расчетные схемы ВГД, включающие сетки, граничные и

начальные условия, предназначенные для дальнейшего исследования уплотнений.

В четвертой главе диссертант рассматривает комплекс проблем, связанных с исследованием влияния уплотнений на динамику роторных машин. Дано описание балочной модели и трехмерной модели. Однако основное внимание уделяется балочной модели, особенность которой при исследовании динамики ротора заключается в применении матриц жесткости и демпфирования конечного элемента балки Тимошенко. Необходимость исследования взаимодействия ротора и уплотнения вызвана тем, что они образуют связанную нелинейную систему, параметры которой – частотный спектр и амплитуды отклонений вала существенно влияют на работу уплотнения, а циркуляционные силы, возникающие в уплотнении, влияют на динамику ротора. Для расчета динамики ротора автор разработал в среде MATLAB собственный программный комплекс, использующий модель балки Тимошенко и применил систему ANSYS, адаптировав с помощью скриптов элемент балки Тимошенко и «осесимметричный трехмерный» конечный элемент для исследования частот и форм колебаний ротора. Применение упомянутых выше моделей продемонстрировано на примере расчета частот и форм колебаний и моделирования переходных режимов ротора малоразмерного ГТД. Отметим результаты исследования: динамики ротора ГТД с учетом скольжения валов газогенератора и свободной турбины; влияния, установленного за турбиной газогенератора, масляного демпфера со сдавливаемой пленкой; учет эффекта взаимодействия бандажа турбины с уплотнением газодинамического тракта на корпусе. Для учета демпфирования и жесткости уплотнительного узла при исследовании динамики ротора автор предложил применить: метод траекторий; подход аналогичный применяемому при расчете подшипников скольжения; метод круговой прецессии. Отметим, что также как и Глава 3 четвертая глава носит методический подготовительный характер для дальнейшего исследования.

В пятой главе автор привел результаты анализа перечисленных выше моделей методов теоретических исследований и описал экспериментальные стенды и методики проведения экспериментов. Наряду с обсуждением общеизвестных проблем, связанных с реализацией ВГД – качество сеток, учет граничных условий, выбор метода решения уравнений Навье-Стокса и т.д., автор разработал расчетные схемы для некоторых конструкций уплотнений и верифицировал результаты расчетов, используя различные комплексы CFD: ANSYS CFX, FLUENT, Open FOAM. Следует отметить, что материал этой

части пятой главы представляет несомненную практическую ценность и научную новизну.

Вторая часть главы посвящена описанию двух испытательных стендов Мюнхенского технического университета, где при участии диссертанта проводились экспериментальные исследования.

В шестой главе автор привел результаты исследования характеристик уплотнений с использованием разработанных методов и моделей. Параметры щеточных уплотнений сравниваются с параметрами коротких лабиринтных уплотнений. Рассмотрены различные конструкции таких уплотнений. Автор показал преимущество предложенной им улучшенной конфигурации лабиринтного уплотнения с наклонными гребешками по сравнению базовой конструкцией. Аналогичное исследование выполнено для 20 гребешкового уплотнения. Результаты расчетов сопоставлены с экспериментами, выполненными в университете «Остин-Мартин» в Техасе под руководством Чилдса.

Различные конфигурации щеточных уплотнений рассчитаны автором, и результаты сопоставлены с экспериментами, выполненными с его участием. Следует отметить удовлетворительное соответствие между результатами экспериментальных исследований и расчетов, как распределений давлений, так и динамических коэффициентов. Выполненные параметрические исследования, подтвержденные экспериментально, представляют несомненную практическую значимость и отличаются новизной.

Седьмая глава содержит практические рекомендации и инженерные методы для определения параметров щеточных уплотнений. На основе результатов главы 6 и анализа известных опубликованных экспериментальных результатов автор привел для сравнения обобщенные результаты по коэффициентам жесткости, перепадам давлений, демпфированию, расходам для различных конструкций уплотнений. Дано описание особенностей деформирования щеточного пакета. Определенный интерес представляет обсуждение вопросов проектирования узлов со щеточными уплотнениями: учет трибологических характеристик, требования к покрытиям валов, анализ конструктивных решений.

Замечания

1. Диссертационная работа переразмерена. Половину текста работы составляют методические материалы, объем которых можно было бы со-

- кратить, предоставив при редактировании место для более подробного освещения результатов автора.
2. Выводы по главам, заключение и формулировки научной новизны работы размыты и неконкретны.
 3. Имеет место неполнота представления результатов. Так, например, в таблицах 5.11 и 5.12 приведены параметры, описание которых в тексте работы отсутствует. При каких условиях проводились статический и динамический анализы? Что такое «крутильные» напряжения (стр.257)?
 4. На ряде рисунков и схем, например, рис. 2.21, 2.22, 2.23. 2.24, 2.25 либо отсутствуют пояснительные подписи и сноски, либо они на языке оригинала.
 5. Все результаты приведены для изотермического случая, несмотря на то, что технология ВГД позволяет решать, рассмотренные в диссертации задачи с учетом теплообмена.
 6. Стр.189-190 – учет эффекта от контактного взаимодействия. Непонятно, почему приведенная масса M и амплитуда A имеют размерность кг? При этом отметим, что автор при наступлении контакта ротора с корпусом в системе численного моделирования ступенчато изменил жесткость и демпфирование. Однако, не ясно учитывал ли он времена соприкосновения и отскока и особенности маятниковых колебаний.
 7. Отметим, что осесимметричная трехмерная (стр. 167) модель ротора неприемлема для исследования. Возможно, автор имел в виду трехмерную модель с использованием разложения в ряд Фурье по окружности?
 8. В работе создана система моделей, методов и алгоритмов математического моделирования щеточных уплотнений, выполнено их сравнение. Однако, автор в заключении и выводах не привел окончательных рекомендаций о необходимости разработки моделей разного уровня сложности для проектирования уплотнений.

Научная новизна

1. Автор впервые разработал иерархическую систему моделей и методов многодисциплинарного математического моделирования параметров щеточных уплотнений турбомашин.
2. К новым научным результатам следует отнести:
 - Разработку и включение в общую модель ВГД конструкции щеточного уплотнения модели пористой среды адаптированной к условиям течения газа в щеточном пакете;

- Динамическую модель ротора, учитывающую влияние уплотнения:
 - Комплекс методов для определения по результатам вычислительных экспериментов динамических коэффициентов, жёсткостей и демпфирования, расходных характеристик уплотнений;
 - Результаты сравнительного анализа различных расчетных схем и комплексов ВГД при решении тестовых и практических задач анализа лабиринтных и щеточных уплотнений.
 - Ряд новых экспериментальных результатов, полученных автором при испытаниях уплотнений.
 - Обоснованные результатами междисциплинарного математического моделирования инженерные методы определения параметров уплотнений.
3. Автор выполнил исследования эффективности ряда конструктивов лабиринтных, щеточных и комбинированных уплотнений с использованием многокритериальных оценок, основанных на сравнении расходов, величин динамических коэффициентов и прогнозировании устойчивости работы. Разработку критериев сравнения и полученные оценки следует отнести к новым научным результатам

Практическая значимость результатов работы несомненна. Автор создал современную методику расчета щеточных уплотнений, которая может стать основой для практической работы ОКБ, занимающихся вопросами проектирования турбомашин и авиационных двигателей. Материалы диссертации по сравнительному анализу конструкций уплотнений представляют методический интерес для конструкторов. Теоретические результаты работы могут быть использованы в учебных курсах соответствующих кафедр университетов. Учитывая большой объем методического и теоретического материала, приведенного в первых четырех главах работы, считаю, что на их основе может быть создана монография, посвященная уплотнительным устройствам. Программы, разработанные автором, могут быть использованы при проектировании уплотнений и исследовании динамики роторов.

Достоверность положений и выводов работы подтверждена: вычислительными экспериментами и математическим моделированием процессов в конструкциях уплотнений с применением разработанных автором и коммерческих программных комплексов и моделей; сопоставлением численных результатов с экспериментами, как автора, так и опубликованными в научно-технической литературе.

Заключение

Несмотря на приведенные выше замечания, считаю, что диссертационная работа А.О. Пугачёва является законченной квалификационной работой, в которой решена важная техническая проблема – создана методика расчета щеточных уплотнений турбомашин. Автореферат диссертации дает полное представление о ее уровне и содержании. По результатам исследований автора опубликовано 17 работ из перечня, рекомендованного ВАК РФ, и 14 работ, входящих в Web of Science и Scopus.

Приведенные выше замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы. Диссертант решил важную научную проблему, обладающую новизной и практической значимостью. Достоверность результатов подтверждена.

Считаю, что диссертация А.О. Пугачёва соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов. Диссертант, Александр Олегович Пугачёв, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук.

Официальный оппонент
начальник отдела
«Математическое моделирование
и САПР ГТД»
ЦИАМ им. П.И. Баранова
доктор технических наук, профессор

Темис
Юрий Моисеевич

Подпись Темиса Ю.М. заверяю.

Секретарь диссертационного совета
ЦИАМ им. П.И. Баранова,
кандидат технических наук



Федина
Юлия Алексеевна

Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» (государственный научный центр)
Почтовый адрес: 111116, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 2
Адрес электронной почты: tejoum@ciam.ru
Телефон: (495) 361-64-82