

МИНИСТЕРСТВО
НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
«Казанский национальный
исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева-КАИ»
(КНИТУ-КАИ)

К. Маркса ул., д. 10, Казань, 420111
Тел.: (843) 238-41-10 Факс: (843) 236-60-32
E-mail: kai@kai.ru, http://www.kai.ru
ОКПО 02069616, ОГРН 1021602835275
ИНН/КПП 1654003114/165501001
26.05.2023 № 0612.1-26-7-2841
На № _____ от _____

Председателю диссертационного
совета Д ПНИПУ.05.18
на базе ФГАОУ ВО ПНИПУ
д-ру техн. наук В.Я. Модорскому

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» (ФГБОУ ВО «КНИТУ-КАИ») на диссертацию **Яковкина Вадима Николаевича** «Численное и экспериментальное моделирование резонансных колебаний деталей ГТД с демпферами сухого трения», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности **2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов**

1. Актуальность диссертационной работы

Детали и узлы газотурбинного двигателя (ГТД) работают в условиях высоких силовых нагрузок, в том числе переменных нагрузок, вызывающих вибрацию деталей. Особенно критичны резонансные или околерезонансные режимы работы деталей, когда происходит многократное увеличение вибронапряжений. Чрезмерный уровень вибронапряжений может быть причиной ограничения ресурса, т.к. усталостные поломки деталей приводят, порой, к выключению двигателя. С целью решения проблемы недостаточной усталостной прочности обычно рассматриваются способы уменьшения возбуждающих сил, изменения геометрии или способы повышения усталостной прочности проблемных деталей ГТД. Однако, зачастую, эти способы накладывают дополнительные конструкционные ограничения или

приводят к ухудшению параметров двигателя, поэтому не всегда могут быть применены.

Широко распространено применение специальных демпферов сухого трения, либо подобных им по сути способов обеспечения демпфирования в сочленениях деталей – замковые соединения, бандажные полки и пр. Разработка конструкции демпферов производится с применением расчётных методик, а также имеющегося опыта проектирования и испытаний.

Применение расчётных методик требует существенных временных затрат, т.к. существующие расчетные модели основаны прежде всего на учете нелинейности силы сухого трения и численном воспроизведении массово-жесткостных характеристик объекта. Сложность добавляет необходимость моделирования колебаний на резонансе в нестационарной постановке с учетом основных параметров нагружения – инерционных сил, упругих сил, возбуждающих сил и прочих сил демпфирования. Очевидно, что расчетный этап проектирования демпферов нуждается в упрощенных инженерных методиках.

В связи с этим диссертационная работа Яковкина Вадима Николаевича является актуальной и значимой, так как она направлена на повышение надежности газотурбинных двигателей и эффективного снижения резонансных вибронапряжений за счет развития инженерных расчетных методик оценки демпферов сухого трения и позволит в дальнейшем ускорить проектирование демпферов и снизить трудоемкость вычислений.

В своей работе соискатель ставит и успешно решает задачи по разработке малозатратной расчетной модели, ее верификации и расчетно-экспериментальному обоснованию работоспособности модели на примере демпфирования рабочей лопатки компрессора и зубчатых колес авиационного двигателя.

2. Научная новизна

Автором диссертации разработана математическая модель для расчета демпфера сухого трения, основанная на линейном представлении силы кулоновского трения в виде упругой связи и оценки работы силы трения демпфера по выбранной форме колебаний. Данные особенности позволили обеспечить многократное снижение трудоемкости вычислений.

Определена возможность сведения задачи, заключающейся в оценке совершенной работы силы трения демпфера для выбранной формы колебаний, к общему виду, однако, ограниченному теорией малых деформаций.

Представлена работоспособность математической модели для натуральных узлов ГТД - рабочей лопатки компрессора и зубчатых колес авиационного двигателя.

3. Практическая значимость работы

Разработанная инженерная методика может быть использована в практике проектирования демпферов, что подтверждено на примере проектирования демпферов для лопаток и зубчатых колес в АО «ОДК-Авиадвигатель», г. Пермь, Россия (двигатели ПС-90А, ПД-14).

4. Содержание работы. Соответствие автореферата диссертационной работе

Диссертационная работа состоит из четырех глав и одного приложения, основной текст изложен на 144 страницах.

Во введении обоснована актуальность проведения исследований, направленных на разработку малозатратной расчетной модели для применения в инженерной практике.

В первой главе проведен обзор научно-технической литературы по проблемам расчетного моделирования деталей ГТД с демпферами сухого трения. Обзор затрагивает научные достижения отечественных и зарубежных авторов с 1980-х годов по настоящее время. Описаны идеи используемых методов и представлены результаты, демонстрирующие возможности расчетных моделей, в том числе с экспериментальным подтверждением результата. Отмечен факт регулярного пополнения патентов на полезные изобретения от ведущих двигателестроительных зарубежных фирм.

Наиболее продвинутые расчетные модели основаны на применении метода мультигармонического баланса, т.е. с использованием нескольких гармоник в разложении ряда Фурье в противовес методам прямого интегрирования по времени в нестационарной постановке. Для дополнительного сокращения времени расчета применяют способы уменьшения размерности расчетных моделей, таких как редукция матриц масс и жесткости в методе конечных элементов (МКЭ) и использование специализированных точечных контактных элементов. Это свидетельствует о трудоемкости подготовки расчетной модели. Эти подходы продолжают совершенствоваться.

Описаны проблемы моделирования контакта, касающиеся выбора закона трения и учета сопутствующих факторов контактной механики.

Представленные в обзоре материалы достаточно полно описывают мировой опыт по проблеме диссертационного исследования.

Во второй главе изложены основы разработанной расчётной модели. Предложенная соискателем модель основана на одномассовой системе с упругими связями. Описаны принятые допущения, показаны возможности модели. Во второй части главы представлены результаты успешной верификация модели путем сравнения с методом прямого интегрирования по времени. Стоит отметить значительную экономию времени расчета (на несколько порядков), по сравнению с прямым интегрированием. Анализ постановок задач и используемых уравнений выглядит вполне логичным.

В третьей главе проведено расчетно-экспериментальное исследование демпфирования типовой детали ГТД – рабочей лопатки компрессора с трактовой полкой. Особенности конструкции лопатки позволяют реализовать подполочный демпфер, который под действием центробежных сил упирается одной гранью на полку лопатки, а второй гранью на диск за счет конструктивного скоса на полке. Проведены экспериментальные исследования на вибростенде, где имитировалась центробежная нагрузка, действующая на демпфер. Используемая экспериментальная установка отличается оригинальностью, вероятнее всего она не позволяет полностью имитировать рабочие условия нагружения лопатки и демпфера, но позволяет воспроизвести обширный диапазон условий работы демпфера.

Расчет характеристик демпфирования проведен методом конечных элементов с использованием разработанной в главе 2 модели. Показано удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных результатов.

В четвертой главе проведено расчетно-экспериментальное исследование демпфирования тарельчатыми демпферами вибраций зубчатых колес коробки приводов и центрального привода авиационного двигателя ПС-90А. Экспериментальное исследование проведено в условиях испытаний натурного двигателя. Расчеты выполнены методом конечных элементов с применением разработанной в главе 2 линейризованной модели. Достигнута сходимость расчетных данных с натурным экспериментом по уровню логарифмического декремента колебаний в пределах 10%.

Соискателю удалось определить конкретные конструкторские параметры демпфера, на которых достигается стабильный результат демпфирования. Эксперименты на двигателе показали успешность применения расчетной модели на практике.

Можно с уверенностью констатировать, что материалы этой главы демонстрируют состоятельность методики проектирования демпфера, ее пригодность для инженерной практики.

В **Заключении** отражены основные выводы о проделанной работе, свидетельствующие об успешном решении поставленных задач. Отмечена необходимость проведения исследования по определению границ применимости математической модели, что, безусловно, важно.

5. Мнение о работе в целом

Диссертационная работа изложена ясным техническим научным языком. Структура диссертации логична по построению и подаче материала: начинается с рассмотрения простых расчетных моделей, заканчивается лабораторными экспериментами и испытаниями на натурном двигателе.

В диссертации отражен значительный объем выполненных многоплановых расчетных и экспериментальных работ. Соискателем не только решена проблема разработки расчетной методики и ее верификации, но и обоснована работоспособность на практике, для чего были проведены многочисленные экспериментальные исследования. Особую полезность работе придает раздел с экспериментальными исследованиями зубчатых колес ГТД, т.к. детали испытаны в рабочих условиях. Интересен и полезен полученный опыт с микроскольжением в контакте для различных пар трения, который также следует учитывать при проектировании демпферов. Изложенные экспериментальные и расчетные материалы представляют научную и практическую ценность и могут быть использованы в газотурбостроении.

По сути, соискателем предложен универсальный инженерный способ расчета эффективности демпфера сухого трения, который с успехом может применяться в самых различных конструкциях. Разработанная расчетная модель отличается оригинальностью и представлена впервые. Несмотря на универсальность расчётной модели, сделан вывод о необходимости ее адаптации для конкретных условий применения, с чем соискатель успешно справился.

Результаты диссертационной работы используются на предприятии АО «ОДК-Авиадвигатель» в качестве инженерной методики проектирования и расчета демпферов сухого трения с целью борьбы с опасными вибронапряжениями и для повышения надежности ГТД.

Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертационной работы. Выносимые на защиту положения и результаты с

достаточной полнотой отражены в шести научных статьях в периодических изданиях, включенных в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, рекомендованных ВАК, одна из них опубликована в журнале, индексируемом Scopus.

6. Соответствие диссертации выбранной специальности

Диссертационная работа Яковкина Вадима Николаевича соответствует научной специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов, а именно: п. 8. Колебания в тепловых двигателях летательных аппаратов. Резонансные явления, автоколебательные и нестационарные процессы в конструкциях двигателей. Способы борьбы с опасными вибрациями в двигателях, 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)

7. Вопросы и замечания по работе

1. Не ясно, каким способом были получены графики (рисунки 2.25, 3.24, 4.09), где представлен уровень снижения резонансных напряжений в зависимости от силы прижатия демпфера, а именно с использованием разработанной математической модели.

2. Соискатель на рисунке 2.22 воспроизвел затухающие колебания одномассовой системы с использованием разработанной модели, однако сама модель не предполагает получение результатов во временной шкале, что требует пояснения.

3. На рисунке 2.24 не приведена размерность величины по оси ординат, а в вышестоящем абзаце приведена размерность амплитуды колебаний на резонансе, вызывающая сомнение по величине.

4. На рисунках 4.08 и 4.13 приведены амплитудно-частотные характеристики при натурных испытаниях зубчатых колес с демпферами, на них резонансные пики слабо различимы. Каким образом был определен декремент колебаний?

5. На рисунке 4.13 перепутаны, как комментарий к рисунку, так и пояснение на самом рисунке.

6. В тексте автореферата и самой диссертации отмечены орфографические и пунктуационные ошибки. Описание литературных источников выполнено не по ГОСТу.

8. Заключение

Диссертационная работа **Яковкина Вадима Николаевича** «Численное и экспериментальное моделирование резонансных колебаний деталей ГТД с демпферами сухого трения», выполненная в АО «ОДК-Авиадвигатель» и ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основе проведенных соискателем расчетно-экспериментальных исследований содержится решение задачи снижения резонансных напряжений в узлах ГТД за счет применения демпферов сухого трения на основе разработанной математической модели, подходящей для применения в инженерной практике.

Работа выполнена на высоком научном и техническом уровне с использованием современных средств и методик, а основные выводы обоснованы и подтверждены результатами эксперимента в лабораторных условиях и в рабочих условиях на авиационном двигателе.

Диссертация **Яковкина Вадима Николаевича** соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор **Яковкин Вадим Николаевич** заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.5.15 Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов

Диссертационная работа рассмотрена на заседании кафедры реактивных двигателей и энергетических установки, протокол № 9 от 25.05.2023г.

Ректор



Т.Л. Алибаев