

В диссертационный совет  
Д ПНИПУ.05.18, на базе  
Федерального государственного  
автономного образовательного  
учреждения высшего образования  
«Пермский национальный  
исследовательский политехнический  
университет»  
614990, г. Пермь,  
Комсомольский проспект, д. 29.

### **ОТЗЫВ**

официального оппонента Макарова Павла Вячеславовича на диссертационную работу Яковкина Вадима Николаевича по теме «Численное и экспериментальное моделирование резонансных колебаний деталей ГТД с демпферами сухого трения» на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

### **Актуальность темы**

В диссертационной работе рассматривается актуальная научно-техническая проблема прогнозирования резонансных колебаний деталей газотурбинного двигателя (ГТД) с демпферами сухого трения на этапе проектирования, либо доводки серийных двигателей. Применение демпферов оправдано, когда другие способы исчерпаны или невозможны, позволяет увеличить запасы усталостной прочности узла, его ресурс и повысить надежность двигателя.

Для обеспечения эффективного демпфирования необходимо конструкторское сопровождение, подразумевающее как проектирование узла, так и расчетное обоснование параметров демпфера. Существующие методики не позволяют проводить экспресс оценку возможности осуществления демпфирования, данный недостаток особенно проявляется в темпе проектирования демпфера при нехватке рабочего и вычислительного времени. Кроме того, современные методики подразумевают использование большого числа расчетных переменных и нагружающих факторов, что приводит к сложности анализа результатов расчета и принятия решения по изменению конструкции. Диссертационная работа направлена на разработку математической модели (ММ) в значительной мере лишенной обозначенных недостатков, поэтому является, безусловно, актуальной.

Во введении обоснованы актуальность работы, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе представлен обзор научно-технической литературы по применению демпферов сухого трения для деталей ГТД. Освещены проблемы моделирования демпферов. Представлено несколько существующих методик расчета демпферов, особое внимание уделено экспериментально подтвержденным методикам. На основе обзора сформулированы и поставлены задачи исследования.

Во второй главе соискатель на примере тестовой системы с демпфером сухого трения выводит уравнение движения для оценки работы силы трения, совершенной за один период колебаний по собственной форме. Примечательно, что уравнение движения с силой сухого трения линеаризовано и сведено к простейшему уравнению для определения модальных характеристик системы (собственные формы и частоты колебаний). Вторым важным моментом заключается в независимости относительной характеристики демпфирования (отношение работы силы трения к кинетической энергии) от масштабирования амплитуды по собственной форме. Работоспособность разработанной ММ доказана путем сравнения с методом прямого интегрирования по времени по двум целевым параметрам: достигнута количественная сходимость по уровню снижения резонансных колебаний (свидетельствует график на рисунке 2.25 в диссертации), достигнут многократный выигрыш по времени ожидания результата расчета.

В третьей главе приводятся расчётные и экспериментальные исследования демпфирования натурной лопатки с трактовой полкой. Эксперимент проведен на вибростенде. Стоит отметить экспериментальную АЧХ (рисунок 3.21 в диссертации) для лопатки с демпфером, вид АЧХ удовлетворяет теории и схож с экспериментальными данными зарубежных авторов. Удовлетворительная повторяемость эксперимента и соответствие теории свидетельствуют о высоком качестве проведения эксперимента. ММ соискателя успешно описывает эксперимент, для настройки модели соискатель подбирает коэффициенты сухого трения и упругие характеристики контакта. Важно отметить, что ММ согласуется с экспериментом по модальным характеристикам, уровню снижения резонансов и декременту колебаний.

В четвертой главе продемонстрирована возможность применимости ММ для зубчатых колес авиационного двигателя в рабочих условиях. Анализ п.4.2, а также крайней научной работы соискателя по зубчатым колесам говорит о некоторой сложности моделирования тарельчатых демпферов с использованием данной ММ. Тем не менее соискатель справляется с этой задачей, по крайней мере, выданные им величины натягов для демпферов, позволили значительно демпфировать резонансы двух зубчатых колес на работающем двигателе. Успешное применение тарельчатых демпферов по-видимому связано с их высокой демпфирующей способностью.

## **Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати**

По теме исследования соискатель имеет 5 публикаций в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук. Одна публикация в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах и системах цитирования – Scopus. Прочие результаты опубликованы в 10 научных трудах, включающих труды конференции и периодические издания. Опубликованные работы и автореферат достаточно полно отражают содержащиеся в диссертации научные результаты.

### **Замечания по диссертации**

1. В третьей главе на графике (рисунок 3.20) наблюдается амплитудная зависимость логарифмического декремента колебаний от уровня резонансных напряжений в лопатке без демпфера. Как это учитывалось при вычислении декремента лопатки с демпфером?

2. На рисунке 3.34 приведена осциллограмма затухающих колебаний, на которой наблюдаются выраженные линейные участки, явно отклоняющиеся от траектории эллипса. Данный вид гистерезиса характерен при отображении силы сухого трения, однако в эксперименте она напрямую не измерялась. В тексте нет пояснения данного явления.

3. Из экспериментальных исследований сделан вывод о важности учета эффектов микроскольжения, т.к. оно снижает демпфирование (рисунки 3.24, 3.30). В то же время при расчете тарельчатых демпферов зубчатых колес соискатель микроскольжение не учитывает, что требует объяснения.

4. В работе не отражена, помимо демпфирования в материале и конструкционного демпфирования, необходимость учета аэродинамического демпфирования при расчете амплитуды резонансных колебаний лопатки в потоке.

### **Заключение**

Оценивая работу в целом, считаю, что она является законченной научно-квалификационной исследовательской работой, выполненной на актуальную тему, численное и экспериментальное моделирование резонансных колебаний деталей ГТД с демпферами сухого трения. Работа выполнена на достаточно высоком научно-техническом уровне, с применением современных методов экспериментального исследования и грамотного применения основ теории колебаний. Полученные в работе результаты имеют практическую и теоретическую значимость и могут быть использованы при проектировании демпферов сухого трения для деталей ГТД,

позволяют сократить трудоемкость расчетов и объем экспериментальных работ на двигателе.

В качестве предложения для дальнейших практических исследований по данной теме работ, рекомендуется применить полученный автором диссертации инструментарий к проектированию и экспериментальному подтверждению эффективности демпфирующего элемента для рабочего колеса ГТД блискового конструкции.

Диссертационная работа Яковкина Вадима Николаевича «Численное и экспериментальное моделирование резонансных колебаний деталей ГТД с демпферами сухого трения» соответствует паспорту научной специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов, 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).

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.

Кандидат технических наук

П.В. Макаров

26.2023г.

Контактные данные:

Макаров Павел Вячеславович, к.т.н., заместитель генерального конструктора Производственный комплекс «Салют» Акционерное общество «Объединенная двигателестроительная корпорация».

Почтовый адрес: 105118, г. Москва, пр. Буденного, 16

Телефон: +7 (495) 232-55-02

E-mail: makarov-pv@uecrus.com

Подпись и должность П.В. Макарова заверяю

