

На правах рукописи

ЯКОВКИН Вадим Николаевич

**ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
РЕЗОНАНСНЫХ КОЛЕБАНИЙ ДЕТАЛЕЙ ГТД
С ДЕМПФЕРАМИ СУХОГО ТРЕНИЯ**

2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и
энергоустановки летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь – 2023

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Настоящая диссертационная работа посвящена проблеме расчетной и экспериментальной оценки демпфирующей способности демпферов сухого трения в узлах газотурбинных двигателей (ГТД) при гашении резонансных колебаний.

Практически каждая деталь ГТД испытывает вибрационные нагрузки, в том числе резонансные колебания. Резонанс опасен повышенным уровнем динамических напряжений, которые в случае превышения предела выносливости материала приводят к зарождению усталостной трещины с последующей поломкой. Проблемы вибрационной прочности деталей ГТД широко описаны в современной научно-технической литературе. Известно множество патентов на полезные изобретения, описывающих демпфирующие устройства для деталей ГТД или иные способы снижения вибронпряжений в современных двигателях. Одним из способов снижения резонансных напряжений является применение демпфера сухого трения.

Эффективность применения демпфера зависит от правильности настройки системы, к примеру, должны быть настроены массово-жесткостные параметры демпфера и его сила прижатия и пр. Применительно к ГТД, экспериментальная настройка требует высоких финансовых и трудовых затрат. В этом случае, до проведения натурных испытаний, целесообразно проводить математическое моделирование эксперимента с целью подбора параметров демпфера.

Задача с моделированием контакта трущихся тел является нелинейной, это обусловлено наличием сухого трения (Кулоновское трение). Современные математические модели позволяют учитывать данную нелинейность, что повышает точность решения колебательной системы с демпфером, но в то же время усложняет систему. Как следствие, при решении практических задач, возникают трудности в понимании процесса демпфирования конструкции и в понимании проектирования демпфера.

Анализом научно-технической литературы установлено, что простых расчетных методик проектирования демпфера и пригодных в инженерной практике, не существует. Поэтому, на сегодняшний день актуальной задачей является разработка инженерной методики проектирования демпфера сухого трения, содержащей математическую модель с меньшим числом неизвестных переменных и не требующей больших вычислительных затрат, необходимых для расчета демпфирующей способности демпфера.

Степень разработанности темы. Множество работ посвящено широкому спектру экспериментального изучения демпфирующей способности лопаток ГТД, а также численным подходам к расчету демпферов сухого трения для узлов ГТД. Наиболее яркие работы в этом направлении принадлежат J. Griffin, E. Petrov, L. Panning, D. Laxalde, S. Zucca, M. Gola, J. Szwedowicz, Г.С. Писаренко, В.В. Матвееву, М.Ш. Нихамкину, Н.Н. Саженкову, Б.Ф. Шору, Н.Н. Серебрякову, Е.В. Кожаринову, О.В. Репецкому и др. Применяемые математические модели позволяют получить лишь частное решение,

вследствие большого количества независимых переменных и, по-прежнему, требуют больших временных затрат.

Большое внимание таких авторов как J. Szwedowicz, D. Laxalde, С.М. Firrone, D.J. Ewins и др. уделено эффектам микроскольжения в контакте, проявляющихся на демпферах ГТД.

Целью диссертационного исследования, направленного на повышение надежности газотурбинных двигателей и снижение резонансных напряжений в деталях, является разработка инженерной методики проектирования демпферов сухого трения для элементов ГТД, основанной на экспериментально проверенной математической модели расчета демпфирующей способности демпферов и подходящей для применения в инженерной практике.

Задачи диссертационной работы.

1. Разработка математической модели для расчета демпфирующей способности демпферов сухого трения для узлов ГТД, позволяющей проводить расчеты без использования большого вычислительного ресурса и больших временных затрат.

2. Верификация разработанной модели путем сравнения результатов с общепринятым расчетным методом прямого интегрирования по времени (нестационарная постановка).

3. Разработка способа учета эффектов микроскольжения в математической модели.

4. Разработка и создание экспериментальной установки и методики эксперимента для исследования контактных пар и демпфера сухого трения в условиях вибростенда. Экспериментальное подтверждение работоспособности модели на примере демпфирования лопатки компрессора с трактовой полкой на вибростенде.

5. Расчетно-экспериментальное исследование демпферов тарельчатого типа для конических зубчатых колес центрального привода и коробки приводов в рабочих условиях на двигателе ПС-90А с целью подтверждения применимости инженерной методики для натуральных узлов ГТД.

6. Разработка рекомендаций по проектированию демпферов для различных узлов ГТД на основе разработанной методики.

Методология исследования базируется на теории механики деформируемого твердого тела, в том числе на известных способах расчетного и экспериментального определения собственных форм и частот колебаний и численном моделировании с использованием метода конечных элементов. Экспериментальные работы проведены на электродинамическом вибростенде LDS 875 и в рабочих условиях на ГТД, регистрация данных эксперимента происходила на МПС, обработка данных эксперимента проводилась в программном пакете обработки сигналов WinPOS.

Научная новизна.

1. Разработана новая математическая модель (далее «линеаризованная модель») для определения демпфирующей способности демпфера сухого трения для узлов ГТД при гашении резонансных колебаний. Модель отличается от известных тем, что содержит как минимум вдвое меньшее количество

составляющих сил в уравнении движения. Модель основана на принципе линеаризации системы и описывается уравнением для расчета собственных форм и частот колебаний, это позволяет сфокусировать решение на резонансных частотах колебаний. Перечисленные особенности позволяют существенно сократить вычислительный ресурс и использовать модель как эффективный инструмент в методике проектирования демпферов сухого трения для гашения резонансных колебаний.

2. Определено, что задача о гашении амплитуды резонансных колебаний за счет демпфера сухого трения может быть описана малым числом решений, но достаточным для воспроизведения влияния демпфера на форму колебаний: в диапазоне от беспрепятственного взаимодействия демпфера и колебательной системы до заклинивания демпфера и нескольких промежуточных вариантов между двумя обозначенными состояниями. Решение при заданной жесткости системы впервые сведено к общему виду.

3. Проведена адаптация модели к натурным деталям ГТД. На примере демпфирования лопатки ГТД на вибростенде и зубчатых колес на авиационном двигателе экспериментально подтверждена работоспособность линеаризованной модели и научно обоснована применимость инженерной методики на практике.

Достоверность научных результатов обоснована использованием фундаментальных законов механики деформируемого твердого тела и подтверждается качественной и количественной сходимостью результатов расчета с эталонным решением и экспериментом; применением метрологически аттестованного и поверенного измерительного оборудования; применением сертифицированного программного обеспечения.

Практическая значимость работы заключается в создании инженерной методики проектирования демпферов сухого трения для деталей ГТД, позволяющей сократить трудоемкость расчетов при проектировании демпферов и объем экспериментальных работ при доводке двигателя.

Результаты диссертационной работы применены при проектировании демпферов для лопаток и зубчатых колес в АО «ОДК-Авиадвигатель», г. Пермь, Россия (ПС-90А, ПД-14 и другие ГТД).

Теоретическая значимость работы заключается в разработке подхода к оценке демпфирующей способности демпфера сухого трения в условиях резонансных колебаний, позволяющего свести решение к общему виду при заданных жесткостях колебательной системы.

На защиту выносятся следующие основные положения и результаты:

1. Разработанная математическая модель для расчета демпфирующей способности элемента сухого трения при гашении резонансных колебаний одномассовой системы.

2. Результаты расчетно-экспериментального исследования демпфера сухого трения для лопатки ГТД с трактовой полкой.

3. Результаты расчетно-экспериментального исследования демпфера сухого трения тарельчатого типа для зубчатых колес коробки приводов и центрального привода ГТД.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на конгрессе по двигателестроению «НТКД-2012» (Москва, 2012); IV Всероссийской научно-практической конференции «Современные наукоемкие инновационные технологии» (Дом науки и техники, Самара, 2012); XXII Всероссийской школе-конференции молодых ученых и студентов ММЕН (Пермь, 2013); XIV Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2013» (Пермь, 2013); XV Всероссийской научно-технической конференции, АКТТИ-2014 (Пермь, 2014); Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (Самара, 2014); Международной научно-технической конференции «International Conference on Aviation Motors» (ICAM 2020) (Москва, 2021).

Структура диссертации состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложения. Объем диссертации 144 страниц, 104 рисунка, 1 таблица, 130 использованных источников для ссылок.

Публикации автора по теме диссертации состоят из 16 научных трудов, в том числе 5 - в журналах, входящих в Перечень ВАК, 1 – в научном издании, включенном в международную базу цитирования Scopus.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, обоснованы научная новизна и практическая значимость результатов исследования.

В первой главе представлены результаты анализа современного состояния конструкторских работ и исследований по проблеме проектирования демпферов сухого трения, их применения в газотурбинных двигателях.

По результатам обзора технической литературы отмечено множество патентов на демпфирующие устройства сухого трения и множество публикаций от ведущих мировых авиадвигателестроительных фирм. В подавляющем большинстве при проектировании демпферов используется метод конечных элементов (МКЭ) и математическая модель, основанная на методе гармонического баланса с использованием нескольких гармоник в разложении ряда Фурье, а также с уточнением силы трения в статической постановке на отдельном этапе расчета. Метод прямого интегрирования по времени (далее прямое моделирование, нестационарная постановка) используется в качестве эталонного при настройке альтернативных моделей. Для снижения трудоемкости расчетов используют процедуру редуцирования и GAP-элементы для моделирования контактного взаимодействия. Существенный вклад в развитие тематики внесли J. Griffin, J. Ewins, E. Petrov, J. Szwedowicz. Из отечественных работ в данном направлении стоит отметить О.В. Репецкого, Б.Ф. Шора, Н.Н. Серебрякова, Е.В. Кожаринова (ФГУП «ЦИАМ им. Баранова»), М.Ш. Нихамкина, Н.А. Саженкова (ФГАОУ ВО «ПНИПУ»). В работах Г.С. Писаренко и В.В. Матвеева (институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко, НИИ Украины, г. Киев) используются упрощенные модели с известным законом движения.

Существующие модели достаточны и применяются для расчета натуральных узлов ГТД, однако требуют больших временных затрат на расчет и подбор параметров демпфера. Разрабатываемые модели проходят экспериментальную проверку в лабораторных условиях (J. Griffin, Н.А. Саженов, М.А. Нихамкин, Н.Н. Серебряков и др.) на вибростенде, в т.ч. с использованием натуральных узлов ГТД, так и на разгонных стендах (Е. Petrov, J. Ewins, J. Szwedowicz и др.).

Из основных проблем сопоставления расчета с экспериментом отмечена необходимость правильной настройки модели контактного взаимодействия. Распространено использование модели трения Даля (вместо Кулоновской), что связано с проявлением эффектов микроскольжения в контакте.

Анализ обзора технической литературы показал, что проектирование демпфера для узлов ГТД в настоящее время опирается на результаты расчета с использованием математических моделей, позволяющих воспроизвести колебания системы с демпфером. Существующие математические модели содержат чрезмерный набор второстепенных параметров и независимых переменных, не позволяющих проводить быструю оценку влияния конструкционных факторов на практике. По результатам анализа литературных источников определены основные задачи исследования диссертационной работы.

Во второй главе представлена физическая постановка задачи, приведена основа разработанной математической модели. Выполнено сравнение результатов с прямым моделированием. Представлено влияние параметров жесткости системы на демпфирующую способность демпфера.

При разработке математической модели был принят ряд допущений:

- предполагается, что фрикционный демпфер преимущественно влияет на жесткость системы, инерционные эффекты демпфера не рассматриваются;
- применяется Кулоновская модель трения;
- для нелинейной системы с сухим трением колебания демпфируемой системы описываются гармоническим законом, перемещение демпфера допускает более сложный характер движения;
- новая математическая модель основана на принципе линеаризации системы с сухим трением. Задача решается в упругой постановке, описываемой теорией малых деформаций;
- в качестве инструмента оценки демпфирования в системе выбран логарифмический декремент колебаний $\delta_{\text{тр}}$, обусловленный затраченной работой на преодоление силы трения в контакте демпфера с демпфируемой системой за один период колебаний;
- резонансная частота (пик) может сдвигаться, т.к. демпфер влияет на характеристики жесткости системы. Вынуждающая сила постоянна в рассматриваемом диапазоне частот;
- основные принципы работы фрикционного демпфера выведены на примере одномассовой системы с демпфером, совершающей продольные колебания. Все принципы, полученные для одномассовой системы, считаются равноправными для более сложных систем;

• для пространственных форм колебаний случаи отрыва демпфера от контактной поверхности не рассматриваются.

Автором разработана линеаризованная модель, в которой влияние действия от силы Кулоновского трения $F_{тр}$ заменено на упругий элемент с заданной жесткостью ξ (рисунок 1). Линеаризованная модель производит имитацию колебаний нелинейной системы, таким образом, чтобы амплитудные отклонения линеаризованной и нелинейной системы совпадали. На рисунке 2 представлена функция силы трения и интерпретация линеаризованной модели для простейшей нелинейной модели.

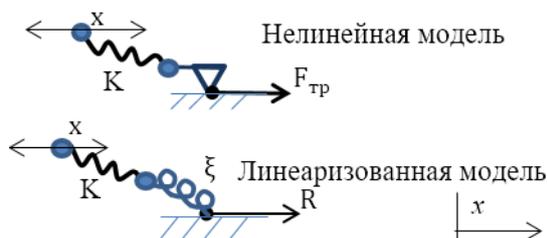


Рисунок 1 – Линеаризация элемента с сухим трением. x – перемещения точки, K – жесткость демпфера, R – сила реакции упругого элемента ξ

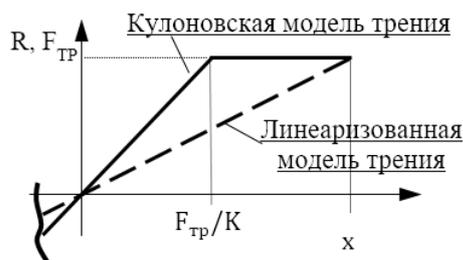


Рисунок 2 – Функция силы трения

Для описания колебаний узлов ГТД с демпфером достаточно использования полного уравнения движения:

$$[M] \cdot \{\ddot{x}\} + [\alpha] \cdot \{\dot{x}\} + [C + K] \cdot \{x\} + \{F(x, \dot{x})\} = \{Q\} \quad (1)$$

где $[M]$, $[C]$ – матрицы масс и жесткости соответственно, $[K]$ – матрица жесткости демпфера, $[\alpha]$ – матрица диссипативных сил, обусловленных демпфированием в материале, аэродемпфированием и прочими силами, допускающих в первом приближении линейный закон сопротивления, $\{x\}$ – вектор узловых перемещений, точкой обозначено дифференцирование по времени t , $\{F(x, \dot{x})\}$ – вектор нелинейных сил, обусловленных сухим трением в демпфере, $\{Q\}$ – вектор внешних гармонических сил.

Автором предложено разделение нелинейной системы (1) на два независимых линейных уравнения:

$$[M] \cdot \{\ddot{x}\} + [\alpha] \cdot \{\dot{x}\} + [C] \cdot \{x\} = \{Q\} \quad (2)$$

$$[M] \cdot \{\ddot{x}\} + [C + K + \xi] \cdot \{x\} = 0 \quad (3)$$

Уравнение (2) является классическим для поиска отклика гармонических колебаний, а уравнение (3) – для определения собственных частот и форм колебаний. Автором определено, что уравнения (3) достаточно для расчета демпфирующей способности демпфера сухого трения. При этом из уравнения (2) определяется часть исходных данных: демпфирование системы без демпфера δ_0 , амплитуда колебаний на резонансе – данные, необходимые для прогнозирования снижения резонансной амплитуды и вычисления требуемой силы трения (или силы прижатия демпфера).

В качестве тестового примера рассмотрена одномассовая система (рисунок 3, принято $x_i(t)=U_i$, $i=1, 2, 3$). Показано, что все множество решений при заданных жесткостях колебательной системы может быть описано в виде

зависимости $\delta_{\text{ТР}}(F_{\text{ТР}}/U_1)$ (рисунок 4), для построения которой необходима вариация жесткости упругого элемента ξ . Зависимость $\delta_{\text{ТР}}(F_{\text{ТР}}/U_1)$ предложена Автором, как удобная при проектировании и выбора параметров демпфера на практике. К примеру, на рисунке 4 отражено влияние жесткости демпфера K : чем выше жесткость, тем выше демпфирование. Для натуральных узлов может быть использована зависимость $\delta_{\text{ТР}}(P \cdot k/S)$, где P – сила прижатия демпфера, k – коэффициент трения, S – амплитуда резонансных напряжений.

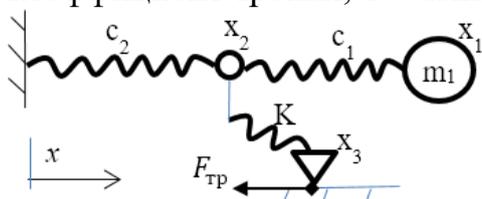
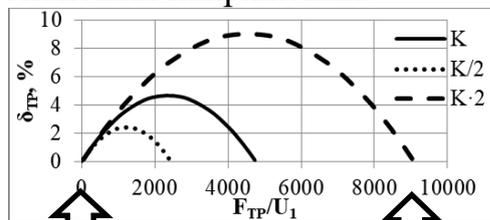


Рисунок 3 – Одномассовая система с сухим трением:
 $c_1=c_2=100000$ Н/м,
 $K=10000$ Н/м, $m_1=1$ кг



$F_{\text{ТР}}/U_1 = 0$, демпфер не влияет на систему и форму колебаний

$F_{\text{ТР}}/U_1 = 9000$, демпфер с жесткостью $K \cdot 2$ заклинен

Рисунок 4 – Расчетная зависимость $\delta_{\text{ТР}}(F_{\text{ТР}}/U_1)$

Проведена верификация линеаризованной модели путем сравнения с результатом, полученным методом прямого интегрирования по времени для нелинейной системы при вынужденных колебаниях с прохождением через резонанс (в МКЭ). Модель для вынужденных колебаний представлена на рисунке 5.

Параметры тестовой системы:
 $c_1=c_2=100000$ Н/м, $K=10000$ Н/м, $m_1=1$ кг,
 $P=1000$ Н – амплитуда вынужденной гармонической силы, $\alpha=1$ Н·с/м – коэффициент вязкого трения (пропорциональный скорости). Сила сухого трения $F_{\text{ТР}}$ изменялась в диапазоне от 500 до 16000 Н.

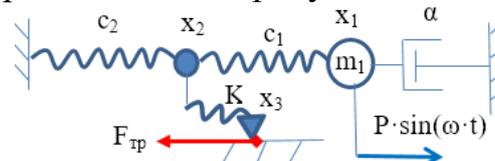


Рисунок 5 – Модель для расчета вынужденных колебаний

На рисунке 6 представлено сопоставление результатов расчета нелинейной системы (маркеры – амплитуда резонансного пика) с линеаризованной моделью (сплошная линия). Из графиков хорошо видна область максимального демпфирования и снижения напряжений, из которой может быть выбран рекомендованный диапазон силы трения для эффективного демпфирования резонансных колебаний.

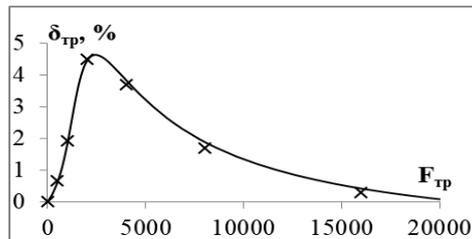
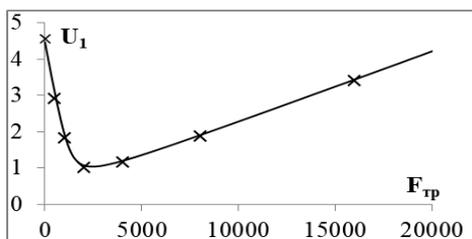


Рисунок 6 – Сопоставление результатов расчета прямого моделирования (маркеры) с линеаризованной моделью (сплошная линия)

По результатам верификации линеаризованной модели получена хорошая сходимость расчетов с отличием не более 3 %. Время расчета линеаризованной модели по сравнению с прямым моделированием уменьшилось с нескольких

суток до нескольких секунд, что делает предложенную модель приемлемой для инженерных расчетов.

В третьей главе представлены результаты расчетно-экспериментального исследования демпфирующей способности модельного демпфера для лопатки компрессора с трактовой полкой в условиях вибростенда.

В качестве типичного конструкторского решения для исследований выбран подполочный демпфер сухого трения для рабочей лопатки (рисунок 7). Для экспериментального исследования была разработана экспериментальная установка на базе вибростенда V875-440, позволяющая в лабораторных условиях воспроизводить вибрацию лопатки и центробежную силу, действующую на демпфер (рисунки 8, 9). Центробежная сила, действующая на демпфер, моделировалась силой натяжения лески. Лопатка закреплялась в зажиме по хвостовику путем поджатия болта в основание подошвы.

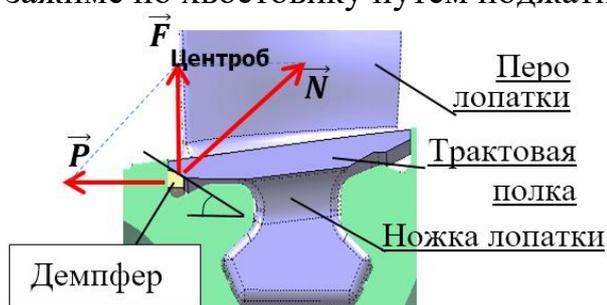


Рисунок 7 – Подполочный демпфер для лопатки ГТД: $F_{\text{ЦЕНТРОБ}}$ – центробежная сила, действующая на демпфер, N – сила прижатия демпфера к лопатке, P – сила прижатия демпфера к диску

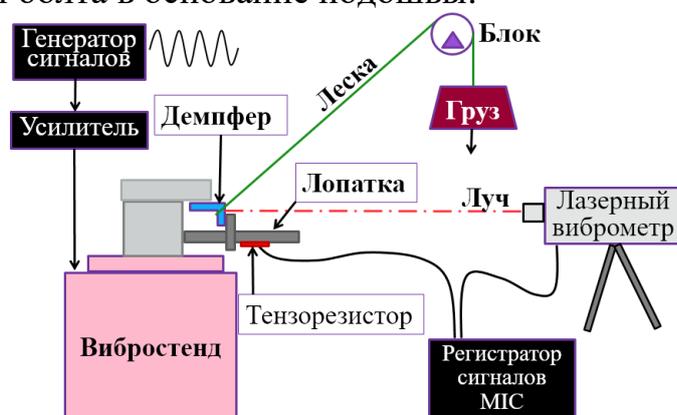


Рисунок 8 – Схема экспериментальной установки

Для измерения динамических напряжений (S) на пере лопатки наклеен тензорезистор, также происходила регистрация виброскорости демпфера лазерным виброметром PDV100 (см. рисунки 8).



Рисунок 9 – Лопатка ГТД с модельным демпфером на вибростенде

Исследование проведено на лопатке, совершающей колебания по первой изгибной форме (рисунок 10). Схема работы демпфера для данной формы колебаний лопатки представлена на рисунке 11.

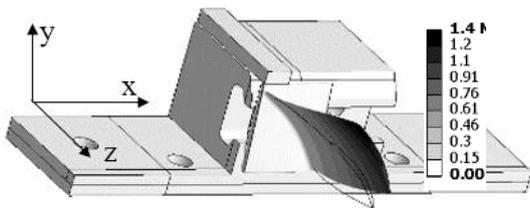


Рисунок 10 – Первая изгибная форма колебаний лопатки в составе зажима, суммарные перемещения (безразмерные). Расчет МКЭ.

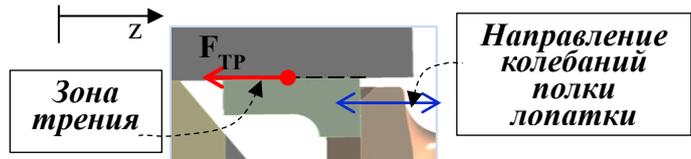


Рисунок 11 – Схема работы демпфера

На рисунке 12 представлена АЧХ регистрации сигнала с тензорезистора при вынужденных колебаниях лопатки с различной силой прижатия демпфера P (на рисунке представлена нормализованная сила прижатия $P_{НОРМ.}=P/P_2$, P_2 – вторая по величине сила прижатия в эксперименте), S – амплитуда напряжений в лопатке, МПа, S_0 – амплитуда напряжений в лопатке на резонансе без демпфера, МПа, f_0 – резонансная частота колебаний лопатки без демпфера, Гц, f – частота колебаний лопатки, Гц.

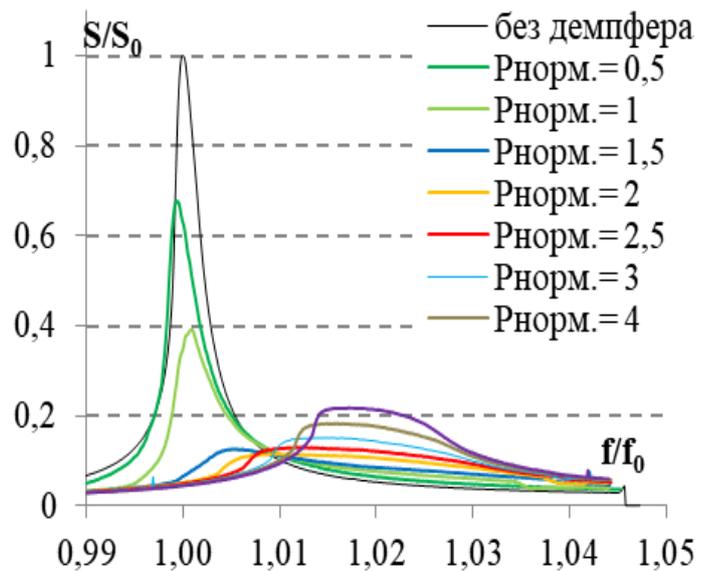


Рисунок 12 – Экспериментальная АЧХ

При $P_{НОРМ.}=2$ отмечено максимальное снижение резонансных напряжений до уровня $S/S_0=0,116\dots 0,134$.

Расчет демпфера проведен с использованием МКЭ (расчетная модель представлена на рисунке 10) с линеаризацией контакта по методологии, изложенной во второй главе. Максимальный расчетный декремент составил $\delta_{ТР}=5,9\%$ (рисунок 13б, сплошная линия). Результаты сопоставления расчета с экспериментом представлены на рисунке 13 в виде зависимости $S/S_0(P_{НОРМ.})$ и $\delta_{ТР}(P_{НОРМ.})$. Максимальный декремент колебаний в эксперименте составил $\delta_{ТР}=4,6\%$, что меньше расчетной величины $\delta_{ТР}=5,9\%$. Различие по декременту объясняется проявлением эффектов микроскольжения, к примеру, при силе прижатия $P_{НОРМ.}=2$ измеренная амплитуда колебаний демпфера составила всего 2 мкм. Пунктирной линией представлен расчет с моделированием эффектов микроскольжения. Моделирование микроскольжения выполнено с помощью снижения тангенциальной контактной жесткости демпфера (аналогичный эффект при снижении жесткости демпфера, как представлено на рисунке 4).

Коэффициент сухого трения k составил от $k=0,4$, когда происходит интенсивное скольжение демпфера без подклинивания на всем периоде колебаний, до $k=0,9$, когда происходит подклинивание демпфера.

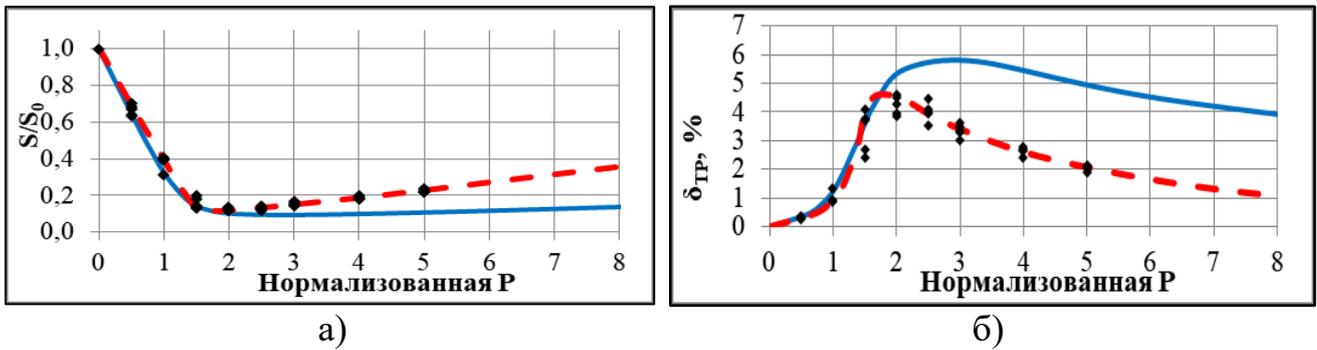


Рисунок 13 – Сопоставление расчета с экспериментом при вынужденных колебаниях: маркер – эксперимент, сплошная линия – расчет, пунктир – расчет с моделированием микроскольжения

С целью получения максимального декремента колебаний был проведен эксперимент с мероприятиями по уменьшению влияния эффектов микроскольжения. Эксперимент проведен в условиях затухающих свободных колебаний. Результаты представлены на рисунке 14 в виде графической зависимости $\delta_{TR}(P \cdot k/S)$. Получена количественная сходимость результатов расчета с экспериментом в районе 5...20 % по уровню декремента колебаний.

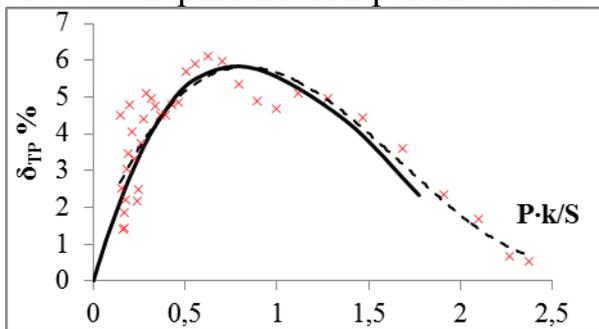


Рисунок 14 – Зависимость $\delta_{TR}(P \cdot k/S)$, сопоставление расчета с экспериментом при затухающих колебаниях: маркер – эксперимент, сплошная линия – расчет, пунктир – аппроксимация эксперимента

В четвертой главе представлено расчетно-экспериментальное определение демпфирующей способности тарельчатых демпферов для конического зубчатого колеса коробки приводов и колеса центрального привода с целью подтверждения применимости методики проектирования демпферов для натуральных узлов ГТД.

Исследование проведено в условиях испытаний натурального двигателя ПС-90А. Рассматриваемые конические зубчатые колеса имеют потенциально опасные резонансы по форме колебаний с 3 узловыми диаметрами зубчатого венца, возбуждаемые зубцовой гармоникой. На рисунке 15 представлен эскиз зубчатого колеса коробки приводов с демпфером тарельчатого типа. Испытания проводились с различными величинами натяга демпфера 0,3 мм и 0,5 мм.

Результаты обработки испытаний представлены на рисунке 16 в виде линии тренда динамических напряжений σ отнесенных к максимальному уровню σ_0 с тензорезисторов, расположенных на колесе.

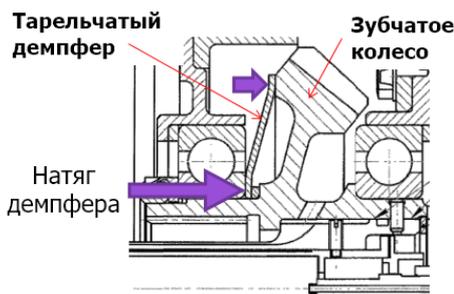


Рисунок 15 – Эскиз зубчатого колеса коробки приводов с демпфером

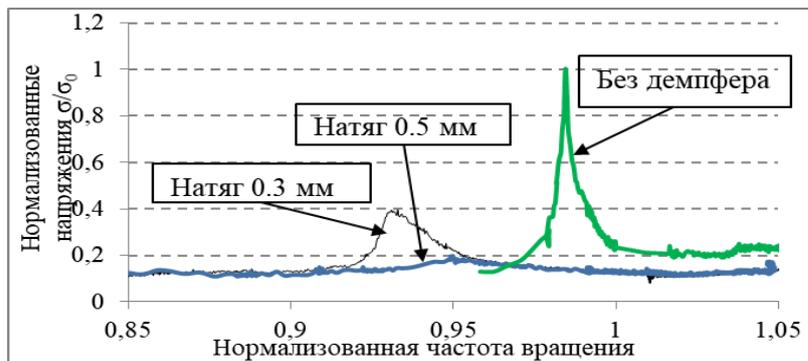


Рисунок 16 – Линии тренда динамических напряжений при испытаниях зубчатого колеса коробки приводов на двигателе

Расчет демпфера проведен в МКЭ. Из расчета линеаризованной модели были определены прогнозируемый уровень снижения резонансных напряжений и необходимая сила прижатия демпфера P . Прочностной расчет демпфера и подбор натяга выполнены в статическом анализе.

На рисунке 17 представлено сопоставление результатов расчета (линия) с экспериментом (маркеры), подобранный коэффициент трения $k=0,032$ (удовлетворяет справочным данным для зубчатых зацеплений, работающих в масле, см. работы И. В. Крагельский и И. Э. Виноградова). Результаты расчета удовлетворительно согласуются с экспериментом.

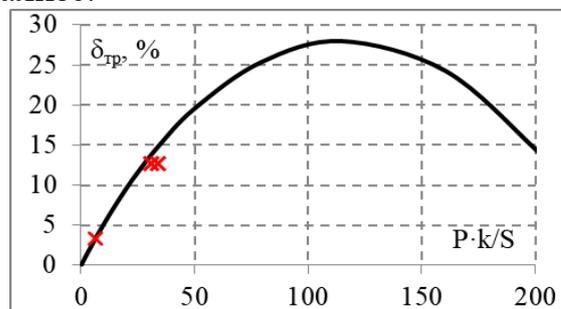


Рисунок 17 – Зависимость $\delta_{тр}(P \cdot k/S)$, маркер – эксперимент, сплошная линия – расчет

Результаты настройки модели были использованы при проектировании демпфера для конического зубчатого колеса центрального привода двигателя ПС-90А. Постановка эксперимента аналогичная, как для зубчатого колеса коробки приводов. Эскиз зубчатого колеса центрального привода с демпфером представлен на рисунке 18. Результаты тензометрирования представлены на рисунке 19 в виде огибающей линии тренда динамических напряжений.

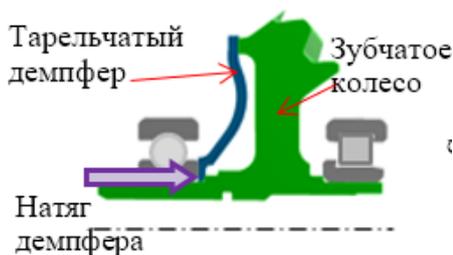


Рисунок 18 – Эскиз зубчатого колеса центрального привода с демпфером

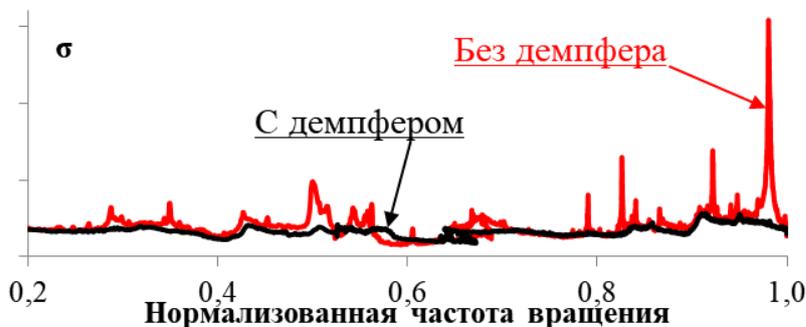


Рисунок 19 – Линии тренда динамических напряжений при испытаниях зубчатого колеса центрального привода с демпфером и без демпфера на двигателе

На рисунке 20 представлено сопоставление результатов расчета с экспериментом в виде графической зависимости $\delta_{тр}(P \cdot k/S)$.

По результатам исследования зубчатых колес с демпферами достигнута удовлетворительная сходимость расчета с экспериментом по уровню демпфирования - в пределах $\Delta=10\%$.

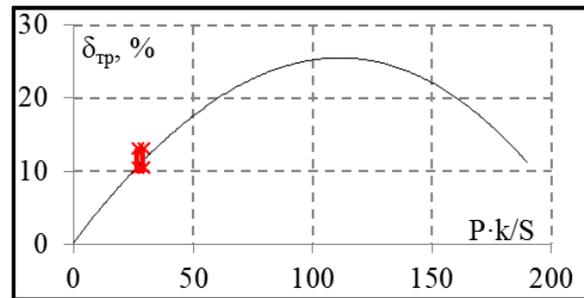


Рисунок 20 – Зависимость $\delta_{тр}(P \cdot k/S)$, маркер – эксперимент, сплошная линия – расчет

Представленные исследования подтверждают применимость методики проектирования демпферов, содержащей линеаризованную модель расчета демпфера, для натуральных узлов ГТД.

Сформированы рекомендации для повышения эффективности демпферов, заключающиеся в: 1) необходимости совместного проектирования демпфера и детали ГТД, предусматривая, к примеру, уменьшение жесткости детали от заделки до места установки демпфера, увеличение жесткости демпфера, увеличение жесткости пера лопатки на изгиб; 2) уменьшении негативного влияния эффектов микроскольжения за счет увеличения жесткости поверхности и повышения износостойкости.

Направление дальнейших научных исследований предусматривает: 1) уточнение модели контактного взаимодействия с учетом специализированных экспериментов; 2) усовершенствование разработанной модели для расчета системы с несколькими демпферами/объектами; 3) уточнение границ применимости разработанной математической модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана математическая модель для расчета демпфирующей способности демпфера сухого трения при гашении резонансных колебаний узлов ГТД. Модель позволяет рассчитывать и проектировать демпферы сухого трения, не прибегая к существенным вычислительным ресурсам и временным затратам. Математическая модель основана на принципе линеаризации системы и описывается уравнением для расчета собственных форм и частот колебаний. Модель имеет новизну и актуальность, что также подтверждено по результатам обзора технической литературы.

Проведена верификация линеаризованной модели путем сравнения результатов с решением, полученным в нестационарной постановке. Достигается количественная сходимость результатов с погрешностью не более 3% по уровню демпфирования.

Экспериментально подтверждена работоспособность модели на примере демпфирования лопатки компрессора на вибростенде. Достигается количественная сходимость результатов с погрешностью 5...20% по уровню демпфирования. Представлено, что математическая модель способна учитывать влияние эффектов микроскольжения, как важной практической составляющей при проектировании демпфера для узлов ГТД.

Подтверждена применимость инженерной методики проектирования демпферов, содержащей линеаризованную модель расчета демпфера, на примере демпфирования натуральных узлов ГТД – зубчатых колес центрального привода и коробки приводов на двигателе ПС-90А. Спрогнозирована высокая демпфирующая способность тарельчатого демпфера, получена удовлетворительная сходимость расчета с экспериментом.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук

1. Яковкин, В.Н. Расчётная оценка эффективности демпфера сухого трения для полой широкохордной лопатки вентилятора / В.Н. Яковкин, В.А. Бессчетнов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2012.– Т. 14. – № 4(5). – С. 1394-1398.

2. Яковкин, В.Н. Проектирование демпфирующего устройства для конической шестерни коробки приводов / В.Н. Яковкин, В.А. Бессчетнов // Современные проблемы науки и образования.– 2013. – № 3. – С. 28.

3. Яковкин, В.Н. Расчет демпфирующей способности тарельчатого демпфера для конической шестерни коробки приводов газотурбинного двигателя / В.Н. Яковкин, В.А. Бессчетнов // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2014. – № 76. – 19 с.

4. Яковкин, В.Н. Математическое моделирование демпфера сухого трения для зубчатого колеса газотурбинных двигателей. Часть 1 / В.Н. Яковкин, М.Ш. Нихамкин, Н.А. Саженков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2022. – № 70. – С. 140–149.

5. Яковкин, В.Н. Математическое моделирование демпфера сухого трения для зубчатого колеса газотурбинного двигателя. Часть 2 / В.Н. Яковкин, А.Б. Пищальников, И.И. Соколов, М.Ш. Нихамкин, Н.А. Саженков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2022. – № 70. – С. 150–159.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах и системах цитирования

6. Yakovkin, V. N. Verification of a Mathematical Model of a Dry Friction Damper for a GTE Blade / V.N. Yakovkin, V.A. Besschetnov // Journal of Physics: Conference Series: materials of International Conference on Aviation Motors (ICAM 2020). (Moscow, 18-21 May 2021) – 2021.– Vol.1891. – Art. 012037.

Публикации в прочих изданиях

7. Бессчетнов, В.А. Моделирование контактного взаимодействия в лопатках ГТД при вынужденных колебаниях / В.А. Бессчетнов, Н.В. Гладышева, В.Н. Яковкин, И.Г. Габов // 12-й международной салон «Двигатели-2012»: тезисы докладов научно-технического конгресса по двигателестроению (НТКД-2012). – 2012. – С. 195-197.

8. Яковкин, В.Н. Приближенные методы оценки демпфирующей способности прижимного демпфера для полой широкохордной лопатки вентилятора / В.Н. Яковкин, В.А. Бессчетнов // «Математическое моделирование в естественных науках»: тезисы докладов XXII Всероссийской школы-конференции молодых ученых и студентов ММЭН. – 2013. – Т. 1. – С. 189-190.

9. Яковкин, В.Н. Расчетное исследование демпфирующей способности уплотнительного кольца для рабочей лопатки КВД / В.Н. Яковкин, В.А. Бессчетнов // «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации (АКТТИ-2013)»: тезисы докладов XIV Всероссийской научно-технической конференции. – 2013. – Т. 1. – С. 158-159.

10. Яковкин, В.Н. Влияние жесткости прижимного демпфера сухого трения на динамические характеристики лопатки вентилятора / В.Н. Яковкин, В.А. Бессчетнов // «Авиация и космонавтика - 2013»: тезисы докладов 12 Международной конференции. – 2013. – С. 432-435.

11. Яковкин, В.Н. Расчетно-экспериментальное определение демпфирующей способности тарельчатого демпфера для конической шестерни коробки приводов ГТД / В.Н. Яковкин, В.А. Бессчетнов // 14-й международной салон «Двигатели-2014»: тезисы докладов научно-технического конгресса по двигателестроению (НТКД-2014). – 2014. – Т. 1. – С. 150-152.

12. Бессчетнов, В.А. Отработка расчетного метода оценки демпфирующей способности межлопаточных демпферов рабочих лопаток ТВД / В.А. Бессчетнов, В.Н. Яковкин, Т.Ю. Королева // «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации (АКТТИ-2014)»: тезисы докладов XV Всероссийской научно-технической конференции. – 2014. – Т. 1. – С. 33-38.

13. Яковкин, В.Н. Расчетный анализ демпфирующей способности демпфера сухого трения и демпфера на основе металлорезины для лопатки вентилятора на резонансе / В.Н. Яковкин, В.А. Бессчетнов // «Проблемы и перспективы развития двигателестроения»: тезисы докладов Международной научно-технической конференции. Ч. 2. – С.148-150.

14. Besschetnov, V.A. The Calculated Research of Underplatform Damper Damping Capacity for Turbine Blades / V.N. Yakovkin, V.A. Besschetnov // «Инновационные процессы в исследовательской и образовательной деятельности». – 2014. – № 1. – С. 8-10.

15. Яковкин, В.Н. Математическая модель осциллятора с сухим трением при вынужденных колебаниях / В.Н. Яковкин, В.А. Бессчетнов // «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации (АКТТИ-2018)»: тезисы докладов XIX Всероссийской научно-технической конференции. – 2018. – Т. 1. – С. 355-358.

16. Яковкин, В.Н. Влияние эффектов микроскольжения на демпфирование колебаний лопаток / В.Н. Яковкин, В.А. Бессчетнов // «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации (АКТТИ-2019)»: тезисы докладов XX Всероссийской научно-технической конференции. – 2019. – Т. 1. – С. 172-175.