

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке

Пермского национального

исследовательского

политехнического университета,

доктор физ.-мат. наук, доцент

Швейкин А.И.

« 20 » марта 2023 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования

«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

Диссертация «Численное и экспериментальное моделирование резонансных колебаний деталей ГТД с демпферами сухого трения», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов, выполнена Яковкиным Вадимом Николаевичем в отделении динамики и прочности АО «ОДК-Авиадвигатель» и на кафедре Авиационные двигатели Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Яковкин Вадим Николаевич 1988 года рождения в 2011 году окончил Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пермский государственный технический университет» по направлению 15.04.03 «Прикладная механика» специализация 15.03.03 «Динамика и прочность машин», с присуждением степени магистра техники и технологии. В 2015 году окончил очную аспирантуру по специальности 05.07.05 - Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов (2.5.15) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный

исследовательский политехнический университет» (срок обучения 01.10.2011-01.10.2015). В период подготовки диссертации с 2011 г. по настоящее время работает в отделении динамики и прочности АО «ОДК-Авиадвигатель» в должности начальника бригады расчетов динамической прочности силовых схем и агрегатов двигателя.

Научный руководитель - Нихамкин Михаил Шмерович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Авиационные двигатели», федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

1. Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации, заключается в следующем:

- проведен анализ научно-технической литературы по тематике диссертационного исследования;
- предложен подход к линеаризации осциллятора с сухим трением,
- который лег в основу разработанной Автором математической модели для оценки диссипативных характеристик демпфера сухого трения;
- проведен комплекс расчетно-аналитических работ, направленных на доказательную базу состоятельности разработанной математической модели, в части верификации с методами прямого интегрирования по времени и точным решением;
- проведен комплекс расчетно-экспериментальных работ, заключающихся
 - в настройке расчетных линеаризованных моделей деталей ГТД, разработке постановки эксперимента, анализе экспериментальных данных;
 - построены расчетные модели лопатки компрессора и зубчатых колес ГТД;
 - предложен способ моделирования контакта для учета эффектов микроскольжения;
 - составлены рекомендации по повышению эффективности демпфера сухого трения применительно к деталям ГТД.

2. Научная новизна диссертационного исследования заключается в

- разработке математической модели, позволяющей оценивать диссипативную энергию демпфера сухого трения на основе базовых модальных характеристиках осциллятора. Особенностью модели является линеаризация силы сухого трения, позволяющая рассматривать систему как линейный

осциллятор свободных колебаний при соблюдении заданных допущений математической модели. По результатам верификации с эталонными методами решения и испытаний натурной лопатки компрессора на вибростенде доказана работоспособность модели;

- представлении возможности сведения задачи к общему решению, характеризующемуся в виде относительного рассеяния энергии (или логарифмического декремента колебаний) при заданном соотношении порогового значения силы трения и контролируемого параметра амплитуды (или динамических напряжений), что дает существенный выигрыш по времени расчета.

- применении разработанной модели в качестве инструмента для инженерной методики проектирования демпферов для натуральных деталей ГТД. Проведена настройка линеаризованной модели для натуральных деталей ГТД. Инженерная методика успешно опробована на зубчатых колесах авиационного двигателя.

3. Степень достоверности результатов проведенных исследований 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 и лицензионного программного обеспечения.

4. Практическая и теоретическая значимость исследования 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.

Газотурбинные двигатели играют важную роль в мире, являясь основными для двигателей авиационного применения. Преимущества ГТД объясняются высокой удельной мощностью при малых размерах. Считается, что ГТД это образец высочайшей надежности при этом яркий пример сложнейшего устройства, содержащего роторные детали, работающие в условиях предельно высоких температур и передаваемых нагрузок. Соответственно, в двигателе множество генерируемых сил периодического и вибрационного характера. Практически каждая деталь испытывает вибрационные нагрузки, в том числе резонансные колебания. Резонансные

колебания опасны повышенным уровнем динамических напряжений, которые при превышении предела выносливости материала могут вызвать зарождение усталостной трещины. Поломки деталей, участвующих в генерации мощности двигателя, зачастую вызывают отключение двигателя, что представляет опасность. Ввиду сложности устройства двигателя ремонт является затратным по времени, поэтому риски досрочного ремонта всегда стараются минимизировать. С каждым новым поколением эффективность двигателей повышается, а значит и повышаются удельные передаваемые нагрузки на детали двигателя. Т.е. проблемы вибрационной прочности и, в частности, резонансных колебаний, всегда будут присущи для ГТД, в особенности авиационного применения. Основными способами борьбы с резонансными колебаниями являются отстройка резонансов из рабочего диапазона частот вращения двигателя, повышение сопротивляемости объекта, снижение вынуждающей силы и демпфирование колебаний, в том числе за счет применения демпфера сухого трения. Нередки случаи, когда единственным вариантом гашения резонансных колебаний является применение демпфера сухого трения. Для обеспечения высокой работоспособности демпфера необходимо определить его рабочие параметры, такие как сила прижатия, масса и пр., что существенно дешевле сделать расчетным способом. Существуют известные методики расчета демпферов, однако они не позволяют: 1) проводить экспресс оценку в условиях ограниченного временного ресурса; 2) объективно анализировать полученный результат, т.к. система содержит слишком много независимых параметров. Иными словами, существует потребность в инженерной методике расчета демпфера, содержащей простую математическую модель расчета демпфирующей способности демпфера.

В диссертационной работе представлена математическая модель, подходящая для применения в инженерной методике проектирования демпферов. Результаты верификации модели и сопоставления результатов расчета с экспериментальными данными с двигателя говорят о работоспособности математической модели и применимости инженерной методики, содержащей данную модель.

Результаты диссертационной работы применены при проектировании демпферов для лопаток и зубчатых колес в АО «ОДК-Авиадвигатель», г. Пермь, Россия.

5. Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

По теме диссертационной работы Яковкиным Вадимом Николаевичем опубликовано 16 научных работ, в том числе 5 в ведущих рецензируемых изданиях, 1 – в издании, индексируемом в международной базе цитирования Scopus. Основные положения и результаты работы отражены в следующих научных публикациях в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий и в базу цитирования Scopus:

Наиболее значимые работы:

1) 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. **(ВАК)**

Соискателем предложен подход к линеаризации контакта зубчатого колеса с демпфирующим устройством. Проведены расчеты диссипативных характеристик (в виде логарифмического декремента колебаний) демпфера с различными настройками линеаризованного контакта.

2) 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. 01203. **(Scopus)**

Соискателем проведен анализ научно-технической литературы по проблемам расчета демпферов сухого трения для деталей ГТД. Представлена разработанная Автором математическая модель, позволяющая оценивать диссипативную энергию демпфера сухого трения на основе базовых модальных характеристиках объекта. Предложено представление результатов расчета в виде обобщенной зависимости логарифмического декремента от силы трения и динамических напряжений в лопатке. Проведен комплекс расчетно-экспериментальных работ, заключающихся в настройке расчетной линеаризованной модели лопатки компрессора, разработке постановки эксперимента, анализе экспериментальных данных. Разработан и представлен подход учета эффектов микроскольжения в модели натурной лопатки.

3) 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. **(ВАК)**

Соискателем проведен анализ научно-технической литературы по тематике диссертационного исследования. Разработана постановка задачи осциллятора с демпфером сухого трения, в том числе с применением линеаризованной модели. Проведены аналитические расчеты. Представлен

подход учета эффектов микроскольжения в базовой модели линеаризованного контакта.

4) 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. Саженов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2022. – № 70. – С. 150–159. **(ВАК)**

Соискателем проведен анализ научно-технической литературы по проблемам вибрационной прочности авиационных зубчатых колес. Выполнена сравнительная оценка при изменении расчетных параметров линеаризованной модели на результаты расчета логарифмического декремента колебаний. Проведен анализ экспериментальных данных тензометрирования зубчатого колеса на двигателе.

Научные труды в прочих изданиях:

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

6) 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. **(ВАК)**

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 полый широкохордной лопатки вентилятора / В.Н. Яковкин, В.А. Бессчетнов // «Математическое моделирование в естественных науках»: тезисы докладов XXII Всероссийской школы-конференции молодых ученых и студентов ММЕН. – 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.

6. Диссертация соответствует паспорту 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).

7. Соответствие диссертационной работы требованиям, «Положения о присуждении ученых степеней»,

Диссертация Яковкина Вадима Николаевича отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Диссертация «Численное и экспериментальное моделирование резонансных колебаний деталей ГТД с демпферами сухого трения» Яковкина Вадима Николаевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Заключение принято на заседании кафедры Авиационные двигатели.

Присутствовало на заседании 10 чел. Результаты голосования: «за» - 10 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0, протокол № 16 от «13марта 2023 г.

Зам. заведующего кафедрой
«Авиационные двигатели», к.т.н.
Плотников А. И.



_____ /