

УТВЕРЖДАЮ

Управляющий директор –

генеральный конструктор

АО «ОДК-Авиадвигатель»,

академик РАН,

А.А. Иноземцев

16.02.23

М

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

акционерного общества «ОДК-Авиадвигатель»

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».

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 Федерального государственного автономного 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 кафедры «Авиационные двигатели», чл.-корр. Академии инженерных наук федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

По результатам рассмотрения диссертации Яковкина В.Н. на тему «Численное и экспериментальное моделирование резонансных колебаний деталей ГТД с демпферами сухого трения», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных

аппаратов, на заседании НТС АО «ОДК-Авиадвигатель», протокол № ПР-НТС-002-2023 от 15.02.2023, принято следующее заключение.

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

- проведен литературный обзор современного состояния работ по расчетно-экспериментальному исследованию демпфирующей способности демпферов сухого трения для деталей газотурбинных двигателей;

- разработана математическая модель для расчета демпфирующей способности демпфера сухого трения при гашении резонансных колебаний. Определена постановка задачи для верификации математической модели с общепринятыми методами. Выведены обобщенные зависимости демпфирующей способности колебательной системы. Проведена адаптация разработанной модели к натурным узлам двигателя: лопатка компрессора, зубчатые колеса;

- разработана оснастка и методика проведения эксперимента для исследования контактных пар и демпфера сухого трения в условиях вибростенда. Непосредственное руководство проведения экспериментальных работ. Проведена обработка результатов эксперимента на вибростенде;

- рассчитана демпфирующая способность тарельчатых демпферов для зубчатых колес коробки приводов центрального привода авиационного двигателя ПС-90А, выданы значения натягов демпферов для исследования вибрационного состояния зубчатых колес на двигателе. Проведена обработка результатов тензометрирования зубчатых колес на двигателе;

- разработаны рекомендации по проектированию демпферов для различных узлов ГТД.

2. **В рамках диссертационной работы получены результаты, обладающие научной новизной:**

- разработана математическая модель для расчета демпфирующей способности демпфера сухого трения, обладающая преимуществом от прочих известных моделей в скорости расчета и универсальностью применительно к различным узлам ГТД, что делает предложенную модель приемлемой для инженерных расчетов;

- расчетным и экспериментальным способом подтверждена достаточность ограниченного числа решений для описания всей области работы демпфера при заданной форме колебаний детали ГТД (рассмотрена лопатка с трактовой полкой в условиях вибростенда), известных граничных условиях, заданной конструкции демпфера;

- подтверждена работоспособность математической модели на практике. Модель применена для расчета натуральных деталей ГТД, в том числе смоделированы испытания конических зубчатых колес коробки приводов и центрального привода с демпферами тарельчатого типа – расчетом спрогнозирована и экспериментально подтверждена высокая эффективность демпфера.

3. **Достоверность** полученных результатов и выводов, изложенных в диссертации, обеспечивается 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. **Теоретическая значимость работы** заключается в возможности сведения задачи, о демпфировании резонансных колебаний за счет демпфера сухого трения, к общему виду при заданных жесткостях колебательной системы.

5. **Практическая значимость работы** заключается в создании инженерной методики проектирования демпферов сухого трения для деталей ГТД, содержащей новую математическую модель, 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 других ГТД).

6. **Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем:**

Содержание диссертационной работы достаточно полно отражено в 16 работах, из них 5 опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК, и 1 - в международной базе цитирования Scopus.

Опубликованные работы достаточно полно отражают содержащиеся в диссертации научные результаты, а также основные аспекты их практического применения.

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 разработана и построена расчетная модель зубчатого колеса с демпфером. Проведены исследования на предмет влияния контактной жесткости на демпфирующую способность демпфера. Проведено сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными.

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. 012037. **(Scopus)**

Соискателем проведен литературный обзор современного состояния работ по расчетно-экспериментальному исследованию демпфирующей способности демпферов сухого трения для деталей газотурбинных двигателей. Соискателем разработана и представлена математическая модель для расчета демпфера сухого трения. Соискателем разработана оснастка для проведения испытаний в условиях вибростенда. Разработана методика испытаний лопатки компрессора с демпфером, осуществлено непосредственное участие и руководство экспериментом. Построена расчетная модель лопатки с демпфером и проведены расчеты. Проведена обработка результатов эксперимента. Проведено сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными.

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 литературный обзор. Определена постановка задачи для верификации математической модели. Выполнена обработка результатов эксперимента.

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

Соискателем проведен литературный обзор по проблемам резонансных колебаний зубчатых колес ГТД. Построена расчетная модель зубчатого колеса с демпфером, проведены расчетные исследования на предмет влияния различных расчётных факторов на демпфирующую способность демпфера, т.к. жесткость контакта, плотность прилегания демпфера. Проведена адаптация математической модели для зубчатого колеса. Выполнена обработка результатов эксперимента зубчатого колеса на авиационном двигателе. Проведено сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными.

Научные труды в прочих изданиях:

5) 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. **(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 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.

7. **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, методы их проектирования и конструирования применительно к системам автоматизированного проектирования. Математическое моделирование стадий и этапов жизненного цикла (создания, производства и эксплуатации двигателей и установок).

Диссертационная работа является *завершенной*.

Тема диссертационной работы признана актуальной. Актуальность определена проблемами вибрационной прочности деталей ГТД, как важной составляющей при подтверждении прочности деталей по многоцикловой усталости. На этапе проведения опытно-конструкторских работ проблемы вибрационной прочности деталей высокоресурсных и высоконагруженных ГТД носят особо острый характер, практически каждая деталь из списка - рабочие и статорные лопатки, трубопроводы, конические зубчатые колеса, тензометрируется для определения фактического уровня динамических напряжений. Нередки случаи проявления высоких резонансных напряжений, тогда должны быть разработаны мероприятия, обеспечивающие вибрационную прочность узла. Из-за высоких удельных параметров нагружения и широкого диапазона рабочих частот двигателя не всегда удается произвести отстройку резонансов или повысить сопротивляемость объекта, в этом случае целесообразны способы увеличения демпфирующей способности узла за счет демпфера сухого (Кулоновского) трения. Кроме того, демпфер позволяет повысить надежность ответственного узла в случае, если есть предпосылки высоких резонансных напряжений, к примеру, на рабочих лопатках турбины высокого давления практически всегда устанавливаются межлопаточные демпферы сухого трения. В процессе проектирования узлов двигателя актуальным является наличие инженерной методики проектирования демпфера, позволяющей в короткие сроки рассчитать параметры разных вариантов конструкций демпферов. 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.

Диссертационная работа представляет собой законченную научно-квалифицированную работу, в которой содержится решение проблемы расчетной оценки демпфирующей способности демпферов сухого трения для деталей ГТД.

Членами научно-технического совета АО «ОДК-Авиадвигатель» сделан вывод о том, что диссертационная работа Яковкина Вадима Николаевича соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Диссертацию «Численное и экспериментальное моделирование резонансных колебаний деталей ГТД с демпферами сухого трения» Яковкина Вадима Николаевича рекомендуется представить 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 научно-технического совета АО «ОДК-Авиадвигатель».

Присутствовало на заседании 44 чел. Результаты голосования:

«за» - 44 чел., «против» - 0 чел., «воздержались» - 0 чел., протокол № ПР-НТС-002-2023 от 15.02.2023

Ученый секретарь НТС, к.т.н.

**Саженов
Алексей Николаевич**

Заместитель начальника
отделения динамики и
прочности, ОТД. 299, к.т.н.

**Андрейченко
Игорь Леонардович**

Начальник отдела прочности
силовых схем и
перспективных методов
анализа, КО-2992, к.т.н.

**Гладкий
Иван Леонидович**