



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям
национального
Пермского
Пермского государственного университета,
мат. наук, доцент
А.И. Швейкин
2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

Диссертация «Разработка методов анализа и оценки изменения вибронапряжений при изменении геометрии лопаток газотурбинных двигателей в процессе их прочностной доводки и их экспериментальном исследовании», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов, выполнена Пивоваровой Марией Владимировной 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» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Соискатель, Пивоварова Мария Владимировна, в период подготовки диссертационной работы с 2015 г. по настоящее время работает в отделении динамики и прочности АО «ОДК-Авиадвигатель» в должности ведущий конструктор бригады перспективных методов анализа.

Пивоварова Мария Владимировна в 2009 году окончила Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пермский государственный университет» по направлению «Математика» специализация «Алгебра», с присуждением квалификации Математик по специальности «Математика» (очная форма обучения, специалитет).

В 2019 году окончила аспирантуру очной формы обучения по научной специальности 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (период обучения с 01.10.2015 г. по 01.10.2019 г.).

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» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

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;
- поставлена и решена задача оптимального расположения тензорезисторов на лопатках;
- поставлена и решена задача расчетной оценки изменения динамических напряжений при изменении геометрии лопаток в процессе их прочностной доводки;
- разработан комплекс программ, написанный на языке Visual Fortran 6.0 и адаптированный для работы с сертифицированным и лицензионным программным продуктом конечно-элементного анализа;
- проведен комплекс расчетно-экспериментальных работ, заключающихся в настройке расчетных моделей компрессорных и турбинных лопаток ГТД, анализе расчетных и экспериментальных данных при выполнении верификации и валидации методов.

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

- разработан новый расчетный метод оптимального размещения тензорезисторов на деталях ГТД (в том числе на лопатках) при экспериментальном исследовании;
- введены новые понятия: коэффициент чувствительности тензорезистора к формам колебаний (ЧТФК), «покрытие» собственных форм колебаний и коэффициент изменения максимальных динамических напряжений в лопатке при изменении ее геометрии в процессе прочностной доводки;
- разработан новый расчетный метод оценки изменения уровня вибронапряжений в лопатках ГТД при изменении ее геометрии на этапе проектирования для обеспечения допустимого уровня вибронапряжений.

3. Достоверность результатов проведенных исследований обоснована использованием фундаментальных физических законов механики деформируемого твердого тела и подтверждается качественной и количественной сходимостью результатов расчета и эксперимента; применением сертифицированного программного обеспечения.

4. Теоретическая значимость работы заключается в:

- обобщении и систематизации материалов по теме исследования;
- представлении научного обоснования разработанных расчетных методов анализа и оценки изменения вибронапряжений при изменении

геометрии лопаток газотурбинных двигателей в процессе их прочностной доводки и их экспериментальном исследовании;

– коррективке:

- алгоритма прочностного проектирования при изменении геометрии лопаток в трехмерной постановке на этапе технического проекта;
- алгоритма экспериментального исследования на подготовительном этапе.

5. Практическая значимость работы заключается в следующем:

– скорректирован алгоритм прочностного проектирования и подготовки испытаний лопаток газотурбинного двигателя, что позволяет существенно сократить временные и финансовые затраты при подготовке и проведении испытаний натурного двигателя, проектировании и прочностной доработке компрессорных и турбинных лопаток;

– разработан инструментарий, позволяющий обеспечить допустимый уровень динамических напряжений на компрессорных и турбинных лопатках и осуществить отстройку от опасных резонансов;

– разработан инструментарий, позволяющий повысить качество планирования экспериментального исследования по определению динамических напряжений в лопатках. Данный подход реализован в комплексе программ, написанном на языке Visual Fortran 6.0. Комплекс программ адаптирован для работы с программным продуктом конечно-элементного анализа;

– выпущен Руководящий технический материал (РТМ), сформированный на основе результатов исследования и внедренный в технологический процесс на АО «ОДК-Авиадвигатель», г. Пермь, Россия;

– на основании расчетного метода оптимального расположения тензорезисторов разработана лабораторная работа для студентов ПНИПУ;

– результаты диссертационной работы внедрены в процесс проектирования и процесс подготовки испытаний компрессорных и турбинных лопаток в АО «ОДК-Авиадвигатель», г. Пермь, Россия (семейство газотурбинных двигателей ПД).

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

Всего по теме диссертации опубликовано 17 работ. Основные положения отображены в 5 работах, в том числе 2 в научном издании, индексируемом в международной базе цитирования Scopus (включен в базу RSCI), 3 в научных изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК. В тексте диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах по теме диссертации.

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

Наиболее значимые работы:

1) Верификация расчета распределения динамических напряжений и расчетного метода разработки схемы препарирования для рабочей лопатки компрессора / **М. В. Пивоварова**, В. М. Лимонова, А. В. Артемов, В. А. Бессчетнов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2017. – № 49. – С. 72–80. (ВАК, 05.07.00)

Соискателем проведен анализ научно-технической литературы по тематике экспериментального исследования лопаток ГТД. Представлена верификация расчетного метода оптимального расположения тензорезисторов. Проведены расчеты вибрационных характеристик.

2) Пивоварова, М. В. Разработка расчетного метода определения оптимального размещения тензорезисторов и определение коэффициентов чувствительности форм колебаний / М. В. Пивоварова, В. А. Бессчетнов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. – 2017. – № 50. – С. 5–14. (ВАК, 05.07.00)

Соискателем проведен анализ научно-технической литературы по проблемам тензометрирования лопаток ГТД. В статье представлен метод определения оптимального положения тензорезисторов. Эффективность метода отображена в сравнительной оценке эффективности трех схем препарирования, разработанных по разным принципам. Соискателем представлено описание разработанного комплекса программ для определения коэффициента чувствительности форм колебаний и оптимального расположения тензорезисторов.

3) Пивоварова, М. В. Расчетный метод оценки изменения уровня вибронапряжений в компрессорных лопатках газотурбинных двигателей / М. В. Пивоварова, В. А. Бессчетнов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2021. – № 2. – С. 118–131. (ВАК; Scopus)

Соискателем проведен анализ научно-технической литературы по проблемам расчетного прогнозирования уровня вибронапряжений в лопатках ГТД. Представлен метод оценки изменения уровня вибронапряжений в лопатках при доработке геометрии. Соискателем предложены мероприятия по изменению геометрии лопатки с целью снижения вибронапряжений. Представлен прогноз изменения реальных действующих вибронапряжений в лопатке после доработки геометрии. Проведены валидация и верификация расчетного метода оценки изменения уровня вибронапряжений в лопатке после доработки.

4) Пивоварова, М. В. Разработка способа обрыва рабочей лопатки компрессора высокого давления на заданной частоте вращения / М. В. Пивоварова, И. Л. Гладкий // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – № 3. – С. 53–62. (ВАК, Scopus, K2)

Соискатель в данной публикации представляет экспериментальное подтверждение возникновения резонансов на основных режимах работы двигателя рабочей лопатки компрессора высокого давления газотурбинного двигателя по причине возникновения высоких динамических напряжений. Приведен расчетный метод моделирования обрыва лопатки на резонансе. Проведено валидация и верификация расчетного метода моделирования обрыва лопатки на резонансе на заданной частоте вращения.

5) Пивоварова, М. В. Оптимизация схемы препарирования лопаток газотурбинных двигателей датчиками при определении динамических напряжений / М. В. Пивоварова, М. Ш. Нихамкин // *Авиационные двигатели*. – 2024. – № 1 (22). – С. 118–131. (ВАК, 2.5.15, К3)

Соискателем проведен анализ научно-технической литературы по проблемам тензометрирования лопаток турбины из монокристаллического сплава с ортотропными свойствами. Приведена доработка метода определения оптимального положения тензорезисторов. Особенности доработанного метода продемонстрированы при разработке оптимальной схемы препарирования на основании расчета вибрационных характеристик турбинной лопатки из монокристаллического сплава с ортотропными свойствами.

Научные труды в прочих изданиях:

6) Отработка расчетного метода снижения динамических напряжений в пустотелой лопатке вентилятора / **М. В. Пивоварова**, В. А. Бессчетнов, А. А. Стром, Л. В. Сараева // *Сборник тезисов докладов Научно-технического конгресса по двигателестроению, ЦИАМ, 15–17 апреля 2014 г.* – Москва, 2014. – С. 174–177.

7) Пивоварова, М. В. Снижение динамических напряжений в рабочих лопатках КВД с кольцевым замком за счет изменения аэродинамического профиля / М. В. Пивоварова, В. А. Бессчетнов // *Авиадвигатели XXI века: сборник тезисов докладов Всероссийской научно-технической конференции, ЦИАМ, 24–27 ноября 2015 г.* – Москва : ЦИАМ, 2015. – С. 245–246.

8) Пивоварова, М. В. Разработка оптимальной схемы препарирования для лопаток турбомашин / М. В. Пивоварова, В. А. Бессчетнов // *Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации-2018: сборник материалов XIX Всероссийской научно-технической конференции, г. Пермь, ПГНИУ, 15–17 ноября 2018 г.* – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2018. – С. 67–69.

9) Пивоварова, М. В. Ресурс деталей ГТД в условиях воздействия коррозионных сред / М. В. Пивоварова, И. Л. Андрейченко, И. Л. Гладкий // *Динамика, прочность и надежность авиационных газотурбинных двигателей: сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции, ЦИАМ, 23–25 января 2019 г.* – Москва, 2019.

10) Пивоварова, М. В. Ресурс деталей газотурбинных двигателей в условиях воздействия коррозионных сред / М. В. Пивоварова, И. Л. Гладкий //

Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2019. – №3. – С. 109–117. (ВАК, 05.02.22, 05.13.05)

11) Изучение сульфидно-оксидной коррозии никелевого сплава в средах активных корродирующих агентов в кинетическом режиме / **М. В. Пивоварова**, А. И. Пузанов, А. Л. Казанцев, П. В. Сковородников // Климат-2020: современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы: сборник трудов V Всероссийской научно-технической конференции. – Санкт-Петербург, 2020. – С. 119–133.

12) Пивоварова, М. В. Моделирование инженерных испытаний обрыва рабочей лопатки первой ступени КВД / М. В. Пивоварова, И. Л. Гладкий // International Conference on Aviation Motors (ICAM 2020): сборник тезисов докладов Международной научно-технической конференции. – Москва, 2021. – С. 643–644.

13) Исследование металлопорошкового сплава ХН56КВМТЮБ для дисков ГТД в условиях агрессивного действия смеси хлоридов и сульфатов натрия / **М. В. Пивоварова**, Л. Б. Гецов, А. Б. Лаптев, А. И. Пузанов, М. Ю. Баландина, Д. А. Мовенко // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2021. – №7 (793). – С. 19–25. (ВАК, Web of Science, Scopus)

14) Пивоварова, М. В. Сопротивление МЦУ жаропрочного никелевого сплава в условиях концентрации напряжений / М. В. Пивоварова, И. Л. Гладкий // Проблемы прочности авиационных конструкций и материалов: сборник тезисов докладов всероссийской научно-практической конференции. – Новосибирск, 2022. – С. 16–18.

15) Пивоварова, М. В. Оценка изменения уровня вибронапряжений при доработке конструкции турбинной лопатки газотурбинного двигателя / М. В. Пивоварова, М. Ш. Нихамкин // Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций: сборник тезисов докладов XVIII Международной конференции, г. Екатеринбург, 27–31 мая 2024 г. – Екатеринбург, 2024. – С. 32–33.

16) Пивоварова, М. В. Особенности оптимизации схемы препарирования лопаток газотурбинных двигателей при определении вибронапряжений / М. В. Пивоварова, М. Ш. Нихамкин // ICMAR-2024: сборник тезисов докладов Международной конференции по методам аэрофизических исследований, г. Новосибирск, 1–5 июля 2024 г. – Новосибирск, 2024. – С. 23–24.

17) Пивоварова, М. В. Оптимизация схемы препарирования лопаток газотурбинных двигателей датчиками при определении динамических напряжений / М. В. Пивоварова, М. Ш. Нихамкин // Сборник тезисов докладов Научно-технического форума двигателестроения, ЦИАМ, 23–25 октября 2024 г. – Москва, 2024. – С. 78–80.

7. Соответствие содержания диссертации специальности, по которой она рекомендуется к защите.

Решение рассматриваемой научной проблемы предполагает научные исследования и технические разработки, включенные в формулу научной специальности 2.5.15 Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов, а именно:

п. 6. Методы конструирования тепловых и электроракетных двигателей летательных аппаратов, их узлов и систем, включая методы автоматизированного проектирования двигателей с помощью ЭВМ.

п. 7. Строительная механика тепловых двигателей летательных аппаратов. Методы оценки и характеристики статической и усталостной прочности систем двигателей с учетом пластичности и ползучести материалов.

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. 10. Методы испытания двигателей, их элементов и агрегатов, системы автоматизированного сбора, обработки и анализа экспериментальных данных, включая комплексную автоматизацию стендовых испытаний.

п. 12. Методы обеспечения надежности двигателей и энергетических установок летательных аппаратов, эффективности их использования.

п. 18. Процессы создания и доводки двигателей летательных аппаратов. Способы улучшения характеристик и основных данных двигателей, находящихся в серийном производстве и эксплуатации.

п. 22. Методы и средства экспериментальных способов определения статических и динамических характеристик систем автоматического управления двигателями; способы оптимального построения элементов и контуров систем управления; способы оптимальной передачи информации в системах автоматического управления двигателями.

8. Диссертация Пивоваровой Марии Владимировны отвечает требованиям, установленным п. 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 482, предъявляемым диссертациям на соискание ученой степени.

Диссертация «Разработка расчетных методов анализа и оценки изменения уровня вибронапряжений лопаток газотурбинных двигателей» Пивоваровой Марии Владимировны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.5.15 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Заключение принято на заседании кафедры «Авиационные двигатели» ФГАОУ ВО «ПНИПУ» от 31 января 2025 г. Присутствовало на заседании 18 чел. Результаты голосования: «за» – 18 чел., «против» – 0 чел., «воздержались» – 0 чел., протокол № 12 от 31 января 2025 г.

Заместитель заведующего кафедрой
«Авиационные двигатели»,
к.т.н., доцент

А.И. Плотников

