

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«Пермский национальный исследовательский политехнический
университет»**

**Заключение диссертационного совета Д ПНИПУ.05.18
по диссертации Пивоваровой Марии Владимировны
на соискание ученой степени кандидата технических наук**

Диссертация «Разработка методов анализа и оценки изменения вибронпряжений при изменении геометрии лопаток газотурбинных двигателей в процессе их прочностной доводки и их экспериментальном исследовании» по научной специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов принята к защите «18» апреля 2025г. (протокол заседания № 2) диссертационным советом Д ПНИПУ.05.18, созданным по приказу ректора Пермского национального исследовательского политехнического университета от «5» октября 2022 г. № 93-О в рамках реализации предоставленных ПНИПУ прав, предусмотренных абзацами вторым – четвертым пункта 3.1 статьи 4 Федерального закона от 23 августа 1996 г. № 127-ФЗ «О науке и государственной научно-технической политике» на основании распоряжения Правительства Российской Федерации от 23 августа 2017 г. № 1792-р.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации и в Акционерном обществе «Объединенная двигателестроительная корпорация-Авиадвигатель».

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.

Официальные оппоненты:

Великанова Нина Петровна, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», кафедра «Реактивные двигатели и энергетические установки», профессор (г. Казань),

Блинов Виталий Леонидович, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», кафедра «Турбины и двигатели» Уральского энергетического института, доцент (г. Екатеринбург).

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа. Отзыв ведущей организации утвержден проректором по научной работе, доктором физико-математических наук, доцентом Шарафуллинским Ильдусом Фанисовичем, диссертационная работа рассмотрена на заседании кафедры авиационных двигателей и энергетических установок, протокол №33 от 12.05.2025 г., отзыв подписан заведующим кафедрой авиационных двигателей, кандидатом технических наук, доцентом Зыряновым Алексеем Викторовичем, отзыв составлен доктором технических наук, профессором кафедры авиационные двигатели Бадамшиным Ильдаром Хайдаровичем.

Отмечено, что диссертационная работа соответствует требованиям п.п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013г. №842 (в действующей редакции), а ее автор – Пивоварова Мария Владимировна – заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по

научной специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается областью их компетентности и научной деятельностью, связанной с исследованиями динамических процессов в газотурбинных двигателях и прочностного анализа с использованием численных и экспериментальных методов.

На автореферат и диссертацию поступило 9 отзывов:

1. Новиков Дмитрий Константинович, профессор кафедры «Конструкция и проектирование двигателей летательных аппаратов» Самарского национального исследовательского университета им. академика С.П. Королева, доктор технических наук (г. Самара).

2. Лоскутников А.А., главный конструктор, кандидат технических наук; Латыпов Рустам Климович, начальник сектора «Лопатки и диски» отдела «Прочность»; Кусова Олеся Игоревна, инженер-конструктор 1 категории сектора «Лопатки и диски» отдела «Прочность», ПАО «ОДК-УМПО», ОКБ «Мотор» (г. Уфа).

3. Леонтьев Михаил Константинович, генеральный директор ООО «Альфа-Транзит», доктор технических наук, профессор (г. Химки).

4. Серебряков Николай Николаевич, начальник отдела «Расчеты динамики и прочности двигателя» Федерального автономного учреждения «ЦИАМ им. П.И. Баранова», кандидат технических наук (г. Москва).

5. Дубровская Александра Сергеевна, инженер-конструктор 1 категории отдела прочности конструкторского отделения филиала ПАО «ОДК-Сатурн» - ОМКБ, кандидат технических наук (г. Омск).

6. Мусеев Александр Александрович, заместитель начальника ОКБ по расчетам; Гинзбург Александр Евгеньевич, ведущий инженер-конструктор, кандидат технических наук, АО «ОДК-Климов» (г. Санкт-Петербург).

7. Лысенко Алексей Анатольевич, эксперт конструкторского отдела прочности ПАО «ОДК-Сатурн», кандидат технических наук (г. Рыбинск).

8. Шахов Александр Сергеевич, научный сотрудник научно-исследовательского отдела 203 Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» кандидат технических наук (г. Москва).

9. Швецов Антон Владимирович, кандидат технических наук, заместитель главного конструктора ПАО «ОДК- Кузнецов» (г. Самара).

Все полученные отзывы положительные, указанные недостатки не являются определяющими, частично носят дискуссионный характер и в целом не снижают высокой оценки работы. Во всех отзывах отмечено, что диссертационная работа является полным, законченным исследованием, соответствует п.п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (в действующей редакции), а ее автор Пивоварова Мария Владимировна заслуживает присуждение ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

По теме диссертации соискателем опубликовано семнадцать научных трудов, из них два в научном издании, индексируемом в международной базе цитирования Scopus (включен в базу RSCI), три в научных изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем научных трудах. Наиболее значимые работы по теме диссертации:

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).

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).

3. Пивоварова, М. В. Расчетный метод оценки изменения уровня вибронпряжений 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).

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)

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, K3).

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработаны метод оптимального размещения тензорезисторов на деталях ГТД (в том числе на лопатках) при экспериментальном исследовании и метод оценки изменения уровня вибронпряжений в лопатках ГТД при изменении ее геометрии на этапе проектирования для обеспечения допустимого уровня вибронпряжений;

предложены оптимизационное решение задачи определения наиболее информативного расположения тензорезисторов с целью определения максимальных динамических напряжений, комплекс программ, написанный на языке программирования Visual Fortran 6.0 и адаптированный для работы с сертифицированным и лицензионным программным продуктом конечно-элементного анализа, а также универсальный алгоритм прогнозирования прочностного проектирования при изменении геометрии лопаток в трехмерной постановке на этапе технического проекта;

доказана эффективность разработанных методов анализа и оценки изменения вибронпряжений при изменении геометрии лопаток газотурбинных двигателей в процессе их прочностной доводки и их экспериментальном исследовании путем верификации и валидации на основании экспериментальных исследований лопаток в составе натурального двигателя;

введено в область практического применения использование методов анализа и оценки изменения вибронпряжений при изменении геометрии лопаток газотурбинных двигателей в процессе их прочностной доводки и их экспериментальном исследовании в АО «ОДК-Авиадвигатель», а также новые понятия: коэффициент чувствительности форм колебаний тензорезистора (ЧТФК), «покрытие» собственных форм колебаний и коэффициент изменения максимальных динамических напряжений в лопатке при изменении ее геометрии в процессе прочностной доводки.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что: **доказаны** научно подтвержденные методы анализа и оценки изменения вибронпряжений при изменении геометрии лопаток газотурбинных двигателей в процессе их прочностной доводки и их экспериментальном исследовании;

применительно к проблематике диссертации результативно **использованы** основы теории колебаний, программные расчетные комплексы для моделирования колебаний натуральных деталей ГТД;

изложены основные положения расчетного определения оптимальной схемы препарирования и расчетного прогнозирования изменения динамических напряжений в лопатках при их прочностной доводке, скорректированный алгоритм прочностного проектирования при изменении геометрии лопаток в трехмерной постановке на этапе технического проекта и экспериментального исследования на подготовительном этапе;

раскрыты особенности разработки оптимальной схемы препарирования для деталей ГТД, изготовленных из материалов с ортотропными свойствами (монокристаллические сплавы и композиционные материалы);

изучен характер влияния различных вариантов изменения геометрических параметров на формы колебаний и собственную частоту лопаток ГТД при прочностной доводке;

проведена адаптация математической модели к современному программному комплексу для разработки оптимальной схемы препарирования деталей ГТД в конечно-элементной постановке.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены инженерные методы анализа и оценки изменения вибронапряжений при изменении геометрии лопаток газотурбинных двигателей в процессе их прочностной доводки и их экспериментальном исследовании, позволяющие сократить временные и финансовые затраты и объем экспериментальных работ при прочностной доводке двигателя. Методы применены для проектирования компрессорных и турбинных лопаток высокого и низкого давления, а также для подготовки к экспериментальным исследованиям лопаток и других деталей ГТД в АО «ОДК-Авиадвигатель», г. Пермь, Россия;

определены перспективы использования методов и моделей; рекомендуемые области применения разработанных методов для прогнозирования реальных действующих переменных динамических напряжений на деталях ГТД и расчета коэффициента запасов прочности лопаток;

созданы руководящий технический материал (РТМ), сформированный на основе результатов исследования и внедренный в технологический процесс на АО «ОДК-Авиадвигатель», г. Пермь, Россия и методический материал для проведения лабораторной работы для студентов в рамках дисциплины «Ресурсное проектирование и надежность АД»;

представлены результаты испытаний лопаток с применением оптимальных схем препарирования и с измененной геометрией при прочностной доводке на натурных авиационных двигателях и в лабораторных исследованиях на вибростенде.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ применено метрологически аттестованное и поверенное измерительное оборудование, сертифицированное программное обеспечение;

для численного моделирования использовались современные расчетные программные комплексы, апробированные и верифицированные в АО «ОДК-Авиадвигатель» по результатам натурных экспериментов;

теория построена на известных законах механики деформируемого твердого тела, теории механических колебаний и законах сохранения энергии;

идея базируется на моделировании собственных колебаний нелинейной механической системы в условиях действия газодинамических нагрузок и центробежных сил;

использовано сравнение результатов исследования автора с результатами, полученными другими исследователями по тематике влияния изменения геометрических параметров лопаток на вибрационные характеристики;

установлено, что математические модели верифицированы по аналитическим решениям, а результаты расчетного определения вибрационных характеристик натурных лопаток компрессора удовлетворительно согласуются с экспериментом. Расхождение не превышает 5 %.

Личный вклад соискателя состоит в:

выполнении анализа научно-технической литературы по проблемам анализа и оценки изменения динамических напряжений при изменении геометрии лопаток ГТД в процессе их прочностной доводки и их экспериментальном исследовании и расчета деталей ГТД;

разработке метода оптимального размещения тензорезисторов на деталях ГТД (в том числе на лопатках) при экспериментальном исследовании, метода оценки изменения уровня вибронапряжений в лопатках ГТД при изменении ее геометрии на этапе проектирования для обеспечения допустимого уровня вибронапряжений, а также в разработке комплекса программ, адаптированном для работы с сертифицированным и лицензированным программным продуктом конечно-элементного анализа;

обработке результатов экспериментов, проведенных в лабораторных условиях и на натурных двигателях;

участии в проектировании на эскизном и технологическом этапах и подготовке лопаток ГТД к экспериментальным исследованиям на натурных двигателях и на вибростенде.

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 с учетом дополнений от 26.09.2022 г., соответствует требованиям раздела 2 «Порядка присуждения ученых степеней в ПНИПУ» утвержденным приказом ректора ПНИПУ от 09 декабря 2021 г. № 4334-В. В диссертационной работе изложено решение актуальной научной задачи разработки методов анализа и оценки изменения вибронапряжений при изменении геометрии лопаток газотурбинных двигателей в процессе их прочностной доводки и их экспериментальном исследовании, нашедших практическое применение при проектировании газотурбинных двигателей. Применение методов позволяет существенно

сократить временные и финансовые затраты при подготовке и проведении испытаний натурального двигателя, проектировании и прочностной доработке компрессорных и турбинных лопаток, что имеет важное значение для авиадвигателестроительной отрасли.

На заседании «20» июня 2025 г. диссертационный совет ДПНИПУ.05.18 принял решение присудить Пивоваровой Марии Владимировне ученую степень кандидата технических наук (протокол заседания № 3) по научной специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 8 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 16 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за присуждение ученой степени – 15, против присуждения ученой степени – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель диссертационного совета

ДПНИПУ.05.18,

доктор технических наук,

доцент

Ученый секретарь

ДПНИПУ.05.18

кандидат технических наук

ПРИКАЗ № 01/ПР/2025/01/01
ОБРАЗОВАНИЯ

его совета

Модорский Владимир Яковлевич

Бабушкина Анна Викторовна

«20» июня 2025 г.

М.П.