

РӘСӘЙ ФЕДЕРАЦИЯҢЫ ФӘН ҺӘМ
ЮГАРЫ БЕЛЕМ БИРЕҮ МИНИСТРЛЫҒЫ
ЮГАРЫ БЕЛЕМ БИРЕҮ
ФЕДЕРАЛЬ ДӘҮЛӘТ БЮДЖЕТ МӘҒАРИФ
УЧРЕЖДЕНИЕҢЫ

«ӨФӨ ФӘН ҺӘМ ТЕХНОЛОГИЯЛАР
УНИВЕРСИТЕТЫ»
(Өфө университеты)

Заки Вәлиди урамы, 32, Өфө калаһы, БР, 450076

тел.: 8 (347) 272-63-70 e-mail: rector@uust.ru https://uust.ru
ОКПО 79067778 ОГРН 1220200037474 ИНН/КПП 0274975591/027401001

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«УФИМСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ НАУКИ И
ТЕХНОЛОГИЙ»

(Уфимский университет, УУНТ)

Заки Валиди ул., 32, Уфа, РБ, 450076

от 21.05 2025 г. № 1195/3131-13
на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Проф.
докт.
Шаф

и

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОР

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский университет науки и технологий» на диссертацию Пивоваровой Марии Владимировны «Разработка методов анализа и оценки изменения вибронпряжений при изменении геометрии лопаток газотурбинных двигателей в процессе их прочностной доводки и их экспериментальном исследовании», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов

1. Актуальность диссертационной работы

Согласно Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации от 28.02.2024, приоритетным направлением в гражданской авиации является создание современных самолетов с отечественными двухконтурными газотурбинными двигателями (ГТД) нового поколения в рамках современных реалий увеличения темпов производства авиационного двигателестроения с необходимым импортозамещением материалов, программного обеспечения и систем автоматизации. Современные газотурбинные двигатели должны отвечать требованиям по обеспечению необходимой надежности и безопасности. Так как лопатки – самые массовые детали в авиационных двухконтурных двигателях, то поломка даже одной лопатки может привести к фатальным последствиям для работы двигателя в целом. Важной задачей при разработке ГТД является необходимость обеспечить надежность и безопасность работы лопаток с низким уровнем динамических напряжений. Своевременное определение действующих динамических напряжений в лопатках с большой точностью помогает решить данную задачу. Тенденции создания современных газотурбинных двигателей приводят к уменьшению массы двигателя и увеличению коэффициента полезного действия (КПД). Для реализации этих требований в конструкциях двигателей появились лопатки со сложным профилем пера, широкохордные лопатки компрессора, лопатки турбин из монокристаллического сплава с анизотропными свойствами и т.д. С одной стороны, усложнение профиля приводит к возникновению изгибно-крутильных форм колебаний, для которых зачастую невозможно зафиксировать традиционным расположением тензорезисторов максимальный уровень вибронпряжений при испытании. С другой стороны, вследствие повышенного уровня вибраций возникает большинство поломок лопаток, имеющих усталостный характер разрушения. Поломка одной лопатки обычно приводит к лавинообразному процессу повреждения или разрушения других лопаток, нарушению балансировки ротора, помпажу и другим серьезным последствиям. Для предупреждения таких поломок определяются динамические напряжения в лопатках. Для таких испытаний требуется специальная

подготовка лопаток, они должны быть препарированы тензорезисторами. Критически важно на этапе подготовки испытаний правильно выбрать расположение и ориентацию тензорезисторов на поверхности пера лопатки. Сложность в разработке схемы препарирования лопаток тензорезисторами состоит в том, что она должна обеспечивать надежное измерение максимальных амплитуд вибронапряжений на всех возможных резонансных режимах с различными собственными формами. Ошибка в схеме препарирования может привести к заниженной оценке динамических напряжений и неправильной оценке коэффициентов запаса.

Зачастую в процессе экспериментальных исследований натурного двигателя проявляются резонансы в основном диапазоне работы двигателя с высокими динамическими напряжениями, что приводит к необходимости дорабатывать лопатки с целью снижения динамических напряжений. Это достигается, в частности, изменением геометрии лопатки с последующей проверкой при испытаниях натурного двигателя. В отдельных случаях с первой попытки не удается получить нужный результат, что приводит к временным и финансовым потерям.

Методы определения вибронапряжений в лопатках на этапе проектирования в настоящее время разработаны недостаточно. Расчетный метод оценки изменения уровня динамических напряжений при изменении геометрии лопатки в процессе ее прочностной доводки повысит качество проектирования, что значительно сократит время и финансовые затраты.

Методы решения задач по определению динамических напряжений с большой точностью и методы оценки изменения динамических напряжений в лопатках отстают от современных требований создания авиационных двигателей.

В связи с этим диссертационная работа Пивоваровой Марии Владимировны является актуальной и значимой, так как она направлена на повышение надежности и безопасности работы газотурбинных двигателей и эффективного снижения резонансных вибронапряжений за счет развития инженерных расчетных методов анализа и оценки изменения вибронапряжений при изменении геометрии лопаток газотурбинных двигателей в процессе их прочностной доводки и их экспериментальном исследовании.

В своей работе соискатель ставит и успешно решает задачи по разработке малозатратной расчетной модели, ее верификации и расчетно-экспериментальному обоснованию работоспособности модели на примере анализа и оценки изменения вибронапряжений при изменении геометрии рабочей лопатки компрессора.

2. Научная новизна

Автором диссертации разработаны расчетный метод оптимального размещения тензорезисторов на деталях ГТД (в том числе на лопатках) при экспериментальном исследовании и расчетный метод оценки изменения уровня вибронапряжений в лопатках ГТД при изменении ее геометрии на этапе проектирования для обеспечения допустимого уровня вибронапряжений. Данные методы позволили обеспечить усталостную прочность лопаток и гарантировали существенное снижение объема доводочных испытаний.

Автором были введены 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.

Представлена работоспособность методов для рабочей лопатки компрессора и турбины ГТД.

3. Практическая значимость работы

Разработанные расчетные методы позволяют сокращать временные и финансовые затрат при подготовке и проведении испытаний натурного двигателя, проектировании и прочностной доработке компрессорных и турбинных лопаток.

Кроме того, был скорректирован алгоритм прочностного проектирования и подготовки испытаний лопаток газодинамического двигателя. Таким образом, разработаны инструментарии, позволяющие:

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

–повысить качество планирования экспериментального исследования по определению динамических напряжений в лопатках. Данный подход реализован в комплексе программ, написанном на языке VisualFortran 6.0 и адаптированном 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». На основании расчетного метода оптимального расположения тензорезисторов разработана лабораторная работа для студентов ФГБОУ ВО «ПНИПУ».

4. Содержание работы. Соответствие автореферата диссертационной работе

Диссертационная работа состоит из четырех глав и одного приложения, основной текст изложен на 143 страницах.

Во введении обоснована актуальность проведения исследований, направленных на разработку расчетных методов анализа и оценки изменения вибронапряжений для применения в инженерной практике.

В первой главе представлены результаты анализа исследований в области экспериментального определения динамических напряжений, способов доработки деталей с целью снижения динамических напряжений и расчетной оценки изменения уровня вибронапряжений при доработке детали. Проведена систематизация литературных источников.

Выделены основные способы снижения динамических напряжений (изменение геометрии лопатки) и основной метод определения динамических напряжений на лопатках (тензометрирование).

Отмечена основная проблема снижения динамических напряжений путем изменения геометрии лопатки: необходимость подтверждения уровня действующих динамических напряжений для каждого варианта геометрии путем повторения натурных испытаний в составе двигателя, так как испытание натурального двигателя на стенде наиболее точно воспроизводит работу двигателя по полетному циклу. Что приводит к возникновению дополнительных временных и финансовых затрат.

Описана основная проблема тензометрирования лопаток можно выделить следующие: ограниченность по размерам и количеству тензорезисторов, необходимость размещения тензорезисторов в места максимальных деформаций и необходимость зафиксировать динамические напряжения с наибольшей точностью.

Для сокращения временных и финансовых затрат при планировании испытаний и проектировании лопаток необходимо разрабатывать расчетные методы анализа и оценки изменения вибронапряжений при изменении геометрии лопаток газотурбинных двигателей в процессе их прочностной доводки и их экспериментальном исследовании.

Представленные в обзоре материалы достаточно полно описывают мировой опыт по проблеме диссертационного исследования.

Во второй главе представлен разработанный автором расчетный метод оптимального размещения тензорезисторов при подготовке перед испытаниями по определению динамических напряжений. Введены два новых понятия: коэффициент чувствительности тензорезистора к формам колебаний (ЧТФК) и коэффициент «покрытия» форм колебаний. Сформулирована задача оптимального размещения тензорезисторов и представлена ее реализация в комплексе программ. Представлена верификация расчетного метода оптимального расположения тензорезисторов на примере определения полей динамических напряжений при резонансных колебаниях с первыми тремя собственными формами в лабораторных условиях на вибростенде ВЭДС-1500.

В третьей главе представлен разработанный автором расчетный метод оценки изменения уровня вибронапряжений в лопатках ГТД при изменении профильной части геометрии лопаток в процессе их проектирования (прочностной доводке).

Введено новое понятие: коэффициент изменения максимальных динамических напряжений в лопатке при изменении ее профильной части геометрии в процессе проектирования (прочностной доводки). Представлена верификация и валидация расчетного метода оценки изменения уровня вибронапряжений в лопатках газотурбинного двигателя (ГТД) при изменении геометрии лопаток в процессе их прочностной доводки.

В четвертой главе приведен скорректированный алгоритм прочностного проектирования лопаток при изменении их геометрии в трехмерной постановке на этапе технического проекта и алгоритм экспериментального исследования динамических напряжений деталей на подготовительном этапе.

Соискатель отмечает, что результаты, изложенные в диссертации, нашли практическое применение при проектировании и при подготовке испытаний компрессорных и турбинных лопаток перспективных двухконтурных газодинамических двигателей ПД-8, ПД-14, ПД-35 для пассажирских самолетов.

В Заключении отражены основные выводы о проделанной работе, свидетельствующие об успешном решении поставленных задач.

5. Мнение о работе в целом

Диссертационная работа изложена простым техническим научным языком. Структура диссертации логичная по построению и подаче материала: начинается от рассмотрения простых расчетных моделей, заканчивается лабораторными экспериментами и испытаниями на натурном двигателе.

В диссертации отражен значительный объем выполненных многоплановых расчетных и экспериментальных работ. Соискателем не только решена проблема разработки расчетных методов и их верификации, но и обоснована работоспособность на практике, для чего были проведены многочисленные экспериментальные исследования. Особую полезность работе придает разработка комплекса программ для оптимального расположения тензорезисторов, а также Руководящий технический материал и лабораторная работа для студентов ФГБОУ ВО «ПНИПУ». Интересен и полезен разработанный инструментарий, позволяющий обеспечить допустимый уровень динамических напряжений на компрессорных и турбинных лопатках и осуществить отстройку от опасных резонансов, а также повысить качество планирования экспериментального исследования по определению динамических напряжений в лопатках. Изложенные экспериментальные и расчетные материалы представляют научную и практическую ценность и могут быть использованы в проектировании и доводке газотурбинных двигателей разной мощности наземного и авиационного назначения.

По сути, соискателем предложен универсальный инженерный способ разработки оптимальной схемы препарирования лопаток ГТД и инструментарий для оценки изменения уровня вибронапряжений в лопатках ГТД при изменении ее геометрии, которые с успехом может применяться и к другим деталям ГТД, работающим в условиях вибраций. Разработанная расчетная модель отличается оригинальностью и представлена впервые. Универсальность расчётной модели делает ее адаптивной для различных условий применения.

Результаты диссертационной работы используются на предприятии АО «ОДК-Авиадвигатель» в качестве инженерных методов, позволяющих сокращать временных и финансовых затрат при подготовке и проведении испытаний натурного двигателя, проектировании и прочностной доработке компрессорных и турбинных лопаток, а также обеспечивающих надежную и безопасную работу ГТД.

Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертационной работы. Выносимые на защиту положения и результаты с достаточной полнотой отражены в пяти научных статьях в периодических изданиях, включенных в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные

научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, рекомендованных ВАК, две из них опубликованы в журнале, индексируемом в международной базе цитирования Scopus.

6. Соответствие диссертации выбранной специальности

Диссертационная работа Пивоваровой Марии Владимировны соответствует научной 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. Вопросы и замечания по работе

1. В автореферате необходимо привести развернутые допущения. В частности, проведенное исследование на изолированной лопатке - основа расчета.
 2. В автореферате не раскрыто обоснование использования главных деформаций при определении коэффициента чувствительности тензорезистора к формам колебаний.
 3. В автореферате неполно или неясно раскрыто назначение коэффициента покрытия форм.
 4. По данным некоторых авторов изменение геометрии профиля более 3 % влияет на газодинамические характеристики лопаточной решетки. В работе указана качественная оценка влияния изменения геометрии лопатки на её газодинамические характеристики. Необходимо развернуть данный аспект исследований.
 5. В соотношении равенства потенциальных энергий деформации $U_{21} = U_{32}$ следует указать знак приближенного равенства. Это уточнит допущение, но не снизит достоинств работы. Иначе говоря, речь идет об эквивалентности, но не о математическом равенстве.
 6. Общепринятое обозначение коэффициента запаса прочности (КЗП) - K_σ . Он является относительной величиной. Поэтому фраза в автореферате на с. 12: «Зачастую при сопоставлении динамических напряжений, измеренных в ходе натурных испытаний, с допустимыми значениями $[K_\sigma]$ фиксируется значительное превышение первых» звучит некорректно. Следует добавить: «...динамических напряжений, приведённых к КЗП, ...».
- Стилистические замечания.
1. Непонятна фраза на странице 14 автореферата «пересчет намеренных напряжений с учетом коэффициента ЧТФК». Что означает «намеренных»?
 2. В разделе «Основные результаты диссертации» в п. 4 напечатано «...двухконтурного газодинамического двигателя...». Следует писать: «двухконтурного турбореактивного двигателя».
 3. Аналогично в п. 5 этого же раздела автореферата следует писать: «двухконтурного турбореактивного двигателя» вместо «...двухконтурного газотурбинного двигателя...».
 4. На странице 123 диссертации в фразе «После получения удобоваримых результатов одномерных расчетов...» следует писать «...приемлемых результатов...».
- Указанные замечания, не умаляют значимость выполненной соискателем работы.

8. Заключение

Диссертационная работа Пивоваровой Марии Владимировны «Разработка методов анализа и оценки изменения вибронапряжений при изменении геометрии лопаток газотурбинных двигателей в процессе их прочностной доводки и их экспериментальном исследовании» является завершенной научно-квалифицированной работой, в которой на основе проведенных соискателем расчетно-экспериментальных исследований содержится решение задачи по анализу и оценки изменения вибронапряжений при изменении

геометрии лопаток газотурбинных двигателей в процессе их прочностной доводки и их экспериментальном исследовании, подходящей для применения в инженерной практике.

Работа выполнена на высоком научном и техническом уровне с использованием современных средств и методик, а основные выводы обоснованы и подтверждены результатами эксперимента в лабораторных условиях и в рабочих условиях на натурном газотурбинном двигателе.

Диссертация Пивоваровой Марии Владимировны соответствует п.п. 9-11,13,14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям, 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

Диссертационная работа рассмотрена на заседании кафедры авиационных двигателей и энергетических установок, протокол № 33 от 12.05.2025 г.

Заведующий кафедрой
авиационных двигателей,
к.т.н., доцент

Зырянов А.В.

Доктор технических наук,
профессор кафедры
Авиационные двигатели

Бадамшин И.Х.

ФГБОУ ВО «УУНиТ»
450076, Приволжский федеральный округ, Республика Башкортостан,
г. Уфа, ул. Заки Валиди, дом 32

