

На правах рукописи

ПИВОВАРОВА Мария Владимировна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ
ИЗМЕНЕНИЯ ВИБРОНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ
ГЕОМЕТРИИ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
В ПРОЦЕССЕ ИХ ПРОЧНОСТНОЙ ДОВОДКИ И ИХ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ИССЛЕДОВАНИИ**

2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и
энергоустановки летательных аппаратов

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» и в Акционерном обществе «Объединенная двигателестроительная корпорация-Авиадвигатель»

Научный руководитель:

Нихамкин Михаил Шмерович,
доктор технических наук, профессор

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

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

Ведущая организация:

Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Уфимский
университет науки и технологий», г. Уфа

Защита состоится «20» июня 2025 г. в 14-00 на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.05.18 по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29, ауд. 423.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»: <http://pstu.ru>.

Автореферат разослан «__»_____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук

А.В. Бабушкина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. 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 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 газотурбинных двигателей 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 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 вибронапряжений 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. Для регистрации сигналов от тензорезисторов применяется тензометрическая аппаратура и токосъемники, имеющие ограниченное число каналов. Из-за ограниченной емкости токосъемников и низкого ресурса датчиков специальную сборку двигателя приходится повторять. Всё это делает исследование дорогостоящим и длительным. В последние годы проводятся работы, направленные на то, чтобы снизить трудоемкость испытаний по обеспечению усталостной прочности лопаток за счет применения новых методов определения амплитуды колебаний лопаток, применения новых типов датчиков, переноса части испытаний с натурального двигателя на специальные стенды.

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 натурального 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 натурального 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.

Несмотря на достигнутые успехи в развитии теории определения и оценки вибронапряжений (Б.Ф. Шорр, М.Е. Колотников, А.Л. Михайлов, О.В. Репецкий, В.А. Фролов, Р.В. Журавлев, А.Э. Кухтинский, А.А. Дегтярев, Ю.С. Воробьев и др.), многие вопросы остаются нерешенными. 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.

Исходя из вышеперечисленного, актуальность настоящего исследования обусловлена потребностью в развитии подходов к обеспечению усталостной прочности лопаток и, в частности, к разработке схем препарирования, а также в разработке подхода, при котором будет осуществляться снижение объема доводочных испытаний за счет приближенного расчетного прогнозирования изменения вибронапряжений в лопатке при изменении геометрии ее профильной части.

Степень разработанности темы исследования. Описанию основных методов и способов испытаний газотурбинных двигателей и газогенераторов с имитацией условий эксплуатации посвящены работы В.М. Акимова, В.И. Бабкина, Г.М. Горбунова, В.А. Григорьева, А.А. Иноземцева, Б.М. Клинского, Н.Д. Кузнецова, В.Я. Левина, В.Н. Леонтьева, Е.Ю. Марчукова, Ю.И. Павлова, Л.С. Скубачевского, В.А. Скибина, Э.Л. Солохина, А.А. Шишкова и др. Проблемы автоматизации таких испытаний рассмотрены в работах В.Г. Августиновича, Р.И. Адгамова, Д.А. Ахмедзянова, М.М. Берхеева, С.Н. Васильева, Ф.Д. Гольберга, О.С. Гуревича, А.А. Шевякова, Г.П. Шибанова и др. Существенный вклад в создание и развитие испытательных комплексов и установок

внесли коллективы Национального газотурбинного института (Англия), НИЦ ЦИАМ им. П.И. Баранова (Россия), НИЦ им. Льюиса (США), НИЦ им. Ленгли (США), НИЦ им. Арнольда (США), «ОДК-Авиадвигатель» (Россия), «ОДК-Кузнецов» (Россия), «ОДК-Сатурн» (Россия), Университета Штутгарта (Германия) и др.

Цель исследования. Разработка расчетных методов анализа и оценки изменения вибронапряжений при изменении геометрии лопаток в процессе их прочностной доводки.

Задачи исследования, способствующие достижению цели исследования:

1. Разработка расчетного метода оптимального размещения тензорезисторов на деталях (в том числе на лопатках) газотурбинного двигателя.
2. Разработка расчетного метода анализа и оценки изменения уровня вибронапряжений в лопатках газотурбинного двигателя (ГТД) при изменении геометрии лопаток в процессе их прочностной доводки.
3. Верификация и валидация разработанных методов на лопатках двухконтурного газотурбинного двигателя для гражданской авиации.
4. Корректировка алгоритма прочностного проектирования и подготовки испытаний лопаток газотурбинного двигателя с учетом разработанных методов.

Объект исследования – компрессорные и турбинные лопатки низкого и высокого давления.

Предмет исследования представляет собой динамические напряжения в лопатках газотурбинного двигателя.

Научная новизна исследования. При выполнении диссертационной работы получены следующие результаты, обладающие научной новизной:

- разработан новый расчетный метод оптимального размещения тензорезисторов на деталях ГТД (в том числе на лопатках) при экспериментальном исследовании;
- разработан новый расчетный метод оценки изменения уровня вибронапряжений в лопатках ГТД при изменении ее геометрии на этапе проектирования для обеспечения допустимого уровня вибронапряжений;
- 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.

Теоретическая значимость исследования заключается в:

- 1) обобщении и систематизации материалов по теме исследования;
- 2) 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;
- 3) корректировке:
 - алгоритма прочностного проектирования при изменении геометрии лопаток в трехмерной постановке на этапе технического проекта;
 - алгоритма экспериментального исследования на подготовительном этапе.

Практическая значимость исследования заключается в следующем:

1) сокращение временных и финансовых затрат при подготовке и проведении испытаний натурного двигателя, проектировании и прочностной доработке компрессорных и турбинных лопаток;

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

3) разработан алгоритм, позволяющий обеспечить допустимый уровень динамических напряжений на компрессорных и турбинных лопатках и осуществить отстройку от опасных резонансов;

4) разработан алгоритм, 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 и адаптированном для работы с программным продуктом конечно-элементного анализа;

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

6) на основании расчетного метода оптимального расположения тензорезисторов разработана лабораторная работа для студентов ПНИПУ.

Методология и методы исследования основаны на применении теории газотурбинных двигателей, теории механики деформируемого твёрдого тела, в том числе на известных методах расчетного и экспериментального определения собственных форм и частот колебаний и численном моделировании с использованием метода конечных элементов, а также принципов оптимизации.

Основные положения исследования, выносимые на защиту:

1) расчетный метод оптимального размещения тензорезисторов на лопатках ГТД при экспериментальном исследовании;

2) расчетный метод оценки изменения уровня вибронапряжений в лопатках ГТД при изменении ее геометрии для обеспечения допустимого уровня вибронапряжений;

3) результаты верификации и валидации разработанных методов на лопатках двухконтурного газодинамического двигателя для гражданской авиации;

4) корректировка алгоритма прочностного проектирования при изменении геометрии лопаток в трехмерной постановке на этапе технического проекта и алгоритма экспериментального исследования на подготовительном этапе с учетом применения разработанных методов.

Степень достоверности результатов исследования обеспечивается применением фундаментальных физических законов механики деформируемого твердого тела и подтверждается качественной и количественной сходимостью результатов расчета и эксперимента; применением метрологически аттестованного и поверенного измерительного оборудования; применением сертифицированного программного обеспечения.

Апробация результатов исследования проводилась на международных, всероссийских и региональных конференциях и семинарах: Международном научно-техническом форуме двигателестроения (НТКД-2014) (Москва, ЦИАМ, 2014), Всероссийской конференции «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2015» (Пермь, ПНИПУ, 2015), Всероссийской научно-технической конференции «Авиадвигатели XXI века» (Москва, ЦИАМ им. П.И. Баранова, 2015), Всероссийской конференции «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации – 2018» (Пермь, ПНИПУ, 2018), XVIII Международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (г. Екатеринбург, 27–31 мая 2024 г.), ISMAR-2024 (г. Новосибирск, 1–5 июля 2024 г.), Международном научно-техническом форуме двигателестроения (НТКД-2024) (г. Москва, 23–25 октября 2024 г.)

Результаты диссертационной работы реализованы на предприятии АО «ОДК-Авиадвигатель», также результаты исследования включены в содержание дисциплины «Ресурсное проектирование и надежность авиационных двигателей» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Публикации. Основные положения исследования опубликованы в 17 работах. В их числе две – в научном издании, индексируемом в международной базе цитирования Scopus, три – в научных изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий. Остальные двенадцать работ опубликованы в материалах конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация включает в себя введение, четыре главы, заключение, список литературы, а также приложения. При этом диссертация содержит 143 страницы, 30 рисунков и 12 таблиц, список литературы включает 125 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определены объект и предмет исследования, сформулированы цель, задачи, методы, научная новизна, а также показана практическая значимость исследования.

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.

Основные способы снижения динамических напряжений:

1. Частотная отстройка от резонансных режимов: изменение собственных частот за счет изменения геометрии лопатки, изменение гармоник нагрузки (изменение числа затеняющих элементов).
2. Воздействие на источник возбуждения: изменение зазоров, улучшение аэродинамики, изменение конструкции лопаточного аппарата статора (наклон лопаток, разношаговость).

3. Демпфирование колебаний: демпферы, зазоры в замках, конструкционное демпфирование, композитные материалы.

4. Увеличение предела выносливости: выбор материала, поверхностное упрочнение, выбор режима термической и механической обработки, жесткий контроль характеристик конструкционной прочности.

Снижение динамических напряжений в лопатках возможно различными способами, однако наиболее распространенный – изменение геометрии лопатки (Б.Ф. Шорр, М.Е. Колотников, А.Л. Михайлов, О.В. Репецкий, В.А. Фролов, Р.В. Журавлев, А.Э. Кухтинский, А.А. Дегтярев, Ю.С. Воробьев и др.). Рассматриваются различные подходы по изменению геометрии лопаток: использование программных пакетов многокритериальной оптимизации (А.В. Семенова, Р. Lampart, S. Yershov, А.В. Сальников, Т.В. Буюкли, Г.М. Попов, Е.С. Горячкин) или применение проверенных мероприятий по доработке геометрии (например, профиль Шварова). Однако определить величину действующих динамических напряжений в лопатке с измененной геометрией возможно только в повторном натурном испытании в составе двигателя, так как испытание натурального двигателя на стенде наиболее точно воспроизводит работу двигателя по полетному циклу. На испытаниях отдельно газогенератора с имитацией входного устройства и турбины не удастся воссоздать реальные нагрузки (газодинамические, тепловые, центробежные), действующие на лопатки, в связи с чем невозможно определить точное значение динамических напряжений на лопатках, но возможно определить резонансные режимы в диапазоне частоты вращения ротора газогенератора (как правило, частота вращения ротора не доходит до наиболее нагруженных режимов: крейсерский, взлетный, максимальный полетный).

Тензометрирование является основным методом определения динамических напряжений на лопатках. В настоящее время проведено множество исследований (Jarkko Tikka, Risto Hedman, Aslak Siljander, Л.В. Москаленко) по подготовке испытаний деталей различных двигателей, особенно много работ по подготовке лопаток ГТД к их тензометрированию. Из основных проблем 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. В связи с чем работы в области расчетного определения мест размещения тензорезисторов с целью определения динамических напряжений с высокой точностью (P. Teufel and J. Poland) имеют большую значимость в подготовке экспериментальных исследований лопаток. В работах В.М. Бондаренко, О.В. Репецкого, Б.П. Скорика, Б.Е. Васильева, О.Г. Вассерберга, А.В. Семеновой, Р. Lampart, S. Yershov представлено математическое моделирование нескольких подходов управления величиной динамических напряжений путем изменения того или иного геометрического параметра лопатки. Однако в этих исследованиях нет четкого критерия оценки динамических напряжений и отсутствует экспериментальное подтверждение эффективности каждого из подходов.

В настоящее время не существует расчетного метода подтверждения эффективности изменения геометрии лопаток с целью снижения динамических напряжений, в связи с чем эффективность таких изменений геометрии проверяется на натурных испытаниях двигателя. Каждое такое экспериментальное исследование натурального двигателя требует привлечения больших временных и финансовых затрат. В связи с этим актуально разработать расчетный метод оценки изменения уровня вибронапряжений в лопатке при изменении ее геометрии на этапе проектирования.

По результатам анализа литературных источников определены основные задачи исследования.

Во второй главе представлен разработанный автором расчетный метод оптимального размещения тензорезисторов при подготовке перед испытаниями по определению динамических напряжений.

При разработке метода оптимального размещения тензорезисторов были введены новые понятия:

- коэффициент чувствительности тензорезистора к формам колебаний (ЧТФК) – это отношение величины главных деформаций по тензорезистору к максимальному значению главных деформаций в профильной части лопатки при той же форме колебаний:

$$K_{ij} = \frac{\varepsilon_{s_1 s_1}}{\varepsilon_{\max}}, \quad (1)$$

где K_{ij} – коэффициент чувствительности тензорезистора i к собственной форме колебаний j (осредненный по узлам КЭ-сетки на поверхности лопатки, Рисунок 1), $\varepsilon_{s_1 s_1}$ – осредненная по площади рабочей части тензорезистора относительная деформация в точке установки датчика i в направлении вектора $\bar{s}_1$, который совпадает с осью тензорезистора, $\varepsilon_{\max}$ – максимальное значение первой главной деформации на поверхности профильной части лопатки;

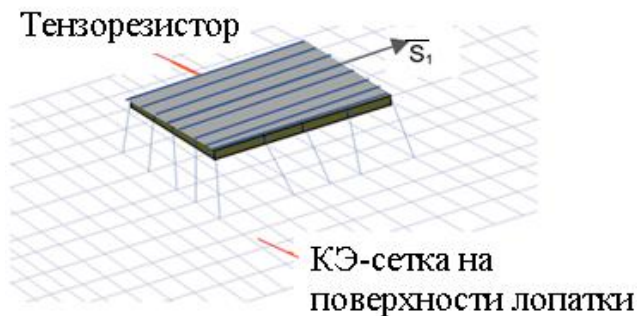


Рисунок 1 – Схема осреднения коэффициента ЧТФК по поверхности лопатки

- коэффициент «покрытия» форм колебаний k_{cov} – отношение количества собственных форм колебаний с коэффициентом ЧТФК $\geq 0,5$ к общему их количеству в заданном диапазоне частот по результатам расчета.

Разработанный метод основан на анализе вынужденных колебаний лопатки под действием переменных

газодинамических сил. Сначала определяются собственные частоты и формы колебаний лопатки. Свободные колебания в методе конечных элементов описываются однородной системой уравнений:

$$[M]\{\ddot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = 0, \quad (2)$$

где $\{\delta\}$ – вектор узловых перемещений, $[K]$ – матрица жесткости, $[M]$ – матрица масс. Система (2) имеет нетривиальное решение при значениях ω_i , обращающих в ноль определитель

$$\det|[K] - \omega^2[M]| = 0. \quad (3)$$

Значения ω_i являются собственными частотами колебаний, а соответствующие им векторы $\{\delta_0\}_i$ характеризуют собственные формы колебаний лопатки. Для собственных форм вводится масштаб так, чтобы выполнялось соотношение:

$$\{\delta_0\}_i^T [M] \{\delta_0\}_i = I, \quad (4)$$

где индекс T обозначает транспонирование, I – единичная матрица.

Вынужденные колебания лопатки возникают вследствие воздействия на лопатку внешних сил (главным образом, газодинамических), которые являются квазипериодическими и, как правило, кратны частоте вращения ротора. Чтобы определить потенциально возможные резонансные режимы колебаний лопатки, используется диаграмма Кембелла (Рисунок 2). Резонансные колебания имеют место при тех частотах вращения ротора n , при которых одна из собственных частот колебаний лопатки $f_i = \omega_i/2\pi$ совпадает с частотой одной из гармонических составляющих периодических внешних сил: $f_i = kn$ (где k – номер гармоники к частоте вращения).

Определенным таким образом собственным частотам ω_i , реализующимся на резонансных режимах, соответствуют собственные формы колебаний $\{\delta_0\}_i$. Известные соотношения метода конечных элементов позволяют по условным перемещениям узлов i -й собственной формы колебаний $\{\delta_0\}_i$ определить соответствующие им поля деформаций и напряжений:

$$\{\varepsilon\} = [B]\{\delta_0\}; \{\sigma\} = [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}) + \{\sigma_0\}, \quad (5)$$

где $[B]$ – матрица дифференцирования, $[D]$ – матрица упругости, $\{\varepsilon_0\}$ – начальные деформации, $\{\sigma_0\}$ – остаточные напряжения.

Расчет вибрационных характеристик проводится на основных режимах работы двигателя с соответствующими тепловыми и центробежными нагрузками.

Задача оптимального размещения тензорезисторов (определения координат X_i точек их установки) при подготовке испытаний ставится следующим образом: тензорезисторы должны располагаться на поверхности лопатки так, чтобы коэффициенты ЧТФК принимали максимальное значение по всем формам колебаний, что позволит обеспечить снижение погрешностей оценки динамических напряжений в лопатке. Накладываются следующие ограничения на количество тензорезисторов и координаты точек их размещения. Количество датчиков n , устанавливаемых на одной лопатке, ограничено возможностями тензометрической аппаратуры и токосъемников. Область F установки тензорезисторов на поверхности лопаток ограничена технологией монтажа датчиков (подложка, место под вывод проводов). В соответствии с нормативными документами значения коэффициентов ЧТФК используемых датчиков должны быть не ниже $K^* = 0,5$. Математическая формулировка задачи записывается следующим образом:

$$I = \frac{1}{n \cdot m} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m K_{ij} \rightarrow \max, \quad (6)$$

$$K_{ij} \geq K^*, \quad (7)$$

$$X_i \in F, \quad (8)$$

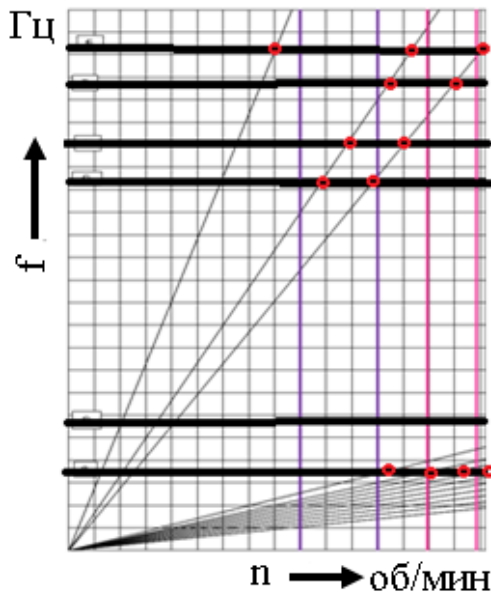


Рисунок 2 – Диаграмма
Кембелла

где n – количество тензорезисторов, m – количество собственных форм колебаний, которые могут реализоваться в качестве резонансных на возможных режимах работы двигателя, F – поверхность лопатки, пригодная для расположения тензорезисторов с учетом их размеров с подложкой и токоподводами, X_i – координаты места расположения тензорезистора, K^* – минимальное значение коэффициента ЧТФК, допускаемое из соображений точности измерения динамических напряжений.

Решение задачи оптимизации (6)–(8) реализовано в комплексе программ, написанных на языке Visual Fortran 6.0 и адаптированных для работы с программным продук-

том конечно-элементного анализа. Они реализуют метод прямого перебора узлов КЭ-сетки на поверхности профильной части лопатки.

Отработка метода оптимального расположения тензорезисторов выполнена на примере разработки схемы препарирования пяти компрессорных лопаток с замковым соединением «ласточкин хвост» двухконтурного газотурбинного двигателя для пассажирского самолета, которая должна регистрировать все опасные резонансы по формам колебаний в основном диапазоне работы двигателя. Был проведен модальный анализ, получены формы колебаний, осуществлен анализ резонансной диаграммы. Разработана схема препарирования с использованием предложенного метода, которая позволила обеспечить значения коэффициента $k_{cov} = 91\%$ даже с дублированием в рабочем диапазоне (Рисунок 3). Традиционная схема препарирования обеспечивала $k_{cov} = 46\%$.

Подобная задача была решена для лопатки турбины высокого давления из монокристаллического сплава с анизотропными свойствами и рабочей лопатки вентилятора из композиционного материала газотурбинного двигателя.

Проведена 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. Объектом исследования была пустотелая рабочая лопатка вентилятора двухконтурного газотурбинного двигателя для гражданского самолета. В экспериментальном исследовании и по результатам расчета определены собственные частоты и распределения эпюр вибронапряжений по профилю лопатки. Для каждого тензорезистора определены коэффициенты ЧТФК и построены эпюры изменения коэффициента ЧТФК по перу лопатки. Отклонение расчетных и экспериментальных собственных частот по второй крутильной форме составило $6,8\%$.

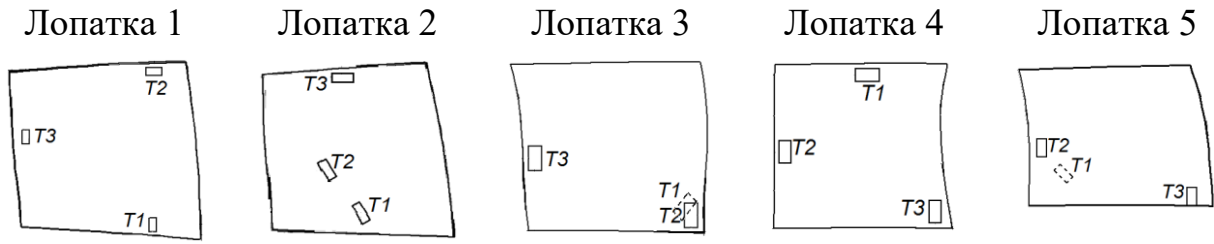


Рисунок 3 – Разработанная схема препарирования рабочих лопаток КВД с замковым соединением «ласточкин хвост»

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):

$$E_{\sigma} = \frac{S_{\max_p2}}{S_{\max_p1}} \cdot \sqrt{\frac{U_{p1}}{U_{p2}}}, \quad (9)$$

где $S_{\max_p1}$, $S_{\max_p2}$ – максимальные расчетные динамические напряжения в лопатках исходной и измененной геометрии; U_{p1} , U_{p2} – потенциальная энергия в лопатках исходной и измененной геометрии по расчету.

Разработанный метод основан на анализе и сопоставлении действующих напряжений при вынужденных колебаниях в лопатках под действием переменных газодинамических сил.

В матричной виде $\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\}$, где $\{\varepsilon\} = [B]\{\delta\}$, тогда суммарная потенциальная энергия лопатки:

$$U = \frac{1}{2} \int \{\sigma\} \cdot \frac{1}{E} \cdot \{\sigma\} dV = \frac{1}{2E} \int \{\sigma\}^2 dV. \quad (10)$$

При проектировании исходной лопатки по расчету модального анализа определены максимальные динамические напряжения ($S_{\max_p1}$) и суммарная потенциальная энергия (U_{p1}). В результате экспериментального исследования этой же исходной лопатки была получена максимальная амплитуда динамических напряжений ($S_{\max_э1}$), при этом лопатка в испытаниях обладает какой-то потенциальной энергией ($U_{э1}$). Тогда, используя (10), можно получить следующее соотношение:

$$U_{э1} = U_{p1} \cdot \left(\frac{S_{\max_э1}}{S_{\max_p1}} \right)^2. \quad (11)$$

Одним из критериев оценки при проектировании лопатки является соответствие максимальных динамических напряжений допустимым значениям ($[K_{\sigma}]$). Зачастую при сопоставлении динамических напряжений, измеренных в ходе натурных испытаний, с допустимыми значениями $[K_{\sigma}]$ фиксируется значительное превышение первых. Вследствие чего возникает необходимость в геометрической доработке лопатки с незначительным изменением ее профильной части на этапе проектирования. Исходя из вышесказанного, для измененной геометрии лопатки также можно записать (11) в следующем виде:

$$U_{э2} = U_{p2} \cdot \left(\frac{S_{\max_э2}}{S_{\max_p2}} \right)^2 \text{ [Дж]}. \quad (12)$$

Оценить изменение реально действующих напряжений на измененную конструкцию профильной части лопатки возможно расчетным путем, но принимая несколько допущений. Во-первых, при изменении профильной части геометрии лопатки вносятся малые изменения. Во-вторых, эти малые изменения профильной части не влияют на газовую динамику и на демпфирование, т.е. измененная лопатка при работе в составе двигателя воспринимает такой же аэродинамический поток и демпфирование, как и исходная лопатка. В-третьих, эти малые изменения не влияют на изменение собственных форм колебаний.

Исходя из этих предположений, вытекает, что подводится примерно одинаковая энергия из потока к обоим лопаткам. Если принять эту энергию за постоянную величину в расчете и испытаниях для исходной лопатки, то можно масштабировать энергию деформации по суммарной потенциальной энергии.

Считаем, что суммарная потенциальная энергия деформации будет очень близкой для исходной и измененной лопаток (так как вносим малые изменения в конструкцию), поэтому мы можем сравнивать их по напряжениям, т.е. предположим, что $U_{э2} = U_{э1}$. Таким образом, измененная лопатка в целом деформируется так же, как и исходная.

Из (11) и (12), учитывая $U_{э2} = U_{э1}$, получим соотношение для расчетного прогнозирования действующих напряжений в измененной геометрии профильной части лопатки:

$$S_{\max_э2} = S_{\max_э1} \cdot \left(\frac{S_{\max_p2}}{S_{\max_p1}} \cdot \sqrt{\frac{U_{p1}}{U_{p2}}} \right), \quad (13)$$

где $E_{\sigma} = \frac{S_{\max_p2}}{S_{\max_p1}} \cdot \sqrt{\frac{U_{p1}}{U_{p2}}}$ – коэффициент изменения максимальных динамических напряжений в лопатке при изменении ее профильной части геометрии в процессе проектирования (прочностной доводки).

Таким образом, для реализации метода проводятся расчеты собственных частот и форм колебаний исходного и измененного вариантов геометрии, в результате которых определяются распределения динамических напряжений (зоны концентрации напряжений) и узловые линии. Одним из критериев проектирования равномерно нагруженной лопатки является характер расположения узловых линий по лопатке: для первой крутильной – расположение узловых линий вдоль оси лопатки, для изгибных форм колебания – расположение узловых линий параллельно полке лопатки. Выполняется оценка изменения динамических напряжений при изменении геометрии.

Расчетный метод позволяет перебрать множество вариантов геометрии, также существует возможность воспользоваться многопараметрической оптимизацией, при которой не надо проверять эффективность каждого варианта испытаниями. Еще одним достоинством представленного метода является то,

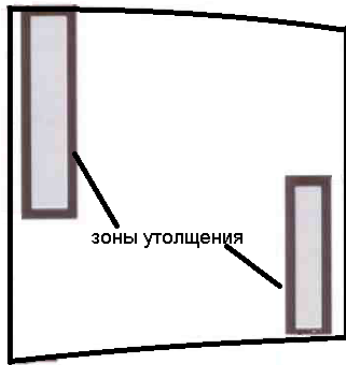


Рисунок 4 – Изменение геометрии компрессорной лопатки

что метод не требует проведения ресурсозатратных нестационарных расчетов для определения действующих напряжений.

Реализация метода оценки изменения уровня динамических напряжений выполнена на примере доработки компрессорной лопатки в рамках доводки двухконтурного двигателя для пассажирского самолета. Результаты испытаний измененной геометрии лопатки использованы при валидации метода.

В ходе испытаний компрессорной лопатки в составе натурального двухконтурного двигателя получены высокие действующие динамические напряжения (пересчет намеренных напряжений с учетом коэффициента ЧТФК) на опасных резонансах в основном диапазоне работы двигателя, а также получены недостающие коэффициенты запаса по динамической прочности. Для снижения динамических напряжений выполнено изменение геометрии лопатки (Рисунок 4).

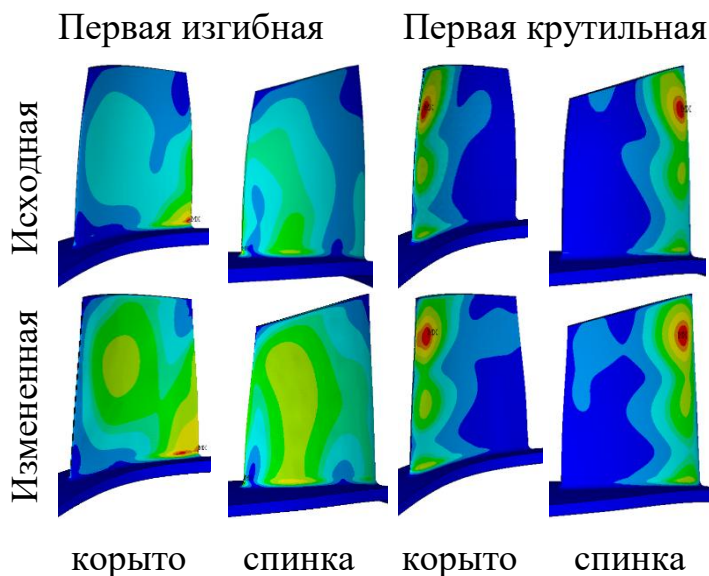


Рисунок 5 – Распределения динамических напряжений в исходной и измененной лопатках

Определены распределения условных динамических напряжений (Рисунок 5).

Прогноз изменения динамических напряжений в лопатке измененной геометрии показал снижение по первой изгибной форме колебаний на 31 %, по первой крутильной форме колебаний на 47 %. Отклонение расчетных и экспериментальных собственных частот по первой изгибной форме колебаний составило 5 %. При испытаниях лопатки измененной геометрии в составе натурального двигателя снижение динамических напряжений по первой изгибной

форме колебаний составило 43 %. Резонанс по первой крутильной форме колебаний в лопатке измененной геометрии не проявился.

Ранее доработка лопаток без расчетной оценки изменения динамических напряжений проводилась по традиционной схеме, при многократном проведении испытаний лопаток измененной геометрии в составе натурального двигателя для подтверждения эффективности доработки (Рисунок 6).

Применение разработанного метода оценки изменения динамических напряжений позволяет проектировать лопатку еще на стадии первоначального проектирования, когда прогнозируется проявление опасных резонансов в

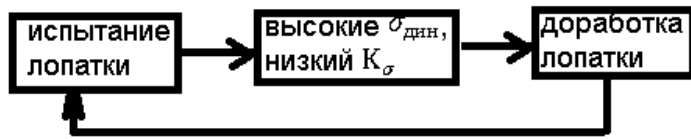


Рисунок 6 – Традиционная схема доработки лопаток

основном диапазоне работы двигателя и возникает необходимость в снижении динамических напряжений на них. При этом пропадает необходимость в доработке лопаток, следовательно, и в проведении проверочных испытаний, что приводит к экономии финансовых и временных затрат. Алгоритм проектирования лопаток с применением метода оценки изменения уровня вибронапряжений в лопатках ГТД при изменении профильной части геометрии лопаток представлен в виде блок-схемы на Рисунке 7.

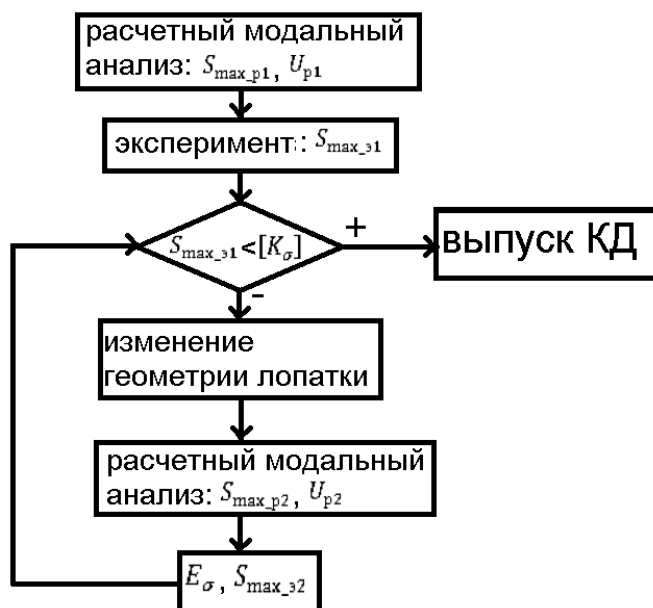


Рисунок 7 – Алгоритм проектирования лопаток с применением метода оценки изменения вибронапряжений в лопатках при изменении ее геометрии

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 (см. Рисунок 7).

На этапе подготовительных работ перед экспериментальным исследованием предварительно проводится расчетное определение оптимального расположения тензорезисторов на поверхности

детали с использованием разработанного метода.

Корректировка алгоритма прочностного проектирования лопаток при изменении их геометрии заключается в применении метода оценки изменения уровня вибронапряжений на этапе разработки профиля лопатки с целью изначальной отстройки от опасных резонансов с высокими динамическими напряжениями и на этапе доводки с целью снижения динамических напряжений, превышающих допустимый уровень.

В заключении обобщены основные результаты работы.

В приложениях А и Б приложены сканы Актов внедрения результатов диссертации на АО «ОДК-Авиадвигатель» и Акт внедрения результатов диссертационной работы в образовательный процесс ФГАОУ ВО «ПНИПУ».

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработан расчетный метод оптимального размещения тензорезисторов на деталях газотурбинного двигателя. Выполнена валидация и верификация разработанного метода. Метод реализован при разработке схем препарирования компрессорных и турбинных лопаток ГТД.
2. Разработан метод оценки изменения уровня вибронапряжений в лопатках ГТД при изменении геометрии лопаток в процессе их прочностной доводки. Выполнена валидация разработанного методов. Метод применен при проектировании компрессорных и турбинных лопаток ГТД высокого и низкого давления.
3. Скорректирован алгоритм прочностного проектирования и подготовки испытаний лопаток двухконтурного газодинамического двигателя для пассажирских самолетов с учетом разработанных методов.
4. Материалы диссертационной работы оформлены М.В. Пивоваровой в виде Руководящего технического материала (РТМ08.124), внедренного в производственный процесс на АО «ОДК-Авиадвигатель».
5. Применение разработанных методов в проектировании лопаток и при подготовке к испытаниям лопаток двухконтурного газотурбинного двигателя позволяет существенно снизить технические, временные и финансовые затраты.
6. Результаты диссертационной работы подтверждены Актом внедрения результатов диссертации в АО «ОДК-Авиадвигатель» и Актом внедрения результатов диссертации в образовательный процесс ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, или приравненных к ним:

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 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)

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)

Прочие публикации:

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, 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 препариования 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 препариования 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 2024г. – Москва, 2024. – С. 78–80.

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии издательства
Пермского национального исследовательского политехнического университета.
614990, г. Пермь, Комсомольский пр. 29, к. 113. Тел.: +7 (342) 219-80-33