

На правах рукописи



ЧЕРНЯЕВ АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ
ОТКАЗОВ ПРИ ОЦЕНКЕ НАДЕЖНОСТИ И ПРОГНОЗИРОВАНИИ
ДОЛГОВЕЧНОСТИ РАБОЧИХ ЛОПАТОК АВИАЦИОННОГО
ДВИГАТЕЛЯ**

**Специальность 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и
энергоустановки летательных аппаратов**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Казань – 2016

Работа выполнена на кафедре «Безопасность жизнедеятельности» ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Трефилов Виктор Александрович

Официальные оппоненты: **Шепель Вячеслав Тимофеевич**
доктор технических наук, профессор,
ПАО «Научно-производственное объединение «САТУРН», г. Рыбинск,
ведущий специалист службы
«Сертификация и летная годность».

Макаева Розалия Хабибулловна
доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Казанский национальный
исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева-КАИ»,
профессор кафедры «Техническая физика»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Самарский государственный
аэрокосмический университет имени
академика С.П. Королева (национальный
исследовательский университет)»

Защита состоится «21» сентября 2016 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.079.02 при ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» по адресу: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» и на сайте <http://www.kai.ru/science/disser/index.phtml>.

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.079.02
кандидат технических наук, доцент



А.Г. Каримова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Как известно одними из наиболее механически нагруженных частей авиационного двигателя являются лопатки, используемые в составе компрессоров и турбины, зачастую именно они определяют эксплуатационный ресурс и межремонтный период всей конструкции. В современных условиях при разработке, проектировании, создании, модернизации и обслуживании авиационных двигателей для оценки надежности используются статистические методики расчета. Для определения показателя надежности производится сбор информации об отказных состояниях системы, после чего она структурируется и на основе интенсивностей отказов определяется показатель надежности. Соответственно оценка надежности отдельных механизмов и деталей также производится с использованием полученной ранее статистики, это касается абсолютно всех механизмов, в том числе и компрессорных и турбинных лопаток.

Безусловно, использование статистических методик позволяет с некоторой точностью оценивать надежность уже использующихся конструкций авиационных двигателей, однако для вновь разрабатываемых двигателей, для которых отсутствует эксплуатационная наработка, такая оценка будет не достоверной. В случаях создания, доработки и модернизации авиационных двигателей применяется оценка надежности с помощью аналогов, уже используемых на предыдущих версиях конструкции, однако, полученные таким образом статистические данные относятся к различным генеральным совокупностям, строго говоря, не могут использоваться для расчетов, вследствие изменения внутренней структуры материалов элементов, режимов их работы, характера нагружения и недостаточной экспериментальной наработки.

Более того, при статистической оценке надежности конструктором задаются запасы прочности, то есть возможное отказное состояние системы определяется исходя из соображений одного или группы экспертов, внося возможную ошибку вследствие наличия человеческого фактора.

Также, при использовании статистических методик расчета надежности во многих случаях невозможно объяснить причины отказов, особенно в начальный период эксплуатации. Очевидно, что в этих случаях всё же необходимо принимать во внимание физические процессы, протекающие в материале элементов.

Авиационный двигатель состоит из нескольких ступеней компрессорных и турбинных лопаток, которые отличаются друг от друга по размеру, сечению, материалу, наличию или отсутствию охлаждающих каналов, а, следовательно, и по воспринимаемым нагрузкам, но в случае использования статистических методик при определении надежности, нижним уровнем является отказ всех рабочих или направляющих лопаток одного из компрессоров или турбины. В соответствии с теорией вероятности, использование интенсивностей отказов возможно только в случае однородности выборки, этот факт демонстрирует

ошибку при использовании интенсивностей отказов при оценке надежности компрессорных и турбинных лопаток.

Таким образом, для более точной оценки надежности авиационных двигателей необходима разработка методики, которая бы позволяла, основываясь на физических факторах, прогнозировать вероятность отказа и долговечность отдельных компрессорных и турбинных лопаток.

Цель работы. Целью диссертационной работы является повышение достоверности оценки надежности авиационных двигателей путем использования структурно-энергетической теории для определения вероятностей отказа рабочих лопаток.

Были сформулированы следующие **основные задачи** исследования:

1. Определение теоретической составляющей оценки надежности на основе структурно-энергетической теории отказов;
2. Разработка алгоритма расчета надежности и прогнозирования долговечности компрессорных и турбинных рабочих лопаток;
3. Выполнение исследований внутренних дефектов компрессорных и турбинных лопаток двигателей летательных аппаратов с использованием промышленной компьютерной томографии и их влияния на разрушение;
4. Проведение разрушающих испытаний исследуемых лопаток для определения и сравнения практических значений их наработки до отказа;
5. Разработка методики оценки надежности двигателей летательных аппаратов, выполняемой на основе содержания и развития в них внутренних дефектов и создание компьютерной программы для расчета.

Научная новизна. Применение структурно-энергетической теории отказов на практике производилось исключительно для плоских образцов толщинами 0,1-0,5 мм. Для оценки надежности объемных элементов, исходя из информации о внутренней структуре их материалов, а именно рабочих лопаток авиационного двигателя, структурно-энергетическая теория отказов использовалась впервые.

Практическая ценность. Практическая ценность работы заключается в разработке и реализации на ПЭВМ алгоритмов расчета показателя надежности авиационного двигателя при определении вероятности отказа рабочих компрессорных и турбинных лопаток, основываясь на физических характеристиках материала, и прогнозирования долговечности элементов при заданных механических нагрузках.

Методология и методы исследования. Объектом исследования являются рабочие лопатки турбины 1, 2 и 3 ступеней, а также новые и ремонтные рабочие лопатки 5 ступени компрессора высокого давления.

Для выявления внутренних отклонений был проведен неразрушающий контроль с помощью промышленной компьютерной томографии. Разрушающие усталостные испытания лопаток, для определения необходимой энергии разрушения проводились на вибрационных стендах по первой изгибной форме колебаний, при комнатной температуре ($\sim 20^{\circ}\text{C}$). Перед

испытаниями лопатки препарировались тензорезисторами, по которым задавался и контролировался уровень переменных напряжений.

Для оценки надежности и прогнозирования долговечности лопаток использовалась структурно-энергетическая теория отказов, а определение показателей надежности всех остальных систем и механизмов авиационного двигателя с помощью построения дерева неисправностей.

Положения и выводы, выносимые на защиту.

1. С помощью статистических методик оценки невозможно достоверно оценить надежность доработанного, модернизируемого и вновь разрабатываемого авиационного двигателя. Оценку надежности необходимо проводить, основываясь на внутреннем состоянии материалов элементов. Для расчета вероятности отказа и прогнозирования долговечности на основании содержащихся внутренних отклонений в рабочих лопатках авиационного двигателя подходит структурно-энергетическая теория отказов.

2. Результаты экспериментальных исследования внутренних отклонений турбинных и компрессорных лопаток авиационного двигателя показали наличие внутренних дефектов в рабочих турбинных лопатках и наличие внутренних повреждений в рабочих лопатках компрессора высокого давления.

3. При оценке надежности с помощью структурно-энергетической теории отказов, основанной на наличии в материале элементов внутренних повреждений, происходит увеличение вероятности отказа по сравнению со статистическими методами. Так как рабочие компрессорные и турбинные лопатки находятся на нижних уровнях дерева неисправностей использование вероятностей отказа рассчитанных с помощью структурно-энергетической теории, вместо надежности определенной по интенсивностям отказов, также оказывает влияние на показатели надежности ряда подсистем и всей конструкции авиационного двигателя.

4. Используя структурно-энергетическую теорию, становится возможным определение долговечности рабочих лопаток авиационного двигателя. С помощью созданной компьютерной программы возможна оценка надежности различных авиационных двигателей, с учетом наличия внутренних повреждений в рабочих компрессорных и турбинных лопатках.

Достоверность результатов. Подтверждается использованием аттестованных приборов и экспериментальных установок; использованием апробированных экспериментальных методов; использованием современных компьютерных аппаратных и программных средств для сбора и обработки экспериментальных данных; удовлетворительным согласованием расчетных и экспериментальных данных.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы были представлены на Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 70-летию основания кафедры ракетных двигателей Казанского авиационного института (КАИ) «Ракетные двигатели и энергетические

установки» (Казань, 2015), VIII Всероссийском форуме студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и инновации в технических университетах» (Санкт-Петербург, 2014), II Международной научно-технической конференции «Проблемы обеспечения безопасности в промышленности, строительстве, на транспорте и в нефтегазовом деле. Анализ рисков» (Пермь, 2013), II Международной научно-практической конференции «Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований» (Москва, 2013), II Международной научной конференции «Инновационные процессы в исследовательской и образовательной деятельности» (Пермь, 2013).

Личный вклад автора заключается в разработке алгоритма определения показателя надежности рабочих лопаток газотурбинного двигателя с помощью структурно-энергетической теории отказов, непосредственном участии в проведении экспериментов, выполнении расчетов и анализе их результатов, а также разработке и составлении компьютерной программы, которая позволяет рассчитывать надежность авиационного двигателя с использованием информации о внутренних дефектах в материале рабочих лопаток.

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 12 печатных работ, включая 2 статьи в центральных российских изданиях рекомендованных ВАК РФ по специальности 05.07.05, 3 статьи в прочих журналах из перечня ВАК РФ, 4 тезисов и материалов докладов на Международных и Всероссийских конференциях.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка использованной литературы из 113 наименований и двух приложений. Объем диссертации составляет 144 страницы. В работе содержится 38 рисунков и 18 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту. Дана краткая аннотация всех разделов диссертации.

В первой главе представлены общетеоретические сведения о надежности и возникновении отказов элементов и критический анализ используемых в настоящее время методов оценки надежности, которые также применяются при разработке, проектировании, создании и эксплуатации авиационных двигателей.

На сегодняшний день Международной организацией гражданской авиации ИКАО (International Civil Aviation Organization, ICAO), принято руководство ARP 4761 «Методы оценки безопасности систем и бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации», которое определяет методы проведения оценки безопасности при сертификации гражданских летательных аппаратов. В состав этих методов включены анализ дерева

неисправности, анализ логической схемы, анализ видов и последствий отказов, сводка анализа видов и последствий отказов, а также анализ общих причин, состоящий из анализа зонной безопасности, анализа специфического риска и анализа общего режима.

Согласно ARP 4761 оценка функциональной опасности проводится вначале цикла разработки системы, для классификации и определения отказных состояний, которые связаны с функциями конструкции и их комбинациями. После полного распределения функций двигателя между системами, каждая из этих систем должна быть дополнительно рассмотрена с применением оценки функциональной опасности, вплоть до единичных отказов. Полученные результаты используются в дальнейшем для предварительной оценки безопасности системы.

Предварительная оценка безопасности системы является проверкой предполагаемой конструкции, для определения того, как отказы системы могут приводить к функциональным опасностям. Задачей предварительной оценки является установление требований по безопасности системы и подтверждение того, что при реализации предполагаемой конструкции следует ожидать выполнение целей безопасности, определенных при функциональной оценке. Более того, с помощью предварительной оценки определяются стратегии защиты, учитываются концепции отказобезопасности и конструктивные решения, которые могут потребоваться для соответствия целям и обеспечения безопасности.

Предварительная оценка безопасности проводится на всех этапах разработки системы, в этой связи в качестве инструмента для ее выполнения чаще всего используются такие статистические методики как анализ дерева неисправностей, Марковский анализ или анализ логических цепей.

После завершения предварительной оценки проводится оценка безопасности всей системы, которая является упорядоченной, подробной оценкой реализованной системы для демонстрации того, что цели безопасности, определенные при оценке функциональной опасности и производственные требования, определенные при предварительной оценке, удовлетворяются.

Вся остальная оценка надежности производится в процессе эксплуатации, с помощью различных систем диагностирования.

Из вышеизложенного можно сделать вывод о высокой важности проведения точной предварительной оценки, так как с ее помощью задаются требования надежности ко всей системе. Однако точность такой оценки ставится под сомнение в связи с тем, что параметры надежности обычно задаются экспертом, исходя из испытаний образцов аналогов, использование которых, в соответствии с теорией вероятности, в представленных условиях является недопустимым. Более того, отсутствие возможности достоверной проверки и объяснения причин отказа на нижних уровнях дерева неисправностей, кроме как, при дальнейшем эксплуатационном сборе

информации увеличивает риск незапланированного разрушения отдельных узлов или всей системы авиационного двигателя.

Для объяснения причин отказов, в качестве физического параметра, приводящего, в конечном счете, к отказу элемента следует рассматривать виды внутренних дефектов материала, характерные для производства авиационных двигателей.

Во второй главе содержится описание теоретического расчета надежности с помощью структурно-энергетической теории отказов, включая расчет долговечности элементов, основываясь на информации о содержании в их материале внутренних дефектов.

Применение структурно-энергетической теории отказов к оценке надежности элементов объясняется следующим. Известно, что твердые тела, находящиеся под воздействием внешних или внутренних источников энергии способны к ее накоплению до определенного критического значения. В некоторый момент времени, когда твердое тело больше не может поглощать энергию, наступают условия, при которых закон ее накопления перестает соблюдаться, этот момент является отказом элемента. Этот факт позволяет сопоставить вероятность отказа, в качестве показателя надежности элемента, с количеством подводимой энергии и получить зависимость $q = f(E)$. В свою очередь, атомы, молекулы и ионы являются структурными единицами материала, то есть физико-химические превращения в элементе, такие как разрушение, восстановление или образование новых связей происходят на атомно-молекулярном уровне. На микроскопическом уровне процессы, приводящие к отказу элемента носят дискретный характер и, учитывая тот факт, что степени свободы атомных частиц в твердом теле носят упорядоченный характер, исходя из положений статистической физики процессы, происходящие в твердом теле могут быть описаны введением в рассмотрение квазичастиц, которые движутся в занимаемом телом объеме в определенном направлении с определенной энергией. Таким образом, процесс возникновения отказа рассматривается как процесс прохождения активных квазичастиц через некоторый потенциальный барьер, в результате которого, затрачивая некоторую энергию для преодоления сил структурного взаимодействия, квазичастицы выбывают из процесса, приводя к отказу элемента.

Другими словами, чувствительные микрообъемы оказывают каталитическое воздействие на процесс возникновения отказа, то есть для наступления отказа элемента необходимо поглощение ими критического значения квазичастиц n или возникновение n элементарных повреждений.

Значение вероятности отказа элемента $q(E)$ является обратной величиной вероятности безотказной работы $P(E)$ и при использовании структурно-энергетической теории отказов рассчитывается следующим образом:

$$q(E) = 1 - P(E) = 1 - \exp(-\alpha E) \cdot \left[\sum_{i=0}^{n-1} \frac{(\alpha E)^i}{i!} \right]. \quad (1)$$

где α – коэффициент перехода из одного состояния в другое;

n – число элементарных повреждений необходимых для наступления отказа элемента.

Для определения параметров модели n и α используется информация, полученная в ходе экспериментальных испытаний:

$$n = \frac{\bar{E}^2}{\sigma_E^2}; \quad \alpha = \frac{n}{\bar{E}} = \frac{\bar{E}}{\sigma_E^2}. \quad (2)$$

где \bar{E} – среднее значение энергии разрушения элементов, Дж•ч/мм³;
 σ_E^2 – дисперсия энергии разрушения, Дж•ч/мм³.

При расчете параметр n может оказаться дробным, однако для оценки надежности его необходимо округлить в большую сторону до ближайшего целого числа, так как полученное значение является нижней границей, при которой возможен отказ.

Таким образом, используя уравнение (2) для определения параметров n и α , становится возможным рассчитать надежность элементов на основе данных, полученных в ходе экспериментальных испытаний, с заданным энергетическим воздействием.

Зависимости среднего значения \bar{E} и среднего отклонения σ_E энергии возникновения отказа от размеров дефектных структур материалов l , мм³, аппроксимируются гиперболой:

$$\bar{E} = \frac{K_1}{(l/L)^b}; \quad \sigma_E = \frac{K_2}{(l/L)^c}. \quad (3)$$

где K_1 – предел прочности материала, Дж/мм³;
 K_2 – предел выносливости материала, Дж/мм³;
 b, c – показатели степени, определяющие закономерность изменения параметров n и α ;
 L – объем материала элемента, мм³.

Тогда параметры n и α структурно-энергетической модели отказов будут определяться по формулам:

$$n = \frac{\bar{E}^2}{\sigma_E^2} = \frac{K_1^2 (l/L)^{2b}}{K_2^2 l (l/L)^{2c}} = \left(\frac{K_1^2}{K_2^2} \right) \left(\frac{l}{L} \right)^{2c-2b}; \quad \alpha = \frac{\bar{E}}{\sigma_E^2} = \frac{K_1 l (l/L)^b}{K_2 l (l/L)^{2c}} = \frac{K_1}{K_2} \left(\frac{l}{L} \right)^{2c-b}. \quad (4)$$

После определения параметров n и α структурно-энергетической теории отказов, основываясь на содержащихся в материале внутренних дефектах, становится возможным определить зависимость вероятности безотказной работы от времени эксплуатации при заданном энергетическом воздействии.

Исходя из условия $E=I \cdot t$, где I – интенсивность энергетического воздействия, Дж/мм³, используя формулу (1)

$$P(t) = 1 - q(t) = \exp(-\alpha It) \cdot \left[\sum_{i=0}^{n-1} \frac{(\alpha It)^i}{i!} \right].$$

Задавшись требуемым уровнем надежности элементов $P(E)$ в процессе эксплуатации по графику, представленному на рис. 1, можно определить соответствующее этим значениям предельное время безотказной работы для фиксированного значения параметра α , либо рассчитать показатель надежности, задавшись необходимым временем работы элемента.

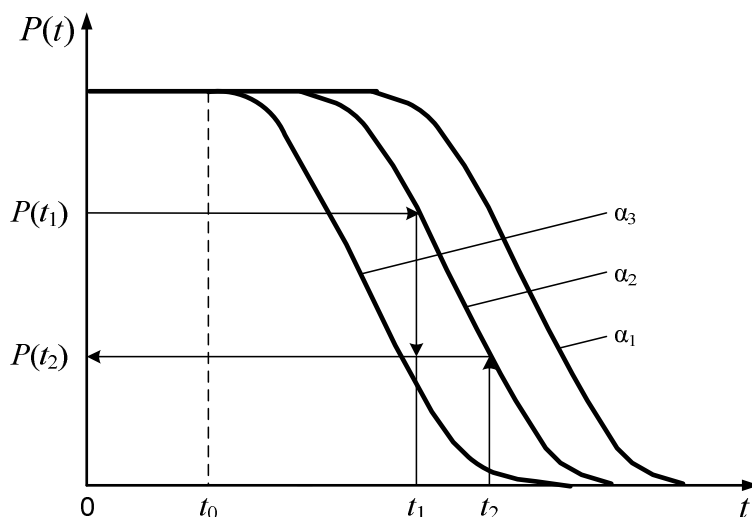


Рис. 1. Зависимость $P(t)$ для различных значений параметра α при $I=\text{const}$.

Таким образом, структурно-энергетическая теория отказов позволяет как определить надежность, так и прогнозировать количество часов наработки элемента при заданном уровне безотказной работы, основываясь на определении внутренних дефектов материала элемента по средствам неразрушающего контроля.

Третья глава диссертации содержит описание методик и исследований рабочих турбинных и компрессорных лопаток авиационного двигателя, информацию о допустимых дефектах в их материале, объем обнаруженных внутренних дефектов с помощью томографии, значения нагрузок в процессе разрушающих испытаний, а так же наработку исследуемых лопаток до разрушения.

Для неразрушающего контроля лопаток был использован промышленный компьютерный томограф для рентгеноскопии на основе рентгеноскопической системы ХТН 450 LC, который позволяет получать превосходное разрешение и точность изображения, за счет меньшего, по сравнению с аналогами, размера фокального пятна. Томография при расчете с помощью структурно-энергетической теории отказов ценна тем, что позволяет определить не только площадь, форму и количество внутренних отклонений, но и их объем.

Были проведены исследования внутренней структуры партий рабочих лопаток 1 ступени турбины высокого давления ТВД из сплава ЖС26-ВИ (рис.2), 2 ступени ТВД из сплава ЖС32-ВИ (рис.3), рабочих лопаток 3 ступени

свободной турбины СТ из сплава ЧС70-ВИ (рис.4), компрессорных лопаток используемых в 5 ступени компрессора высокого давления КВД, новых, которые до испытаний не подвергались эксплуатации (рис.5), и бывших в эксплуатации, восстановленных после износа с помощью лазерной наплавки (рис.6), которые в дальнейшем устанавливаются на менее ответственные объекты, такие как газоперекачивающие станции.

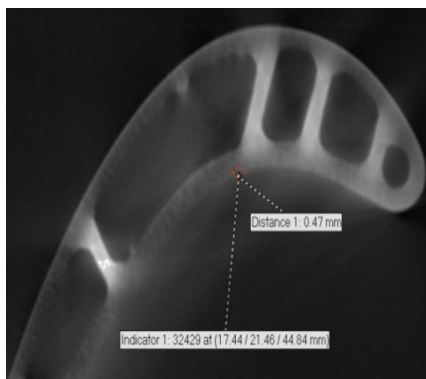


Рис.2. Неразрушающие исследования рабочих лопаток 1 ступени ТВД сплава ЖС26-ВИ

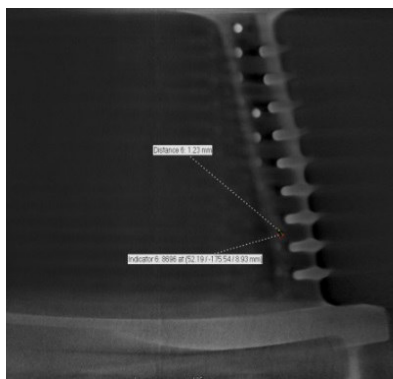


Рис.3. Неразрушающие исследования рабочих лопаток 2 ступени ТВД сплава ЖС32-ВИ

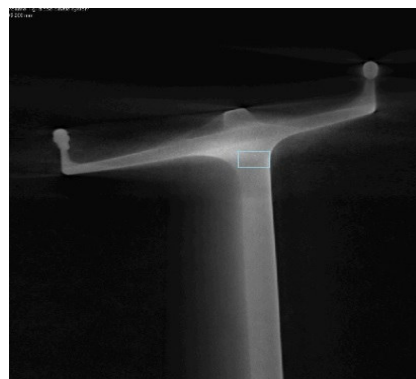


Рис.4. Неразрушающие исследования рабочих лопаток 3 ступени СТ сплава ЧС70-ВИ

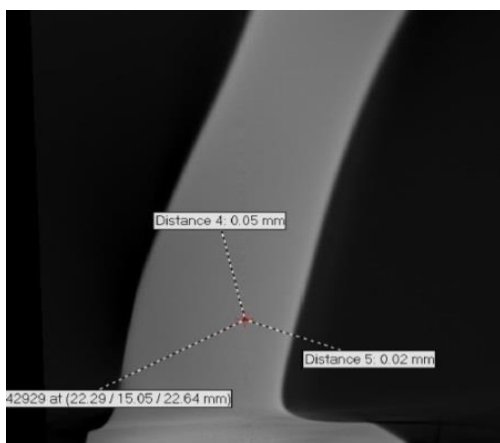


Рис.5. Неразрушающие исследования рабочих лопаток 5 ступени КВД из титана марки ВТ8

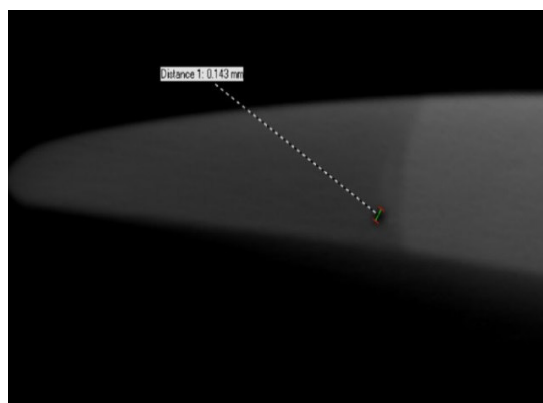


Рис.6. Неразрушающие исследования рабочих лопаток 5 ступени КВД из титана марки ВТ8 восстановленных наплавкой титановым порошком ВТ6

Проведенный анализ демонстрирует наличие более крупных, чем это допускается, внутренних дефектов в лопатках турбины, также при наличии охлаждающих каналов во всех случаях в их размерах присутствуют отклонения. Были обнаружены мелкие внутренние повреждения в материале компрессорных лопаток, и довольно крупные в наплавленном слое восстановленных.

В четвертой главе изложены принципы расчета надежности принятые Международной организацией гражданской авиации ИКАО (International Civil Aviation Organization, ICAO) и используемые в настоящее время в условиях производства авиационных двигателей. Эта методика заключается в

построении дерева неисправностей, на первом этапе производится анализ возможных причин выключения двигателя и оценивается интенсивность этих событий, далее составляется дерево событий, начиная с отказных состояний, после чего производится оценка следующего уровня причин по каждому состоянию. Описанный процесс производится для каждой ветви, определяется интенсивность отказов всех состояний и с помощью формулы (5) определяется надежность работы всей системы.

$$q_{\lambda}(t) = 1 - \exp(-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_j)t) \quad (5)$$

где, λ_j – интенсивность отказа по каждому переходу;

j – количество испытываемых элементов;

t – время наработки до отказа, ч.

Были выделены отказные состояния, в которых возможно применение структурно-энергетической теории отказов, а именно поломка лопаток КВД, КНД и турбины из-за дефекта при забросе температуры газа T_g и локализованном внутреннем разрушении двигателя. Так как направляющие и сопловые лопатки в первую очередь испытывают температурные нагрузки и разрушаются вследствие воздействия на них высоких температур, для использования структурно-энергетической теории отказов были выбраны только случаи разрушения рабочих лопаток.

Таким образом, общий расчет надежности двигателя будет производиться на основании вероятностей отказов полученных экспериментальным путем $q(E)$ рабочих компрессорных и турбинных лопаток и статистическими методиками $q(\lambda)$ остальных элементов системы.

Используя расчет надежности с помощью структурно-энергетической теории отказов на нижних уровнях дерева неисправностей, становится возможным увеличение объективности оценки не только рассчитываемых элементов, но и всей конструкции двигателя летательного аппарата.

Расчет вероятностей отказа имеющихся рабочих лопаток с помощью структурно-энергетической теории отказов проводился при заданных экспериментальных нагрузках и известных времени наработки элементов и характеристиках их материалов, а именно пределе прочности и выносливости.

На первом этапе оценки надежности с помощью структурно-энергетической теории отказов по формулам (2) были определены параметры n и α , полученные значения представлены в таблице 1.

Таблица 1

Средние значения параметров n и α

	1 ступень ТВД, сплав ЖС-26ВИ	2 ступень ТВД, сплав ЖС32-ВИ	3 ступень СТ, сплав ЧС70-ВИ	5 ступень КВД, ВТ-8	Восстановлен- ная 5 ступень КВД, ВТ-8
n	4	5	14	3	3
α	0,00489	0,00736	0,0262	0,000421	0,000613

Увеличение показателя n третьей ступени по сравнению с остальными, можно объяснить следующим: лопатки первой и второй ступеней имеют охлаждающие каналы, то есть являются полыми, что касается лопаток КВД, они изготавливаются из титановых, а не жаропрочных сплавов и в процессе эксплуатации подвержены более сильным механическим напряжениям. Более того лопатки третьей ступени имеют больший объем по сравнению с остальными, в этой связи и для наступления их отказа необходимо большее число случаев возникновения элементарных повреждений.

Для определения закономерности изменения параметров n и a в зависимости от размеров дефектных (чувствительных) структур материалов элементов и интенсивности энергетического воздействия на них воспользуемся формулами (4). Для этого необходимо определить показатели степени b и c , выражая их из уравнений (3):

$$b = \frac{\lg[k_1 / \bar{E}]}{\lg(l/L)}; c = \frac{\lg[k_2 / \sigma_E]}{\lg(l/L)}.$$

После определения закономерностей изменения показателей n и a возможно расчетное определение вероятности отказа каждого элемента и их долговечности в зависимости от размеров дефектных (чувствительных) структур. Вероятность отказа определяется исходя из ресурса двигателя, а именно 25000 часов. Для прогнозирования долговечности следует задаться необходимой вероятностью безотказной работы, в представленном случае вероятность безотказной работы была принята $P=0,9999$.

В таблице 2 приведены значения вероятностей отказа отдельных лопаток, определенные на основе разрушающих экспериментальных испытаний, а также рассчитанные с помощью структурно-энергетической теории отказов. Более того для наглядности представлены значения показателей надежности, задаваемые в условиях производства.

Таблица 2

Средние вероятности отказа, рассчитанные с помощью структурно-энергетической теории отказов $q(E)$, полученные на основе разрушающих экспериментальных данных $q(e)$, и интенсивностей отказов, определенные с помощью статистических методик $q(\lambda)$

	1 ступень ТВД, сплав ЖС-26ВИ	2 ступень ТВД, сплав ЖС32-ВИ	3 ступень СТ, сплав ЧС70-ВИ	5 ступень КВД, ВТ-8	Восстановлен- ная 5 ступень КВД, ВТ-8
$q(E)$	$1,915 \cdot 10^{-5}$	$9,117 \cdot 10^{-8}$	$4,442 \cdot 10^{-16}$	$3,9197 \cdot 10^{-8}$	$1,213 \cdot 10^{-7}$
$q(e)$	$1,922 \cdot 10^{-5}$	$9,12 \cdot 10^{-8}$	$4,441 \cdot 10^{-16}$	$3,925 \cdot 10^{-8}$	$1,209 \cdot 10^{-7}$
$q(\lambda)$	$8,04 \cdot 10^{-7}$			$1,6 \cdot 10^{-9}$	

Рассчитанные вероятности отказа на основе содержания внутренних дефектов в материале лопаток $q(E)$ соответствуют значениям надежности, которые были получены в ходе разрушающих экспериментов $q(e)$, что позволяет

сделать вывод о достоверности разрабатываемой методики. Следует отметить, что показатели надежности $q(\lambda)$, определенные с помощью статистических методик задаются на все лопатки турбины или компрессора, а не на отдельные, как в случае с рассчитанными с помощью структурно-энергетической теории отказов. В этой связи уже сейчас можно сделать вывод, о необходимости использования предлагаемой методики, так как рассчитанная надежность ниже, чем полученная статистически.

Что касается восстановленных лопаток, в настоящее время данных об их интенсивностях отказов не существует, а при установке на двигатель для них просто задаются большие запасы прочности.

Прогнозируемая долговечность в случаях новых лопаток варьируется в узких пределах, а именно ± 5 часов, что же касается восстановленных лопаток, объем внутренних дефектов, в которых значительно выше, разница в прогнозируемом ресурсе работы достигает нескольких тысяч часов. Минимальная наработка, полученная в ходе определения долговечности для каждого типа лопаток, представлена в таблице 3. Графические зависимости вероятности безотказной работы лопаток от времени в процессе эксплуатации, при надежности $P(t)=0,9999$, представлены на рисунках 7-11.

Таблица 3

Минимальные значения долговечности, рассчитанные с учетом объема содержащихся в материале элементов внутренних дефектов, при вероятности безотказной работы $P(t)=0,9999$, ч

1 степень ТВД, сплав ЖС-26ВИ	2 степень ТВД, сплав ЖС32-ВИ	3 степень СТ, сплав ЧС70-ВИ	5 степень КВД, ВТ-8	Восстановленная 5 степень КВД, ВТ-8
70943	178458	474896	770664	522229

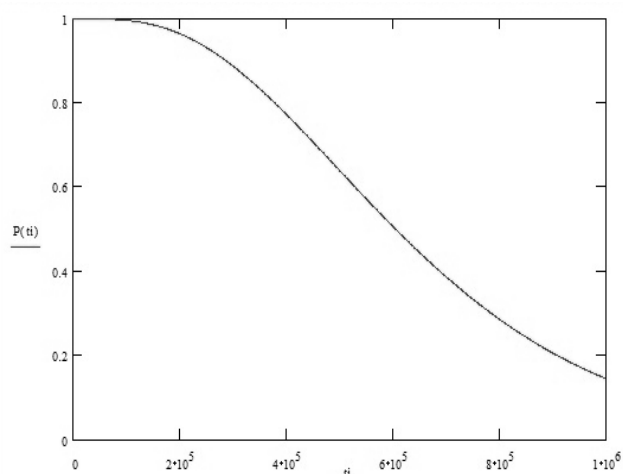


Рис. 7. Зависимость вероятности безотказной работы $P(t)$ рабочих лопаток ТВД 1 степени от времени t

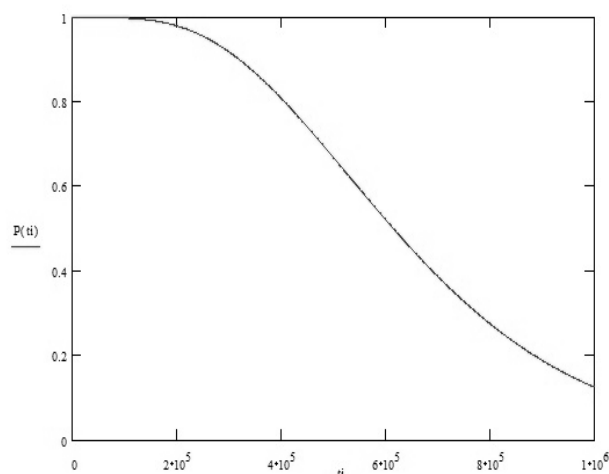


Рис. 8. Зависимость вероятности безотказной работы $P(t)$ рабочих лопаток ТВД 2 степени от времени t

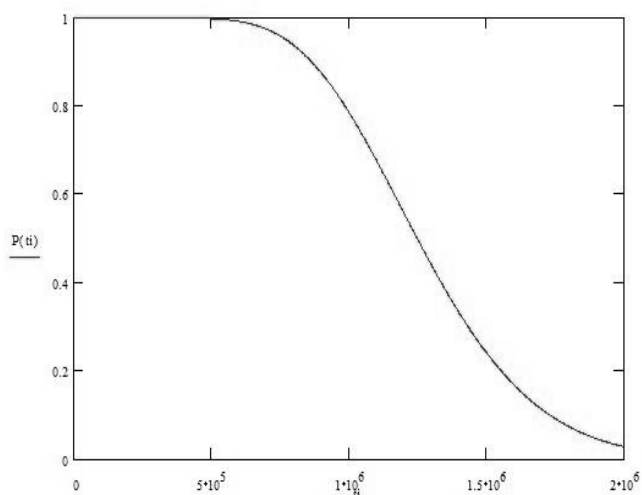


Рис. 9. Зависимость вероятности безотказной работы $P(t)$ рабочих лопаток ТВД 3 ступени от времени t

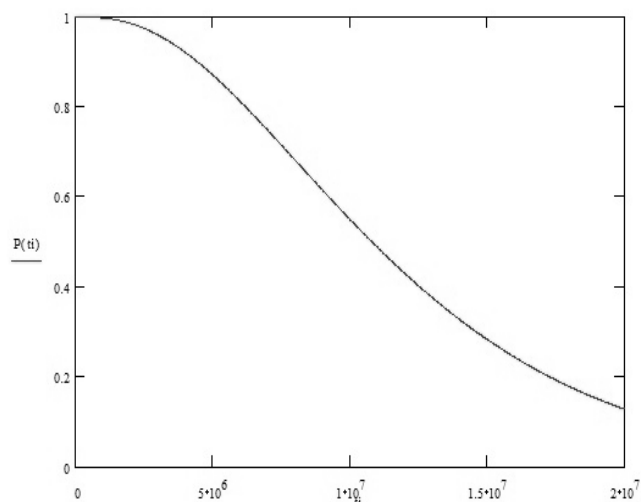


Рис. 10. Зависимость вероятности безотказной работы $P(t)$ рабочих лопаток КВД 5 ступени от времени t

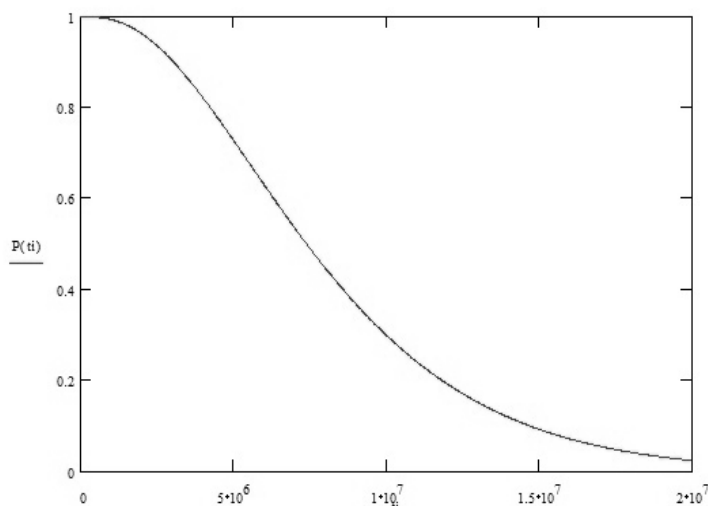


Рис. 11. Зависимость вероятности безотказной работы $P(t)$ восстановленных рабочих лопаток КВД 5 ступени от времени t

На основании вышеизложенного создана компьютерная программа, которая позволяет оценить надежность авиационного двигателя, используя информацию о наличии внутренних дефектов в материале рабочих турбинных и компрессорных лопаток. В качестве параметра надежности, полученного применением информации об интенсивностях отказов рабочих компрессорных и турбинных лопаток, используется их вероятность отказа, рассчитанная с помощью структурно-энергетической теории. Так как замена производится на нижнем уровне дерева неисправностей, то изменения касаются и прочих значений, находящихся на верхних уровнях, в том числе изменяется значение вероятности полного отказа двигателя.

Написание программы производилось на языке программирования C++, с помощью кросс-платформенной библиотеки Qt версии 5.5.0. Для выполнения

расчета в базу вносятся следующие исходные данные: нагрузка во время разрушающих испытаний $(I_u)_j$, время разрушающих испытаний до отказа для каждой лопатки $(t_u)_{ji}$, информация об объеме внутренних отклонений в материале лопаток используемых в конструкции двигателя l_{ji} , объем материала каждого типа лопаток L_j , где j – количество ступеней; i – количество однотипных лопаток. Исходя из этих параметров вычисляется дисперсия наработки однотипных лопаток до отказа, а в последующем расчете при задании эксплуатационной нагрузки $(I_o)_j$ и предполагаемого времени эксплуатации до обслуживания $(t_o)_{ji}$, становится возможным рассчитать вероятности отказа отдельных рабочих лопаток КВД, КНД и турбины, отдельных ступеней (сумма показателей надежности отдельных лопаток ступени), всего КВД, КНД и турбины (сумма показателей надежности всех ступеней системы), а также, исходя из полученных значений, с помощью дерева неисправности оценить общую надежность двигателя.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В процессе работы над диссертацией были получены следующие результаты.

1) Определена теоретическая составляющая оценки надежности на основе структурно-энергетической теории отказов, с помощью которой, в результате систематизации и анализа информации о существующих методиках были определены возможные пути увеличения их точности.

2) По результатам анализа существующих способов оценки надежности в условиях разработки, конструирования и производства авиационных двигателей был разработан алгоритм оценки вероятности отказа рабочих турбинных и компрессорных лопаток, основанный на исследовании внутреннего состояния их материала.

3) Выполнены исследования внутреннего состояния материала рабочих лопаток 1, 2, 3 ступеней турбины и новых и ремонтных рабочих лопаток 5 ступени КВД. В случае турбинных лопаток удалось обнаружить более крупные внутренние поры, чем допускают производственные стандарты. Относительно компрессорных лопаток, в которых наличие дефектов не допускается, также были найдены мелкие внутренние повреждения, и значительные несплавления и поры в ремонтных лопатках. Во всех случаях объем внутренних каналов охлаждения турбинных лопаток не соответствует разработанному конструктором, что тоже следует учитывать при определении объема чувствительных структур.

4) Проведены разрушающие испытания лопаток, которые продемонстрировали значительные различия в их наработке, не смотря на одинаковые нагрузки, материалы, геометрию и способ изготовления. Выполнен расчет надежности рабочих турбинных и компрессорных лопаток с помощью структурно-энергетической теории отказов, на основе информации полученной в ходе разрушающих испытаний и на основе содержания внутренних дефектов

в образцах. Полученные значения показателей надежности при этих расчетах практически идентичны. Сравнение рассчитанных вероятностей отказа с используемыми при производстве авиационных двигателей интенсивностями показало значительное увеличение вероятности отказа на 1-2 порядка. Также была проведена оценка долговечности исследуемых лопаток, при заданной вероятности безотказной работы 99,99%, для новых однотипных лопаток полученные значения гарантированного времени работы изменяются незначительно, в пределах 20-50 часов.

В случае ремонтных лопаток 5 ступени КВД, когда образование внутренних отклонений не зависит от технологии и может происходить случайным образом, необходимо их более тщательное исследование, более того, следует учитывать тот факт, что тело лопатки изготовлено из титанового сплава BT8, а наплавка производилась порошком из сплава BT6, в этой связи при определении вероятности отказа и прогнозировании времени работы таких элементов следует задаться значительным запасом времени и увеличить частоту контроля в процессе эксплуатации, для предотвращения их внезапного разрушения.

5) Разработана модель оценки надежности авиационного двигателя, основанная на уже используемых статистических методиках определения интенсивностей отказов и разработанного алгоритма оценки вероятности отказа рабочих лопаток. Создана компьютерная программа, учитывающая вероятности отказа, рассчитанные относительно внутреннего состояния материала рабочих лопаток и интенсивности отказа других систем входящих в конструкцию авиационного двигателя, которая позволяет наглядно проследить влияние структурных повреждений в материале на надежность.

6) Результаты диссертационной работы приняты к внедрению ОАО «Авиадвигатель» в качестве методики оценки надежности и долговечности рабочих компрессорных и рабочих турбинных лопаток.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

Научные статьи, опубликованные в изданиях из перечня, рекомендованного ВАК РФ для специальности 05.07.05

1. Черняев, А.И. Оценка надежности компрессорных лопаток авиационных двигателей / А.И. Черняев, В.А. Трефилов // Авиационная промышленность. – 2015. – №3. – С. 52-55
2. Черняев, А.И. Оценка надежности и долговечности плоских образцов со сварным швом при испытании на растяжение / А.И. Черняев, В.А. Трефилов, В.А. Ямщиков // Известия Самарского научного центра РАН. – 2014. – Т.16. – №4-1. – С. 245-249.

Научные статьи, опубликованные в прочих изданиях, рекомендованных ВАК РФ

3. Черняев, А.И. Оценка надежности лопаток двигателя используемого в конструкции газоперекачивающих станций / А.И. Черняев, В.А. Трефилов // Газовая промышленность. – 2015. – №723. – С.66-68

4. Черняев, А.И. Прогнозирование долговечности металлоконструкций в строительстве / А.И. Черняев, В.А. Трефилов, В.А. Ямщиков // Безопасность труда в промышленности. – 2014. – № 8. – С. 51-54.
5. Черняев, А.И. Оценка ресурса работы лопаток компрессора низкого давления в двигателях для перекачки нефти и газа / А.И. Черняев, В.А. Трефилов // Нефтепромысловое дело. – 2013. – № 9. – С. 69-72.

Другие публикации

6. Черняев, А.И. Использование структурно-энергетической теории отказов для оценки долговечности металлоконструкций / А.И. Черняев, В.А. Трефилов // Вестник ПНИПУ. Безопасность и управление рисками. – 2014. – №1. – С.127-138
7. Черняев, А.И. Оценка надежности и долговечности металлоконструкций / А.И. Черняев, В.А. Трефилов // Молодой ученый. – 2013. – № 10(57) . – С.225-228
8. Черняев, А.И. Оценка надежности и обеспечение долговечности тяжело нагруженных элементов / А.И. Черняев, В.А. Трефилов // Научные исследования и инновации. – 2013. – Т. 7. – № 1-4. – С.95-100

Публикации в трудах конференций

9. Черняев, А.И. Использование структурно-энергетической теории отказов для оценки надежности лопаток компрессора высокого давления входящего в конструкцию авиационного двигателя / А.И. Черняев, В.А. Трефилов // Ракетные двигатели и энергетические установки: материалы докладов Всероссийской науч.-техн. конф., посвященной 70-летию основания кафедры ракетных двигателей Казанского авиационного института (КАИ), Казань, 21-22 мая 2015г./Казань: изд-во Казан. ун-та. – 2015. – С.110-115
10. Черняев, А.И. Оценка надежности и обеспечение безопасности металлоконструкций в строительстве / А.И. Черняев, В.А. Трефилов // Наука и инновации в технических университетах: материалы восьмого всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых, С-Петербург, 27-29 окт. 2014: [сб.докл.]/СПб. гос. политехн. ун-т. – СПб: изд-во Политехн. ун-та. – 2014. – С.43-45
11. Черняев, А.И. Расчет долговечности тяжело нагруженных элементов с использованием структурно-энергетической теории отказов / А.И. Черняев, В.А. Трефилов // Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований: материалы II междунар. науч.-практ. конф., Москва, 10-11 окт. 2013 г. – North Charleston: CreateSpace, 2013. –Vol.3. – С. 131-134
12. Черняев, А.И. Влияние неметаллических включений на надежность стали / А.И. Черняев // Инновационные процессы в исследовательской и образовательной деятельности: тез. докл. II Междунар. науч. конф., г. Пермь, 23 апр. 2013 г./Перм. нац. исслед. политехн. ун-т. – Пермь.: Изд-во ПНИПУ. – 2013. – С.160-164

Подписано в печать 27.04.2016. Формат 60×90/16.
Усл. печ. л. 2,0. Тираж 100 экз. Заказ № 839/2016.

Отпечатано в типографии
Издательства Пермского национального исследовательского
политехнического университета.
Адрес: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, к. 113.
Тел. (342) 219-80-33.