

## Вероятностное моделирование ресурса деталей газотурбинного двигателя с учетом производственных отклонений

**А.Н. АРХИПОВ**,  
канд. техн. наук  
(МАИ, Москва),  
**М.В. ВОЛГИНА**  
(ПАО «ОДК-Сатурн»,  
Рыбинск),  
**А.А. МАТУШКИН**,  
канд. техн. наук,  
**Ю.А. РАВИКОВИЧ**,  
д-р техн. наук,  
**Д.П. ХОЛОБЦЕВ**  
(МАИ, Москва)  
arkhipov.48@list.ru

*Представлены результаты вероятностного расчета ресурса ротора компрессора низкого давления газотурбинного двигателя для регионального самолета с учетом производственных отклонений. Описан алгоритм расчетов, подготовка параметров вероятностной модели, порядок и опытная программа автоматизированных вероятностных расчетов. Приведен пример результатов расчета ресурса.*

**Газотурбинный двигатель, вентилятор, компрессор низкого давления, ротор, ресурс, допуски, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, вероятностное моделирование**

Для обеспечения конкурентных преимуществ российского двухконтурного газотурбинного двигателя (ГТД) для регионального самолета необходимо дальнейшее увеличение ресурса и снижение стоимости жизненного цикла.

Одним из узлов, ограничивающих ресурс двигателя-прототипа, является барабан ротора компрессора низкого давления (КНД).

Существующие в России основные расчетные методики оценки циклической долговечности деталей ротора компрессора основаны на оценке напряженно-деформированного состояния (НДС) с использованием двух- и трехмерных конечно-элементных моделей с номинальными размерами и нагрузками [1, 2]. Отклонение размеров деталей в процессе производства, отклонение от номинала нагрузок сопряженных деталей, влияющее на НДС и ресурс деталей, учитывается соответствующими запасами, назначаемыми по результатам испытаний и эксплуатации. При данном подходе наиболее сложным является назначение запасов, которые определяются по результатам обобщения результатов испытаний, доводки и эксплуатации известных двигателей.

В мировой практике при оценке ресурса, в том числе и для ротора двигателя-прототипа, стали использоваться подходы, при которых для создания расчетной модели используются не номинальные, а худшие геометрические отклонения и максимальные нагрузки сопряженных деталей. По результатам расчета циклической долговечности такой модели (долговечности до появления «инженерной» трещины малоциклового усталости глубиной до 0,4 мм и длиной до 0,8 мм) назначается ресурс с запасом, уменьшающимся при увеличении наработки двигателя и обеспечивающим вероятность разрушения детали не более  $10^{-8}$  на час полета. Выбор наихудших с точки зрения ресурса параметров (допусков на размеры, нагрузок сопряженных деталей и т.д.) не всегда очевиден и требует нескольких итераций предварительных расчетов. Полученная оценка размаха напряжений и ресурса является излишне консервативной, что в результате может привести к утяжелению конструкции двигателя либо к занижению оценки ресурса.

В 1970–80-е гг. в ЦИАМ (Москва) начали активно разрабатываться и применяться вероятностные подходы к оценке долговечности деталей ГТД [3–5].

В настоящее время вероятностное моделирование получает все более широкое распространение при оценке ресурса основных деталей газовых турбин [2–12]. В отличие от детерминированных дискретных подходов вероятностное моделирование позволяет более четко оценить риски, связанные с разбросом свойств материала, нагрузок, действующих на деталь, условий эксплуатации, геометрических допусков и др. параметров. Вместо дискретных значений используется распределение параметров, которое учитывается при моделировании НДС и ресурса детали с использованием метода Монте-Карло (ММК), что позволяет получить наиболее соответствующие опыту эксплуатации (консолидированные) значения долговечности и повысить достоверность оценки ресурса детали.

## Алгоритм инженерных расчетов

Вероятностное моделирование ресурса ротора КНД двигателя-прототипа проводилось для зоны с минимальной циклической долговечностью, которой является радиус в окне барабана бустера для установки рабочих лопаток третьей ступени.

Вероятностная оценка НДС выполняется следующим образом [9], [13].

На первом этапе проводится серия детерминированных расчетов двух- и трехмерных номинальных моделей детали и моделей с выбранными предельными отклонениями размеров и нагрузок. Выбор конечно-элементных моделей и граничных условий для расчета НДС ротора в критической зоне описан в работе [14].

Затем определяются коэффициенты влияния каждого геометрического и весового допуска на НДС. Моделирование НДС ротора КНД с учетом допусков и автоматизированный расчет коэффициентов влияния каждого допуска приведено в работе [13].

На завершающем этапе проводится вероятностная оценка коэффициентов влияния, напряжений и долговечности при случайном разбросе допусков в соответствии с описанным далее алгоритмом, блок-схема которого приведена на рис. 1.

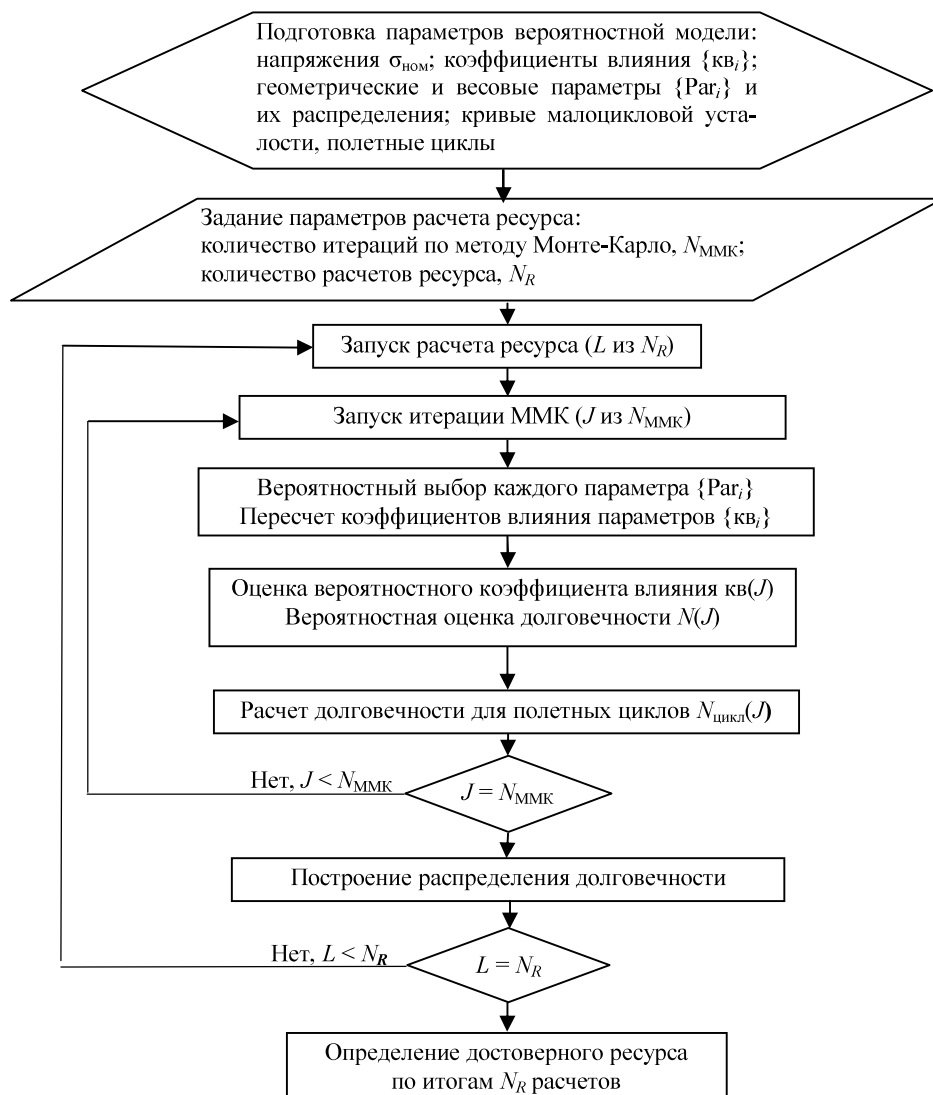


Рис. 1. Общий алгоритм вероятностных расчетов ресурса ротора КНД

Таким образом, программа позволяет рассчитывать минимальное значение долговечности деталей в критической зоне и устанавливать статистически обоснованный ресурс с определенной, заданной вероятностью неразрушения.

## Подготовка параметров вероятностной модели

В качестве исходных данных для вероятностного моделирования задаются следующие параметры.

### 1. Напряжения в критической зоне.

Задаются максимальные напряжения в критической зоне номинальной модели  $\sigma_{\text{ном}}$  и модели с худшими предельными отклонениями  $\sigma_{\text{max}}$ , определенные по результатам серии детерминированных двух- и трехмерных расчетов (рис. 2 [13, 14]). Так как деформирование критической зоны происходит в упругой области, то величина максимальных напряжений является оценкой размаха напряжений.

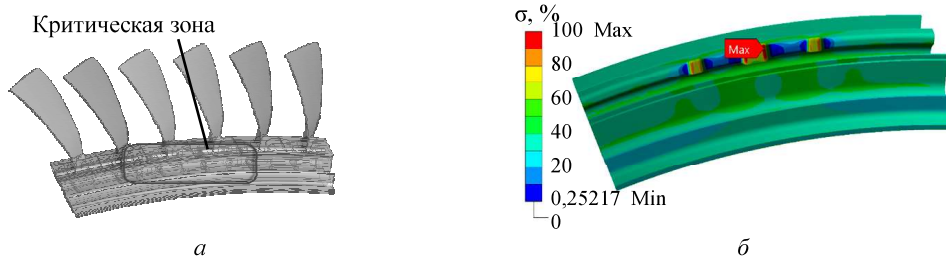


Рис. 2. Критическая зона в центре субмодели с шестью лопатками (а) и относительное распределение напряжений Мизеса в критической зоне субмодели ротора (б) [12], [15]

### 2. Коэффициенты влияния допусков.

Задаются коэффициенты влияния каждого геометрического и массоинерционного допуска на НДС в критической зоне  $\{kv_i\}$ , определенные по результатам серии детерминированных автоматизированных двух- и трехмерных расчетов [14].

### 3. Геометрические параметры.

Все геометрические параметры, влияющие на долговечность в критической зоне [14], задаются на основе анализа реальных измеренных значений этих размеров для малой выборки ранее изготовленных барабанов при изменении размеров в пределах, сопоставимых с точностью измерения.

При этом проводится проверка взаимной корреляции измеренных параметров, и те пары параметров, для которых величина достоверности линейной аппроксимации  $R^2 > 0,5$ , считаются взаимно коррелированными. Для вероятностной оценки напряжений выбирается только один из двух взаимно коррелированных параметров (см. рис. 3, а).

Малый размер выборки измеренных размеров часто не позволяет провести стандартную проверку по критерию согласия Пирсона  $\chi^2$ , поэтому для проверки распределения на нормальность выборка измеренных размеров может быть отсортирована по их возрастанию и построен график функции распределения размера. Пример такого распределения показан на рис. 3, б, по которому может быть сделан вывод о том, что с высокой степенью достоверности для данного размера может быть принято линейное распределение в пределах допусков. После преобразования вероятности в квантили нормального распределения по графику проверки распределения на нормальность (рис. 3, в) можно принять распределение нормальным, но из-за высокого среднеквадратичного отклонения (вследствие малого размера выборки) при выходе генерируемого по ММК размера за пределы допуска следует приравнивать данный размер к предельному значению.

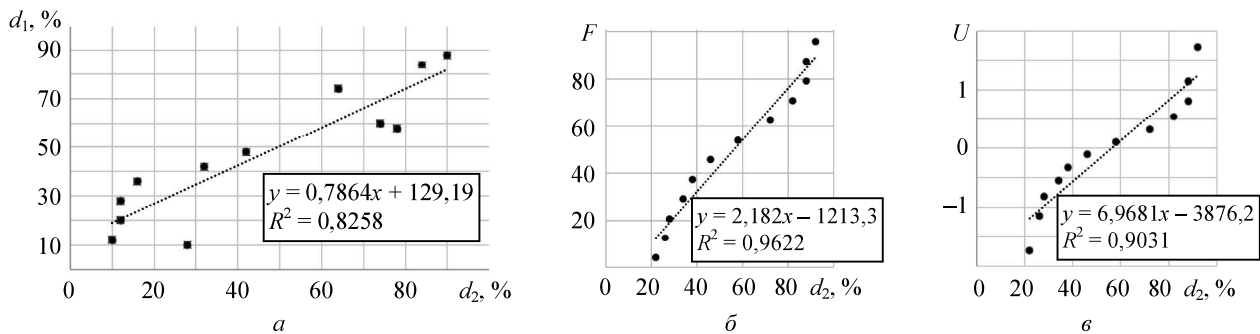


Рис. 3. Примеры графиков взаимной корреляции отклонений от допустимого минимума размеров  $d_1$  и  $d_2$  (а), функции распределения  $F$  размера  $d_2$  (б) и проверки распределения размера  $d_2$  на нормальность по квантилю  $U$  (в)

Некоторые геометрические размеры, оказывающие влияние на НДС критической зоны, контролируются геометрическими шаблонами (например, радиусы галтелей, ширина и длина окон под постановку лопаток). Их фактические значения сложно измерить, поэтому при вероятностном моделировании рекомендуется принять наиболее консервативный равномерный закон распределения в диапазоне от минимального до максимального допустимого значения либо взять наихудшее значение.

#### 4. Массоинерционные параметры.

Параметры массы лопаток компрессора, влияющие на величину напряжений в критической зоне, задаются на основе анализа реальных измеренных весов лопаток, осредненных для разных комплектов.

#### 5. Долговечность при малоцикловом нагружении.

Минимальные значения долговечности задавались с использованием усталостных свойств материала основного заказчика, в которых учитывается влияние возможных производственных факторов (металлургические дефекты, риски, шероховатость, остаточные напряжения и т.п.). Средние и максимальные значения долговечности, необходимые для вероятностного моделирования, были построены по минимальным значениям долговечности для нормально-логарифмического закона распределения логарифма долговечности со среднеквадратичным отклонением  $S_{lgN} = 0,3$  [15, 16] (рис. 4).

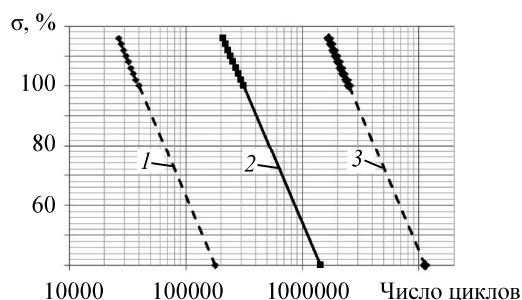


Рис. 4. Вероятностные кривые усталости материала: 1 — минимальные; 2 — средние; 3 — максимальные

#### 6. Полетные циклы.

Полетные циклы задаются по оборотам (рис. 5) и газовым нагрузкам на лопатки для различных климатических условий в диапазоне  $-16...+37$  °С (миссии А–Е) и для различных степеней изношенности двигателя (новый, средний износ, максимальный износ).

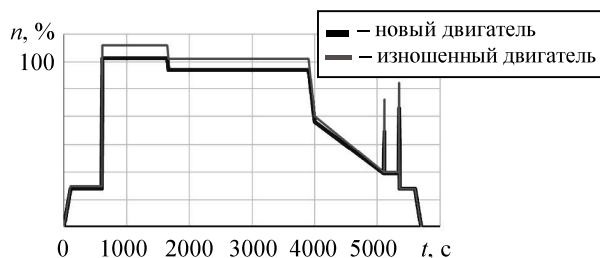


Рис. 5. Пример полетных циклов ротора КНД по оборотам для двигателей

Кроме того, задается относительная наработка двигателя при различных климатических условиях за ресурс (например, 30 % — миссии А и В; 28 % — миссия С; 10 % — миссия D; 2 % — миссия Е) и относительная наработка двигателя с различной степенью изношенности за ресурс (например, 30 % — новый двигатель, 30 % — двигатель со средним износом, 40 % — двигатель с максимальным износом или плавное изменение износа двигателя за ресурс от нового до предельного состояния).

Обороты ротора и газовые нагрузки на лопатки для различных миссий и степени износа определяются из соответствующих аэродинамических расчетов.

Расчет числа полетных циклов проводится на основе гипотезы линейного суммирования долговечностей с учетом заданных относительных чисел циклов в каждой миссии и с учетом изношенности двигателя и соответствующего увеличения оборотов при возрастании наработки. Изменение газовых нагрузок в указанных пределах не оказывает заметного влияния на уровень напряжений в критической зоне барабана бустера.

## 7. Число оценок.

Для исследования стабильности результатов и получения достоверных оценок ресурса задается число оценок ресурса ( $N_R$  до 100), число случайных реализаций при каждой оценке ресурса ( $N_{\text{ММК}}$  до 10000) и вероятность определения минимального ресурса ( $P$  до 0,0001).

### Порядок инженерных вероятностных расчетов

В каждом цикле  $L$  от 1 до  $N_R$  (до 100 циклов) проводится расчет минимального ресурса барабана бустера по серии из  $N_{\text{ММК}}$  итераций с вероятностным моделированием по ММК.

В каждой итерации  $J$  от 1 до  $N_{\text{ММК}}$  (до 10000 итераций) проводится определение значений напряжений и долговечности в зависимости от миссии и степени изношенности двигателя, соответствующих одной случайной комбинации варьируемых геометрических и массоинерционных параметров, в следующем порядке.

#### 1. Вероятностный выбор каждого параметра.

В каждой итерации  $J$  проводится серия расчетов в цикле  $i$  от 1 до  $N_p$  (число варьируемых параметров) для каждого варьируемого параметра  $\text{Par}_i$ .

В каждом цикле  $i$  задается очередной параметр в диапазоне от минимального до максимального значения. Затем с помощью датчика случайных чисел (ММК) в соответствии с заданным законом распределения (нормальный или равномерный) выбирается случайное значение данного параметра, либо выбирается худший случай, если требуется рассмотреть только такой вариант (вид распределения «худший»). В случае выпадения случайного значения за границы интервала между минимальным и максимальным значениями задается значение, соответствующее ближайшей границе.

Если для параметра известны данные измерений со своими минимальными, максимальными и средними значениями, то могут использоваться эти значения.

#### 2. Пересчет коэффициентов влияния параметров.

Пересчет коэффициента влияния каждого параметра  $k_v$ , проводится пропорционально выбранному случайному значению (вероятностному) данного параметра  $\text{Par}_i$ .

Коэффициентами в пропорции являются заданные номинальное значение данного параметра  $\text{Ном}_i$  и его предельные значения  $\text{min}_i$  и  $\text{max}_i$ , а также максимальный коэффициент влияния (при минимальном или максимальном допуске) параметра на напряжение  $k_{v,\text{max}}$ .

#### 3. Оценка вероятностного коэффициента влияния и напряжения.

В каждой итерации  $J$  после серии расчетов в цикле  $i$  от 1 до  $N_p$  для каждого случайного значения варьируемого параметра получаем серию вероятностных значений коэффициента влияния для каждого параметра  $k_{v_i}$ .

Для данной серии коэффициентов влияния  $k_{v_i}$  получаем суммарный коэффициент влияния для итерации  $J$ :  $k_v(J) = k_{v_1}k_{v_2}\dots k_{v_i}\dots k_{v_{N_p}}$ . По общему коэффициенту влияния получаем напряжение для данной  $J$ -й реализации варьируемых параметров:  $\sigma(J) = k_v(J)\sigma_{\text{ном}}$ .

#### 4. Вероятностная оценка долговечности.

В каждой итерации  $J$  для полученного напряжения в критической зоне барабана бустера  $\sigma(J)$  выбираем соответствующие значения долговечности  $N_{\text{min}}(J)$ ,  $N_{\text{cp}}(J)$  и  $N_{\text{max}}(J)$ , используя линейную интерполяцию в логарифмической системе координат.

Затем с помощью датчика случайных чисел (ММК) в соответствии с заданным законом распределения (логарифмически нормальный) выбирается случайное значение долговечности  $N(J)$ .

Полученное значение долговечности является оценкой ресурса для данной случайной реализации параметров барабана бустера при циклическом нагружении с постоянными максимальными оборотами.

Через точку на кривой усталости с координатами  $\sigma(J)$ ,  $N(J)$  строится локальная кривая усталости для данной  $J$ -й реализации варьируемых параметров (в логарифмических координатах), эквидистантная исходным кривым усталости (см. рис. 4).

## 5. Расчет долговечности для полетных циклов.

По полученным значениям коэффициента влияния  $kv(J)$  и напряжения  $\sigma(J)$  для  $J$ -й локальной кривой усталости проводится пересчет напряжений и долговечности и определение количества циклов в общем полетном цикле (см. рис. 5) с учетом миссий, полетных циклов и изношенности двигателя.

Все заданные напряжения в полетных циклах для каждого  $k$ -го пикового значения оборотов в каждой миссии (см. рис. 5, где, например, показаны три пиковые нагрузки в общем цикле) пересчитываются для данной случайной реализации параметров барабана бустера с учетом коэффициента влияния  $kv(J)$ .

Таким образом, для каждой миссии при соответствующей степени изношенности двигателя есть три номинальных напряжения  $\sigma_{\text{пик}}(J, k)$ , пересчитанных с учетом линейной зависимости напряжений в критической зоне ротора от квадрата его скорости. Кроме того, с увеличением изношенности обороты увеличиваются в соответствии с заданными результатами аэродинамического расчета.

Если для каждого напряжения  $\sigma_{\text{пик}}(J, k)$ , соответствующего новому двигателю, расчетная долговечность  $N_{\text{пик}}(J, k)$  выше верхней границы интервала нового или среднеизношенного двигателя (например, 6000 циклов или 12000 циклов), то идет пересчет долговечности с учетом изменения напряжений для среднеизношенного или полностью изношенного двигателя.

По пересчитанным напряжениям и локальной кривой усталости для данной  $J$ -й реализации определяется вектор значений долговечностей  $\{N_{\text{цикл}}(J, k)\}$  (где  $k$  – число значений долговечностей при пиковых нагрузках в цикле), соответствующих каждому пересчитанному пиковому напряжению на локальной кривой усталости.

На основе гипотезы линейного суммирования долговечностей с учетом заданных относительных чисел циклов в каждой миссии определяется количество циклов в общем полетном цикле  $N_{\text{цикл}}(J)$ .

## 6. Построение распределения долговечности.

Для построения распределения долговечности приведенные расчеты повторяются для  $J$  итераций (до 10000 раз), в результате чего получается вектор значений общих полетных циклов  $\{N_{\text{цикл}}(J)\}$ .

Для данного вектора строится распределение долговечности (в логарифмах), определяются характеристики распределения данного вектора долговечностей  $\overline{\lg N}$  и  $S_{\lg N}$  и оценка минимальной долговечности барабана бустера в критической зоне, соответствующей либо  $-3S_{\lg N}$ , либо другой заданной заказчиком вероятности безопасной эксплуатации.

При этом проводится проверка нормальности распределения с помощью критерия согласия  $\chi^2$  (Пирсона).

## 7. Назначение статистически обоснованного ресурса.

Для назначения статистически обоснованного ресурса на завершающей ступени расчета проводится повторение приведенных расчетов для проверки стабильности полученных оценок. В каждом цикле  $L$  от 1 до  $N_R$  (до 100 циклов) проводится расчет минимального ресурса барабана бустера по серии ММК из  $N_{\text{ММК}}$  итераций (каждая до 10000) для заданной вероятности безопасной эксплуатации.

## Результаты инженерных расчетов

Вероятностные расчеты ресурса КНД по приведенному алгоритму проводились с использованием опытной программы «Вероятностный анализ ресурса. Версия 2.0», созданной в программном комплексе Microsoft Excel при помощи VBA-скриптов.

Приведен пример одного из вариантов результатов расчета: число итераций по методу ММК – 10000; среднее значение долговечности по результатам  $N$  итераций ММК – 7,49  $N_{\text{кнд}}$ ; долговечность с учетом полетных циклов для заданной вероятности 0,1 % – 1,71  $N_{\text{кнд}}$ ; целевая долговечность достигнута; общее время расчета – 3,68 мин.

Пример результатов вероятностного расчета приведен также на рис. 6.

Полученное минимальное значение долговечности для заданной вероятности 0,1 % превышает планируемый ресурс ротора КНД на 70 %.

Предлагаемая методика вероятностного моделирования ресурса деталей ГТД с учетом производственных отклонений позволяет повысить достоверность оценки долговечности по сравнению с детерминированной наилучшей (по допускам) моделью.

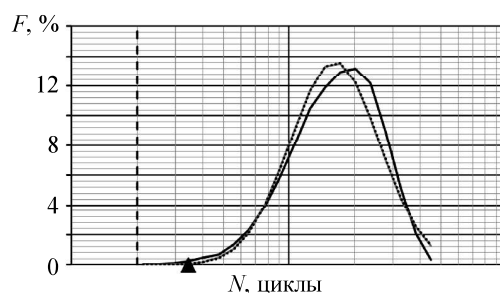


Рис. 6. График плотности распределения долговечности:

— — выборка последнего расчета ММК; ···· — теоретическое распределение объединенных выборок;  
▲ — долговечность с учетом полетных циклов для заданной вероятности; - - - - целевая долговечность

Предварительная оценка коэффициентов влияния допусков на НДС в критической зоне может быть использована для выбора оптимальных (с точки зрения ресурса) допусков на этапе проектирования.

Учет фактических геометрических и весовых параметров может позволить оценить НДС каждого изготовленного барабана.

По результатам испытаний малоразмерного КНД предложенная методика расчетов может быть предложена для использования в промышленности.

Работы выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в ходе реализации комплексного проекта, шифр 2017-218-09-172.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л.* Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. М.: Машиностроение, 2008. Т. 4. 192 с.
2. *Машиностроение: Энциклопедия / Под ред. В.А. Скибина, Ю.М. Темиса, В.А. Сосунова.* Разд. IV. Расчет и конструирование машин. Т. IV-21. Самолеты и вертолеты. Кн. 3. Авиационные двигатели. М.: Машиностроение, 2010. 720 с.
3. *Конструкционная прочность материалов и деталей ГТД // Под ред. И.А. Биргера, Б.Ф. Балашова.* М.: Машиностроение, 1981. 234 с.
4. *Биргер И.А.* Принципы построения норм прочности и надежности в машиностроении // Вестник машиностроения. 1988. № 7. С. 3–5.
5. *Харьков В.П.* Расчетное определение параметров распределения долговечности и запасов прочности при нестационарном циклическом нагружении // Технология и прочность машин: Материалы 2-й Республ. науч.-техн. конф. Татар. НТО Машпром, г. Казань, 20–21 марта 1974. Казань: КГУ, 1974. С. 19–21.
6. *Vittal S., Hajela H., Joshi A.* Review of Approaches to Gas Turbine Life Management [Electronical Resource]. URL: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.2004-4372> (дата обращения: 18.03.2019).
7. *Voigt M. et al.* Probabilistic Lifetime Analysis for Turbine Blade Based on a Combined Direct Monte Carlo and Response Surface Approach // Proc. of the 10th ASME Turbo Expo, June 14–17, 2004, Vienna, Austria. ASME Paper GT2004-53439. P. 327–335.
8. *Nozhnitski Y.A. et al.* Probabilistic Prediction of Aviation Engine Critical Parts Lifetime // Proc. of ASME Turbo Expo, May 8–11, 2006, Barcelona, Spain. ASME Paper GT2006-91350. P. 1025–1034.
9. *Arkhipov A.N., Krasnovskiy Y.E., Putschkov I.V.* Probabilistic Life Assessment of Turbine Vanes // Proc. of the ASME Turbo Expo, June 6–10, 2011, Vancouver, British Columbia, Canada. ASME Paper GT2011-45841. P. 733–740.
10. *Antinori G., Arsenyev I., Fischersworrning-Bunk A.* Robust Design Optimization of a Low Pressure Turbine Rotor Discs Secondary Air System // Proc. of the ASME Turbo Expo, June 26–30, 2017, Charlotte, USA. Paper № GT2017-63289. 12 p.
11. *Beck J.A. et al.* Active Subspace Development of Integrally Bladed Disk Dynamic Properties Due to Manufacturing Variations // Proc. of the ASME Turbo Expo, June 11–15, 2018, Oslo, Norway. Paper № GT2018-76800. 10 p.
12. *Васильев Б.Е. и др.* Учет влияния возможных отклонений размеров в пределах технологических допусков на величины собственных частот колебаний рабочей лопатки компрессора в процессе ее отстройки от опасных резонансов // Изв. вузов. Авиационная техника. 2019. № 1. С. 108–114.

13. *Архипов А.Н. и др.* Моделирование напряженно-деформированного состояния ротора КНД с учетом геометрических и весовых допусков // Научно-технический вестник Поволжья. Технические науки. 2018. № 10. С. 61–68.
14. *Архипов А.Н. и др.* Влияние выбора модели и граничных условий на результаты расчета напряженно-деформированного состояния ротора компрессора низкого давления // Изв. вузов. Авиационная техника. 2018. № 4. С. 8–13.
15. *Балашов Б.Ф. и др.* Конструкционная прочность материалов и деталей ГТД: руководство для конструкторов: Тр. ЦИАМ. 1979. № 835. 522 с.
16. *Петухов А.Н.* Сопротивление усталости деталей ГТД. М.: Машиностроение, 1993. 240 с.

Поступила в редакцию 18.03.19

После доработки 14.05.19

Принята к публикации 19.05.19

## Probabilistic Assessment of Life for Gas Turbine Engine Parts Considering Manufacture Tolerances

A.N. ARKHIPOV<sup>1</sup>, M.V. VOLGINA<sup>2</sup>, A.A. MATUSHKIN<sup>1</sup>,  
YU.A. RAVIKOVICH<sup>1</sup>, AND D.P. KHOLOBTSEV<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow

<sup>2</sup> PAO United Engine Corporation Saturn, Rybinsk

*The results of the probabilistic assessment of life for the low-pressure compressor rotor of the gas turbine engine for a regional aircraft are presented taking into account production tolerances. The calculation algorithm, preparation of the probabilistic model parameters, and the experimental program of automated probabilistic analysis are described, the example of the life calculation results is given.*

**Gas turbine engine, fan, low-pressure compressor, rotor, life, tolerances, finite element method, stress-strain state, probabilistic assessment**