

УДК 629.7.063.3

Н.П. ВЕЛИКАНОВА, А.С. КИСЕЛЁВ

Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева «КАИ», Россия

АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКОЙ НАГРУЖЕННОСТИ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИН АВИАЦИОННЫХ ГТД БОЛЬШОГО РЕСУРСА НА ОСНОВЕ ВЕРОЯТНОСТНОГО ПОДХОДА

На основе изучения статистической информации об условиях эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей для самолетов гражданской авиации, применяя генератор случайных чисел, была сформирована выборка объемом $n = 100$ для построения гистограммы эмпирического распределения основного фактора нагружения рассматриваемой конструкции рабочей лопатки турбины – частоты вращения ротора высокого давления. Применение математической модели, позволяющей вычислить максимальные суммарные статические напряжения в сечении пера рабочей лопатки с минимальным запасом прочности по напряжениям, позволило сформировать выборку действующих в лопатке напряжений в указанном сечении для нового двигателя (наработка в эксплуатации $\tau=0$). Используя закономерности изменения частоты вращения ротора высокого давления в процессе длительной эксплуатации, построены аналогичные выборки для действующих в лопатке напряжений для двух уровней наработки – 5000 и 10500 часов. В рамках статистического анализа были решены следующие задачи: определение числовых характеристик для выборок с разным уровнем наработки; определение закона распределения действующих статических напряжений; определение влияния эксплуатационной наработки на закон и числовые характеристики распределений.

Ключевые слова: ресурс, двигатель, лопатка, температура, турбина, вероятностный подход, статическая нагруженность.

Введение

Рабочие лопатки турбин авиационных двигателей являются наиболее нагруженными деталями по параметру длительной прочности и определяют ресурс двигателя в часах.

Анализ проявления дефектов на рабочих лопатках турбин после длительной эксплуатации показывает, что поврежденность рабочих лопаток двигателей, установленных на одном и том же самолете, имеющих одинаковую наработку, различна: одни лопатки имеют дефекты, а другие, имеющие такую же конструкцию и изготовленные из того же материала — нет. Тем более различны по поврежденности лопатки, эксплуатировавшиеся на двигателях, установленных на разных самолетах. Традиционные методы оценки прочности и долговечности рабочих лопаток не могут дать количественной оценки этим фактам; эти факты свидетельствуют о случайном характере поврежденности лопаток, обусловленном рассеянием нагруженности лопаток и сопротивлением их материала различным видам нагружения. Из этого следует вывод о необходимости совершенствования традиционных методов расчета на основе вероятностного подхода.

Материал рабочих лопаток турбин – литейный жаропрочный сплав на никелевой основе ЖС30-ВИ

монокристаллической структуры. Рассматриваемые лопатки являются неохлаждаемыми, бандажированными и эксплуатируются на самолетах Ил-86.

1. Условия эксплуатации

Из теории воздушно-реактивных двигателей известно, что параметры работы двигателей, определяющие напряженное и тепловое состояние деталей турбины, в общем случае зависят от температуры и давления атмосферного воздуха. Для двигателей НК-86 в соответствии с их законом регулирования указанные выше параметры зависят только от температуры атмосферного воздуха.

Условия эксплуатации были изучены по результатам 500 полетов самолетов Ил-86 в аэропорту Пулково (г. Санкт-Петербург). На рис. 1 приведена гистограмма распределения температуры T_n атмосферного воздуха при выполнении взлетов для 500 полетов самолетов Ил-86. На рис. 2 приведены графики изменения работы двигателей в зависимости от температуры атмосферного воздуха при выполнении взлета в соответствии с законом регулирования двигателей.

Из приведенных на рис. 2 данных следует, что при увеличении температуры T_n параметры работы двигателей частота вращения ротора турбины высо-

кого давления p и температура газа за турбиной t_6^* (для двигателя НК-86 эти величины являются штатными замерами) увеличиваются до момента ограничения.

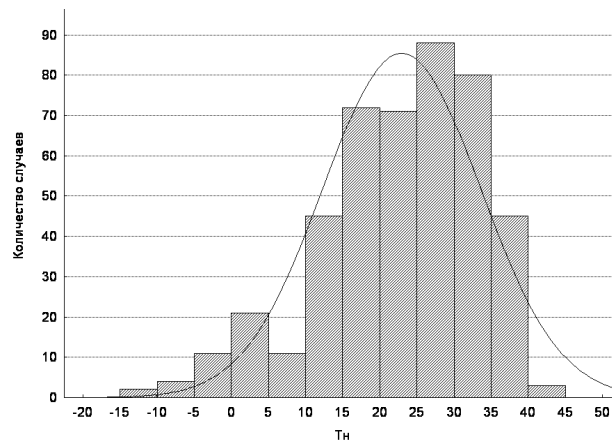


Рис. 1. Гистограмма распределения температуры T_n атмосферного воздуха при выполнении взлетов для 500 полетов самолетов Ил-86

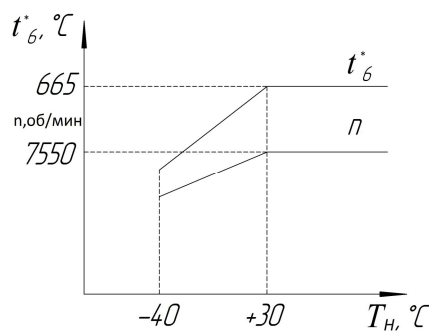


Рис. 2. Графики изменения работы двигателей в зависимости от температуры атмосферного воздуха

2. Параметры нагруженности рабочих лопаток первой ступени турбин

Напряженное состояние рабочих лопаток определялось по теории стержней переменного сечения с начальной закруткой [1]. Для того чтобы оценить влияние параметров работы двигателя на нагруженность лопатки, на основе выполненных многовариантных расчетов в работе [2] была построена модель для лопаток из сплава ЖС30-ВИ:

$$\sigma_{\Sigma \text{лоп}} = 0,308 \cdot 10^{-5} n^2, \quad (1)$$

где $\sigma_{\Sigma \text{лоп}}$ – суммарное максимальное напряжение в сечении пера лопатки с минимальным запасом прочности (с учетом напряжения растяжения и изгиба); n – частота вращения ротора турбины высокого давления.

Минимальный запас прочности для рассматриваемой конструкции лопаток представляет собой эквивалентный запас по местным напряжениям K_m

для пера лопаток; остальные запасы, требуемые в соответствие с нормативной документацией, значительно превышают требуемые значения.

По модели (1) можно определить действующие в лопатке напряжения в сечении пера с минимальным запасом прочности K_m по напряжениям.

Для статистического анализа нагруженности рабочих лопаток из выборки в 500 полетов с использованием генератора случайных чисел была сформирована выборка в 100 полетов. На рис. 3 представлено эмпирическое распределение частоты вращения ротора турбины высокого давления для 100 выбранных полетов.

По формуле (1) для 100 полетов был проведен расчет напряжений $\sigma_{\Sigma \text{лоп}}$ и получена выборка из 100 значений $\sigma_{\Sigma \text{лоп}}$ для нового двигателя (эксплуатационная наработка $\tau = 0$).

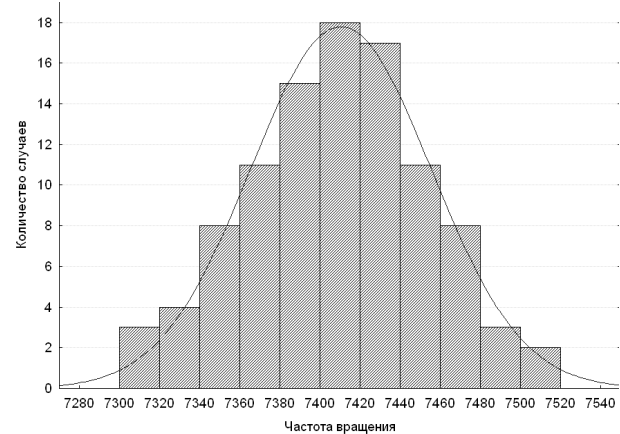


Рис. 3. Эмпирическое распределение частоты вращения ротора турбины

3. Влияние эксплуатационной наработки на параметры работы двигателя

В процессе длительной эксплуатации происходит ухудшение состояния деталей газозвоздушного тракта и, как следствие, ухудшение параметров работы двигателя: в процессе длительной эксплуатации частота вращения ротора высокого давления увеличивается.

Количественно это отражается соотношением [3]:

$$\Delta \bar{n} = 0,232 \cdot \tau^{0,6844}, \quad (2)$$

где $\Delta \bar{n}$ – приращение среднего значения частоты вращения ротора турбины; τ – эксплуатационная наработка в часах.

При проведении капитального ремонта параметры работы двигателя восстанавливаются до исходного уровня, то есть до тех значений параметров, с которых двигатель начинал летную эксплуатацию.

4. Статистический анализ действующих в лопатках статических напряжений $\sigma_{\Sigma\text{лоп}}$

Для выполнения статистического анализа действующих напряжений $\sigma_{\Sigma\text{лоп}}$ были сформированы выборки по 100 полетов для лопаток с различными уровнями эксплуатационной наработки:

$\tau = 0$ – новый двигатель;

$\tau = 5000$ часов – первый капитальный ремонт;

$\tau = 10500$ часов – назначенный ресурс.

Выборки напряжений $\sigma_{\Sigma\text{лоп}}$ для $\tau = 5000$ часов и для $\tau = 10500$ часов были получены с использованием формулы (2).

В рамках статистического анализа были решены следующие задачи:

1) определение числовых характеристик для трех выборок $\sigma_{\Sigma\text{лоп}}$ с разным уровнем наработки;

2) определения закона распределения действующих в лопатке статических напряжений;

3) определение влияния наработки на числовые характеристики распределений.

Статистическая обработка рассматриваемых выборок действующих напряжений $\sigma_{\Sigma\text{лоп}}$ для разных уровней наработки проводилась с использованием программы Excel. В табл. 1 представлены полученные числовые характеристики распределений – среднее значение $\bar{\sigma}_{\Sigma\text{лоп}}$ и среднее квадратическое отклонение $S_{\sigma_{\Sigma\text{лоп}}}$.

Таблица 1

Числовые характеристики распределений

τ , ч	$\bar{\sigma}_{\Sigma\text{лоп}}$, МПа	$S_{\sigma_{\Sigma\text{лоп}}}$, МПа
0	160,32	1,940
5000	163,75	1,961
10500	164,01	1,963

Графики распределений действующих напряжений $\lg\sigma_{\Sigma\text{лоп}}$ для различных уровней эксплуатационной наработки на нормальной вероятностной бумаге приведены на рис. 4. Вид графиков позволяет сделать вывод о том, что представленные данные описываются логарифмически нормальным законом распределения.

Так как графический метод является приближенным, для проверки соответствия закона распределения величин $\lg\sigma_{\Sigma\text{лоп}}$ нормальному закону использовался критерий согласия Пирсона χ^2 . Результаты проверки гипотезы о нормальности закона распределения величины $\lg\sigma_{\Sigma\text{лоп}}$, приведенные в табл. 2, позволяют сделать вывод: выборки $\lg\sigma_{\Sigma\text{лоп}}$ для различных уровней наработки лопаток, каждая объемом $n = 100$, принадлежат к нормальному закону распределения при уровнях значимости $\alpha = 0,01 \dots 0,05$.

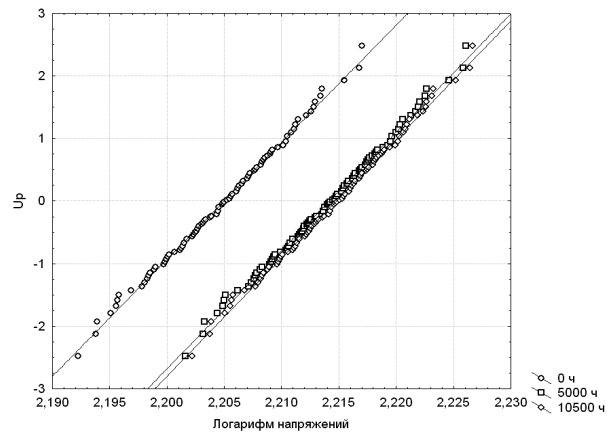


Рис. 4. Графики распределений логарифмов действующих напряжений

Таблица 2

Проверка гипотезы о нормальности закона распределения

τ , ч	$\lg\sigma_{\Sigma\text{лоп}}$	$S_{\lg\sigma_{\Sigma\text{лоп}}}$	$\chi^2_{\text{расч.}}$	$\chi^2_{0,05}$	H_0
0	2,205	0,00525	1,25	2,17	+
5000	2,214	0,00520	1,26	2,17	+
10500	2,215	0,00519	1,27	2,17	+

Из данных, приведенных в табл. 1, следует, что средние значения $\lg\sigma_{\Sigma\text{лоп}}$ увеличиваются по мере наработки, что соответствует факту увеличения частоты вращения ротора.

С целью определения влияния эксплуатационной наработки на напряженное состояние рабочих лопаток турбин была выполнена проверка однородности выборок $\lg\sigma_{\Sigma\text{лоп}}$ при выбранных уровнях наработки. Проверка однородности дисперсий $S_{\lg\sigma_{\Sigma\text{лоп}}}$ выполнялась по критерию Хартля. В результате проверки однородности дисперсий было установлено, что гипотеза об однородности дисперсий $S_{\lg\sigma_{\Sigma\text{лоп}}}$ не отвергается при уровне значимости $\alpha = 0,05$ (таблица 3), то есть характеристики рассеяния величин $\lg\sigma_{\Sigma\text{лоп}}$ не зависят от наработки.

Для проверки однородности средних значений $\lg\bar{\sigma}_{\Sigma\text{лоп}}$ использовалась процедура однофакторного дисперсионного анализа.

В результате проверки (табл. 4) было установлено, что гипотеза об однородности средних значений отвергается во всех рассматриваемых случаях, то есть при различных уровнях эксплуатационной наработки средние значения $\lg\sigma_{\Sigma\text{лоп}}$ не принадлежат к одной генеральной совокупности.

На основании полученных результатов методом наименьших квадратов была построена регрессионная зависимость, позволяющая определить среднее значение $\bar{\sigma}_{\Sigma\text{лоп}}$ после наработки:

$$\bar{\sigma}_{\Sigma_{\text{лоп}}} = \bar{\sigma}_{\Sigma_{\text{лоп}0}} + 3 \cdot 10^{-4} \tau, \quad (3)$$

где $\bar{\sigma}_{\Sigma_{\text{лоп}0}}$ – среднее значение величины $\sigma_{\Sigma_{\text{лоп}}}$ при наработке $\tau = 0$ ч; τ – наработка двигателя.

Таблица 3
Проверка однородности дисперсий

Параметр	n	k	F _{max}	F _{max 0,05}	H ₀
lgσ _{Σ_{лоп}}	3	99	1,0332	1,85	+

Таблица 4
Проверка однородности средних значений

Параметр	Объем выборки	S ₁ ²	S ₂ ²	F _{расч.}	F _{0,95}	H ₀
S _{lgσ_{Σ_{лоп}}}	300	421,1	6,611	63,7	3,04	-

Выводы

В результате статистического анализа действующих в рабочих лопатках статических напряже-

ний $\sigma_{\Sigma_{\text{лоп}}}$ установлено, что нагруженность рабочих лопаток при различных уровнях эксплуатационной наработки характеризуется совокупностью выборок, распределенных в соответствии с логарифмически нормальным законом с общей дисперсией $S_{lg\sigma_{\Sigma_{\text{лоп}}}}^2$ и разными средними значениями.

Литература

1. Расчет на прочность авиационных газотурбинных двигателей / Под ред. И.А. Биргера, Н.И. Котерова. – М.: Машиностроение, 1984. – 208 с.
2. Великанова Н.П. Сравнительный анализ прочностной надежности рабочих лопаток турбин авиационных ГТД большого ресурса / Н.П. Великанова, Ф.К. Закиев // Вестник двигателестроения. – 2006. – № 3. – С. 80-83.
3. О влиянии наработки в летной эксплуатации на ухудшение параметров двухконтурных турбореактивных двигателей / А.П. Буточников, Е.Д. Нестеров, Н.М. Акимов, Э.Л. Симкин. – М.: ЦИАМ, 1976. – 11 с. (Тр. ЦИАМ №731).

Поступила в редакцию 01.06.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.Г. Мингазов, Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева, Казань, Россия.

АНАЛІЗ СТАТИЧНЕ НАВАНТАЖЕННЯ РОБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБІН АВІАЦІЙНИХ ГТД ВЕЛИКОГО РЕСУРСУ НА ОСНОВІ ІМОВІРНІСНОГО ПІДХОДУ

Н.П. Великанова, О.С. Киселёв

На основі вивчення статистичної інформації про умови експлуатації авіаційних газотурбінних двигунів для літаків цивільної авіації, застосовуючи генератор випадкових чисел, була сформована вибірка обсягом n=100 для побудови гістограми емпіричного розподілу основного чинника навантаження розглянутої конструкції робочої лопатки турбіни – частоти обертання ротора високого тиску. У рамках статистичного аналізу були вирішені наступні завдання: визначення числових характеристик для вибірок з різним рівнем напруження; визначення закону розподілу діючих статичних напруг; визначення впливу експлуатаційної напруженості на закон і числові характеристики розподілів.

Ключові слова: ресурс, двигун, лопатка, температура, турбіна, імовірнісний підхід, статична навантаженість.

ANALYSIS OF STATIC LOADING TURBINE ROTOR BLADES GAS TURBINE ENGINES MORE RESOURCES BASED PROBABILISTIC APPROACH

N.P. Velikanova, A.S. Kiselev

On the basis of statistical information on the operating conditions of aircraft gas turbine engines for civil aircraft, using a random number generator, was formed by a sample of size n = 100 for the histogram of the empirical distribution of the main factor loading of the considered design of the working turbine blades - rotor speed of high pressure. In the statistical analysis were the following objectives: determine the numerical characteristics for samples with different levels of operating time, the definition of the distribution of existing static stress, define the influence of operating time between the law and the numerical characteristics of the distributions.

Key words: resource, engine, blade, temperature, turbine, a probabilistic approach, the static loading.

Великанова Нина Петровна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры авиационных двигателей и энергетических установок Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева «КАИ», Казань, Россия, e-mail: adeu@adeu.kstu-kai.ru.

Киселев Алексей Сергеевич – аспирант кафедры авиационных двигателей и энергетических установок Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева «КАИ», Казань, Россия, e-mail: kis_alex85@mail.ru.