

УДК 629.7.03: 539.4

Н.П. ВЕЛИКАНОВА¹, П.Г. ВЕЛИКАНОВ¹, А.С. КИСЕЛЕВ²¹ Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, Казань, Россия² ОАО КПП «Авиамотор», Казань, Россия

ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНЫХ УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ДИСКОВ ТУРБИН АВИАЦИОННЫХ ГТД

На основе анализа атмосферных условий эксплуатации и факторов, определяющих нагружение дисков турбин авиационных ГТД для гражданской авиации была выполнена оценка малоциклового усталости в опасном сечении дисков – отверстиях под стяжные болты. В процессе исследования были проведены многовариантные расчеты диска на прочность, на основе результатов которых построены математические модели, отражающие изменение нагруженности дисков в зависимости от атмосферных условий эксплуатации. Для статистического анализа нагруженности дисков турбины был разработан специальный алгоритм, позволяющий сформировать выборки действующих в опасном сечении дисков напряжений в разные периоды эксплуатации. Для оценки долговечности по параметру малоциклового усталости (МЦУ) использовались экспериментальные данные о МЦУ материала дисков – жаропрочного сплава ЭИ698-ВД на никелевой основе.

Ключевые слова: диск, турбина, газотурбинный двигатель, алгоритм, параметры распределений, гистограмма, долговечность, условия эксплуатации.

Введение

Основными видами нагрузок для дисков турбины авиационных ГТД являются центробежные нагрузки и внутренние усилия из-за неравномерного нагрева, обусловленные частотой вращения ротора и температурой газа в турбине.

Из теории воздушно-реактивных двигателей известно, что указанные выше параметры двигателя в общем случае связаны функциональной зависимостью с внешними атмосферными условиями эксплуатации – температурой t_n и давлением p_n атмосферного воздуха:

$$n = f_1(t_n, p_n); t_6^* = f_2(t_n, p_n), \quad (1)$$

где n – частота вращения ротора турбины, а t_6^* – температура газа за турбиной.

Функции, входящие в (1), определены с использованием метода малых отклонений [1] по результатам газодинамического расчета турбин. Эти функции представляют собой аппроксимирующие формулы для оценки изменения частоты вращения ротора и температуры газа за турбиной при изменении параметров t_n и p_n на входе в двигатель. Из вышеизложенного следует, что в каждом полете при разных значениях температуры и давления атмосферного воздуха нагруженность диска турбины будет различной; следовательно и долговечность, и исчерпание ресурса будут различными. Поэтому учет атмосферных условий эксплуатации двигате-

лей имеет важное значение при оценке индивидуального ресурса дисков турбин, а, иногда, и двигателя в целом.

Объектом данного исследования является диск турбины авиационного ГТД семейства НК-8 – двигателя НК-86 для гражданской авиации.

1. Анализ атмосферных условий эксплуатации

Для оценки рассеяния атмосферных условий эксплуатации двигателя НК-86, эксплуатирующегося на российских аэробусах Ил-86, были подвергнуты статистической обработке данные по 3570 полетам самолетов Ил-86 в 1987 году и 675 полетам Ил-86 в 2005 году в разных аэропортах страны. Период эксплуатации 1987 года соответствует началу эксплуатации аэробусов Ил-86 в СССР, а 2005 году соответствует эксплуатации аэробусов Ил-86 в современных экономических условиях. На рис. 1 и 2 приведены гистограммы распределения t_n при выполнении взлета самолетами Ил-86 в 1987 и 2005 гг. соответственно. Из сравнения гистограмм, представленных на рис. 1 следует, что в начальном периоде эксплуатации аэробусов Ил-86 в разных аэропортах страны температура наружного воздуха находилась в интервале от -30°C до $+40^\circ\text{C}$, что было обусловлено сезонностью эксплуатации. В современных условиях (рис. 2) полеты совершаются в основном в страны с жарким климатом – курорты

Средиземноморья, Северной Африки и Юго-Восточной Азии; интервал рассеяния температуры атмосферного воздуха составляет от -20°C до $+60^{\circ}\text{C}$.

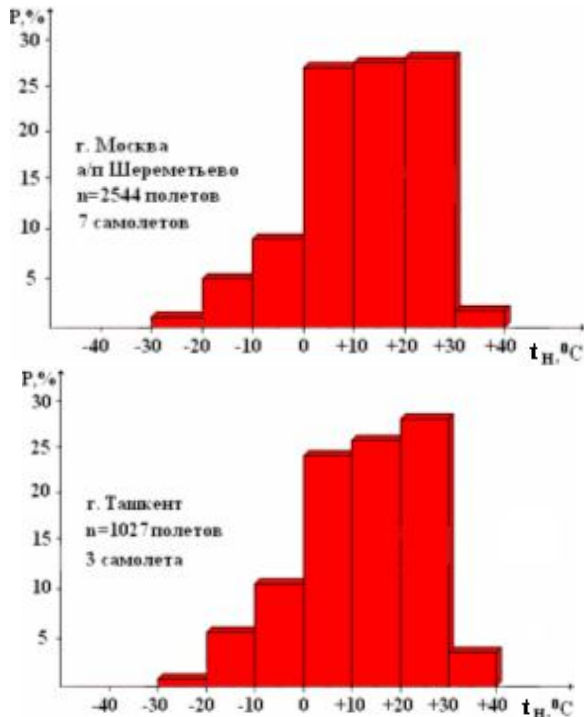


Рис. 1. Гистограммы распределений температуры t_n атмосферного воздуха при выполнении взлета самолетами Ил-86 (данные 1987 г. по 10 самолетам)

Главное отличие между рассматриваемыми периодами эксплуатации самолетов Ил-86 состоит в том, что в 1987 году число полетов при температурах наружного воздуха выше $+20^{\circ}\text{C}$ составляло 30%, а в 2005 – 66%.

Так как с увеличением температуры атмосферного воздуха увеличиваются значения частоты вращения ротора и температуры газа перед турбиной (рис. 3), то возрастает и нагруженность дисков турбин.

Во введении отмечено, что параметры работы двигателей, определяющие напряженное и тепловое состояние деталей турбины, в общем случае зависят от температуры и давления атмосферного воздуха.

Для двигателя НК-86 частота вращения ротора высокого давления и температура газа перед турбиной в соответствии с их законом регулирования определяется работой следующих регуляторов: ЭРО (электронный регулятор оборотов), АДТ (агрегат дозирования топлива), РСТ (регулятор среднемассовой температуры) и G_{max} (регулятор максимального расхода топлива). Причем работа первых трех регуляторов не зависит от давления наружного воздуха при взлете самолетов Ил-86, а четвертый регулятор начинает работать только при значении давления атмосферного воздуха, превышающего

800 мм. рт. ст. Случаи, когда атмосферное давление превышало это значение, были в практике эксплуатации двигателя НК-86, но поскольку такие случаи являются крайне редкими, то работой этого регулятора, а, следовательно и влиянием атмосферного давления на параметры работы двигателей можно пренебречь. Таким образом, частота вращения ротора высокого давления и температура газа перед турбиной для двигателя НК-86 зависят только от температуры атмосферного воздуха [2].

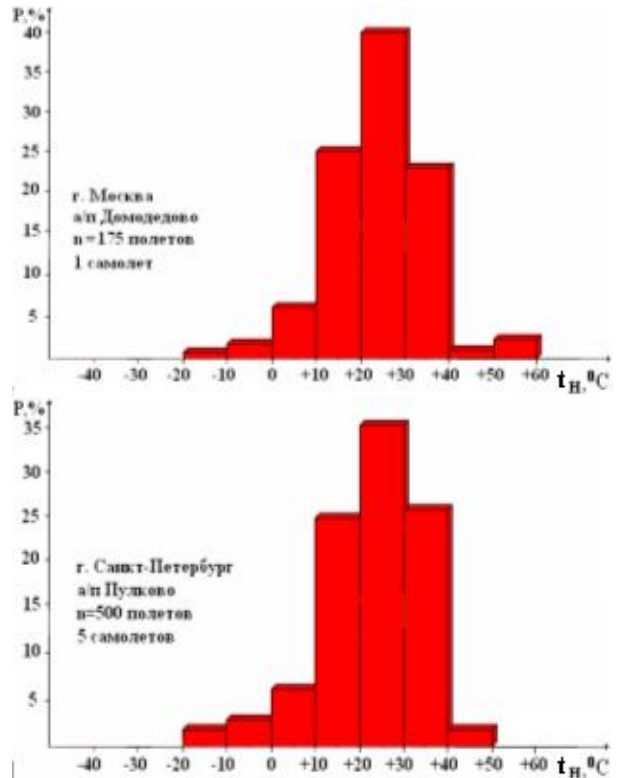


Рис. 2 Гистограммы распределений температуры t_n атмосферного воздуха при выполнении взлета самолетами Ил-86 (данные 2005 г. по 6 самолетам)

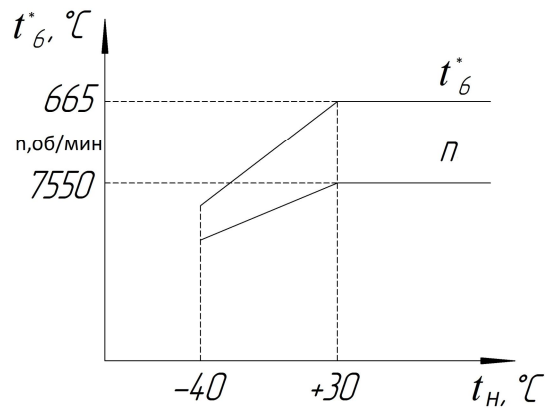


Рис. 3. График изменения частоты вращения ротора ВД и температуры газа за турбиной двигателей в зависимости от температуры атмосферного воздуха

2. Оценка напряженно-деформированного состояния диска турбины

Анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) диска турбины – наиболее нагруженного диска третьей ступени ротора низкого давления – выполнялся на основе теории пластин и оболочек с использованием МКЭ. Проведенным анализом НДС диска турбины установлено, что максимальные упруго-пластические напряжения $\sigma_{\text{экр.д}} = \sigma_i$ (по Мизесу) имеют место в зоне крепежных отверстий в ступичной части диска. В этой зоне возникают упруго-пластические деформации, в процессе эксплуатации происходят знакопеременное циклическое деформирование и накопление пластических деформаций, что подтверждает реализацию в опасном сечении диска малоциклового нагружения.

На рис. 4 представлена геометрия диска, его конечноэлементная модель и поле температур. Результаты расчета с использованием комплекса ANSYS также приведены на рис. 4.

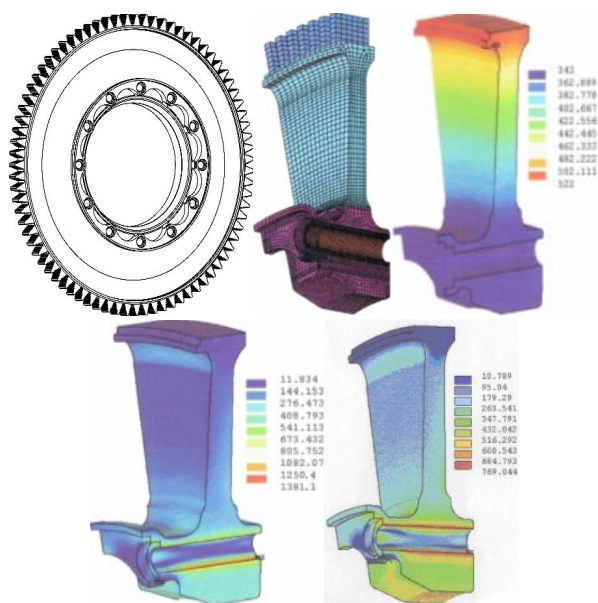


Рис. 4. Расчет в комплексе ANSYS (слева направо): геометрическая модель, расчетная сетка, распределение температур, интенсивность напряжений диска 3-й ступени турбины НК-86 (упругий расчет); интенсивность напряжений диска 3-й ступени турбины НК-86 (упругопластический расчет)

Температурное поле диска принималось по данным термометрирования натурального двигателя. Механические и физические свойства материала диска сплава ЭИ698-ВД приняты по справочным данным ВИАМ [3]. Достоверность результатов расчетного анализа нагруженности дисков турбины подтверждается данными металлургического исследования дисков турбин семейства НК-8 после экс-

плуатации и длительных стендовых испытаний – зона поврежденности, обусловленная пластическим деформированием соответствует месту действия максимальных расчетных упруго-пластических напряжений (рис. 5); в микрорельефе поверхности разрушения выявлены полосы (бороздки) пластической деформации, характерные для МЦУ [4].

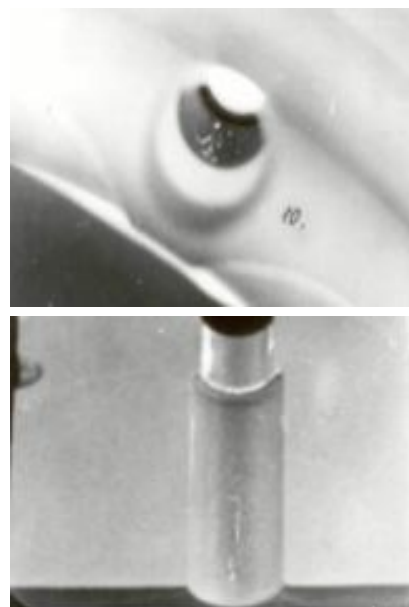


Рис. 5. Вид свечения индикатора при контроле ЛЮМ-А повреждений в отверстия под стяжные болты в ступичной части дисков турбин

Для анализа закономерностей изменения напряжений дисков турбин в зависимости от параметров работы двигателей предложены упрощенные модели, построенные на базе многовариантных расчетов НДС дисков при различных вариациях условий нагружения при работе двигателя на максимальном (взлетном) режиме.

Модели теплонапряженного состояния дисков турбины имеют вид:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{экр.д}} &= \Phi_1(n_2, \Delta t) = A_1 n_2 + B_1 \Delta t; \\ \Delta t &= \Phi_2(t_6^*) = B_2 t_6^* + C_2, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{экр.д}} = \sigma_i$ – максимальное действующее напряжение в опасном сечении диска от центробежных сил и температурного перепада Δt между ободом и ступицей, определенное в соответствии с критерием Мизеса, МПа; n – частота вращения ротора турбины, об/мин; t_6^* – температура газа за турбиной, °С; A_1, B_1, B_2, C_2 – константы.

Для статистического анализа действующих в диске турбины напряжений $\sigma_{\text{экр.д}} = \sigma_i$ в различные периоды эксплуатации был разработан приведенный ниже алгоритм:

1. Из общего числа полетов самолетов Ил-86 в 1987 и 2005 годах с использованием генератора случайных чисел были выбраны сто полетов в указан-

ные периоды с соответствующими им атмосферными условиями;

2. По зависимостям (1) определялись для ста полетов значения параметров работы двигателя – частота вращения ротора турбины и температура газов за турбиной;

3. По моделям (2) были сформированы две выборки объемом в сто значений величин $\sigma_{\text{экв.д}} = \sigma_1$ для условий эксплуатации в 1987 и 2005 годах.

Статистический анализ выборок действующих в диске напряжений в разные периоды эксплуатации показал, что статическое нагружение дисков турбин характеризуется совокупностью нормально распределенных выборок с общей дисперсией и разными средними значениями в зависимости от периода эксплуатации. На рис. 6 приведены графики распределения эквивалентных напряжений в диске турбины в разные периоды эксплуатации. Вертикальная ось на рис. 6 U_p – квантиль нормального распределения. Из результатов статистического анализа (рис. 6) следует, что среднее значение величин $\sigma_{\text{экв.д}}$, соответствующие $U_p=0$, для двух периодов эксплуатации отличаются на 2,5%; большее значение соответствует периоду эксплуатации 2005 года с большим числом полетов при высоких температурах атмосферного воздуха.

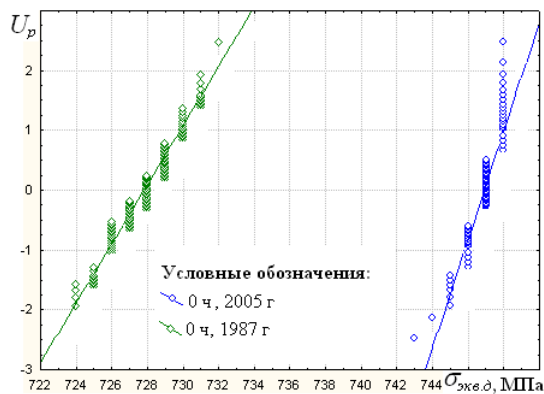


Рис. 6. Графики распределения эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{экв.д}}$

3. Оценка долговечности диска турбины

Каждый полет самолета индивидуален не только по атмосферным условиям, по профилю полета, но и по числу циклов нагружения. В качестве единицы циклического нагружения используется полетный цикл двигателя – совокупность режимов работы двигателя от запуска до останова, включающего работу двигателя на всех режимах. Как было показано выше, основным видом повреждения рассматриваемой конструкции диска турбины является трещина малоциклового усталости его материала в отверстиях под стяжные болты. Поэтому для оценки циклической долговечности по параметру МЦУ не-

обходимо использовать расчетные методы (например, с использованием зависимости С. Мэнсона) или экспериментальные данные о МЦУ материала диска при соответствующем уровне действующих напряжений и температуры [6, 7]. В данной работе использовались экспериментальные данные о МЦУ материала диска – сплава ЭИ698-ВД [8]. Испытания образцов были проведены при нескольких уровнях действующих напряжений и при двух уровнях температур - 20°C и 400°C. На основании результатов экспериментального исследования получены кривые МЦУ сплава ЭИ698-ВД для различных уровней вероятности разрушения. Для 50% вероятности разрушения уравнения кривых МЦУ указанного сплава имеют вид:

$$\begin{aligned} \lg N_p &= - 7,122 \lg \sigma + 25,557 \text{ при } t=20^\circ\text{C}, \\ \lg N_p &= - 9,430 \lg \sigma + 31,640 \text{ при } t=400^\circ\text{C}. \end{aligned} \quad (3)$$

Полученное уравнение (3) использовалось при оценке долговечности диска рассматриваемой конструкции.

Результаты оценки долговечности диска турбины двигателя НК-86 в разные периоды эксплуатации приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты оценки долговечности диска турбины двигателя НК-86

Период эксплуатации	Среднее значение напряжений $\sigma_{\text{экв.д}}$, МПа	Среднее значение долговечности N, цикл
1987	728	4569
2005	747	3800

Выводы

В процессе выполнения данной работы были получены следующие результаты:

1. Сравнение действующих в опасном сечении диска статических напряжений $\sigma_{\text{экв.д}}$ в разные периоды эксплуатации показало, что действующие напряжения увеличились на 2,5% в период эксплуатации 2005 года.

2. Циклическая долговечность диска уменьшается на 20% при увеличении числа полетов в условиях высоких температур атмосферного воздуха на входе в двигатель. Следовательно, истощение ресурса диска идет более интенсивно в этих условиях.

3. Полученные значения имеют важное значение как для разработчиков авиационных двигателей, так и для эксплуатирующих организаций.

Литература

1. Черкез, А.Я. Инженерные расчеты газотурбинных двигателей методом малых отклонений [Текст] / А.Я. Черкез. – М.: Машиностроение, 1975. – 380 с.

2. Киселёв, А.С. Прогнозирование ресурса рабочих лопаток турбин авиационных ГТД [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05, 05.07.03 / Киселев Алексей Сергеевич. – Казань, 2011. -140 с.

3. Справочник по авиационным материалам [Текст] /под ред. А.Т. Туманова. – М.: Машиностроение, 1966. – Т. 3: Коррозионные и жаропрочные стали и сплавы. – 630 с.

4. Великанова, Н.П. Расчетно-экспериментальное исследование дефектов малоциклового усталости дисков турбин авиационных ГТД большого ресурса [Текст] / Н.П. Великанова, Л.Р. Ботвина, Г.П. Окатова // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2008. – № 4. – С. 34-37.

5. Великанова, Н.П. Прогнозирование долговечности дисков турбин авиационных ГТД на основе вероятностного подхода [Текст]: дис. ... канд.

техн. наук / Великанова Нина Петровна. – М., 1994. – 255 с.

6. Великанова, Н.П. Прогнозирование прочности и долговечности дисков турбомашин на основе вероятностного подхода [Текст] / Н.П. Великанова, П.Г. Великанов // Авиационно-космическая техника и технология. - 2002.- № 30. - С. 80-82.

7. Демьянушко, И.В. Влияние эксплуатационных факторов на долговечность роторных деталей тепловых двигателей [Текст] / И.В. Демьянушко, Н.П. Великанова // Машиностроение и инженерное образование. - 2011. - № 4. - С. 51-55.

8. Великанова, Н.П. Статистический анализ результатов экспериментального исследования сопротивления малоциклового усталости жаропрочного сплава ЭИ698-ВД [Текст] / Н.П. Великанова // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2009. – № 4. – С. 25-28.

Поступила в редакцию 1.06.2013, рассмотрена на редколлегии 14.06.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой авиационных двигателей и энергетических установок Б.Г. Мингазов, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, Казань.

ВПЛИВ АТМОСФЕРНИХ УМОВ НА ДОВГОТРИВАЛІСТЬ ДИСКІВ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ

Н.П. Великанова, П.Г. Великанов, О.С. Кисельов

На основі аналізу атмосферних умов експлуатації і факторів, які визначають навантаження дисків турбін авіаційних ГТД для цивільної авіації було виконано оцінку малоциклової втоми у небезпечному перерізі дисків – отворах під стяжні болти. В процесі дослідження було проведено багатоваріантні розрахунки диска на міцність, на основі результатів яких сформовано математичні моделі, що відбивають зміну навантаженості дисків у залежності від атмосферних умов експлуатації. Для статистичного аналізу навантаженості дисків турбіни було розроблено спеціальний алгоритм, який дозволяє сформулювати вибірки напружень, що діють у небезпечному перерізі дисків у різні періоди експлуатації. Для оцінки довго тривалості за параметром малоциклової втоми (МЦВ) використано експериментальні дані про МЦВ матеріалу дисків – жароміцного сплаву ЭИ698-ВД на нікелевій основі.

Ключові слова: диск, турбіна, газотурбінний двигун, алгоритм, параметри розподілів, гістограма, довготривалість, умови експлуатації.

EFFECT OF ATMOSPHERIC CONDITIONS FOR USE DURABILITY OF THE TURBINE DISK GAS TURBINE ENGINES

N.P. Velikanova, P.G. Velikanov, A.S. Kiselev

Based on the analysis of atmospheric conditions and the factors determining the loading drives turbines gas turbine engines for the civil aviation assessment was made of low-cycle fatigue in a dangerous section of the disc - the holes for the locking bolts. The study was carried out multiple calculations on the strength of the disc, based on the results that build mathematical models to reflect the change of loading discs, depending on weather condition operation. For the statistical analysis of loading drives turbines developed a special algorithm that allows to formulate a sampling of operating in a dangerous section of the drive voltage to the different periods of operation. To evaluate the durability of the parameter of low-cycle fatigue (LCF) used experimental data on the disks LCF material - heat-resistant alloy EI698-VD nickel-based.

Key words: disc, turbine, gas turbine engine algorithm, the parameters of distributions, histogram, durability, operating conditions.

Великанова Нина Петровна – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры авиационных двигателей и энергетических установок Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева, Казань, Россия, e-mail: adeu@adeu.kstu-kai.ru.

Великанов Петр Геннадьевич – канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры авиационных двигателей и энергетических установок Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева, Казань, Россия, e-mail: pvelikanov@mail.ru.

Киселев Алексей Сергеевич – канд. техн. наук, начальник бригады реверсов, оболочек и обвязки ОАО КПП «Авиамотор», Казань, Россия, e-mail: kis_alex85@mail.ru.