

УДК 621.452.3:669.018.44:539.431

**А. А. БРУНАК, Д. Ф. СИМБИРСКИЙ**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## **К ВОПРОСУ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИЙ НА ЦИКЛИЧЕСКУЮ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ ГТД**

*Выполнен анализ известных методов расчета циклической долговечности деталей авиационных ГТД в условиях двухчастотного (малоциклового и вибрационного) нагружения, с учетом наличия их экспериментальных подтверждений и возможностей практической реализации. С использованием наиболее эффективных на качественном уровне проведены расчеты долговечности рабочей лопатки турбины ТВаД. По результатам расчетов предлагаются рекомендации по использованию и практическому применению выделенных методов, которые, по нашему мнению, наиболее полно отвечают поставленным задачам в части долговечности деталей АГТД.*

**Ключевые слова:** модели долговечности, двухчастотное нагружение, низкочастотное нагружение, наложенная вибрация, амплитуда вибраций и напряжений, виброскорость.

### **1. Постановка задач исследования**

Одним из наиболее актуальных вопросов при создании и эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей (АГТД) является прогнозирование, установление, учет выработки и продление назначенных ресурсов основных деталей двигателей, работающих в условиях комплексного нагружения. **Комплексность нагружения** заключается в чередовании за время полетных циклов двигателя основных повреждающих видов его нагружения: **длительных статических** при повышенной температуре и **циклических: повторно-статических** (ПСН), **мало- и многоцикловых** (МЦН и вибрационных). При указанных нагружениях проявляются такие свойства материала как ползучесть и сопротивление повторно-статической, малоцикловой и многоцикловой усталости (ПСУ, МЦУ и МнЦУ-вибрации соответственно).

Существенное взаимное влияние видов нагружения на долговечность деталей двигателя неоднократно подчеркивалось в технической литературе, например, в монографии [1]. Однако, несмотря на значительный практический интерес, в отраслевых нормативных материалах отсутствуют нормированные методики и рекомендации по проблеме комплексного нагружения в силу ее очевидной сложности и недостаточной изученности.

Поэтому многие исследования посвящены изучению влияния на долговечность деталей парных корреляций перечисленных выше составляющих комплексного нагружения. В первую очередь, это исследование влияния ПСН и выдержек в цикле при максимальных температурах и напряжениях на на-

копление повреждений и пределы МЦУ и ПСУ. Следующим по важности является учет влияния МнЦУ-вибрации на МЦУ и ПСУ материала деталей, что в научно-технической литературе называется **двухчастотным нагружением**, которому посвящена достаточно обширная библиография.

Как констатируется в обстоятельном обзоре [1], двухчастотное нагружение осуществляется с частотами от сотых и тысячных долей (ПСН или МЦН) до тысяч герц (МнЦУ или вибрации). Исследователями двухчастотного нагружения применяются подходы, основанные на гипотезах линейного суммирования повреждений, спектрального суммирования, энергетических представлений, эмпирических зависимостей и пр.

В связи с актуальностью изложенного выше, нами были поставлены следующие задачи:

1. Выполнить анализ известных методов прогнозирования циклической долговечности деталей АГТД при двухчастотном нагружении с акцентом на уровень совпадения расчетных результатов с экспериментальными данными с целью выделения наиболее предпочтительных для практического применения.

2. На качественном (приближенном) уровне реализовать выделенные методы для близких реальным условиям двухчастотного нагружения деталей АГТД, в частности, рабочих лопаток турбин.

### **2. Методы расчета циклической долговечности деталей АГТД при двухчастотном нагружении**

Из числа известных методов прогнозирования циклической долговечности деталей АГТД, рабо-

тающих в условиях двухчастотного нагружения, нами было отдано предпочтение двум основным подходам, предложенным с позиций опыта создания современных АГТД мирового уровня для транспортно-авиации. В частности:

2.1. Интенсивные исследования указанной проблемы, начиная со середины 1970х годов, проводились ведущими учеными-специалистами НПО «Труд» (Самара) – В.И. Цейтлиным, Н.Д. Кузнецовым, Д.Г. Федорченко, Ю.М. Ануровым, М.Е. Колотниковым и другими [2-9]. В качестве одного из важных для практики итогов их работы можно привести следующую распространенную зависимость [6, 9, 1]:

$$N_{\text{мцц}+\text{в}} = C \left( \frac{A^* - \sigma_{\text{а.в.}}}{A^* \sigma_{\text{а.мцц}}} \right)^{\beta}, \quad (1)$$

где  $N_{\text{мцц}+\text{в}}$  – число циклов МЦН до разрушения с учетом наложенного вибрационного нагружения;

$\sigma_{\text{а.в.}}$  – амплитуда вибрационного напряжения;

$\sigma_{\text{а.мцц}}$  – амплитуда напряжения МЦУ;

$M$  и  $C$  – параметры общепринятой модели МЦУ

$$\sigma_{\text{а.мцц}}^M N = C;$$

$A^*$  – предел выносливости материала,

$\beta$  – некоторый коэффициент, который в первом приближении можно принять равным 1.

Уравнение (1) дает удовлетворительное совпадение расчетных значений долговечности с экспериментальными в широком диапазоне частот составляющих циклического двухчастотного нагружения.

2.2. На ГП «Ивченко-Прогресс» для расчета долговечности деталей АГТД в условиях их двухчастотного нагружения в работах Ф. М. Муравченко, В. Н. Колесникова, А. В. Шереметьева [10, 11, 12] и других было показано, что оценка влияния вибрационных напряжений на малоцикловую долговечность деталей может с приемлемой точностью производиться по рекомендуемой в монографии [13] формуле:

$$N_{\text{мцц}+\text{в}} = \frac{N_{\text{мцц}}}{\chi}, \quad (2)$$

где  $N_{\text{мцц}}$  – число циклов до разрушения от действия только МЦУ;

$\chi$  – коэффициент влияния вибраций,  $\chi \geq 1$ .

Величина  $\chi$  определяется по формуле:

$$\chi = \left( \frac{f_{\text{в}}}{f_{\text{мцц}}} \right)^{\nu} \frac{\varepsilon_{\text{а.в.}}}{\varepsilon_{\text{а.мцц}}}. \quad (3)$$

где  $f_{\text{в}}$  и  $f_{\text{мцц}}$  – частоты приложения вибрационной и малоциклового нагружений;

$\varepsilon_{\text{а.в.}}$  и  $\varepsilon_{\text{а.мцц}}$  – амплитуды деформаций вибрационной и малоциклового нагружений;

$\nu$  – коэффициент, зависящий от вида материала.

Был выполнен анализ значений коэффициента  $\chi$  при реальных соотношениях величин и частот действующих малоцикловых нагрузок в цикле и накладывающихся на них вибрационных напряжений, характерных для основных деталей ряда АГТД, созданных на ГП «Ивченко-Прогресс» и надежно работающих в серийной эксплуатации. Он показал, что значения коэффициента  $\chi$ , как правило, находятся в пределах  $\chi \leq 2,5$ . Приобретенный в дальнейшем опыт показал, что, в целом, уменьшение в 2 раза расчетного циклического ресурса основных деталей, полученного с учетом разброса прочностных характеристик их материалов, на практике оказывается достаточным для учета максимального влияния вибрационных напряжений двигателя-прототипа.

Кроме того, с использованием формул (2) и (3) был предложен и успешно используется на ГП «Ивченко-Прогресс» метод установления циклических ресурсов деталей вновь создаваемых двигателей на основании опыта создания, доводки, эксплуатации и определения долговечности соответствующих деталей двигателя-прототипа [11,12].

2.3. Таким образом, для предпочтительного использования на практике нами выделены методы учета двухчастотного нагружения деталей АГТД, смысл которых отражен в формулах (1)-(3).

При этом необходимо отметить, что на этапе завершающих испытаний и доводки АГТД величины, входящие в формулы (1)-(3), могут быть определены общепринятыми методами: параметры МЦН – путем расчетного определения термонапряженного состояния деталей по заданному обобщенному полетному циклу (ОПЦ) двигателя, а параметры вибронгружения – экспериментальным путем прямой поверхностной тензометрии деталей.

В то же время на этапе проектирования выполнение расчетов циклической долговечности деталей по формулам (1) и (3) представляет более сложную задачу, так как при этом параметры вибрационного нагружения приходится определять или приближенно оценивать расчетным путем.

В качестве примера возможного подхода ко второму варианту решения проблемы рассмотрим следующую задачу.

### 3. Расчет долговечности рабочей лопатки турбины АГТД при двухчастотном нагружении

#### 3.1. Постановка задачи

В настоящем разделе приводятся результаты приближенного расчетного применения выделенных в разделе 2 методов на этапе проектирования АГТД, когда отсутствуют экспериментальные данные по вибрационному нагружению деталей в реальных условиях на режимах ОПЦ.

В качестве объекта расчетов нами выбрана рабочая лопатка 1 ступени турбины типового турбовального двигателя (ТВаД), которая выполнена из жаропрочного сплава ЖС-6К. Основные параметры лопатки и условия ее работы приводятся ниже. Будем полагать, что для приближенных решений проблемы допустимо предположение, что максимальный уровень вибраций возникает при колебаниях лопатки по первой изгибной форме с частотой  $f_B$ .

##### 3.1.1. Параметры работы двигателя:

- частота вращения ротора турбокомпрессора –  $n=40000$  об/мин = 667 об/с (будет использована для уточнения частоты собственных колебаний лопатки по первой изгибной форме);

- длительность работы двигателя по эквивалентному циклу  $t=10$  мин (будет использована для вычисления  $f_{MЦУ}$ ).

##### 3.1.2. Параметры вибрационного нагружения лопатки.

Предполагаем, что колебания лопатки  $x(t)$  в области ее критической точки, обычно располагаемой вблизи корневого сечения, происходят по закону:

$$x(t) = x_0 \cos(2\pi f_B t). \quad (4)$$

Тогда закон изменения виброскорости колебаний лопатки имеет вид:

$$\dot{x} = x_0 \cdot 2\pi f_B \sin(2\pi f_B t). \quad (5)$$

По существующим отраслевым стандартам виброскорость колебаний характеризуется максимальным  $\dot{x}_{max}$  и среднеквадратичным  $\dot{x}_{скз}$  значениями:

$$\dot{x}_{max} = 2\pi f_B x_0, \quad (6)$$

$$\dot{x}_{скз} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \dot{x}^2(t) dt} = \frac{\dot{x}_{max}}{\sqrt{2}}, \quad (7)$$

где  $T$  – это период колебаний,  $t$  – время.

Таким образом, зная частоту  $f_B$  колебаний и нормированные значения показателей виброскорости, используя зависимости (6) и (7), можно определить величины соответствующие амплитудам колебания  $x_0$ . Далее, рассматривая модель лопатки в виде консольной балки с соответствующими форме

лопатки размерами и моментом инерции, можно вычислить амплитуды деформаций  $\varepsilon_{a.v.}$  или напряжений  $\sigma_{a.v.}$  для подстановки в зависимости (3) и (1).

##### 3.1.3. Порядок расчета долговечности рабочей лопатки при двухчастотном нагружении

1) задаться исходными данными по лопатке и условиями ее нагружения в составе двигателя, включая сведения о модели газозвоздушного тракта и ОПЦ двигателя;

2) определить или задать приближенно температуру и максимальные эквивалентные напряжения в критической точке лопатки и характер их изменения в соответствии с ОПЦ двигателя, а далее определить требуемые для формул (1) и (3) параметры напряженно-деформированного состояния (НДС) в критической точке лопатки; иными словами – параметры МЦН;

3) в соответствии с изложенным в подразделе 3.1.2, определить аналогичные п.2 величины параметров вибрационного нагружения лопатки, желательно в области, максимально приближенной к ее критической точке;

4) используя формулы (1) и (3), получить решение задачи двухчастотного нагружения.

#### 3.2. Исходные данные для расчетов долговечности лопатки

##### 3.2.1. Параметры формы лопатки

- длина  $h_{лоп}=22$  мм;
- радиус закрепления  $R=93$  мм;
- хорда  $l=15$  мм;
- средняя толщина  $b=3$  мм;
- частота собственных колебаний по 1й изгибной форме  $f_c=6000$  Гц.

##### 3.2.2. Температура в области критической точки лопатки $T_{лоп}=800^\circ\text{C}$ .

##### 3.2.3. Характеристики сплава ЖС-6К [14,15]

- модуль упругости  $E_{20^\circ\text{C}}=20000$  кГ/мм<sup>2</sup>,  $E_{800^\circ\text{C}}=15100$  кГ/мм<sup>2</sup> (используется для уточнения частоты первой изгибной формы колебаний лопатки в зависимости от ее температуры  $T_{лоп}$ );
- диаграмма  $\sigma$ - $\varepsilon$  при рабочей температуре  $800^\circ\text{C}$ ;
- предел выносливости  $\sigma_{-1}=160$  МПа.

#### 3.3. Результаты расчетов

Порядок выполнения расчетов выбранной рабочей лопатки с использованием моделей (1)-(3) приведен выше в разделе 3.1.3.

С целью анализа влияния уровня вибраций расчеты выполнены для двух значений виброскорости: допустимого и предельного, равных 30 мм/с и 45 мм/с (согласно ГОСТ ИСО 10816-1-97) соответственно.

В качестве исходных параметров МЦН выбраны 3 уровня амплитуд напряжений  $\sigma_{a,мцу}$ , равных 220, 240 и 265 МПа. В пределах указанных напряжений циклическая долговечность материала лопатки оказывается приемлемой для работы АГТД.

Результаты расчетов приведены в таблице 1.

### 3.4. Выводы к разделу 3

Таким образом, по результатам выполненных приближенных расчетов долговечности рабочей лопатки турбины ТВаД в условиях двухчастотного нагружения получено подтверждение возможностей практической реализации и работоспособности выделенных двух методов решения поставленной проблемы.

Полученные результаты влияния вибрации на МЦУ (табл. 1), выраженные в величинах  $\chi$ , находятся в пределах подтвержденных практикой значений  $\chi \leq 2 \dots 2,5$ . При этом оба метода показали адекватную реакцию на изменение входных величин и весьма близкие с учетом разброса данных конечные результаты.

### Выводы

По результатам выполненных исследований проблемы долговечности деталей АГТД в условиях двухчастотного нагружения можно констатировать следующее:

1) при анализе известных методов решения проблемы, как наиболее обоснованные и подтвержденные практикой создания и эксплуатации АГТД мирового уровня, выделены два метода, развитые коллективами исследователей НП «Труд» (Самара) и ГП «Ивченко-Прогресс» (Запорожье);

2) при приближенных расчетах долговечности конкретной рабочей лопатки ТВаД оба указанных метода показали устойчивую работоспособность, адекватную чувствительность к изменениям исходных данных и достаточно близкие результаты;

3) также не вызывает сомнения необходимость их дальнейшего совершенствования и развития с подключением известных перспективных подходов и методов решения проблемы двухчастотного нагружения деталей АГТД.

### Литература

1. Колотников, М. Е. *Предельное состояние и прогнозирование ресурса ГТД в условиях многокомпонентного нагружения [Текст] / М. Е. Колотников ; под ред. В. М. Чепкина. – Рыбинск : Изд-во РГАТА, 2003. – 136 с.*
2. Цейтлин, В. И. *Оценка прочности деталей в условиях многокомпонентного нагружения [Текст] / В. И. Цейтлин // Проектирование и доводка авиационных ГТД. – Куйбышев, 1974. – Вып. 67. – 120 с.*
3. Кузнецов, Н. Д. *Эквивалентные испытания газотурбинных двигателей [Текст] / Н. Д. Кузнецов, В. И. Цейтлин. – М. : Машиностроение, 1976. – 216 с.*
4. Цейтлин, В. И. *К вопросу об оценке прочности в условиях многокомпонентного нагружения [Текст] / В. И. Цейтлин // Проблемы прочности. – 1976. – № 6. – С. 10-21.*
5. Цейтлин, В. И. *Оценка долговечности деталей, работающих в условиях двухчастотного нагружения [Текст] / В. И. Цейтлин, Д. Г. Федорченко // Малоцикловая усталость элементов конструкций : тез. докл. III Всесоюз. симпозиума, сент. 1979 г. – Вильнюс, 1979. – С. 79-81.*
6. Цейтлин, В. И. *Оценка долговечности деталей при совместном действии повторно-статического и вибрационного нагружения [Текст] / В. И. Цейтлин, Д. Г. Федорченко // Проблемы прочности. – 1980. – № 1. – С. 14-17.*
7. Цейтлин, В. И. *Оценка циклической долговечности деталей, работающих при сложных программах нагружения [Текст] / В. И. Цейтлин, Д. Г. Федорченко // Проблемы прочности. – 1983. – № 2. – С. 13-19.*

Таблица 1

Результаты расчетов долговечности рабочей лопатки ТВаД при двухчастотном нагружении

Уровни $\dot{x}_{скз}$ виброскорости, мм/с		Допустимый $\dot{x}_{скз} = 30$			Предельный $\dot{x}_{скз} = 45$			
Амплитуда напряжения МЦУ, МПа		220	240	265	220	240	265	
Модели двухчастотного нагружения	Долговечность, циклов	Результаты расчета, циклов						
1	Без учета вибраций	$N_{мцу}$	202208	13673	923	202208	13673	923
		$\chi$	1	1	1	1	1	1
2	Модель (1)	$N_{мцу+в}$	82905	5743	443	74817	5196	489
		$\chi$	0,41	0,42	0,48	0,37	0,38	0,53
3	Модель (3)	$N_{мцу+в}$	86949	6016	415	82905	5606	388
		$\chi$	0,43	0,44	0,45	0,41	0,41	0,42

8. Колотников, М. Е. Оценка запаса прочности лопаток турбины при действии термоциклических и вибрационных нагрузок [Текст] / М. Е. Колотников, К. Г. Святых, В. А. Соляников // Проблемы прочности. – 1990. – № 8. – С. 97-100.

9. Ануров, Ю. М. Основы обеспечения прочностной надежности авиационных двигателей и силовых установок [Текст] / Ю. М. Ануров, Д. Г. Федорченко. – СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2004. – 390 с.

10. Муравченко, Ф. М. Учет влияния вибрационных напряжений на циклическую долговечность деталей авиационных ГТД [Текст] / Ф. М. Муравченко, В. И. Колесников, А. В. Шереметьев // Авиационно-космическая техника и технология : сборник научных трудов Гос. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 5 (тематич.). – Х., 1998. – С. 151-254.

11. Колесников, В. И. Использование методов численного и физического моделирования для установления циклических ресурсов основных деталей авиационных ГТД [Текст] / В. И. Колесников,

А. В. Шереметьев // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования : Тр. Межд. науч.-тех. конф. – Х., 1997. – С. 512-516.

12. Муравченко, Ф. М. Использование конструктивного и физического подобия для установления ресурсов двигателя [Текст] / Ф. М. Муравченко, А. В. Шереметьев, Д. Ф. Симбирский // Авиационно-космическая техника и технология : сб. научн. тр. – Х. : Гос. аэрокосмич. ун-т «ХАИ», 2001. – Вып. 23. – С. 113-115.

13. Когаев, В. П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность [Текст] : справочник / В. П. Когаев, Н. А. Махутов, А. П. Гусенков. – М. : Машиностроение, 1985. – 224 с.

14. Справочник по авиационным материалам [Текст] / под ред. А. Т. Туманова. – М. : Машиностроение, 1965. – Т. 3. – 560 с.

15. Троценко, В. Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справочник [Текст] / В. Т. Троценко, Л. А. Сосновский. – К. : Наук. думка, 1987. – Ч. 1. – 702 с.

Поступила в редакцию 1.06.2015, рассмотрена на редколлегии 23.06.2015

**Рецензент:** канд. техн. наук, доц. каф. конструкции авиационных двигателей В. С. Чигрин, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

#### ДО ПИТАННЯ ОБЛІКУ ВПЛИВУ ВІБРАЦІЙ НА ЦИКЛІЧНУ ДОВГОВІЧНІСТЬ ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНИХ ГТД

*А. О. Брунак, Д. Ф. Симбірський*

Виконано аналіз відомих методів розрахунку циклічної довговічності деталей авіаційних ГТД в умовах двочастотного (малоциклового і вібраційного) навантаження, з урахуванням наявності їх експериментальних підтверджень і можливостей практичної реалізації. З використанням найбільш ефективних на якісному рівні проведено розрахунки довговічності робочої лопатки турбіни ТВаД. За результатами розрахунків пропонуються рекомендації по використанню і практичній реалізації застосування виділених методів, які, на нашу думку, найбільш повно відповідають поставленим завданням в частині довговічності деталей АГТД.

**Ключові слова:** моделі довговічності, двочастотне навантаження, низькочастотне навантаження, накладена вібрація, амплітуда вібрацій й навантаження, віброшвидкість.

#### ISSUES OF VIBRATIONS IN CYCLIC DURABILITY OF THE AIRCRAFT GTE PARTS

*A. A. Brunak, D. F. Simbirsky*

The paper addresses a review of known methods of cyclic durability analysis for the parts of the aircraft GTE in the two-frequency (low-cycle loading and vibration loading) loading conditions. The review deals with methods, which results can be experimentally validated and implemented in the everyday practice. The most advanced methods were selected for the speculative analysis of an rotor blade of a TShE turbine. Basing the results of the analysis, the recommendations for usage limits and practical implementation of the selected methods have been formed. On our opinion, these methods in the fullest manner correspond to the problems in the durability of the aircraft GTE parts.

**Keywords:** durability models, two-frequency loading, low-frequency loading, superimposed vibration, vibration and stress amplitude, vibration velocity.

**Брунак Андрей Александрович** – аспирант каф. конструкции авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aedlab@gmail.com.

**Симбирский Дмитрий Федорович** – д-р техн. наук, проф., проф. каф. конструкции авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: aedlab@gmail.com.