

УДК 629.7.036:539.4

С.В. ЕПИФАНОВ<sup>1</sup>, Н.А. РИНГ<sup>1</sup>, И.Л. ГЛИКСОН<sup>2</sup>, С.И. ШАНЬКИН<sup>2</sup><sup>1</sup> *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*<sup>2</sup> *АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина*

### МОДЕРНИЗАЦИЯ МЕТОДА «ДОЖДЯ» ДЛЯ МОНИТОРИНГА ВЫРАБОТКИ РЕСУРСА ОСНОВНЫХ ДЕТАЛЕЙ ГТД

*Описан и проанализирован алгоритм метода «дождя» для выделения циклов нагружения по значениям эквивалентных напряжений, используемый в настоящее время в программном комплексе мониторинга выработки ресурса основных деталей газотурбинного двигателя. Выявлена неустойчивость этого метода при идентификации циклов по значениям эквивалентных напряжений. Предложено усовершенствовать используемый алгоритм путем перехода анализатора циклов на значения повреждаемостей, рассчитанных при размахе напряжений от нуля до текущего значения. На примере диска центробежного компрессора вспомогательного ГТД показана работоспособность и эффективность предложенного модернизированного алгоритма.*

**Ключевые слова:** метод «дождя», ресурс, мониторинг, контролируемая деталь, повреждаемость.

#### Введение

В настоящее время для реализации стратегии эксплуатации по техническому состоянию используют автоматизированные системы диагностирования технического состояния авиадвигателей. В состав таких автоматизированных систем входит подсистема мониторинга (текущего расчета) выработки в процессе эксплуатации назначенных ресурсов (МВР) набора контролируемых деталей (КД), реализующая принцип их эквивалентной повреждаемости [1].

Структура программного комплекса для мониторинга выработанных ресурсов КД включает следующие блоки [2]:

- блок исходных данных (измеряемые параметры двигателя и условия полета);
- блок расчета необходимых для мониторинга неизмеряемых параметров;
- блок расчета теплового состояния КД;
- блок расчета напряженно-деформированного состояния КД;
- циклоанализатор, реализующий метод «дождя» по значениям эквивалентных упругоэластических напряжений;
- расчет повреждаемостей КД по критериям ДП и МЦУ;
- расчет выработанных ресурсов КД.

Погрешности расчета неизмеряемых параметров, температурного и напряженного состояния КД исследованы в [1, 3] и обычно не превышают 1-3% их максимальных значений. Специальные исследования проводятся для уменьшения погрешностей определения этих параметров, связанных с изменением технического состояния двигателей [5, 6]. Ожидаемая погрешность выработанных ресурсов

КД составит не более 15%. Но при расчете указанной погрешности не учитывалась работа блока циклоанализатора. Как будет показано ниже, погрешность выработанного ресурса может увеличиться почти в 2 раза по причине некорректного выделения циклов.

#### Алгоритм метода «потоков дождя»

В соответствии с известным методом «потоков дождя» [4] автором [3] был разработан рекуррентный алгоритм, осуществляющий схематизацию процесса изменения напряженного состояния. Результатом применения алгоритма являются массивы *восходящих и нисходящих полуциклов*. Исходной информацией для анализа являются значения упругоэластических напряжений  $\sigma_{\text{экр}}$ , температур  $t$  и текущего времени  $\tau$ .

Используется нетрадиционная обработка открытых полуциклов (потоков), повреждаемость от которых вычисляется по формуле

$$P_i = \frac{1}{2N} - P_{i-1}, \quad (1)$$

где  $N$  – количество циклов до разрушения;  $P_{i-1}$  – повреждаемость от этого же полуцикла нагружения на предыдущем шаге вычислений.

Повреждаемость может быть рассчитана с помощью любой из существующих гипотез для определения числа циклов до разрушения. В данном алгоритме используется формула Мэнсона:

$$\Delta \varepsilon = 3,5 \frac{[\sigma_B(t) - \sigma_m]}{E(t)} N^{-0,12} + \left[ \ln \frac{1}{1 - \psi(t)} \right]^{0,6} N^{-0,6}, \quad (2)$$

где  $\Delta \varepsilon$  – размах деформаций;

$\sigma_m$  – среднее напряжение полуцикла;

$\sigma_B(t)$ ,  $E(t)$ ,  $\psi(t)$  – характеристики материала.

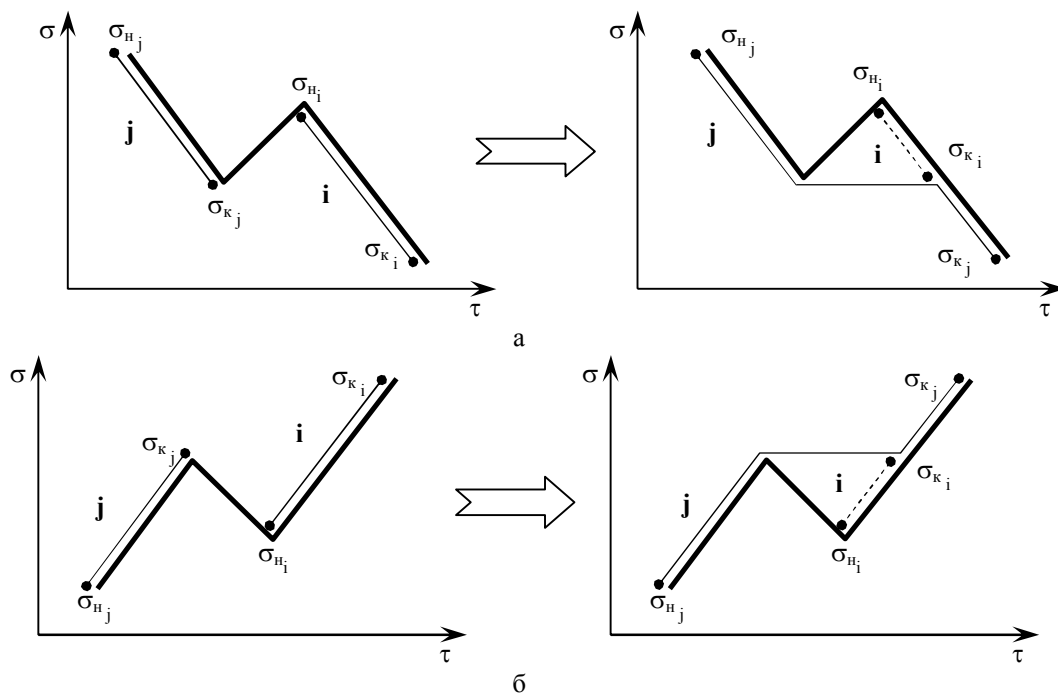


Рис. 1. Обнаружение цикла методом «потоков дождя». Закрытие полуцикла  $j$ :  
а – при восходящем полуцикле, б – при нисходящем полуцикле  $i +$

Программная реализация алгоритма предполагает, что любой полуцикл:

- характеризуется состоянием детали в начале  $[\sigma_{экр\ n}, t_n, \tau_n]$  и в конце полуцикла  $[\sigma_{экр\ k}, t_k, \tau_k]$ ;
- может находиться в двух состояниях: «открытом», когда возможно изменение полуцикла в ходе процесса, и в «закрытом», когда изменение полуцикла невозможно.

Алгоритм работает следующим образом.

1. В каждый  $i$ -й момент формируется новый полуцикл с параметрами

$$[\sigma_{экр\ n} = \sigma_{экр\ i-1}, t_n = t_{i-1}, \tau_n = \tau_{i-1}],$$

$$[\sigma_{экр\ k} = \sigma_{экр\ i}, t_k = t_i, \tau_k = \tau_i].$$

Полуцикл заносится в «список восходящих полуциклов», если  $\sigma_k \geq \sigma_n$ , и в «список нисходящих полуциклов», если  $\sigma_k < \sigma_n$ .

2. В последовательности от большего значения  $\tau_k$  к меньшему полуциклы сравниваются с ранее открытыми и изменяют друг друга.

Новый  $i$ -й восходящий полуцикл изменяет:

–  $j$ -й открытый нисходящий полуцикл (рис. 1, а) по следующему условию: если  $\sigma_{H_j} < \sigma_{K_i}$ , то  $j$ -й полуцикл становится «закрытым»;

–  $j$ -й открытый восходящий полуцикл по следующему алгоритму (рис. 1, а): если  $\sigma_{K_i} < \sigma_{K_j}$ , то полуциклы обмениваются конечными точками и  $i$ -й полуцикл объявляется «закрытым».

Измененный  $j$ -й восходящий полуцикл аналогичным образом сравнивается с остальными восходящими циклами и т.д.

Новый  $i$ -й нисходящий полуцикл изменяет:

–  $j$ -й открытый восходящий полуцикл (рис. 1, б) по следующему условию: если  $\sigma_{H_j} > \sigma_{K_i}$ , то  $j$ -й полуцикл становится «закрытым»;

–  $j$ -й открытый нисходящий полуцикл по следующему алгоритму: если  $\sigma_{K_i} < \sigma_{K_j}$ , то полуциклы меняются конечными точками и  $i$ -й полуцикл становится «закрытым».

Измененный  $j$ -й полуцикл сравнивается с остальными нисходящими и т.д.

При закрытии цикла производится окончательный для данного полуцикла расчет повреждаемости с помощью формулы (2).

### Недостатки алгоритма «дождя»

Рассмотрим изменение эквивалентных упругопластических напряжений в диске ЦБК вспомогательного газотурбинного двигателя в типовом эксплуатационном цикле, представленное на рис. 2. Анализ напряженного состояния выявил три точки с практически одинаковым уровнем напряжений (табл. 1). Расчет для каждой точки показал отличия уровней повреждаемости в 1,6 раза, что обусловлено существенно различными значениями температуры в соответствующие моменты времени.

Из представленных данных видно, что уровень напряжений в выделенных точках практически одинаков. В первой точке достижение максимального уровня напряжений связано с кратковременным забросом температурных напряжений, а в остальных точках – с выходом на более высокий режим (для которого характерны более высокие значения температуры и напряжений, обусловленных действием центробежных сил и температурных градиентов). Поэтому принятие

точки 1 в качестве наиболее нагруженной в данном цикле ошибочно, что и показал расчет повреждаемости. Использование значения повреждаемости, полученного для точки 1, при расчете выработанного ресурса приведет к погрешности в 1,6 раза. Видно, что незначительное изменение эквивалентных напряжений (в данном случае – устранение заброса напряжений в точке 1) может привести к значительному изменению расчетного значения выработки ресурса.

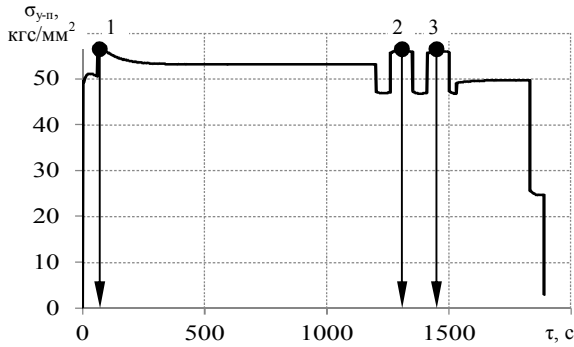


Рис. 2. Изменение эквивалентных упругопластических напряжений диска ЦБК в типовом эксплуатационном цикле

Таблица 1

Параметры напряженно-деформированного состояния в точках с максимальными напряжениями

Параметр	Значения параметра		
	1	2	3
точка на рис. 2	1	2	3
момент времени, с	65	1293	1446
температура, °С	129	212	214
экв. напряжение, кгс/мм <sup>2</sup>	56,8	56,45	56,37
модуль упругости, кгс/мм <sup>2</sup>	11240	10662	10648
предел прочности, кгс/мм <sup>2</sup>	92,2	86,3	86,1
повреждаемость	$5,8 \cdot 10^{-6}$	$9,6 \cdot 10^{-6}$	$9,6 \cdot 10^{-6}$
относительная повреждаемость П/П <sub>ТЭЦ</sub>	1	1,640	1,642

Таким образом, нами обнаружена потеря устойчивости метода «дождя», в котором идентификация циклов выполняется по значениям эквивалентных напряжений. Было предложено модернизировать существующий алгоритм путем перехода к идентификации циклов по значениям повреждаемости.

### Модернизированный алгоритм «дождя»

Модернизированный алгоритм «дождя» по структуре не отличается от существующего. Все изменения заключаются лишь замене эквивалентных напряжений на повреждаемость, которая рассчитывается с помощью формулы Мэнсона (2) или другого алгоритма в каждый момент времени при следующих исходных данных:

- текущая температура детали;

- текущие упруго-пластические напряжения;
- размах напряжений от нулевого до текущего значения;
- свойства материала для текущей температуры критической точки.

Расчет повреждаемости с максимально-возможным отнулевым размахом (от 0 до текущего уровня напряжений) не является окончательным, а служит лишь для идентификации циклов. График изменения такой повреждаемости для диска ЦБК в типовом эксплуатационном цикле представлен на рис. 3. Анализируя графики эквивалентных напряжений и повреждаемости с отнулевым размахом напряжений, представленные на рис. 2 и 3, можно сделать вывод о том, что максимум напряжений не всегда совпадает с максимумом повреждаемости (точка 1), хотя для большинства случаев такое совпадение имеет место.

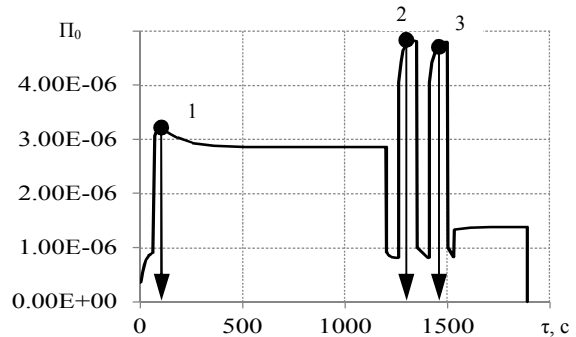


Рис. 3. Изменение повреждаемости с отнулевым размахом напряжений диска ЦБК в ТЭЦ

Таким образом, модернизированный алгоритм заключается в следующем:

- 1) по значениям  $\sigma_{экр}$ ,  $t$ ,  $\tau$  рассчитывается повреждаемость с отнулевым размахом напряжений  $P_0$ ;
- 2) полуцикл заносится в «список восходящих полуциклов», если  $P_{0к} \geq P_{0н}$ , и в «список нисходящих полуциклов», если  $P_{0к} < P_{0н}$ ;
- 3) производится «открытие», сравнение, «заккрытие» полуциклов, как описано выше, и расчет повреждаемости по соответствующей формуле при действующем значении размаха напряжений.

### Заключение

При обработке типового эксплуатационного цикла для диска ЦБК с помощью модернизированного метода «дождя» получено значение накопленной повреждаемости, равное значению в точке 2, представленному в табл. 1; изменение относительной повреждаемости представлено на рис. 4. Обработка типового эксплуатационного цикла для остальных основных деталей двигателя не выявила отличий в накопленных повреждаемостях, что свидетельствует о совпадении максимальных эквивалентных упругопластических напряжений и максимума повреждае-

мости с отнулевым размахом напряжений, а также о работоспособности предлагаемого алгоритма.

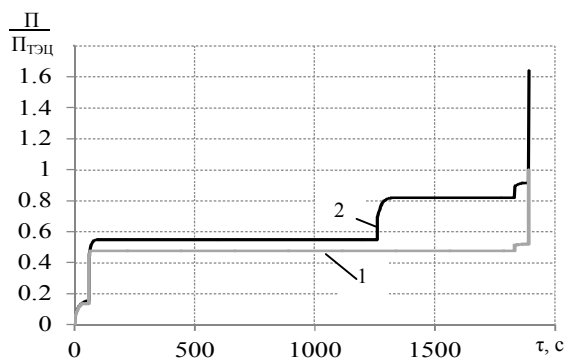


Рис. 4. Изменение относительной повреждаемости диска ЦБК в типовом эксплуатационном цикле при анализе циклов: 1 – по используемому методу «дождя»; 2 – по модернизированному методу

### Литература

1. Олейник, А.В. Концепция и методы мониторинга выработки ресурса авиационных ГТД на основе идентификации динамики температурного и напряженного состояний основных деталей [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук: 05.07.05 / Олейник Алексей Васильевич. – Х., 2006. – 241 с.

2. Программный комплекс для мониторинга выработки ресурса основных деталей вспомогательного двигателя АИ-450-МС [Текст] / Н.А. Шимановская, Д.Ф. Симбирский, И.Л. Гликсон, С.И. Шанькин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – №9(76). – С. 120-124.

3. Филяев, В.А. Мониторинг температурного и напряженного состояний деталей авиационных ГТД в системах учета выработки их ресурса [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05 / Филяев Вячеслав Анатольевич. – Х., 2002. – 193 с.

4. ГОСТ 25.101-83. Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов [Текст]. – Введ. 01.07.84. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 29 с.

5. Maravilla, C. A comparative analysis of turbine rotor inlet temperature models [Text] / C. Maravilla, S. Yepifanov, I. Loboda // *ASME paper GT2011-46161*. – 10 p.

6. Маравилла Эррера, К. Анализ эффективности определения значений коэффициентов теплоотдачи на наружной поверхности лопатки с учетом индивидуальных характеристик газотурбинного двигателя [Текст] / К. Маравилла Эррера, С.В. Елифанов // *Вісник НТУ «ХПІ»*. – Вып. 7. «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування». – 2012. – С. 60-66.

Поступила в редакцию 2.06.2013, рассмотрена на редколлегии 14.06.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. кафедры конструкции авиационных двигателей Д.Ф. Симбирский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

### МОДЕРНІЗАЦІЯ МЕТОДУ «ДОЩУ» ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ВИРОБІТКУ РЕСУРСУ ОСНОВНИХ ДЕТАЛЕЙ ГТД

*С.В. Єпифанов, Н.А. Рінг, І.Л. Гліксон, С.І. Шанькін*

Описано і проаналізовано алгоритм методу «дощу» для виділення циклів навантаження за значеннями еквівалентних напружень, який використовується в поточний час в програмному комплексі для моніторингу виробітку ресурсу основних деталей газотурбінного двигуна. Виявлено нестійкість цього методу під час ідентифікації циклів за значеннями еквівалентних напружень. Запропоновано удосконалити алгоритм, що використовується, шляхом переходу аналізатора циклів на значення пошкоджуваностей, які розраховуються за розмахом напружень від нуля до поточного значення. На прикладі диска відцентрового компресора допоміжного ГТД показана працездатність і ефективність запропонованого модернізованого алгоритму.

**Ключові слова:** метод «дощу», ресурс, моніторинг, деталь, що контролюється, пошкоджуваність.

### “RAIN” METHOD MODERNIZING FOR TURBINE ENGINE BASIC COMPONENTS LIFETIME MONITORING

*S.V. Yepifanov, N.A. Ring, I.L. Glikson, S.I. Shankin*

The “rain” method for loading cycles selection by equivalent stresses is discussed. This method is used in software for turbine engine basic components lifetime monitoring. Non-stability of cycles identification by values of equivalent stresses is detected. To prevent corresponding errors of monitoring, the method was modernized using new procedure of cycles selection by damageabilities calculation for stresses variation from zero to current value., Operability and efficiency of modernized algorithm is demonstrated using the disc of centrifugal compressor as example.

**Key words:** “rain” method, life time, monitoring, turbine engine component, damageability.

**Елифанов Сергей Валерьевич** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

**Ринг Наталья Анатольевна** – канд. техн. наук, науч. сотр. каф. конструкции авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

**Гликсон Игорь Леонидович** – начальник отдела прочности АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина.

**Шанькин Сергей Иванович** – главный конструктор АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина.