

УДК 621.51.226.2.53

## ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ РАДИАЛЬНОГО ЗАЗОРА И ИЗНОСА ПРИРАБАТЫВАЕМОГО ПОКРЫТИЯ В ОСЕВОМ КОМПРЕССОРЕ ПРИ ФЛАТТЕРЕ ЛОПАТОК

**А. А. ХОРИКОВ**

khorikov@rtc.ciam.ru

ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения имени П. И. Баранова»  
(ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова»)

*Поступила в редакцию 1 июля 2015 г.*

**Аннотация.** Предложена математическая модель изменения радиального зазора и специфических особенностей износа прирабатываемого покрытия на корпусе осевого компрессора при возникновении флаттера рабочих лопаток. Показано, что при возникновении флаттера лопаток с бегущей волной деформации изменение радиального зазора может быть представлено набором функций Бесселя первого рода. Предложен способ диагностики флаттера рабочих лопаток компрессора по характерным особенностям износа прирабатываемого покрытия. Приведены примеры, когда на основе анализа особенностей износа прирабатываемого покрытия можно сделать вывод о наличии или отсутствии флаттера на данном режиме работы компрессора, а также определить номер диаметральной формы колебаний, по которой реализован флаттер.

**Ключевые слова:** радиальный зазор; флаттер лопаток; истираемое покрытие; износ покрытия; корпус компрессора, диаметральной формы.

### ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения высоких параметров компрессоров разработчики всегда стремятся к тому, чтобы радиальный зазор между рабочими лопатками внутренней поверхности корпуса компрессора был минимальным. С целью избежания жесткого касания лопаток о корпус, на его внутреннюю поверхность наносится прирабатываемое (истираемое) покрытие. Вследствие закрученности лопаток или конусности корпуса при колебаниях лопатки происходит заметное изменение зазора [1, 2]. Особенно сильное изменение зазора происходит при флаттере лопаток, т.к. этому виду колебаний лопаток свойственны высокие амплитуды колебаний.

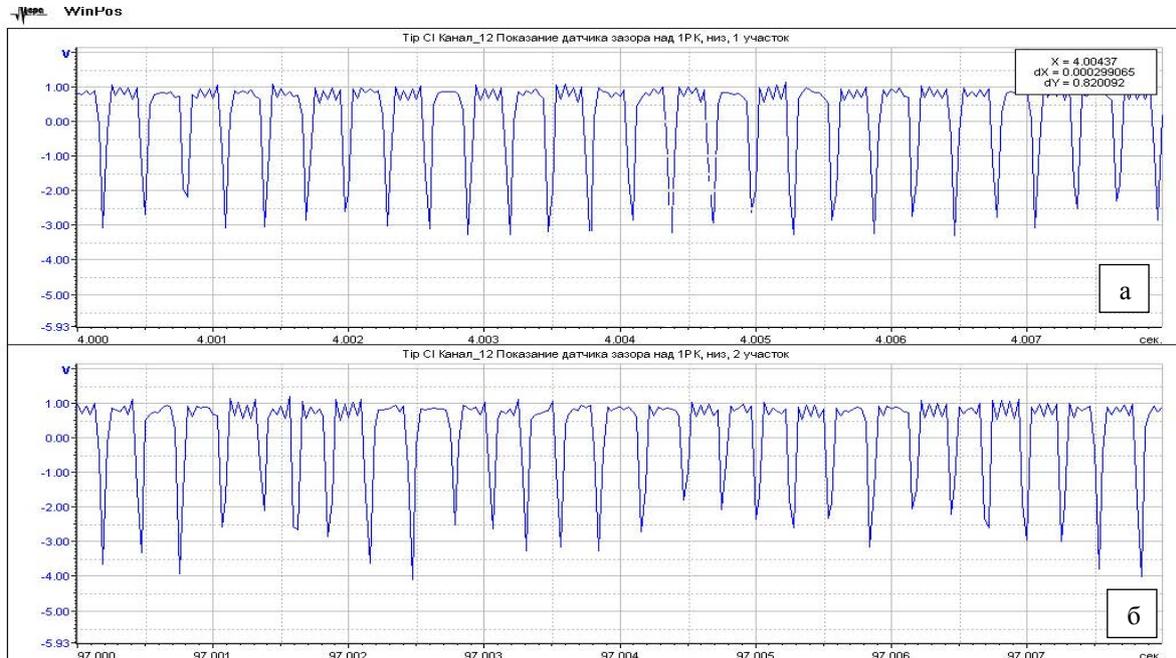
Для измерения зазоров разработаны системы, позволяющие получить индивидуальные градуировочные данные по каждому каналу (датчику) и представления результатов измерения в физических единицах (в мм). На рис. 1 приведены осциллограммы сигналов с датчиков, измеряющих зазор в отсутствие флаттера и при флаттере рабочих лопаток первой ступени трех-

ступенчатого вентилятора. Видно, что при флаттере имеет место существенно большая неоднородность сигнала, как по амплитуде, так и по времени. В частности, при отсутствии флаттера временной интервал между импульсами сигналов одинаков и равен  $\Delta t = 0,003$  с, а при флаттере изменяется от  $t = 0,0025$  с до  $t = 0,0035$  с. При этом на прирабатываемом покрытии были обнаружены характерные особенности его износа.

Целью данной работы является разработка метода диагностики флаттера рабочих лопаток компрессоров по характерным особенностям износа прирабатываемого покрытия. При постановке задачи не предполагается обсуждать изменение зазоров при нестационарных температурных процессах и точность измерения зазоров. Более того, будем предполагать, что датчики измерения зазоров отсутствуют, а при флаттере лопаток, который обычно реализуется с большими амплитудами периферийных сечений лопаток, происходит «врезание» лопаток в прирабатываемое покрытие. Очевидно, что это «врезание» будет соответствовать характеру

изменения зазора при колебаниях лопаток от флаттера. Поэтому для решения поставленной задачи автор считает необходимым сначала разработать математическую модель изменения зазора при колебаниях лопаток, а затем уже на

основе математических соотношений, полученных из этой модели, выявить соответствующие характерные особенности износа приработываемого покрытия внутренней поверхности корпуса компрессора.

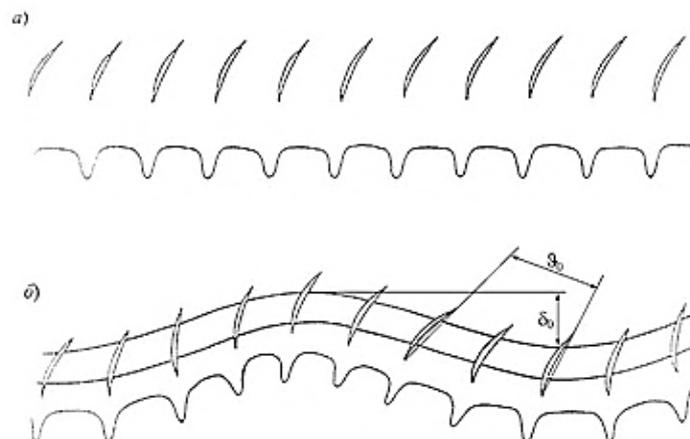


**Рис. 1.** Осциллограммы с датчиков зазора:  
а – нет флаттера; б – флаттер

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗМЕНЕНИЯ ЗАЗОРА ПРИ ФЛАТТЕРЕ ЛОПАТОК

Для создания математической модели изменения радиального зазора при колебаниях лопатки будем считать лопаточный венец однородным, в котором лопатки находятся на по-

датливом диске. Соответствующая деформационная картина венца и сигналов с датчиков пульсаций представлена на рис. 2.



**Рис. 2.** Деформационные картины лопаточного венца и соответствующие им сигналы с датчиков изменения зазоров:  
а – неколеблущаяся решетка профилей; б – решетка профилей на податливом диске

при бегущих волнах деформации

Предположим в первом приближении при отсутствии колебаний лопаток гармонический характер сигнала с датчика изменения зазора  $\Delta$

$$\Delta(t, n) = \Delta_0 [1 + a \cos(\omega_p t - \varphi_{on})], \quad (1)$$

где  $\omega_p = 2\pi f_p$ ,  $\varphi_{on} = 2\pi n / N$  – угловая координата;  $f_p$  – частота вращения;  $N$  – количество лопаток в колесе;  $a$  – амплитуда переменной составляющей сигнала с датчика зазора;  $n$  – порядковый номер лопатки. Начало отсчета может быть выбрано на любой лопатке.

При возникновении флаттера лопаток бегущая по колесу волна деформации с числом волн  $z$  угловую координату  $\varphi_{on}$  в формуле (1) сделает переменной величиной, которая будет меняться по гармоническому закону с частотой колебаний лопаток в неподвижной системе координат  $\omega_z$ :

$$\varphi_n = \varphi_{on} + \vartheta_0 \sin(\omega_z t - 2\pi n / N), \quad (2)$$

где  $\vartheta_0$  – величина, пропорциональная амплитуде крутильной составляющей колебаний периферийного сечения лопатки, а  $\omega_z = \omega_{л} + z\omega_p$  в соответствии с обобщенным эффектом Доплера;  $\omega_{л}$  – частота колебаний во вращающейся системе координат,  $z = 0, 1 \dots N - 1$ .

Кроме того, по гармоническому закону с той же частотой будет изменяться и амплитуда  $\Delta_0$

$$\Delta_0 = \Delta_0(t, n) = A [1 + \delta_0 \cos(\omega_z t - 2\pi n / N)], \quad (3)$$

где  $\delta_0$  – величина, пропорциональная амплитуде колебаний лопатки в осевом направлении.

Между  $\vartheta$  и  $\delta$  справедливо соотношение

$$\vartheta = d\delta / dx, \quad (4)$$

вследствие чего между ними существует сдвиг фаз  $90^\circ$ .

Подставляя выражения (3) и (2) в формулу (1) и принимая начало отсчета сигнала с лопатки с номером  $n = 0$ , получим

$$\Delta(t) = A(1 + \delta_0 \cos \omega_z t) \times [1 + a \cos(\omega t + \vartheta_0 \sin \omega_z t)]. \quad (5)$$

Преобразуем выражение (5), используя формулу косинуса разности двух аргументов:

$$\Delta(t) = A(1 + \delta_0 \cos \omega_z t) \times \left[ \begin{aligned} &1 + a \cos \omega t \cdot \cos(\vartheta_0 \sin \omega_z t) - \\ &- a \sin \omega t \cdot \sin(\vartheta_0 \sin \omega_z t) \end{aligned} \right]. \quad (6)$$

Поскольку справедливы разложения

$$\begin{aligned} \cos(\vartheta_0 \cdot \sin \omega_z t) &= I_0(\vartheta_0) + \\ &+ 2 \sum_{k=1}^{\infty} I_{2k}(\vartheta_0) \cos 2k \omega_z t, \\ \sin(\vartheta_0 \cdot \sin \omega_z t) &= \\ &= 2 \sum_{k=1}^{\infty} I_{2k-1}(\vartheta_0) \sin(2k-1) \omega_z t, \end{aligned} \quad (7)$$

где через  $I_n(\vartheta_0)$  обозначена функция Бесселя первого рода  $n$ -го порядка от аргумента  $\vartheta_0$ , то, применив эти разложения к формуле (6), после обычных алгебраических преобразований и раскрытий произведений функций будем иметь

$$\begin{aligned} \Delta(t) &= A(1 + \delta_0 \cos \omega_z t) [1 + a I_0(\vartheta_0) \cos \omega t + \\ &+ (-1)^k \sum_{k=1}^{\infty} I_k(\vartheta_0) (\cos \omega t - k \omega_z t) + \\ &+ \sum_{k=1}^{\infty} I_k(\vartheta_0) \cos(\omega t + k \omega_z t)]. \end{aligned} \quad (8)$$

Из полученного выражения следует, что при возникновении флаттера датчик зазора, расположенный над лопатками компрессорного колеса, будет регистрировать следующие диагностические частоты флаттера:

$\omega_z = \omega_{л} + z\omega_p$ , – частоту, обусловленную эффектом Доплера;

$\omega = \omega_p \cdot N$  – частоту следования лопаток;

$\omega_{z-k} = \omega - k\omega_z$  – нижнюю боковую полосу частот;

$\omega_{z+k} = \omega + k\omega_z$  – верхнюю боковую полосу частот.

Подставляя выражение (3) и (2) в формулу (1), будем иметь для любого номера  $n$

$$\begin{aligned} \Delta(t, n) &= A \left[ 1 - \delta_0 \cos \left( \omega_z t - \frac{2\pi n}{N} \right) \right] \times \\ &\times \left[ 1 - a \cos \left( \omega_p t - \vartheta_0 \sin \left( \omega_z t - \frac{2\pi n}{N} \right) \right) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

Формулу (9) можно применить для определения величины зазора по окружности колеса, если угловую дискретную координату  $\frac{2\pi n}{N}$  за-

менить на непрерывную координату  $\frac{2\pi}{\lambda}x$ , где  $x$  – расстояние по дуге, а  $\lambda$  – длина волны деформации. Тогда получим

$$\Delta(t, x) = A \left[ 1 - \delta_0 \cos \left( \omega_z t - \frac{2\pi x}{\lambda} \right) \right] \times \\ \times \left[ 1 - a \cos \left( \omega_p t - \vartheta_0 \sin \left( \omega_z t - \frac{2\pi x}{\lambda} \right) \right) \right] \quad (10)$$

Минимальный зазор по координате  $x$  будет иметь место при выполнении двух условий

$$\omega_z t - \frac{2\pi x}{\lambda} = 2\pi k, \quad k = 0, 1, 2, \dots \\ \omega_p t - \vartheta_0 \sin \left( \omega_z t - \frac{2\pi x}{\lambda} \right) = 2\pi k, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (11)$$

Откуда можно получить, что минимальный зазор будет реализовываться при  $x = m\lambda$ . Это означает, что на истираемом покрытии в окружном направлении будут впадины, расстояние между которыми равно длине волны деформации венца, а количество этих впадин будет равно количеству волн деформаций (узловых диаметров), реализуемых при флаттере лопаток.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Способ экспериментальной реализации математической модели основан на том, что увеличение длины лопатки при флаттере вследствие высоких амплитуд колебаний приводит не только к уменьшению радиального зазора, но и к касанию лопаток о внутреннюю поверхность корпуса турбомашины. Нанесение истираемого покрытия на внутренний корпус турбомашины и контроль характерных особенностей его износа позволит диагностировать наличие или от-

сутствие флаттера лопаток на данном режиме, а также определить диаметрную форму колебаний, по которой реализовался флаттер. В процессе экспериментальных исследований флаттера лопаток, проведенных на компрессорах авиационных двигателей, неоднократно наблюдались характерные признаки износа истираемого покрытия.

Поставленная задача решается тем, что реализуют способ диагностики флаттера рабочего колеса в составе осевой турбомашины на заданном рабочем режиме [3]. Способ характеризуется тем, что на внутреннюю поверхность корпуса турбомашины в зоне вращения рабочего колеса наносят истираемое покрытие, толщину которого устанавливают исходя из отсутствия радиального зазора между торцами лопаток рабочего колеса и поверхностью покрытия на максимальной частоте вращения. Выводят турбомашину на заданную частоту вращения. Обеспечивают подачу газового потока на входе в турбомашину, устанавливают заданные значения параметров температуры и давления газового потока и дросселируют турбомашину при заданных значениях параметров температуры и давления газового потока на заданной частоте вращения до заданной точки на напорной характеристике турбомашины. Диагностирование наличия или отсутствия флаттера на заданном рабочем режиме осуществляют после останова турбомашины по результату анализа характера износа истираемого покрытия.

Другим характерным признаком предлагаемого способа является возможность по характеру износа истираемого покрытия определить номер диаметральной формы колебаний, по которой реализовался флаттер.

На рис. 3 показано устройство, реализующее предлагаемый способ; на рис. 4 – характерный волновой износ истираемого покрытия при флаттере лопаток, полученный при экспериментальных исследованиях.

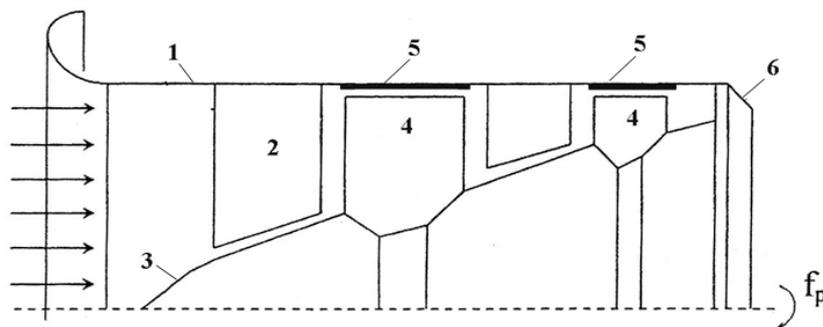
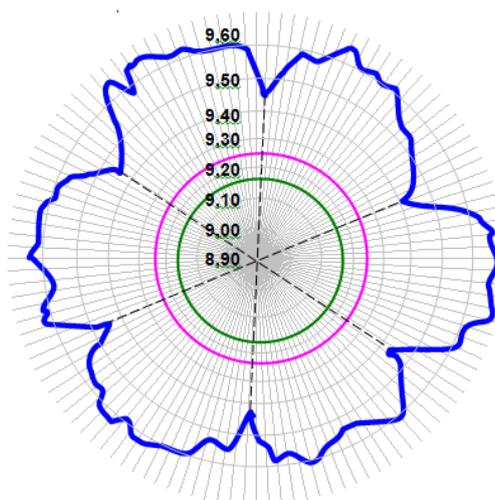


Рис. 3. Схема экспериментального компрессора



**Рис. 4.** Износ истираемого покрытия при флаттере лопаток

Из рис. 4 следует, что в данном случае реализовался флаттер с тремя волнами деформации, т.е. реализовалась третья диаметральная форма колебаний. Диаметры колебаний показаны пунктирными линиями. Характер износа истираемого покрытия показан в виде круговой диаграммы толстой волнистой линией.

Таким образом, простым наблюдением за характером износа истираемого покрытия удастся сделать однозначный вывод о наличии или отсутствии флаттера на данном режиме работы компрессора. Характер износа истираемого покрытия позволяет также сделать вывод о номере диаметальной формы колебаний при флаттере.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Beaupain O.** Numerical simulation of blade/casing rub interaction. European Workshop on New Aero Engine Concepts. Munich, 2010, pp. 5–16.
2. **Хориков А. А.** Исследование колебаний лопаток компрессоров датчиками измерения радиального зазора // *Авиационно-космическая техника и технология*. № 8/55. 2008. С. 77–82. [А. А. Khorikov, "Research compressor blades oscillations with sensors measuring radial clearance", (in Russian), *Aerospace technics and technology*, no. 8/55, pp. 77-82, 2008.].
3. **Хориков А. А.** Способ диагностики флаттера лопаток рабочего колеса в составе осевой турбомшины. Патент на изобретение № 2525061. [А. А. Khorikov, The diagnostic method of rotor blades flutter in the composition of axial turbomachine. Patent 2525061 Russian Federation].

#### ОБ АВТОРАХ

**ХОРИКОВ Анатолий Алексеевич**, д-р техн. наук, проф, нач. отд., ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова».

#### METADATA

**Title:** Radial clearance changes features and burned coatings depreciation in the axial compressor at blades flutter.

**Authors:** A. A. Khorikov.

**Affiliation:**

Central Institute of Aviation Motors after P.I. Baranov.

**Email:** khorikov@rtc.ciam.ru.

**Language:** Russian

**Source:** *Vestnik UGATU* (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), -vol. 19, no. 3 (69), pp. 65-69, 2015. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (print).

**Abstract:** Mathematical model of change of radial clearance, and the specific characteristics of the coating wear burnished on the body in the event of axial compressor rotor blades of flutter was proposed. It is shown that in the event of blade flutter traveling wave deformation variation of the radial clearance can be represented by a set of Bessel functions of the first kind. A method for diagnosing a flutter on the rotor blades of the compressor characteristic features burnished wear coating has been proposed. Examples where, based on analyzing wear burnished coatings can infer the presence or absence of flutter in this mode of operation of the compressor, and to determine the number diametral waveform at which flutter have been implemented are shown.

**Key words:** Radial clearance, flutter blades, abradable coating, the wear coating, compressor housing, diametric form.

**About authors:**

**KHORIKOV, Anatoliy Alekseevich**, Doctor of Science, professor, head of department. Strength, dynamics, calculation and experimental researches.