

УДК 621.794

Д.А. Михайлов, аспирант  
Донецкий национальный технический университет, Украина  
Тел./Факс: +38 (095) 0739343; E-mail: [arasamogon@mail.ru](mailto:arasamogon@mail.ru)

## ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ГТД И КЛАССИФИКАЦИЯ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ

*В статье приведены данные связанные с особенностями эксплуатации лопаток компрессора ГТД. А также разработана системная модель процесса преобразования свойств лопаток компрессора при эксплуатации. В работе представлена классификация основных эксплуатационных воздействий на лопатки компрессора ГТД и разработана гипотетическая схема взаимодействия частиц пыли при износе элементов пера лопатки компрессора. Приведена схема взаимодействия пыли и частиц аэродинамического потока воздуха с лопатками компрессора.*

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, лопатки компрессора, особенности эксплуатации, классификация эксплуатационных функций.

### 1. Введение

Лопатки компрессора газотурбинного двигателя (ГТД) являются главными элементами авиационных двигателей. Общее количество лопаток в ГТД составляет 2500 ... 3500 штук, при этом структурная надежность всего двигателя определяется вероятностью безотказной работы каждой лопатки, в том числе и лопаток компрессора. В процессе эксплуатации лопаток компрессора на них действует целый ряд эксплуатационных функций, вызывающих разрушения элементов лопатки [1 ... 5]. При этом наибольшее влияние на ресурс ГТД оказывают эрозионно-коррозионные воздействия, возникающие в процессе эксплуатации двигателя и вызывающие обычно неравномерные разрушения элементов лопатки. Поэтому в данной работе проведены исследования, связанные с эксплуатационными особенностями лопаток компрессора ГТД и направленные на дальнейшее повышение их ресурса.

Целью данной работы является определение основных особенностей эксплуатации лопаток компрессора ГТД и классификация их эксплуатационных функций для последующей разработки методов повышения их ресурса.

В работе планируется решить следующие задачи: определить основные особенности эксплуатации лопаток компрессора, выполнить классификацию эксплуатационных функций лопаток компрессора и выявить действие основных эксплуатационных функций на функциональные элементы лопатки компрессора ГТД.

При эксплуатации двигателей вертолетов на лопатки компрессора действует целый ряд эксплуатационных воздействий различного характера, действие которых можно моделировать потоками материи  $M_w$ , энергии  $E_w$  и информации  $I_w$  (рис. 1).

На рис. 1 представлена модель процесса преобразования свойств лопаток компрессора ГТД при эксплуатации. Здесь показано:  $V$  – вход, процесс начала эксплуатации лопатки,  $W$  – выход, процесс завершения эксплуатации лопатки. Процесс преобразования свойств лопатки при эксплуатации происходит из-за действия эксплуатационных воздействий материального  $M_w$ , энергетического  $E_w$  и информационного  $I_w$  характеров. Начальные и конечные свойства лопатки можно представлять следующими векторами:

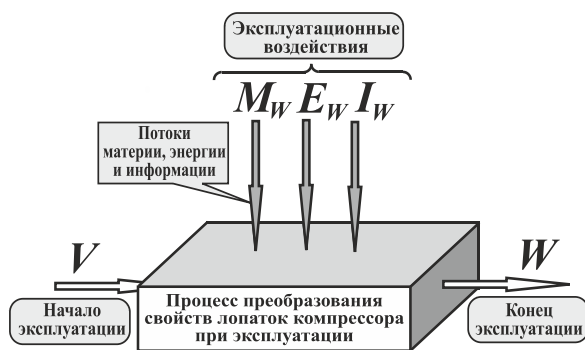


Рис. 1. Модель процесса преобразования свойств лопаток компрессора при эксплуатации

$$V = \begin{Bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \dots \\ v_n \end{Bmatrix}, \quad W = \begin{Bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \dots \\ w_k \end{Bmatrix};$$

где  $v_i$  –  $i$ -е начальное свойство лопатки компрессора;

$w_j$  –  $j$ -е конечное свойство лопатки компрессора;

$n$  – общее количество начальных свойств лопатки компрессора, которые образованы до ее эксплуатации;

$k$  – общее количество конечных свойств лопатки компрессора, образующихся в процессе ее эксплуатации.

## 2. Классификация эксплуатационных функций

В процессе эксплуатации вертолетных двигателей на лопатки компрессора действует целый ряд эксплуатационных воздействий, которые можно структурировать. На

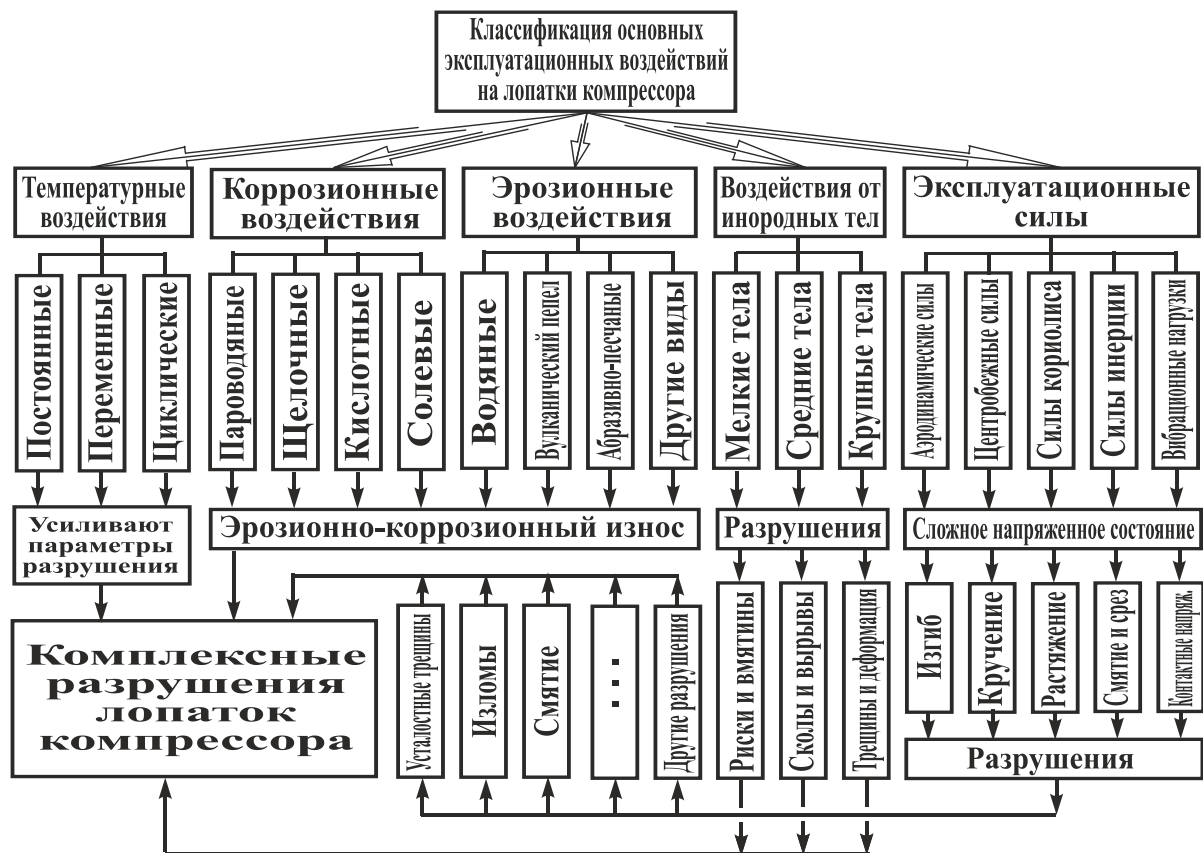


Рис. 2. Классификация основных эксплуатационных воздействий на лопатки компрессора ГТД

рис. 2 представлена классификация основных эксплуатационных воздействий на лопатки компрессора. Эти воздействия можно разделить следующим образом:

- температурные воздействия,
- коррозионные воздействия,
- эрозионные воздействия,
- воздействия от инородных тел,
- эксплуатационные силы.

Здесь можно отметить, что в своей совокупности все эти воздействия вызывают комплексные разрушения лопаток компрессора. При этом катастрофический износ вызывают эрозионные разрушения лопаток, возникающие из-за эрозионного износа пера лопатки компрессора. Поэтому далее будут рассмотрены более детально эти вопросы.

### 3. Особенности эксплуатации лопаток компрессора

Для вертолетов характерны полеты на небольшой высоте, сравнительно длительная работа вблизи поверхности земли, взлет и посадка с естественных площадок [2], имеющих песчанистую и пылевую почву. В этих условиях, в вертолетные двигатели может поступать воздух с частицами песка, пыли и других абразивных частиц, поднимающихся как в результате естественной запыленности воздуха вблизи земли, так и вследствие того, что потоки воздуха, идущие от несущего винта поднимают с поверхности земли твердые частицы, создающие вокруг самолета облако с увеличенной концентрацией частиц песка и пыли. Кроме того, в ряде случаев в регионах, где имеется вулканические процессы, работа вертолетов происходит в условиях с увеличенной концентрации вулканического пепла в воздухе вокруг них.

При висении вертолета концентрация пыли и других частиц в воздухе может достигать несколько грамм в кубическом метре около земли и до  $1 \text{ г/м}^3$  вблизи входов в двигатели. Более типична концентрация на входе в двигатели около  $0,2 \dots 0,3 \text{ г/м}^3$ . При этом в воздух могут подниматься как мелкие частицы, так и достаточно крупные размеры до  $200 \dots 400 \text{ мкм}$  [2].

Все это вызывает значительные эрозионные разрушения элементов ГТД, в том числе и лопаток компрессора.

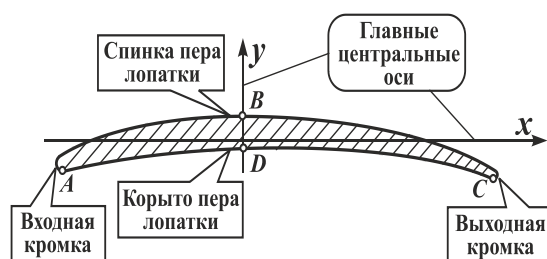


Рис. 3. Основные элементы пера лопатки компрессора

Анализируя процесс эрозионного разрушения лопаток компрессора можно отметить, что их износ в основном происходит по входной кромке и поверхности корыта (рис. 3). На рис. 3 представлены основные элементы пера лопатки компрессора, а именно следующие: входная и выходная кромки, корыто пера лопатки, спинка пера лопатки и тело пера лопатки (на рис. 3 не обозначено). Поверхности пера лопатки являются рабочими, к ним предъявляют высокие требования по точности геометрических параметров, шероховатости поверхностей и физико-механическим свойствам.

Можно отметить, что величина износа элементов пера лопатки обычно увеличивается от полки к периферии пера. Это объясняется тем, что в компрессоре происходит постепенное сепарирование частиц пыли и песка к периферии по тракту компрессора, а также из-за увеличения скорости относительного движения частиц по высоте пера лопатки компрессора (рис. 4). На рис. 4 цифрами обозначены следующие позиции: 1 – перо лопатки компрессора, 2 – полка лопатки, 3 – замок лопатки (трапециидальный).

Здесь можно отметить, что при постоянной частоте вращения ротора компрессора  $\omega$  линейная скорость по высоте пера лопатки изменяется в соответствии с эпюром, представленным на рис. 4. В результате соответственно увеличивается и скорость относительного соударения пыли и частиц песка.

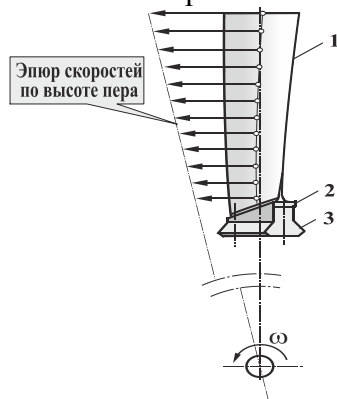


Рис. 4. Эпюр скоростей точек, расположенных по высоте пера лопатки компрессора

А также следует отметить, что в первой ступени износ пера наблюдается по всей высоте, а в последующих ступенях из-за сепарирования пыли и песка он смещается к периферии пера лопатки. В результате концентрации пыли и песка в аэродинамическом потоке у периферии пера лопатки в последних ступенях их износ может быть в несколько раз выше, чем на входе в компрессор. Однако этот износ может в каждом конкретном случае иметь свои особенности.

Можно отметить, что эрозионный износ пера лопатки начинается на входной кромке пера лопатки, которая в процессе износа из-за действия аэродинамического потока теряет свою форму на величину  $\Delta_A$ . А также износ пера лопатки происходит по поверхности корыта пера лопатки (рис. 5). При этом форма пера лопатки 1 преобразуется в форму 2.

Причем величина износа слоя пера корыта лопатки по ее ширине имеет переменную величину  $\Delta_D \neq \text{const} = f(x, z)$ , которая зависит от угла соударения частиц  $\alpha \neq \text{const}$ . При этом угол соударения частиц с лопаткой изменяется по ширине и высоте пера и зависит от формы корыта пера лопатки и траектории относительного движения частиц.

На рис. 5 представлена гипотетическая схема взаимодействия частиц пыли при износе элементов пера лопатки компрессора.

Можно отметить, что спинка пера лопатки почти не изнашивается [2]. При этом при значительном износе поверхности корыта пера лопатки у задней или передней кромки она отгибается, образуя заусенец 3 на спинке (рис. 5). Общий вид заусенца по передней кромке пера лопатки представлен на рис. 6.

Следует отметить, что величина износа, как передней кромки, так и корыта в процессе эксплуатации увеличивается прямо пропорционально суммарному количеству прошедших частиц пыли и песка независимо от их концентрации в воздухе. Размер частиц кварцевой пыли существенно влияет на величину износа. Чем крупнее частицы пыли, тем интенсивнее износ [1, 2].

На рис. 7 представлена схема взаимодействия пыли и частиц аэродинамического потока воздуха с лопатками компрессора. Здесь показано следующее: позиции 1 и 2 - соседние лопатки компрессора;  $v_1$  - направление движения потока воздуха по тракту двигателя;  $v_2$  - поперечная скорость относительного движения частицы пыли или песка;  $v$  - суммарная скорость относительного движения частиц пыли и песка по траекториям относительного движения частиц;  $v_{\text{л}}$  - линейная скорость поперечного движения лопатки;  $a, b, c, d$  - траектории от-

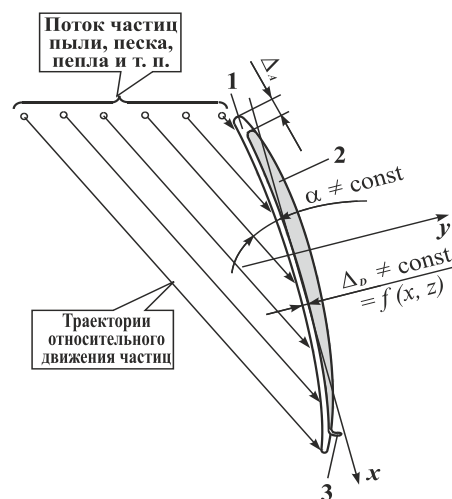


Рис. 5. Гипотетическая схема взаимодействия частиц пыли при износе элементов пера лопатки компрессора

носительного движения частиц разных размеров;  $\alpha$  - угол соударения частиц пыли и песка с поверхностью корыта пера лопатки ( $\alpha \neq \text{const}$  из-за формы корыта пера лопатки).



Рис. 6. Общий вид заусенца по передней кромке пера лопатки

Можно отметить, что траектории относительного движения частиц пыли и песка  $a$  (рис. 7) почти не отклоняются от теоретических значений [2], при этом с уменьшением размера частиц до размеров  $\delta < 10 \dots 15$  мкм траектории  $b, c, d$  начинают отклоняться и тем больше, чем меньше частицы. Это обусловлено особенностями аэродинамического потока воздуха в тракте компрессора вертолетного двигателя.

Интенсивность эрозионного изнашивания элементов пера лопатки зависит от целого комплекса параметров:

плекса параметров:

- состава потока газов, паров и жидкости;
- формы, состава, структуры и материала частиц пыли и песка аэродинамического потока;
- скорости относительного движения частиц и поверхности пера лопатки компрессора;
- угла соударения частиц с поверхностью пера лопатки;
- материала пера лопатки.

Наибольший износ поверхности корыта пера лопатки обычно наблюдается при углах соударения  $\alpha = 50 \dots 60^\circ$ , а для  $\alpha = 90^\circ$  и  $\alpha = 20 \dots 25^\circ$  он почти в 2 раза меньше [2]. Изменение угла соударения частиц и поверхности является основной причиной различной глубины износа корыта пера лопатки по ее ширине и высоте. Это связано с тем, что по ширине пера лопатки форма корыта пера в направлении  $x$  (рис. 7) имеет переменные параметры, а также перо лопатки по высоте в направлении  $z$  имеет закрутку на определенный угол, что также влияет на изменение угла соударения частиц с поверхностью.

#### 4. Заключение

Таким образом, выполненные исследования позволили установить, что износ лопатки компрессора имеет определенные особенности, а именно:

- входная кромка (зона около входной кромки) имеет переменный износ, увеличивающийся от полки лопатки к периферии пера лопатки, величина которого может изменяться до 2-х раз;

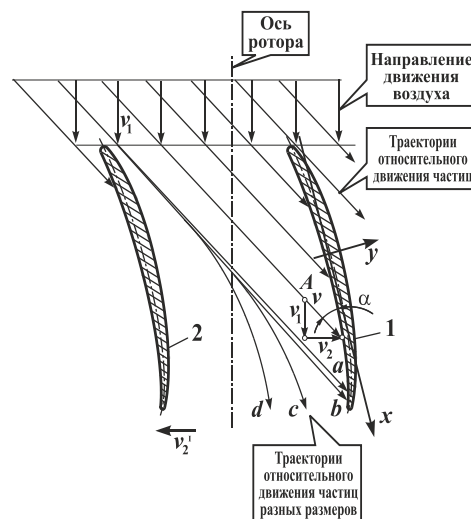


Рис. 7. Схема взаимодействия пыли и частиц аэродинамического потока воздуха с лопатками компрессора

- выходная кромка (зона около выходной кромки) имеет переменный износ, увеличивающийся от полки лопатки к периферии пера лопатки, величина которого может изменяться до 1,5 раз;
- периферийная кромка (зона около периферии корыта пера) имеет переменный износ, уменьшающийся от входной к выходной кромке, величина которого может изменяться до 1,3 ... 1,5 раз;
- поверхность корыта пера лопатки имеет переменный износ, изменяющийся по поверхности до 2-х раз;
- поверхность спинки пера лопатки практически не изнашивается и имеет сравнительно незначительный износ.

#### Список литературы:

1. Демин Ф.И., Проничев Н.Д., Шитарев И.Л. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей. Учеб. пособие. – М.: Машиностроение, 2002. – 328 с. ISBN 5-217-03119-0.
2. Вертолетные газотурбинные двигатели / В.А. Григорьев, В.А. Зрелов, Ю.М. Игнаткин и др.; под общ. ред. В.А. Григорьева и Б.А. Пономарева. -М.: Машиностроение, 2007. – 491 с. ISBN 5-217-03362-2.
3. Абраимов Н.В., Елисеев Ю.С. Химико-термическая обработка жаропрочных сталей и сплавов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 622 с. ISBN 5-89594-066-8.
4. Богуслаев В.А., Качан А.Я., Долматов А.И., Мозговой В.Ф., Кореневский Е.Я. Технология производства авиационных двигателей. Ч. 1. Основы технологии. - Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2007. – 518 с. ISBN 966-87-2.
5. Богуслаев В.А., Яценко В.К., Жеманюк П.Д., Пухальская Г.В., Павленко Д.В., Бень В.П. Отделочно-упрочняющая обработка деталей ГТД. - Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2005. – 559 с. ISBN 966-7108-91-0.

Надійшла до редколегії 16.12.2014.

**D.A. Mikhaylov**

#### **OPERATING HIGHLIGHTS COMPRESSOR BLADES OF GTE AND CLASSIFICATION OF THEIR OPERATIONAL FUNCTIONS**

*The article presents data related to the peculiarities of operation of the compressor blades of GTE. And to develop a system model of the process of transformation properties of the compressor blades during operation. The paper presents a classification of the main operational impacts on the compressor blades and turbine engine developed a hypothetical scheme of interaction of dust particles with wear elements pen compressor blades. A diagram is also given interaction and dust particles with an aerodynamic airflow compressor blades*

**Key words:** gas turbine engine, compressor blades, operating features, the classification of operational functions.

**Д.О. Михайлов**

#### **ОСНОВНІ ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЛОПАТОК КОМПРЕСОРА ГТД І КЛАСИФІКАЦІЯ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ФУНКЦІЙ**

*У статті наведені дані пов'язані з особливостями експлуатації лопаток компресора ГТД. А також розроблена системна модель процесу перетворення властивостей лопаток компресора при експлуатації. У роботі подано класифікацію основних експлуатаційних впливів на лопатки компресора ГТД і розроблена гіпотетична схема взаємодії частинок пилу при зносі елементів пера лопатки компресора. А також наведена схема взаємодії пилу і частинок аеродинамічного потоку повітря з лопатками компресора.*

**Ключеві слова:** газотурбінний двигун, лопатки компресора, особливості експлуатації, класифікація експлуатаційних функцій.