

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ИЗНОСА РАБОЧИХ ЛОПАТОК ПЕРВОЙ СТУПЕНИ КОМПРЕССОРА ВЕРТОЛЕТНОГО ГТД ОТ НАРАБОТКИ

Белоусов А.И., Кинив С.Ю.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара
Сызранский военный авиационный институт, г. Сызрань

Одной из особенностей эксплуатации вертолетных ГТД, ухудшающей условия работы компрессорных лопаток, является попадание в воздушный тракт вместе с воздухом большого количества пыли при работе на земле или вблизи земли. Это приводит к интенсивному износу рабочих лопаток (РЛ) и уменьшению запаса прочности. Абразивный износ лопаток при неблагоприятных полетных условиях может вызвать помпаж двигателя и его отказ [3]. Анализ отказов, приводящих к досрочному съему двигателей, показывает, что около 50% двигателей досрочно снимается из-за отказов компрессора [1]. Поэтому износ рабочих лопаток является одним из параметров, определяющих техническое состояние вертолетных ГТД. Для прогнозирования технического состояния двигателей в условиях эксплуатации устанавливается зависимость между износом рабочих лопаток первой ступени компрессора и наработкой двигателей. Измерение износа РЛ проводилось у двигателей с наработкой от 30 до 1000 ч. Максимально допустимый износ РЛ первой ступени компрессора – 2 мм. Замер износа производился на двигателях, установленных на вертолетах.

Величина износа РЛ вертолетных двигателей зависит от условий эксплуатации и наработки. Полагая условия эксплуатации неизменными (в условиях летного ВУЗа), наработку двигателей можно считать доминирующим параметром по своему воздействию на величину износа РЛ. В данном случае наработка является определяющим параметром, а износ РЛ – определяемым параметром. Для получения требуемой зависимости рассмотрим экспоненциальную модель процесса накопления повреждений деталей машин в нормальной эксплуатации, предложенную И. Б. Тартаковским [2]. Первоначально эта модель применялась только для описания процесса изнашивания деталей машин. В последнее время она успешно применяется также для прогнозирования развития усталостных трещин, накопления повреждений стальных канатов в управлении самолетом и других деталей.

Основой экспоненциальной модели является следующее утверждение: скорость накопления повреждений – есть функция накопленных повреждений

$$\frac{d\delta}{dt} = f(\delta), \quad (1)$$

где δ – накопленное повреждение детали (в данном случае δ выражает износ РЛ в мм);

t – наработка двигателя (в часах).

Очевидно, что функция (1) является очень сложной. Представим эту неизвестную нам функцию в виде степенного ряда

$$\frac{d\delta}{dt} = C + K\delta + K_1\delta^2 + K_2\delta^2. \quad (2)$$

При наиболее простой – линейной схеме процесса накопления повреждений используют только первый член этого ряда $\frac{d\delta}{dt} = C$, в экспоненциальной модели используются первые два члена степенного ряда.

В настоящее время нет способов непосредственного измерения скорости накопления повреждений. В лучшем случае можно измерить конечное приращение повреждения. Поэтому уравнение (2) преобразуем в более удобный для использования вид, проинтегрировав его по наработке

$$t = \int \frac{d\delta}{C + K\delta} = \frac{1}{K} \ln(C + K\delta) + F. \quad (3)$$

Для определения постоянной интегрирования F ставится следующее условие: пусть через t_1 часов после начала работы детали ее повреждение равно δ_1 . После определения постоянной интегрирования и ряда преобразований получаем

$$\bar{\delta} = (\bar{\delta}_1 + h) 10^{\frac{t-t_1}{A}} - h. \quad (4)$$

Постоянные A и h этого уравнения равны

$$A = \frac{1}{K \lg e}; \quad h = \frac{C}{K}. \quad (5)$$

Коэффициент A влияет только на форму кривой накопления повреждений и называется коэффициентом долговечности, постоянная h влияет только на положение кривой накопления повреждений относительно начала координат и называется смещением. Постоянная h есть расстояние между асимптотой кривой накопления повреждений и началом координат с обратным знаком.

Коэффициент A выражается в тех же единицах, что и наработка t . Размерность постоянной h совпадает с размерностью δ [2].

Уравнение (4) выражает наиболее вероятный вариант процесса. Верхняя и нижняя доверительные границы этого процесса описывается уравнениями:

$$\delta = (\bar{\delta}_1 + t_{\beta} \sigma_1 + h) 10^{\frac{t-t_1}{A}} - h; \quad (6)$$

$$\delta = (\bar{\delta}_1 - t_{\beta} \sigma_1 + h) 10^{\frac{t-t_1}{A}} - h, \quad (7)$$

где σ_1 — среднее квадратическое отклонение повреждения в момент времени t_1 ; t_{β} — коэффициент, зависящий от выбранной доверительной вероятности [2].

Для определения постоянных A и h необходимо выполнить исследование по следующей методике.

1. Измерить величину накопленного повреждения достаточно большого числа деталей исследуемого наименования после произвольно выбранной наработки t_1 в условиях обычной эксплуатации.

2. Выполнить эти же измерения на деталях, проработавших произвольно выбранную наработку t_2 (не обязательно, чтобы во втором пункте были исследованы те же экземпляры деталей, которые были исследованы в первом пункте). Наработка t_2 должна быть существенно больше, чем t_1 , учитывая, что прогноз сохраняет достаточную достоверность лишь на протяжении последующего периода, близкого по длительности к периоду $t_2 - t_1$. Необходимое для исследования количество деталей определяют в зависимости от требуемой степени достоверности прогноза, на основании общих принципов математической статистики. Обычно достаточно исследовать 20...30 экземпляров деталей.

3. Вычислить постоянные на основании произведенных измерений по следующим уравнениям

$$A = \frac{t_2 - t_1}{\lg \frac{\sigma_2}{\sigma_1}}; \quad (8)$$

$$h = \frac{\bar{\delta}_2 - \bar{\delta}_1 \frac{\sigma_2}{\sigma_1}}{\frac{\sigma_2}{\sigma_1} - 1}, \quad (9)$$

где $\bar{\delta}_1$ — среднее повреждение после наработки t_1 ;

$\bar{\delta}_2$ — среднее повреждение после наработки t_2 ;

σ_1 и σ_2 — средние квадратические отклонения соответственно после наработки t_1 и t_2 .

Для построения экспоненциальных уравнений требуется всего два значения наработки деталей, а для измерения повреждений используются детали, находящиеся в нормальной эксплуатации.

Рассмотрим, используя экспоненциальную модель, исследование процесса изнашивания РЛ первой ступени компрессора двигателей ТВЗ-

117. После обработки результатов измерения износа РЛ для различной наработки была получена статистическая выборка, которая разбивается на две группы: первая – с наработкой двигателей до 500 ч, вторая – до 1000 ч. Для каждой группы вычисляется средняя наработка, средний износ РЛ, суммарное число случаев для каждой величины износа РЛ и среднее квадратическое отклонение. Результаты этих вычислений приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты обработки данных по износу РЛ компрессора двигателей ТВЗ – 117 по наработке

Износ РЛ, мм	Средняя для группы наработка t, ч	
	262	772
0,1...0,3	11	2
0,3...0,5	6	4
0,5...0,7	9	8
0,7...0,9	4	14
0,9...1,1	–	–
1,1...1,3	–	2
1,3...1,5	–	1
1,5...1,7	–	2
1,7...1,9	–	4
Средний износ РЛ, мм	0,41	0,86
Среднее квадратическое отклонение, мм	0,219	0,461

Математическая обработка табл. 1 по уравнениям (8) и (9) дает значения постоянных $A = 1574$ ч, $h = -0,0045$ мм. Подставляя эти значения в уравнение (4), получаем корреляционное уравнение, выражающее наиболее вероятное течение процесса изнашивания РЛ.

$$\bar{\delta} = 0,4055 \cdot 10^{\frac{t-262}{1574}} + 0,0045. \quad (10)$$

Заменяя $\bar{\delta}$ на C_{cp} и t на t_{Σ} получим

$$C_{cp} = 0,4055 \cdot 10^{\frac{t_{\Sigma}-262}{1574}} + 0,0045. \quad (11)$$

Кривая, соответствующая данному уравнению и нанесенная на корреляционное поле, показана на рис. 1.

$$C_{cp} = 0,4055 \cdot 10^{\frac{t_{\Sigma}-262}{1574}} + 0,0045.$$

Аналогично была получена корреляционная зависимость износа РЛ, для двигателей, эксплуатирующихся на полевых аэродромах

$$C_{cp} = 0,4159 \cdot 10^{\frac{t-269}{1360}} + 0,0041. \quad (12)$$

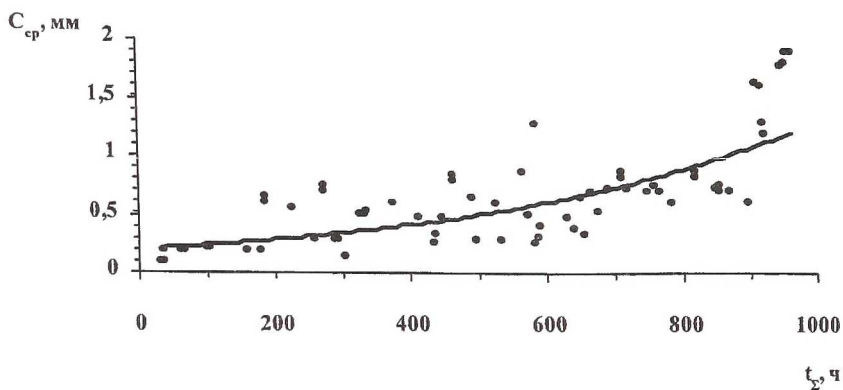


Рис. 1. Линия корреляционной зависимости износа РЛ от наработки двигателей ТВЗ-117 в условиях СВАИ

Для получения сравнительной оценки степени износа РЛ от наработки в различных условиях эксплуатации, полученные зависимости представлены на рис.2.

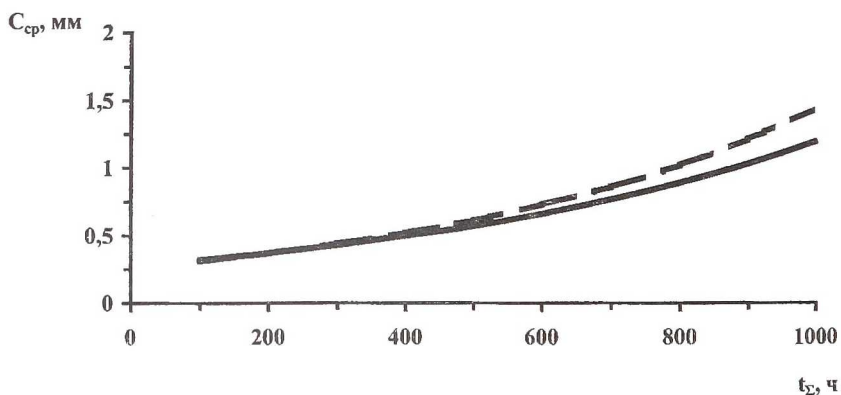


Рис. 2. Износ РЛ первой ступени компрессора двигателей ТВЗ-117 в зависимости от наработки и условий эксплуатации:
 — в условиях СВАИ; - - - - на полевых аэродромах.

Зная максимально допустимый износ РЛ первой ступени компрессора двигателей ТВЗ-117 можно при помощи уравнения верхней доверительной границы вычислить минимальную наработку t_{\min} двигателя при заданной вероятности отказа p . Для этого, решая уравнение (6) относительно текущей наработки при условии $\delta = \delta_{\max}$, получим уравнение

$$t_{\min} = A \cdot \lg \frac{\delta_{\max} + h}{\delta_1 + t_{\beta} \sigma_1 + h} + t_1$$

Так для двигателей, эксплуатирующихся на аэродромах с искусственным покрытием, при доверительной вероятности $\beta = 0,95$ и $t_{\beta}=2$, получим $t_{\min}=856$ ч, а для полевого аэродрома $t_{\min}=755$ ч. Достижение $\delta_{\max}=2$ мм при существенном выходе наработки двигателя за нижний доверительный предел $t_{\min}=856$ ч (для полевого аэродрома $t_{\min}=755$ ч) дает основание предполагать о нарушениях требований технических условий на изготовление двигателя или правил его эксплуатации.

Выводы.

1. Рассмотрена экспоненциальная модель процесса накопления повреждений деталей машин в нормальной эксплуатации.

2. Получены корреляционные уравнения и построены зависимости износа РЛ первой ступени компрессора двигателей ТВЗ – 117 от наработки, эксплуатирующихся на полевых аэродромах и аэродромах с искусственным покрытием.

3. С помощью корреляционных уравнений возможно прогнозировать процесс изнашивания РЛ, при этом следует считать, что процесс изнашивания будет развиваться по наихудшему варианту, т. е. в соответствии с уравнением верхней доверительной границы.

4. При известной величине максимально допустимого износа РЛ δ_{\max} , с помощью уравнения верхней доверительной границы рассчитана минимальная наработка t_{\min} двигателя при заданной вероятности отказа p . Так, для двигателей, эксплуатирующихся на аэродромах с искусственным покрытием, при доверительной вероятности $\beta = 0,95$ получена $t_{\min} = 856$ ч., а для полевого аэродрома $t_{\min} = 755$ ч.

5. Достижение максимального износа РЛ при существенном выходе наработки двигателя за нижний доверительный предел дает основание предполагать о нарушениях требований технических условий на изготовление двигателя или правил его эксплуатации.

Список литературы

1. Белоусов А.И., Кинив С. Ю. Анализ отказов и расчет среднестатистических показателей надежности вертолетных двигателей // Авиационная техника. 2002. №1.
2. Зайцев А.М. Обеспечение надежной работы деталей авиационных двигателей. – М.: Транспорт, 1971. – 196 с.
3. Кеба И.В. Диагностика авиационных газотурбинных двигателей. – М.: Транспорт, 1980. – 248 с.