

МОДЕЛЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЛОПАТОЧНИХ ВІНЦІВ ЗНОШЕНОГО КОМПРЕСОРА

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Україна

У процесі експлуатації газотурбінний двигун піддається впливу різних експлуатаційних факторів, які негативно впливають на його роботу. Одним з таких факторів є потрапляння піску та пилу в проточну частину двигуна.

Виконані роботи з дослідження ерозійного зношування ГТД умовно можна поділити на дві групи. Це, по-перше, роботи, метою яких є підвищення ресурсу елементів ГТД, що зазнавали зношування. І, по-друге, роботи, присвячені розробці методів контролю та аналізу абразивного зносу елементів проточної частини двигуна, насамперед компресора.

В теперішній час з розвитком можливостей обчислювальної техніки знаходять широке застосування методи математичного моделювання ерозійного зносу. У роботі [1] наведено методику чисельного моделювання параметрів потоку в проточній частині багатоступеневого осьового компресора з урахуванням зносу лопаток з використанням програмного модуля Ansys CFX. Вплив пилової ерозії зміну газодинамічних характеристик компресора оцінюється з урахуванням величини зносу хорди в периферійній частині лопаток і величини радіального зазору. Прийнято лінійне зменшення хорди по висоті лопатки, а також, що величини зношування на вхідній та вихідній кромках однакові. Оскільки лопатки робочих коліс зношуються інтенсивніше, то зносом направляючих апаратів у роботі нехтується.

У роботі [2], ґрунтуючись на методі розрахунку параметрів компресора на середньому радіусі, виконано оцінку впливу ерозії лопаток на сумарні характеристики компресора. Як і в роботі [1] розподіл зносу за висотою лопатки прийнято лінійним, а величина зносу вхідного та вихідного краю однаковою. Також прийняті припущення, що максимальна товщина профілю та її положення, форма середньої лінії, кут установки профілю та радіальний зазор не змінюються. Зношування моделюється зміною геометричних параметрів на тільки середньому радіусі.

Варто відзначити, що прийняті моделі зносу в цих роботах не повною мірою відображають реальну картину зносу, тому що ерозія лопаток має не лінійний за висотою характер і інтенсивність зносу на вхідних і вихідних краях різна.

Цей недолік врахований у роботі [3], де представлена оцінка впливу нелінійного за висотою ерозійного зношування робочого колеса на характеристики ступеня компресора ГТД вертольота з використанням програмного модуля Ansys CFX.

У роботі [4] для оцінки впливу зношування на параметри компресора також використовується пакет Ansys CFX. Геометричні параметри, які необхідні для отримання твердотільних моделей лопаточних вінців компресора, визначаються шляхом аналізу геометричних параметрів перерізів зношених лопаток.

У роботі [5] для оцінки зміни геометричних параметрів профілів виконувалося препарування зношених лопаток в декількох перерізах по висоті з подальшим створенням шліфів. Для прогнозування змін характеристик багатоступеневого осьового компресора в результаті ерозійного зношування використовувалася двовимірна осесиметрична математична модель.

З наведеного вище аналізу способів обліку зносу видно, що в практиці знаходять застосування як методи розрахунку параметрів компресора, засновані на одновимірному розрахунку по середньому радіусу, так і двовимірні та тривимірні методи.

Авторами для оцінки впливу зносу проточної частини компресора на параметри та характеристики турбувального ГТД розроблений метод розрахунку, що включає двовимірну повінцеву модель багатоступінчастого компресора, який дозволяє врахувати зміну геометричних параметрів по висоті лопатки з можливістю моделювати знос проточної частини, а також погіршення якості поверхонь, що обтікають.

Для розрахунку характеристики компресора у двовимірній постановці необхідно задати геометричні параметри по висоті лопаткових вінців та проточної частини зношеного компресора. До таких параметрів відносяться: геометричні кути лопаток робочих коліс (β) і направляючих апаратів (α), кут установки профілю γ , хорда профілю b , максимальна товщина профілю s_{max} , форма середньої лінії профілю, число лопаток Z_L , радіальний зазор $\Delta r_{p,зaz}$, шорсткість та ін. Дані параметри представлені на рис. 1.

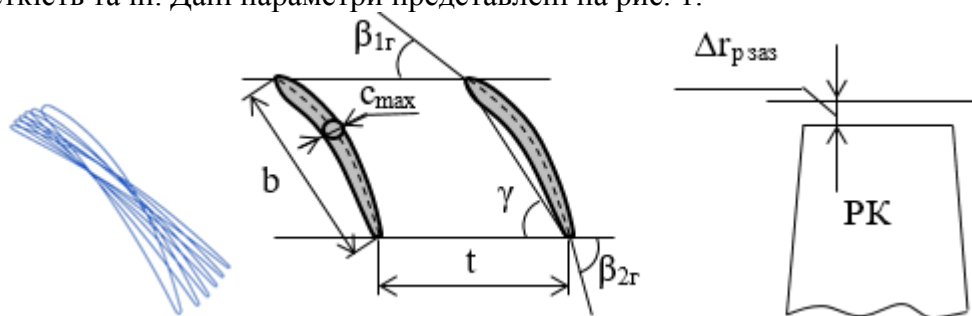


Рисунок 1 – Геометричні параметри лопаткового вінця

Зношування лопаткового вінця, в першу чергу, проявляється на вхідний і вихідний кромках. Зменшення хорди на даних ділянках (b_1 і b_2) тягне за собою збільшення геометричного кута входу (β_{1r}) і зменшення геометричного кута виходу (β_{2r}). Це призводить до суттєвого зменшення кута вигину профілю ($\theta = \beta_{2r} - \beta_{1r}$). Якщо середня лінія профілю представлена дужкою кола, то зношування вхідний і вихідний кромки надають рівноцінний вплив на кут вигину. Тобто, при однаковій величині зносу вхідної і вихідної кромки геометричні кути входу і виходу змінюються однаково. Однак якщо середня лінія профілю описана параболою або іншою кривою, то її кривизна вздовж профілю нерівномірна, відповідно і вплив зносу на вхідну і вихідну кромки по-різному впливає на кут вигину.

При зносі лопатки, крім кута вигину профілю, істотно змінюється кут натікання на профіль $i = \beta_{1r} - \beta_1$, який визначає обтікання профілю. Збільшення кута натікання внаслідок зношування вхідної кромки спричиняє збільшення величини втрат ξ та зменшення діапазону беззривних режимів роботи решіток та лопаткового вінця в цілому.

Для оцінки ступеня зношування елементів проточної частини компресора в процесі експлуатації контролюється зміна радіального зазору та хорди обмеженого числа лопаткових вінців. Найчастіше це перше робоче колесо та кілька лопаткових вінців до яких є доступ через оглядові вікна. Для більш детального аналізу ерозійного зношування може виконуватися обезлопачування компресора під час капітального ремонту або препарування лопаткових вінців після зняття двигуна з експлуатації. В результаті препарування отримують координати спинки та коритця зношеного профілю в декількох перерізах по висоті лопатки.

З отриманих координат профілю можна отримати координати його середньої лінії. Знаходження координат середньої лінії здійснюється шляхом визначення положення центрів вписаних кіл. Зіставлення вихідного та зношеного профілів показано на рис. 2.

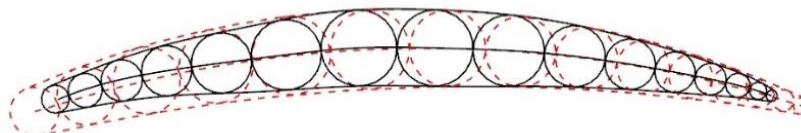


Рисунок 2 – Зіставлення вихідного та зношеного профілів

На підставі даних про знос хорди профілю, а також даних про форму середньої лінії можна визначити зміну геометричних кутів профілів лопаткових вінців.

У випадку, коли середня лінія представлена довільною формою (Рис. 3), для визначення геометричних кутів необхідно знати координати точок середньої лінії і потім апроксимувати в вигляді $y=f(x)$.

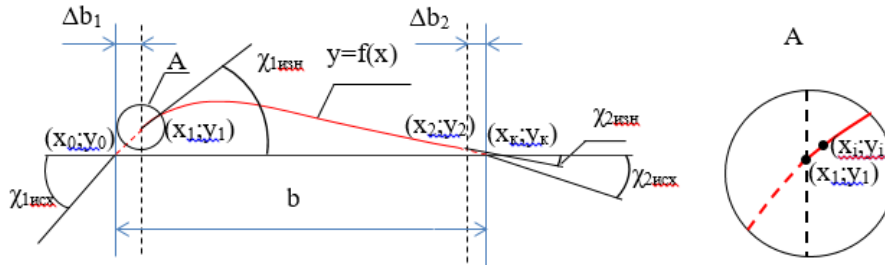


Рисунок 3 – Середня лінія профілю, представлена довільною функцією $y=f(x)$ або набором точок

У разі коли середня лінія вихідного профілю задана координатами, за наявними значеннями зменшення хорди на вхідній (Δb_1) і вихідній (Δb_2) кромках визначаються величини кутів нахилу дотичної до середньої лінії профілю на вхідній ($\chi_{1зн}$) і вихідній ($\chi_{2зн}$) кромках:

$$\chi_{1зн} = \arctg\left(\frac{dy}{dx}\right)_i,$$

$$\chi_{2зн} = \arctg\left(\frac{dy}{dx}\right)_j,$$

де $\left(\frac{dy}{dx}\right)_i$ – похідна функції $y=f(x)$ в точці $x=x_i$,

$\left(\frac{dy}{dx}\right)_j$ – похідна функції $y=f(x)$ в точці $x=x_j$.

У разі коли середня лінія профілю задана координатами, кути нахилу середньої лінії зношеного профілю визначаються з використанням кінцево-різницевого підходу, застосовуючи односторонні різниці:

$$\chi_{1зн} = \arctg\left(\frac{y_i - y_1}{x_i - x_1}\right),$$

$$\chi_{2зн} = \arctg\left(\frac{y_j - y_2}{x_j - x_2}\right).$$

де $(x_1; y_1)$, $(x_2; y_2)$ – координати кінцевих точок середньої лінії зношеного профілю, розташованих на відстані Δb_1 , і Δb_2 від вхідної та вихідної кромки вихідного профілю,

$(x_i; y_i)$, $(x_j; y_j)$ – координати точок найближчих до кінцевих точок зношеного профілю

Після чого визначаються геометричні кути входу та виходу зношеного профілю:

$$\beta_{1з.зн} = \gamma - \chi_{1зн},$$

$$\beta_{2з.зн} = \gamma - \chi_{2зн},$$

де γ – кут установки.

Так як кут $\chi_{1зн} < \chi_{1вих}$ і кут $\chi_{2зн} < \chi_{2вих}$, то із збільшенням зносу профілю кут вигину профілю ($\theta = \chi_2 - \chi_1$) зменшується на величину $\Delta\theta$:

$$\Delta\theta = \Delta\chi_1 + \Delta\chi_2,$$

де $\Delta\chi_1 = \chi_{1\text{вих}} - \chi_{1\text{зн}}$,

$\Delta\chi_2 = \chi_{2\text{вих}} - \chi_{2\text{зн}}$.

Зношування лопатки по висоті відбувається нерівномірно і має нелінійний характер. У зв'язку з цим за основу прийнято дані про знос на периферії та середній радіус відповідно до [5]. Величина зносу в проміжних перерізах визначається шляхом інтерполяції, при цьому передбачається, що втулковий переріз не зношується.

Таким чином, на підставі наявних даних про геометричні параметри лопаток та проточної частини вихідного компресора з використанням запропонованого вище підходу можуть бути визначені геометричні параметри зношених вінців та проточної частини компресора. Схематично зношений лопатковий вінець у порівнянні з вихідним представлений на рис. 4.

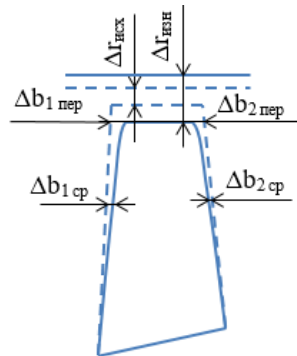


Рисунок 4 – Схематичне зображення зношеної лопатки в порівнянні з вихідною

Крім зміни представлених вище геометричних параметрів при ерозійному зносі суттєво збільшується шорсткість профілю. Шорсткість визначає якість поверхні, яка також визначає на обтікання профілю. Вона залежить від висоти виступів та їхнього розподілу по поверхні. Коли виступи нижче ламінарного підшару, поверхня вважається гідравлічно гладкою, інакше поверхня вважається шорсткою, що, в свою чергу, призводить до збільшення гідравлічних втрат. У цій роботі використовується еквівалентна шорсткість піщинок k_s . Зважаючи на відсутність даних про вимірювання даного параметра в процесі експлуатації, шорсткість зношеного профілю береться відповідно до [6].

Представлений метод моделювання геометричних параметрів дозволяє оцінити зміну хорди, геометричних кутів вхідної та вихідної кромки, максимальної товщини профілю, радіального зазору, а також шорсткості.

Список використаних джерел

1. Двірник Я.В., Павленко Д.В. Влияние пылевой эрозии на газодинамические характеристики осевого компрессора ГТД // Вестник двигателестроения. 2017. № 1. С. 56–66.
2. Баришева Е.С., Дьомін А.Е., Зеленский Р.Л. Моделирование характеристик многоступенчатого осевого компрессора авиационного двигателя с учётом эрозийного износа лопаток // Авиационно-космическая техника и технология. 2017. № 6 (141). С. 58–64.
3. Потапов В. А., Санько А. А. Моделирование характеристик многоступенчатого осевого компрессора турбовального газотурбинного двигателя с учётом нелинейности эрозийного износа его лопаток // Научный Вестник МГТУ ГА. 2020, Том 23, № 05 С.39-53.
4. Гумеров А. В., Акмалетдинов Р. Г. Моделирование эрозийного износа лопатки компрессора // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, №3(27), 2011 С. 233 – 239.
5. Беляев Д.В., Пікула Э.Р., Тализина В.С. «Оценка деформации характеристик осевого компрессора в условиях длительной эксплуатации» / Д.В. Беляев, Э.Р. Пікула, В.С. Тализина // Изв. вуз. Авиационная техника – 1993. – №1. – С.50-54.
6. Aldi, N., Morini, M., Pinelli, M., Spina, P.R., Suman, A., Venturini, M., 2013, Performance evaluation of non-uniformly fouled axial compressor stages by means of computational fluid dynamic analyses, ASME Paper GT2013-95580, 11p.