

ВПЛИВ УПРАВЛІННЯ ПРИМЕЖОВИМ ШАРОМ У ЛОПАТКОВИХ ВІНЦЯХ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СТУПЕНЯ ОСЬОВОГО КОМПРЕСОРА

I. O. Lастівка, канд. ф.-м. наук, доц.

Національний авіаційний університет
iola@nau.edu.ua

Викладено узагальнені результати досліджень, що показують можливості вдосконалення характеристик компресорів газотурбінних двигунів за рахунок управління примежовим шаром у лопаткових вінцях

Ключові слова: примежовий шар, запас газодинамічної стійкості, методи активного і пасивного управління примежовим шаром.

There are generalized results of researches in the article. Influence of active and passive control of boundary layer on compressor characteristics is shown.

Key words: boundary layer, gasdynamic stability margin, active and passive control of boundary layer.

Постановка проблеми

Необхідність вдосконалення параметрів та характеристик компресорів газотурбінних двигунів викликана сучасними вимогами щодо збільшення аеродинамічної навантаженості лопаткових вінців, підвищення економічності компресорів, розширення діапазону беззривного обтікання потоком компресорних решіток, зниження рівня втрат тощо.

Результати дослідження

Дослідження аеродинамічних характеристик компресорних решіток з управлінням обтікання лопаток показали, що, впливаючи на примежовий шар, можна істотно поліпшити характеристики решіток [1–5]. Ця обставина дала змогу розглядати методи активного і пасивного управління примежовим шаром на поверхні лопаток як засоби підвищення аеродинамічного навантаження лопаткових вінців на розрахункових режимах.

На рис. 1 показано (у відносних параметрах) характеристики ступенів осьового компресора з однорядним і дворядним лопатковими вінцями робочого колеса при розрахунковому значенні ступеня підвищення тиску $\pi_{\text{сд},\delta}^* = 1,17$ і колівій швидкості на розрахунковому режимі $u_{\text{с}} = 280 \text{ м/с}$, визначені за методикою, яка ґрунтується на використанні узагальнених характеристик плоских компресорних решіток ($\bar{\pi}_{\text{сд}}^* = \pi_{\text{сд}}^* / \pi_{\text{сд},\delta}^*$ — відносне значення ступеня підвищення тиску; $\bar{q}(\lambda) = q(\lambda) / q_p(\lambda)$ — відносне значення газодинамічної функції (λ — коефіцієнт швидкості)).

Аналіз цих характеристик показує, що на нерозрахункових режимах ступінь підвищення тиску ступеня з дворядним лопатковим вінцем на 10–15 % вищий, ніж у ступені з однорядним лопатковим вінцем.

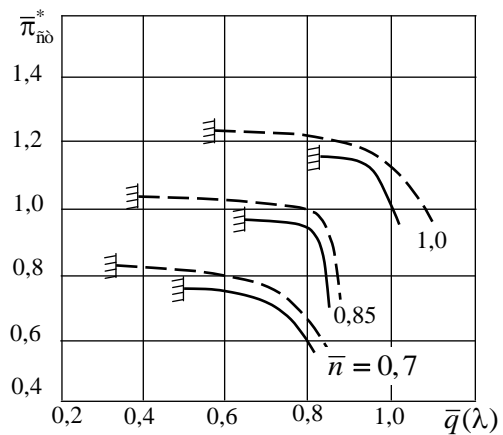


Рис. 1. Характеристики ступенів осьового компресора з однорядним (—) і дворядним (---) лопатковими вінцями робочого колеса

Взаємне розташування профілів у дворядних решітках (на середньому діаметрі) при колівій швидкості $u_{\text{ср}} = 260 \text{ м/с}$ забезпечувало роботу стискування $H_{\text{сд}} = 48 \text{ м}$, що відповідає коефіцієнту навантаження $\mu = (\Delta W_u / u) = 0,715$ (відносний діаметр втулки $\bar{d}_{\text{вд}} = 0,68$, відносна довжина пера лопатки $\bar{h} = 1,8$).

Порівняння характеристик ступенів компресора з дворядним лопатковим вінцем робочого колеса (рис. 2), параметри якого задавались за умови отримання мінімального значення відносного коефіцієнта витрат повного тиску ξ_{min} , показує їх істотну відмінність (на рис. 2 лінія 1 — $(a/b) = 0,071$; 2 — $(a/b) = 0,047$; 3 — $(a/b) = 0,024$; 4 — $(a/b) = 0,008$; 5 — $(a/b) = 0$).

При профілюванні дворядних вінців за умови забезпечення ξ_{min} на розрахунковому режимі рівень втрат у них нижчий, ніж у еквівалентних за напором осьових ступенях з однорядними вінцями.

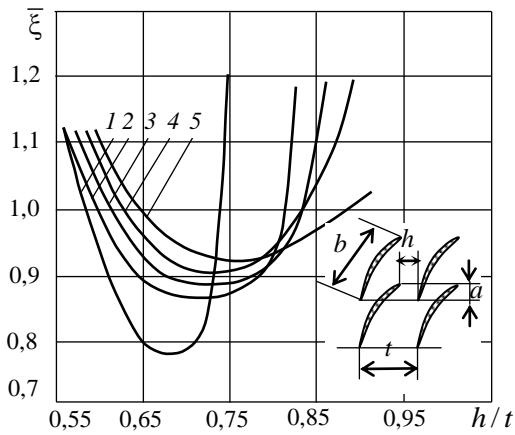


Рис. 2. Залежність характеристик ступенів компресора з дворядним лопатковим вінцем робочого колеса від геометричних параметрів

Ступені з дворядними лопатковими дифузорами, спрофільованими за умови забезпечення $k = (c_y / c_x)_{\max}$, на розрахунковому режимі мають вищий напір і вищий рівень втрат (нижчі значення ККД).

На нерозрахункових режимах (переважно на лівих гілках напірних ліній) ККД ступенів з дворядними лопатковими вінцями дещо вищий, ніж ККД ступенів з еквівалентними однорядними вінцями [2].

Одна з найменш досліджених проблем у компресоробудуванні — це вплив на параметри і характеристики рівнів багатоступеневих компресорів стану поверхні лопаток. Виступи і нерівності на поверхні лопаток, що не перевищують розмірів примежового шару, впливають лише на примежовий шар і через нього — на потік у міжлопатковому каналі.

Виступи і нерівності, розміри яких перевищують параметри примежового шару, впливають безпосередньо на течію в ядрі потоку, приводячи до інтенсивного вихроутворення. У ряді досліджень наголошується, що параметри і характеристики осьових компресорів істотно залежать від стану поверхні лопаток у вінцях лопаток.

У деяких роботах про вплив шорсткості поверхні лопаток на характеристики осьового компресора показано, що загальна шорсткість поверхні лопаток, що відповідає відносній висоті шорсткості $(K_s/b) = 0,45 \cdot 10^{-2}$, призводить до зниження ступеня підвищення тиску майже на 30 % при одночасному зменшенні об'ємних витрат повітря на 15–20 % (порівняно зі значеннями витрат через компресор з гладкими лопатками) [2; 3; 4]. Ці результати отримані при дослідженні характеристик триступеневого осьового компресора з адіабатичною роботою стискування $H_{\text{нд,р}} = 67,3$ кДж/кг з витратою повітря на розрахунковому режимі

$m_{0,p} = 10$ кг/с. Зовнішній діаметр компресора $D_e = 340$ мм, а колова швидкість на розрахунковому режимі $u_e = 302,5$ м/с. Для імітації шорсткості до поверхні лопаток робочого колеса приклеювалися наждачні зерна, причому, розподіл зерен по поверхні лопаток був строго рівномірним.

Характеристики компресора з шорсткими лопатками досліджувалися при значеннях відносної частоти обертання потоку $\bar{n} = (n/n_\delta) = 1$. Число Рейнольдса змінювалося в діапазоні $(3-8,5) \cdot 10^5$. Число Маха на вході в робочі лопатки дорівнювало $M = 0,75$. Вплив шорсткості лопаток на протікання напірної лінії при розрахунковій частоті обертання ілюструє рис. 3 ($\bar{H} = \frac{H_{\text{сд}}}{H_{\text{сд,д}}}$ — відносне значення роботи стискування).

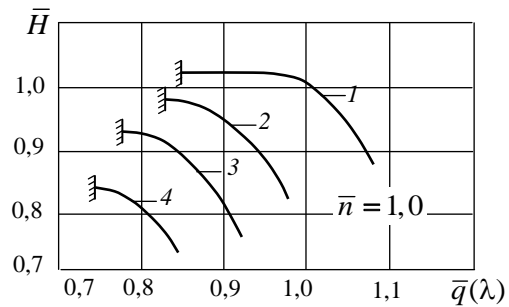


Рис. 3. Вплив шорсткості лопаток на протікання напірної лінії і характеристики компресора

Розглядалися три варіанти шорсткості поверхні лопаток (дрібна, середня і велика), що відповідають певним значенням відносного параметра шорсткості K_s/b , а саме: лінія 1 — компресор з гладкими лопатками; 2 — відносна шорсткість $(K_s/b) = 1,51 \cdot 10^{-3}$; 3 — відносна шорсткість $(K_s/b) = 2,51 \cdot 10^{-3}$; 4 — відносна шорсткість $(K_s/b) = 4,51 \cdot 10^{-3}$.

Порівняно з компресором, що має гладкі лопатки, компресор з шорсткою поверхнею лопаток при розрахунковій частоті обертання мав напірні лінії, зміщені в бік менших значень витрат повітря. Збільшення шорсткості, рівномірно розподіленої на поверхні лопаток, призводить до зниження ККД компресора на номінальному режимі його роботи на 6 % (при відносній шорсткості $(K_s/b) = 4,51 \cdot 10^{-3}$ [1]. Основні причини таких змін — збільшення втрат і зменшення кутів відхилення в апаратах лопаток з шорсткою поверхнею.

Як впливає з аналізу цих характеристик, зсув напірних ліній у бік менших витрат супроводжується збільшенням нахилу характеристик і зменшенням значень ступенів підвищення тиску, що досягається при кожній частоті обертання. Ці результати досить добре узгоджуються з даними про вплив на опір тіл, що обтікаються в'язкою рідиною, стану обтічної поверхні, тобто рівня її шорсткості [3; 4].

Як впливає з рис. 4, створенням штучної шорсткості на поверхні лопаток у вінцях лопаток можна певним чином впливати на характеристики осьового компресора, зокрема на ступінь підвищення тиску $\bar{\pi}_e^* = \frac{\pi_{e,\theta}^* \delta \bar{n} \delta}{\pi_{e,\text{æäåä}}^*}$.

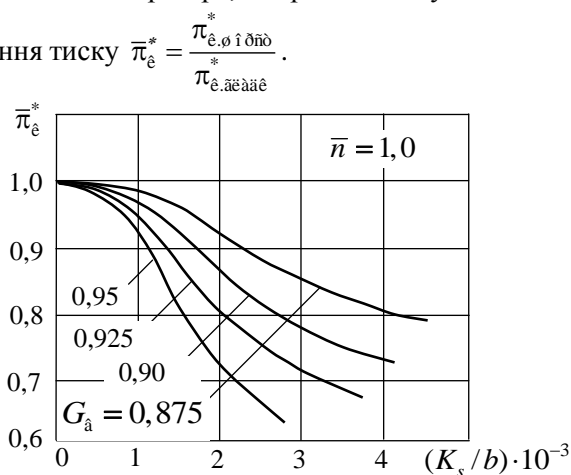


Рис. 4. Залежність ступеня підвищення тиску від шорсткості поверхні лопаток

Результати експериментальних досліджень характеристик ступеня осьового компресора, що має на розрахунковому режимі параметри $\pi_{\text{н}0,\delta}^* = 1,17$, $\eta_{\text{н}0,\delta}^* = 0,84$, $u_\epsilon = 280$ м/с, $D_\epsilon = 372$ мм, $M_w = 0,9$, показали, що шорсткість вхідної ділянки спинки лопатки робочого колеса, розподілена вздовж всієї висоти лопатки і така, що має відносний розмір 0,2 (по хорді), призводить до зсуву вниз напірних ліній при всіх частотах обертання ротора. Одночасно розширюється діапазон беззривного обтікання ступеня — межа обертового зриву зміщується у бік менших витрат повітря. Відносна висота шорсткостей вхідної ділянки поверхні лопаток відповідала $(K_s/b) = 2 \cdot 10^{-3}$.

На рис. 5 подано характеристики ступеня осьового компресора з гладкими лопатками (штрихові лінії) і з лопатками, що мають турбулізатори

ламінарного примежового шару на вхідній ділянці спинки (суцільні криві). Як впливає з аналізу графіків, турбулізатори у вхідній частині лопаток роблять характеристики пологими і зсувають межу обертового зриву в бік менших витрат повітря.

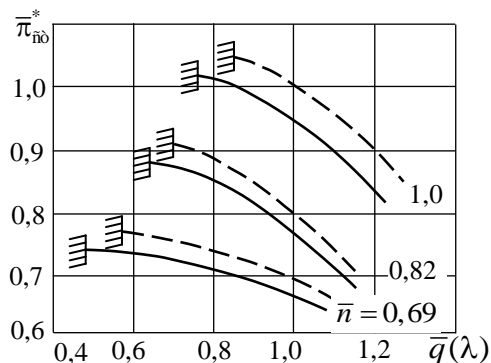


Рис. 5. Характеристики ступеня осьового компресора з гладкими лопатками (-----) і лопатками з турбулізаторами примежового шару (—)

Висновок

Наведені вище матеріали дають змогу вважати, що управління обтіканням лопаткових вінців є досить ефективним засобом удосконалення характеристик ступенів осьових компресорів і підвищення їх запасів газодинамічної стійкості.

ЛІТЕРАТУРА

1. Терещенко Ю. М. Аэродинамическое совершенствование лопаточных аппаратов компрессоров / Ю. М. Терещенко. — М. : Машиностроение, 1987. — 168 с.
2. Терещенко Ю. М. Аэродинамика компрессоров с управлением отрывом потока / Ю. М. Терещенко, М. М. Митрахович. — Труды института математики Национальной академии наук Украины. — Т. 16. — 1996. — 160 с.
3. Шлихтинг Г. Ю. Теория пограничного слоя: пер. с англ. / Г. Ю. Шлихтинг. — М. : Наука, 1969. — 413 с.
4. Чжен П. Управление отрывом потока: пер. с англ. / П. Чжен. — М. : Мир, 1979. — 365 с.
5. Расширение диапазона бесрывного течения в компрессорах газотурбинных двигателей / Ю. М. Терещенко, И. А. Ластивка, Л. Г. Волянская [та ін.] // Восточно-европейский журнал передовых технологий. — № 4/7 (46), 2010. — С. 12—15.

Стаття надійшла до редакції 22.02.2011.