

УДК 621.515-226.2

П.І. Греков, канд. техн. наук
Л.Г. Волянська, канд. техн. наук
Курош Хагані (Іран)
В.Є. Алпатов

ЕКОНОМІЧНІСТЬ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА З ДВОРЯДНИМИ ЛОПАТКОВИМИ ВІНЦЯМИ В ОСЬОВОМУ КОМПРЕСОРИ

НАУ, кафедра авіаційних двигунів, e-mail: avsacsm@nau.edu.ua

Розглянуто один зі шляхів вирішення проблеми підвищення економічності газотурбінних двигунів. Наведено результати досліджень ступеня осьового компресора з постійною циркуляцією. Розроблено рекомендації щодо профілювання дворядних лопаткових вінців на основі використання теорії ефекту ежекції зі змішуванням потоків газу, що ежектується, і газу, який ежектує в напівобмеженому просторі. На підставі порівняльного аналізу результатів експериментальних досліджень ступенів осьового компресора з дворядними й однорядними лопатковими вінцями отримано рекомендації щодо можливості застосування ступенів осьового компресора, спрофільованих за законом постійної циркуляції з малими значеннями відносного діаметра втулки, в авіаційних газотурбінних двигунах.

Вступ

Осьовий компресор є одним з основних конструктивних елементів газотурбінного двигуна (ГТД), від характеристик якого залежать характеристики всього двигуна. В авіаційному двигунобудуванні переважно застосовують дістали осьові компресори.

Відцентрові компресори зрідка використовуються в комплексі з осьовими компресорами й одержали назву осевідцентрові. Однією з основних причин обмеженого застосування відцентрових компресорів в авіаційних ГТД є їхня низька економічність.

Підвищення економічності осьових компресорів можливе завдяки практичному застосуванню в компресоробудуванні останніх досягнень в області аеродинаміки і матеріалознавства.

Постановка задачі

Процес стискування газу в лопаткових апаратах осьового компресора супроводжується гідравлічними втратами енергії, що супроводжується підвищенням тепломісткості газу, змінюючи, таким чином, його стан. Основну частину гідравлічних втрат складають профільні і вторинні втрати. Профільні втрати містять у собі втрати енергії, що виникають при обтіканні лопаткових вінців плоским потоком (лопаток нескінченної довжини). Вторинні втрати зумовлені кінцевою довжиною лопаткових вінців. Вони містять у собі втрати від вторинних течій газу, що мають напрямок руху, відмінний від напрямку основного потоку. Тому під час проектування осьових компресорів однією з основних задач є запобігання радіальної течії газу, особливо в осьових зазорах. Енергія, затрачувана на ці течії, не використовується для підвищення тиску, а витрачається на радіальні перетікання.

У цьому випадку вона еквівалентна втратам, що знижують коефіцієнт корисної дії (ККД) і напірність ступеня осьового компресора.

Шляхи вирішення проблеми

Забезпечення радіальної врівноваженості потоку газу в осьових зазорах ступеня можна досягти, використовуючи закон постійної циркуляції при визначенні кінематичних параметрів за висотою робочої лопатки і напрямного апарата.

Із праць [1–3] відомо, що ступінь з постійною циркуляцією характеризується незмінністю перед робочим колесом і за ним осьової швидкості за висотою лопатки, що сприятливо впливає на ККД ступеня осьового компресора.

Якщо ступінь осьового компресора дозвукова і немає обмеження числа Маха за відносною швидкістю для робочого колеса на периферії, а для напрямного (спрямляючого) апарата за абсолютною швидкістю біля втулки, то однією з основних проблем є забезпечення близького до розрахункового значення напору у втулкових перерізах робочих лопаток ступеня з постійною циркуляцією [4].

Необхідність збільшення напору втулкових перерізів у ступенях з постійною циркуляцією, через зменшення колової швидкості, призводить до значного збільшення закручування потоку, що пов'язано зі зростанням кута повороту потоку.

В осьових компресорних ступенях це призводить до збільшення дифузорності міжлопаткових каналів, що викликає, у свою чергу, збільшення втрат унаслідок відривання потоку.

Вирішення задачі забезпечення безвідривної течії в корневих перерізах можливе при спільному розгляді питань збільшення щільності решітки і застосування методів керування обтіканням лопаткових вінців.

Проблема зниження вторинних втрат, зумовлених особливостями течії біля втулки, набуває особливого значення для ступенів з постійною циркуляцією.

Велике закручування потоку біля втулки призводить до значного зниження реактивності ступеня ρ до від'ємних значень i , отже, нерівномірного навантаження ступеня за висотою лопатки через обмеження за ступенем реактивності. Обмеження за ступенем реактивності $\rho < 0$ викликано збільшенням кута відносної швидкості $\beta_2 > 90^\circ$.

Для збереження постійного напору у зв'язку з введенням обмеження $\beta_2 < 90^\circ$ необхідно, зменшувати кут входу потоку β_1 .

Зменшення β_1 при тому самому куті повороту потоку призводить до збільшення коефіцієнта дифузійності D через зменшення W_2 [4]:

$$D = 1 - \frac{W_2}{W_1} + 0,5b/t \frac{\Delta W_u}{W_1},$$

де W_2 – відносна швидкість потоку на виході із решітки; W_1 – відносна швидкість потоку на вході в решітку; b/t – щільність решітки; ΔW_u – закрутка потоку.

Таким чином, обмеження кута відносної швидкості на вході в решітку не вирішує проблеми забезпечення безвідривного обтікання кореневих перерізів.

Задача ускладнюється також особливостями вторинних течій потоку газу в міжлопатковому каналі поблизу втулкових перерізів, що несприятливо впливає на стійкість примежового шару.

У працях [5; 6] доведено, що застосування дворядних лопаткових вінців із заданим законом зміни осьового і крокового зсуву по висоті вінця дозволяє забезпечити менші профільні втрати і більші критичні кути атаки порівняно з однопрофільними лопатками.

Експериментальні дослідження

З метою розробки рекомендацій щодо забезпечення необхідного відхилення потоку в корневих перерізах лопаткових вінців і здійснення цього процесу з мінімальними втратами були проведені експериментальні дослідження дозвуківого компресорного ступеня з однорядними і дворядними лопатковими вінцями.

Робоче колесо ступеня з дворядними лопатковими вінцями показано на рис. 1.

Ступінь осьового компресора був профільований відповідно до закону постійної циркуляції.

Дворядна лопатка компресорного ступеня має консольно встановлені на загальному хвостовику два пера по ходу потоку і має щільний канал, що характеризується осьовим і кроковим зсувом пер першого і другого рядів.

Основна задача експериментальних досліджень полягала у визначенні коефіцієнтів втрат і кута виходу потоку β_2 . Крім того, проводилося вимірювання полів швидкостей і тисків в осьовому зазорі і на виході зі спрямляючого апарата, а також на поверхні лопаткових вінців.

У результаті досліджень був отриманий закон зміни осьового і крокового зсуву профілів дворядного лопаткового вінця на основі розробленої методики розрахунку параметрів щілини.

В основу методики покладено теорію ежекції зі змішуванням потоків газу, що ежектуються, і газу, який ежектує в напівобмеженому просторі. Як вихідні дані для розрахунку були використані експериментальні дані розподілу тисків на поверхні лопаткового вінця.

Аналіз і узагальнення результатів теоретичних і експериментальних досліджень показали:

– параметри оптимального осьового і крокового зсуву змінюються за висотою лопатки за лінійним законом при постійній хорді:

$$f_{xj} = \frac{r_n - r_i}{r_n - r_k} (f_{xk} - f_{xh}) + f_{xn};$$

$$f_{yj} = \frac{r_n - r_i}{r_n - r_k} (f_{yk} - f_{yh}) + f_{yn},$$

де f_{xi} – осьовий зсув профілів пера на i -му радіусі; r_n – радіус кінцевого перерізу; r_i – i -й радіус; r_k – радіус кореневого перерізу; f_{yi} – кроковий зсув профілів пера на i -му радіусі;

– у корневих перерізах однопрофільних лопаткових вінців спостерігається набрякання примежового шару, що призводить до передчасного його відривання зі спинки лопатки і обмежуючої поверхні біля втулки;

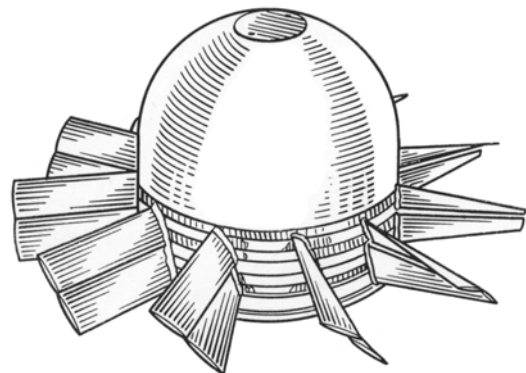


Рис. 1. Робоче колесо осьового компресора з дворядними лопатковими вінцями

– у корневих перерізах дворядної лопатки забезпечується достатня інтенсивність течії зі щільного каналу для здування примежового шару, що перетікає з торцевої поверхні біля кореня лопатки на спинку пера другого ряду лопатки, запобігаючи тим самим його набряканню і відриванню.

На рис. 2 показано розподіл коефіцієнта адиабатичного напору по радіусу за робочим колесом із дворядними й однорядними лопатковими вінцями при розрахунковому коефіцієнті витрати ступеня

$$\bar{C}_a = 0,48.$$

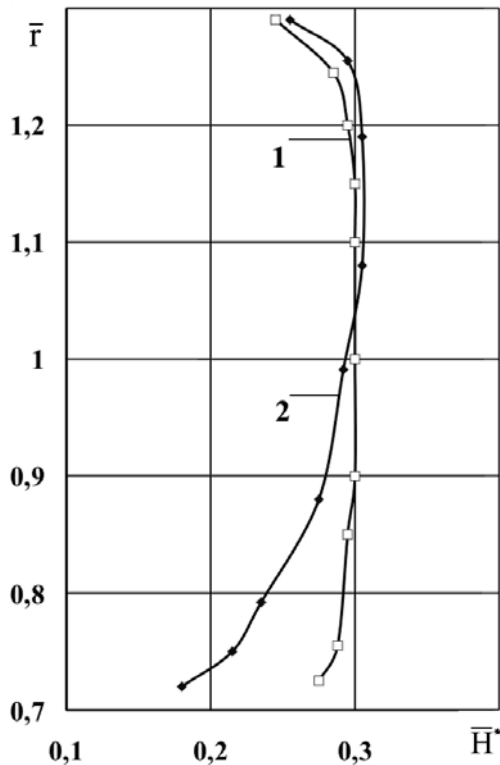


Рис. 2. Розподіл коефіцієнта адиабатичного напору по радіусу за робочим колесом:

1 – дворядний лопатковий вінець; 2 – однорядний лопатковий вінець

З рис. 2 видно, що ступінь осьового компресора з дворядними лопатковими вінцями має більш рівномірний розподіл адиабатичного напору за висотою вінця при більших (до 40%) значеннях біля втулкових перерізів.

На рис. 3 зображено у відносних параметрах експериментальні характеристики ступенів з однорядними і дворядними лопатковими вінцями. Порівняння цих характеристик показує, що напірність ступеня з дворядними лопатковими вінцями на 9–11% вища, ніж ступеня з однорядними вінцями.

Одночасно розширюється діапазон безвідривного обтікання ступеня.

На нерозрахункових режимах ККД ступеня з дворядними лопатковими вінцями значно вищий, ніж ступеня з однорядними вінцями (рис. 3, б).

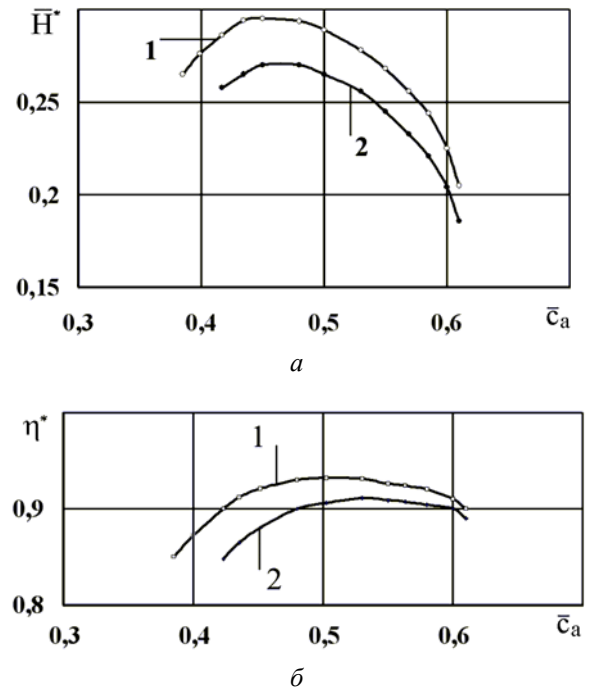


Рис. 3. Експериментальна напірна характеристика ступеня:

a – зміна коефіцієнта адиабатичного напору залежно від коефіцієнта витрати; *b* – залежність ККД ступеня від коефіцієнта витрати;

1 – дворядний лопатковий вінець; 2 – однорядний лопатковий вінець

На рис. 4 показано залежність впливу зміни ККД компресора на питому витрату палива ГТД у відсотках при різних значеннях температури газу перед турбіною T_g^* .

При температурі газу перед турбіною $T_g^* = 1400\text{K}$ та ступеня підвищення тиску в компресорі до $\pi_k^* = 12$ зменшення ККД компресора на 1% призводить до підвищення питомої витрати палива ГТД приблизно прямо пропорційна в усьому діапазоні зміни ККД компресора.

При менших значеннях температури T_g^* інтенсивність підвищення питомої витрати палива ГТД при зменшенні ККД компресора збільшується.

Для більших значень температури T_g^* інтенсивність зростання питомої витрати палива зменшується, однак знаходиться на високому рівні.

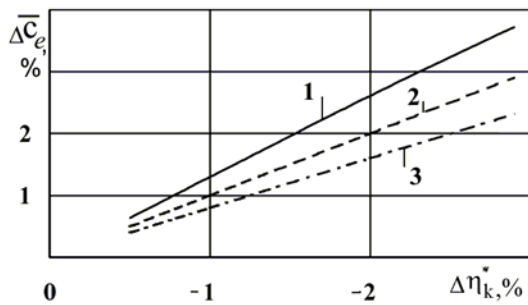


Рис. 4. Залежність впливу зміни ККД компресора на питому витрату палива ГТД при $\pi_k^* = 12$:

1 – $T_r^* = 1200\text{K}$; 2 – $T_r^* = 1400\text{K}$; 3 – $T_r^* = 1600\text{K}$

Висновки

1. Основна частина зниження втрат повного тиску і підвищення аеродинамічного навантаження припадає на кореневі перерізи дворядних лопаткових вінців, що сприятливо позначається на роботі ступеня з постійною циркуляцією.
2. Застосування дворядних лопаткових вінців з оптимальними параметрами за радіусом дозволяє підвищити ККД ступеня на 3–4% і збільшити аеродинамічне навантаження на 9–11%.
3. Економічність ГТД у разі використання дворядних лопаткових вінців в осьовому компресорі може бути збільшена на 2–5%.

4. Запропонований закон профілювання лопаткових вінців осьового компресора з використанням пасивних способів керування примежовим шаром може бути рекомендований для профілювання перших ступенів осьового компресора з малим значенням відносного діаметра втулки.

Література

1. Терещенко Ю.М. Газодинамический расчет ступени компрессора и турбины газотурбинного двигателя. – К.: КВВАИУ, 1974. – 78 с.
2. Юрин А.В. Выбор основных параметров и расчет осевого многоступенчатого компрессора. Куйбышев: КАИ, 1970. – 103 с.
3. Сироткин Я.А. Аэродинамический расчет лопаток осевых турбомашин. – М.: Машиностроение, 1972. – 448 с.
4. Холщевников К.В., Емин О.Н., Митрохин В.Т. Теория и расчет авиационных лопаточных машин: Учеб. для студентов вузов по спец. «Авиационные двигатели». – 2-е изд., доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 432 с.
5. Терещенко Ю.М. Аэродинамическое совершенствование лопаточных аппаратов компрессоров. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
6. Гостелов Дж. Аэродинамика решеток турбомашин: Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 392 с.

Стаття надійшла до редакції 10.11.05.

П.И. Греков, Л.Г. Волянская, Курош Хагани (Иран), В.Е. Алпатов

Экономичность газотурбинного двигателя с двухрядными лопаточными венцами в осевом компрессоре. Рассмотрен один из путей решения проблемы повышения экономичности газотурбинных двигателей. Приведены результаты исследований ступени осевого компрессора с постоянной циркуляцией. Разработаны рекомендации по профилированию двухрядных лопаточных венцов на основе использования теории эффекта эжекции со смешиванием потоков эжектируемого газа и газа, который эжектируется в полуограниченном пространстве. На основе сравнительного анализа результатов экспериментальных исследований ступеней осевого компрессора с двухрядными и однорядными лопаточными венцами получены рекомендации о возможности применения ступеней осевого компрессора, спрофилированных по закону постоянной циркуляции с малыми значениями относительного диаметра втулки, в авиационных газотурбинных двигателях.

P.I. Grekov, L.G. Volyanska, Koorosh Khaghani (Iran), V.E. Alpatov

Profitability of the gas-turbine engine with two-row blade wreaths in the axial compressor

The way of the solution of increasing effectivity gas turbine engine problem is considered. Results of researches of the axial compressor stage with constant circulation are submitted. Recommendations for profiling two-row blade rings are developed on the basis of use of ejection effect with mixing flow ejected gas and gas ejected in semibounded space. Comparative analysis of results of experimental research of two-row blade rings and one-row blade rings has been done. Recommendations for use gas turbine engine axial compressor stage profiled according to the law of constant circulation with small values of hub ratio are carried out.