УДК 629.735.03:621.43.031.3(045)
DOI: 10.15587/1729-4061.2017.109556

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КІЛЬЦЕВОГО ВДУВУ НА ПАРАМЕТРИ СТУПЕНЯ ОСЬВОГО КОМПРЕСОРА

Ю. М. Терещенко
Доктор технічних наук, професор*
E-mail: Terj@nau.edu.ua
К. В. Дорошенко
Кандидат технічних наук*
E-mail: Kiki_ua@ukr.net
І. О. Ластівка
Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри
Кафедра вищої математики**
E-mail: lola@nau.edu.ua
Ю. Ю. Терещенко
Кандидат технічних наук*
E-mail: Terj-nau@ukr.net
*Кафедра авіаційних двигунів**
**Національний авіаційний університет
пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058

Представлено результати чисельного моделювання течії в ступені осьового компресора з кільцевим вдувом газу перед робочим колесом. Газодинамічна дія здійснювалася при роботі ступеня на границі зриву. Ефективність кільцевого вдуву досліджувалась при значеннях кута вдуву від 5° до 90°. Результати досліджень показали, що кільцевий вдув дозволяє покращити аеродинамічні характеристики ступеня компресора

Ключові слова: моделювання течії, газодинамічна дія, кільцевий вдув, ступінь компресора, гідравлічні втрати

Представлены результаты численного моделирования течения в ступени осевого компрессора с кольцевым вдувом газа перед рабочим колесом. Газодинамическое воздействие осуществлялось при работе ступени на границе срыва. Эффективность кольцевого вдува исследовалась при значениях угла вдува от 5° до 90°. Результаты исследований показали, что кольцевой вдув позволяет улучшить аэродинамические характеристики ступени компрессора

Ключевые слова: моделирование течения, газодинамическое воздействие, кольцевой вдув, ступень компрессора, гидравлические потери

1. Вступ

Забезпечення стійкої роботи компресора в широкому діапазоні експлуатаційних режимів – одна з важливих задач двигунобудування.

Використання різних видів газодинамічної дії на течію в компресорі дозволяє поліпшити параметри і характеристики газотурбінних двигунів [1].

Особливий інтерес представляє дослідження методів активної газодинамічної дії на течію в елементах газотурбінних двигунів. Газодинамічна дія дозволяє зменшити рівень втрат і нерівномірність потоку, викликану аеродинамічними слідами. Тому комплексне вивчення течії в проточній частині компресорів є актуальною задачею у вирішенні проблеми підвищення ефективності газотурбінних двигунів.

2. Аналіз літературних даних та формулювання проблеми

У роботі [2] представлені результати досліджень управління слідами за елементами високонавантаженого компресора шляхом імпульсного вдуву. У роботі [3] показано, що вдув в елементи статора перед першим ступенем зменшує рівень колової нерівномірності потоку. Експериментально і аналітично встановлено, що газодинамічна дія на сліди дозволяє зменшити рівень вібронапружень у робочому колесі. У роботі [4] аналізується ефективність імпульсного і постійного вдуву для забезпечення стійкої роботи компресора. Порівняння результатів показало, що використання імпульсного вдуву ефективніше, ніж постійного вдуву. В роботах [2–4] досліджується вплив вдуву по всій довжині лопатки через спеціальні отвори. Реалізації цього методу вимагає використання лопаток складної конструкції. Крім того, використання імпульсного вдуву ускладнює систему автоматичного керування.

У роботах [5, 6] представлені результати досліджень впливу вдуву в робочому колесі на параметри ступеня осьового компресора. Вдув здійснювався через два щілинних отвори перед робочим колесом. У роботі [5] показано, що при певних параметрах вдуву досягається збільшення ступеня підвищення тиску і коефіцієнта корисної дії. Представлений вираз для визначення коефіцієнта корисної дії з урахуванням маси повітря, що видувається. У роботі [6] досліджується структура потоку при вдуві. Показано, що рівень нерівномірності потоку за робочим колесом зменшується. У роботі [7] авторами представлені результати досліджень комбі-

© Ю. М. Терещенко, К. В. Дорошенко, І. О. Ластівка, Ю. Ю. Терещенко, 2017

НЕ ЯВЛЯЕТСЯ ПЕРЕИЗДАНИЕМ

нованого використання дискретного вдуву в периферійну частину компресора і надроторного пристрою. Показано, що при оптимальних параметрах може бути поліпшена газодинамічна стійкість компресора. Проте в дослідженнях [5–7] вдув здійснюється дискретно через декілька щілинних отворів. За певних умов дискретність вдуву може призвести до збільшення вихороутворення в периферійній частині робочого колеса.

У роботі [8] представлені результати досліджень трансзвукового робочого колеса осьового компресора. Вдув здійснювався на різних відстанях перед робочим колесом з виступаючих каналів. Висота виступу варіювалась від 1 до 4 мм. Показано, що при певних параметрах вдуву можна забезпечити вирівнювання поля швидкостей в периферійній частині робочого колеса.

У роботі [9] представлені результати експериментального та обчислювального дослідження течії в низьконапірному триступінчатому компресорі. Вдув додаткової маси повітря здійснювався через декілька виступаючих форсунок, розташованих на вході в перший ступінь. Показано, що використання газодинамічної дії на потік приводить до поліпшення характеристики компресора. У роботах [8, 9] встановлено, що виступаючі канали для вдува є джерелом генерації вихорів перед робочим колесом. Це може призвести до погіршення аеродинамічних характеристик вінців лопаток.

У роботі [10] представлені результати досліджень робочого колеса з рециркуляцією течії в периферійній частині. За допомогою спеціальних каналів частина повітря була спрямована після виходу з робочого колеса на вхід. Як наголошується, ця система може бути ефективною навіть при невеликій витраті рециркулюючого повітря (0.2 % від витрати в ступені). Проте, в спеціальних каналах прямокутного перерізу спостерігався високий рівень втрат.

Результати досліджень [1–10] показали ефективність газодинамічної дії на течію в компресорі. В той же час дотепер залишаються невирішеними задачі, пов'язані з вибором оптимальних параметрів газодинамічної дії. Зокрема, не вирішені задачі оптимізації параметрів течії в периферійній частині компресора.

3. Ціль та задачі дослідження

Ціль роботи є розробка рекомендацій щодо вибору раціональних параметрів кільцевого вдуву в ступенях осьового компресора.

Для досягнення цілі дослідження були поставлені такі завдання:

– провести розрахунково-експериментальне дослідження течії в ступені осьового компресора з кільцевим вдувом газу перед робочим колесом;

– оцінити вплив зміни кута вдуву на коефіцієнт втрат повного тиску в робочому колесі;

– оцінити вплив зміни кута вдуву на ступінь підвищення тиску в ступені.

4. Метод дослідження течії в ступені осьового компресора

Дослідження виконано за допомогою чисельного моделювання течії з використанням 3D моделі ступеня компресора. Була побудована неструктурована адаптивна розрахункова сітка, що складається з 2.013 млн. комірок. Для коректного використання умови періодичності розрахункова область кожного лопаткового вінця складалася з однієї лопатки і міжлопаткового каналу. Розрахунок турбулентної течії проводився шляхом чисельного розрахунку рівнянь Навьє-Стокса. Рівняння замикалися моделлю турбулентної в'язкості SST. Вибрана розрахункова схема другого порядку з локальним використанням розрахункової схеми першого порядку.

Достовірність отриманих результатів забезпечувалася виконанням тестових задач [11].

5. Результати дослідження впливу кільцевого вдуву на параметри ступеня осьового компресора

Досліджуваний ступінь осьового компресора складався з трьох лопаткових вінців: вхідного напрямного апарату, робочого колеса і напрямного апарату. 3D модель ступеня показано на рис. 1. Основні параметри ступеня представлені в роботі [11].

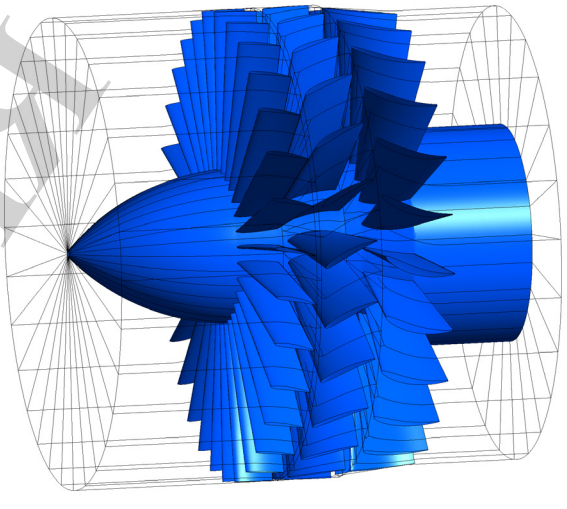

Рис. 1. Ступінь осьового компресора

Першим етапом досліджень був розрахунок характеристики ступеня (частота обертання ротора n=8154 об/хв). Характеристика ступеня (рис. 2) розраховувалася як залежність ступеня підвищення тиску від коефіцієнта швидкості.

Ступінь підвищення тиску розраховувався за формулою:

$$\pi = \frac{p_2^*}{p_1^*}, \qquad (1)$$

де p_1^* – середнє значення повного тиску на вході в ступінь, p_2^* – середнє значення повного тиску на виході із ступеня. Осереднення параметрів потоку здійснювалося за принципом середньомасового осереднення за радіусом.

Коефіцієнт швидкості визначався зі співвідношення:

$$\lambda_c = \frac{c}{a}, \qquad (2)$$

ТОЛЬКО ДЛЯ ЧТЕНИЯ

де c – осьова швидкість потоку на вході, a – швидкість звуку.

На рис. 2 лінією з крапками позначені результати, отримані шляхом чисельного моделювання течії. Крапками на рис. 2 позначені дані фізичного експерименту [12].

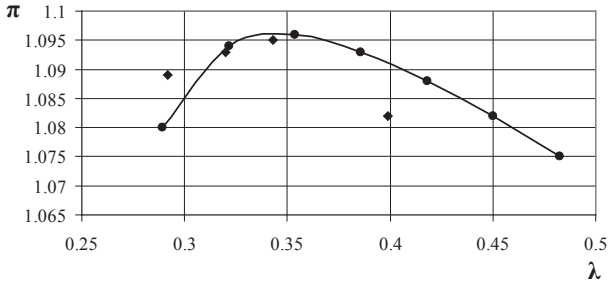

Рис. 2. Характеристика ступеня осьового компресора

Порівняння результатів обчислювального і фізичного експерименту [12] показало, що похибка розрахунків течії при моделюванні склала 0.09...0.83 %.

При значеннях коефіцієнта швидкості на вході $\lambda_c < 0.32$ при обтіканні спостерігалися зриви потоку з лопаток. Також спостерігалося зниження ступеня підвищення тиску і зростання рівня гідравлічних втрат. Тому для дослідження ефективності газодинамічної дії вибрано режим роботи ступеня на межі зриву. Цей режим відповідає осьовій швидкості на вході c=90 м/с і окружній швидкості на кінцевому радіусі u=170.7 м/с.

Газодинамічна дія на потік здійснювалася видувом повітря перед робочим колесом через кільцеву щілину. Ефективність газодинамічної дії на течію досліджувалася при декількох фіксованих значеннях кута вдуву γ в діапазоні від 5° до 90°. Схема газодинамічної дії кільцевим вдувом представлена на рис. 3.

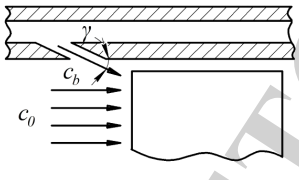

Рис. 3. Схема газодинамічної дії кільцевим вдувом на потік перед робочим колесом

Інтенсивність газодинамічної дії на потік оцінювалася коефіцієнтом імпульсу вдуву c_μ:

$$c_\mu = \frac{\rho_в c_в^2 F_щ \sin\gamma}{\rho_o c_o^2 F_o}, \quad (3)$$

де $\rho_в$ – густина повітря на виході з щілини, ρ_o – густина повітря в основному потоці, $F_щ$ – площа перетину на виході з щілини, F_o – площа перетину на вході в робоче колесо, $c_в$ – швидкість потоку повітря на виході з щілини, c_o – швидкість потоку повітря в основному потоці на вході в робоче колесо.

Коефіцієнт втрат повного тиску розраховувався за формулою:

$$\xi = \frac{p_1'^* - p_2'^*}{\frac{\rho_o w_m^2}{2}}, \quad (4)$$

де $p_1'^*$ і $p_2'^*$ – середні значення повного тиску у відносному русі на вході і виході з робочого колеса відповідно, w_m – середня відносна швидкість потоку в робочому колесі.

На рис. 4 представлена залежність коефіцієнта втрат повного тиску в робочому колесі від коефіцієнта імпульсу вдуву при різних кутах вдуву.

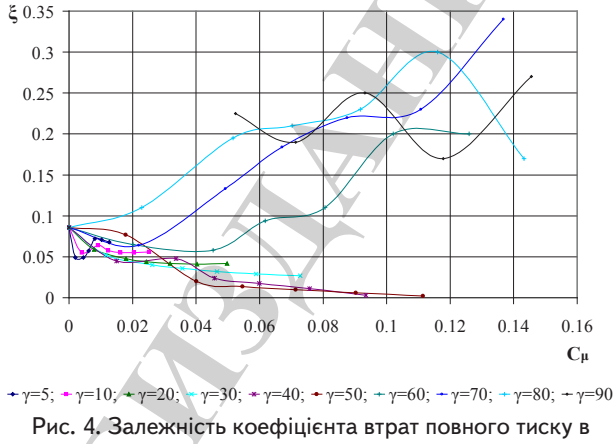

Рис. 4. Залежність коефіцієнта втрат повного тиску в робочому колесі від коефіцієнта імпульсу вдуву

Результати розрахункового дослідження показали, що при значеннях кутів вдуву γ>50° газодинамічна дія відповідна значенням коефіцієнта імпульсу вдуву $c_\mu > 0.045$, призводить до збільшення рівня втрат у робочому колесі.

При кутах вдуву γ≤50° і значеннях коефіцієнта імпульсу вдуву $c_\mu < 0.11$ спостерігається позитивний ефект. При зростанні інтенсивності газодинамічної дії спостерігається зворотний ефект – збільшення вихрових зон і, як наслідок, зростання гідравлічних втрат.

Для кутів вдуву γ=5° і γ=10° спостерігається локальний мінімум втрат, що відповідає значенню ξ=0.049. При кутах вдуву γ=40° і γ=50° має місце найбільша ефективність газодинамічної дії на течію кільцевим вдувом. Для цих варіантів коефіцієнт втрат повного тиску в робочому колесі може бути зменшений до 0.005. При куті вдуву γ=20° коефіцієнт втрат може бути зменшений до 0.04. При куті вдуву γ=30° спостерігається зниження втрат до 0.03.

Наступним етапом було дослідження впливу кільцевого вдуву на зміну ступеня підвищення тиску в ступені осьового компресора.

На рис. 5 представлена залежність ступеня підвищення тиску від інтенсивності газодинамічної дії.

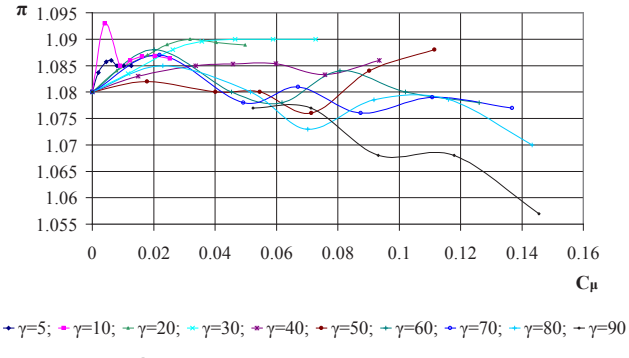

Рис. 5. Залежність ступеня підвищення тиску від коефіцієнта імпульсу вдуву

НЕ ЯВЛЯЕТСЯ ПРЕДМЕТОМ ПУБЛИКАЦИИ

Результати обчислювального експерименту показали, що при раціональних значеннях інтенсивності газодинамічної дії на потік ступінь підвищення тиску в ступені може бути збільшена з 1.08 до 1.093. При куті вдуву γ=5° і γ=10° мають місце локальні максимуми π=1.093...1.086. При кутах вдуву γ=20° і γ=30° спостерігається зростання ступеня підвищення тиску до 1.09. При куті вдуву γ=40° ступінь підвищення тиску збільшується до 1.086.

При коефіцієнті імпульсу вдуву $c_\mu = 0.11$ спостерігається збільшення ступеня підвищення тиску до π=1.088 для кута вдуву γ=50°. Проте для кута вдуву γ=50° при значеннях коефіцієнта імпульсу вдуву $c_\mu = 0.04 \ldots 0.08$ має місце зниження ступеня підвищення тиску до π=1.076. Для кута γ=60° ступінь підвищення тиску може бути збільшена до π=1.086 при значенні коефіцієнта імпульсу вдуву $c_\mu = 0.02$. При газодинамічній дії з кутами вдуву γ>60° при $c_\mu > 0.05$ ступінь підвищення тиску знижується.

6. Обговорення результатів дослідження впливу кільцевого вдуву на параметри ступеня осьового компресора

Проаналізуємо результати чисельного моделювання впливу кільцевого вдуву на течію у лопаткових вінцях. На рис. 6 представлено поле швидкостей за робочим колесом без газодинамічної дії. Картина обтікання показує, що в периферійній частині утворюються зони зривного обтікання. Внаслідок зривного режиму обтікання рівень нерівномірності потоку збільшується, що призводить до зростання втрат і зниження ступеня підвищення тиску.

На рис. 7 показано поле швидкостей за робочим колесом з газодинамічною дією. Використання кільцевого вдуву дозволило зменшити рівень колової нерівномірності потоку в периферійній частині робочого колеса, де спостерігалися найбільші зони зниженої швидкості (рис. 6).

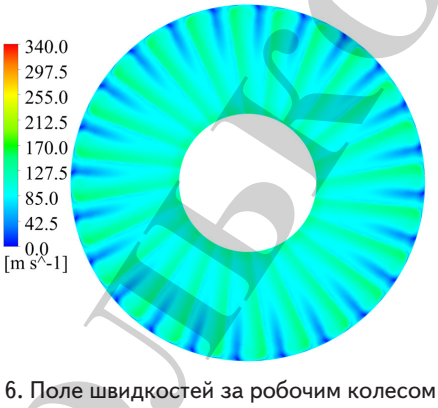

Рис. 6. Поле швидкостей за робочим колесом без газодинамічної дії

На рис. 8, 9 представлено поле швидкостей за направляючим апаратом. Газодинамічна дія на потік дозволила зменшити інтенсивність аеродинамічних слідів за напрямним апаратом (рис. 9). У периферійній частині не спостерігається зон зі зниженою швидкістю, а в середній і втулковій частині ширина аеродинамічних слідів істотно зменшилася.

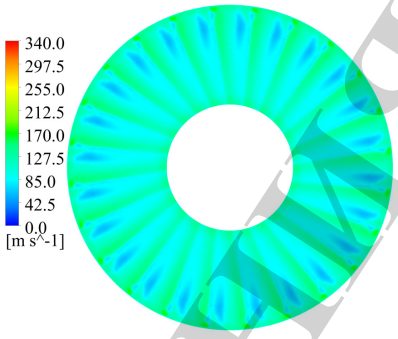

Рис. 7. Поле швидкостей за робочим колесом з газодинамічною дією

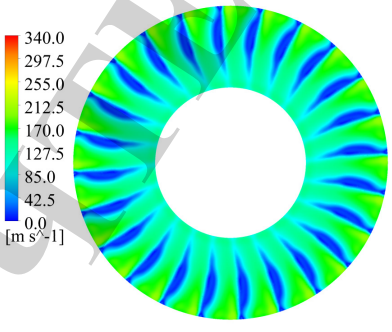

Рис. 8. Поле швидкостей за напрямним апаратом без газодинамічної дії

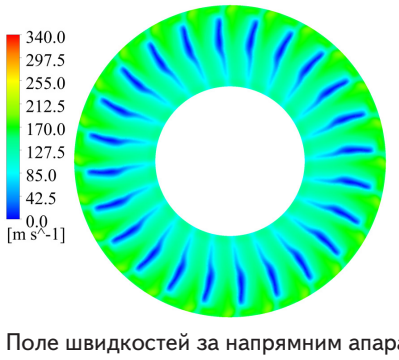

Рис. 9. Поле швидкостей за напрямним апаратом з газодинамічною дією

На рис. 10, 11 зображені поля швидкостей у периферійному перерізі. Газодинамічна дія дозволила змінити характер обтікання в міжлопаткових каналах ступеня осьового компресора (рис. 11). Застосування кільцевого вдуву змінює інтенсивність вихорового характеру обтікання і підвищує стійкість течії.

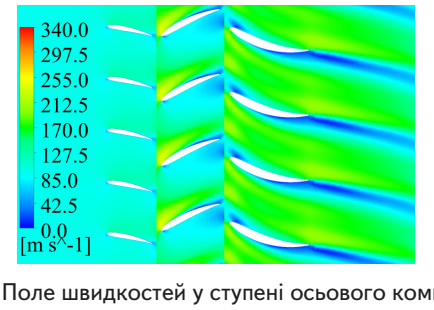

Рис. 10. Поле швидкостей у ступені осьового компресора без газодинамічної дії

Результати чисельного моделювання течії показують, що вибір раціонального кута вдуву при газо-

ПОЛЬОВА ВЕРСІЯ

динамічній дії на потік перед робочим колесом може забезпечити поліпшення аеродинамічних характеристик лопаткових вінців. У діапазоні кутів вдуву від γ=5° до γ=90° при кутах γ=40°...50° може бути забезпечено зниження коефіцієнта втрат повного тиску в робочому колесі від ξ=0.08 до ξ=0.005 при значеннях коефіцієнта імпульсу вдуву $c_{\mu}=0.09\ldots0.11$. При цьому ступінь підвищення тиску зростає від π=1.08 до π=1.084...1.088.

При кутах вдуву γ>50° спостерігається погіршення аеродинамічних характеристик лопаткових вінців: знижується ступінь підвищення тиску і збільшується рівень гідравлічних втрат.

Особливий інтерес представляє газодинамічна дія при куті вдуву γ=30°. При інтенсивності газодинамічної дії в діапазоні коефіцієнта імпульсу вдуву $c_{\mu}=0.04\ldots0.072$ ступінь підвищення тиску становить π=1.09. При цьому коефіцієнт втрат повного тиску в робочому колесі знижується до 0.032...0.028.

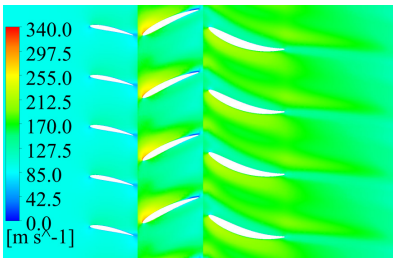

Рис. 11. Поле швидкостей у ступені осьового компресора з газодинамічною дією

Як показали результати досліджень, газодинамічне управління обтіканням дає можливість покращити внутрішню аеродинаміку ступеня компресора. Вдув газу через кільцевий канал руйнує вихровий характер течії. За допомогою газодинамічної дії змінюються кути атаки на вході у лопаткові вінці.

Таким чином, газодинамічна дія кільцевим вдувом на потік у ступені осьового компресора дозволяє розширити діапазон беззривного обтікання.

7. Висновки

1. Проведено чисельне моделювання течії в ступені осьового компресора з кільцевим вдувом газу перед робочим колесом. Газодинамічна дія здійснювалася на режимі роботи ступеня на границі зриву. Кільцевий вдув досліджувався при декількох фіксованих значеннях кута вдуву γ в діапазоні від 5° до 90°. Результати досліджень показали, що газодинамічний вплив на течію дозволяє покращити аеродинамічні характеристики ступеня осьового компресора. Візуалізація характеру обтікання показала, що рівень нерівномірності потоку за робочим колесом і напрямним апаратом зменшився.

2. Результати розрахункового дослідження показали, що при кутах вдуву γ>50° газодинамічна дія, що відповідає значенням коефіцієнта імпульсу вдуву $c_{\mu}>0.045$, призводить до збільшення рівня втрат у робочому колесі. При кутах вдуву γ≤50° і значеннях коефіцієнта імпульсу вдуву $c_{\mu}<0.11$ спостерігається позитивний ефект. При кутах вдуву γ=30°...50° коефіцієнт втрат повного тиску в робочому колесі може бути знижений від ξ=0.08 до ξ=0.03...0.005 при значеннях коефіцієнта імпульсу вдуву $c_{\mu}=0.06\ldots0.11$.

3. Результати чисельного експерименту показали, що при раціональних значеннях інтенсивності газодинамічної дії на потік ступінь підвищення тиску в ступені може бути збільшено з π=1.08 до π=1.093. При куті вдуву γ=30° при інтенсивності газодинамічної дії в діапазоні коефіцієнта імпульсу вдуву $c_{\mu}=0.04\ldots0.072$ ступінь підвищення тиску становить π=1.09.

Література

1. Терещенко, Ю. М. Аэродинамическое совершенствование лопаточных аппаратов компрессоров [Текст] / Ю. М. Терещенко. – М.: Машиностроение, 1987. – 168 с.
2. Staats, M. Closed-loop active flow control of a non-steady flow field in a highly-loaded compressor cascade [Text] / M. Staats, W. Nitsche, S. J. Steinberg, R. King // CEAS Aeronautical Journal. – 2016. – Vol. 8, Issue 1. – P. 197–208. doi: 10.1007/s13272-016-0232-1
3. Tereshchenko, Yu. M. Aerodynamic Factors of Influence on the Resonance Vibration of Gas Turbine Compressor Blades [Text] / Yu. M. Tereshchenko, E. V. Doroshenko, A. Tehrani, J. Abolhassanzade // Strength of Materials. – 2015. – Vol. 47, Issue 5. – P. 711–718. doi: 10.1007/s11223-015-9708-1
4. Gardner, A. D. Experimental investigation of high-pressure pulsed blowing for dynamic stall control [Text] / A. D. Gardner, K. Richter, H. Mai, D. Neuhaus // CEAS Aeronautical Journal. – 2014. – Vol. 5, Issue 2. – P. 185–198. doi: 10.1007/s13272-014-0099-y
5. Khaleghi, H. Role of tip injection in desensitizing the compressor to the tip clearance size [Text] / H. Khaleghi, M.-A. Sheikhshahrokh Dehkordi, A. M. Tousi // Aerospace Science and Technology. – 2016. – Vol. 52. – P. 10–17. doi: 10.1016/j.ast.2016.02.003
6. Khaleghi, H. Stall inception and control in a transonic fan, part B: Stall control by discrete endwall injection [Text] / H. Khaleghi // Aerospace Science and Technology. – 2015. – Vol. 41. – P. 151–157. doi: 10.1016/j.ast.2014.12.022
7. Wang, W. Experimental and numerical study of tip injection in a subsonic axial flow compressor [Text] / W. Wang, W. Chu, H. Zhang, H. Kuang // Chinese Journal of Aeronautics. – 2017. – Vol. 30, Issue 3. – P. 907–917. doi: 10.1016/j.cja.2017.04.004
8. Khaleghi, H. Parametric study of injector radial penetration on stalling characteristics of a transonic fan [Text] / H. Khaleghi // Aerospace Science and Technology. – 2017. – Vol. 66. – P. 112–118. doi: 10.1016/j.ast.2017.02.020
9. Nie, C. Micro Air Injection and Its Unsteady Response in a Low-Speed Axial Compressor [Text] / C. Nie, G. Xu, X. Cheng, J. Chen // Journal of Turbomachinery. – 2002. – Vol. 124, Issue 4. – P. 572. doi: 10.1115/1.1508383

НЕ ДЛЯ ПРОДАЖУ

10. Khaleghi, H. Effect of discrete endwall recirculation on the stability of a high-speed compressor rotor [Text] / H. Khaleghi // Aerospace Science and Technology. – 2014. – Vol. 37. – P. 130–137. doi: 10.1016/j.ast.2014.05.009
11. Tereshchenko, Y. Numerical study of flow in the stage of an axial compressor with different topology of computational grid [Text] / Y. Tereshchenko, E. Doroshenko, I. Lastivka, Y. Tereshchenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 3, Issue 7 (87). – P. 28–33. doi: 10.15587/1729-4061.2017.101315
12. Свечников, В. С. Аэродинамические характеристики ступени осевого компрессора [Текст] / В. С. Свечников, А. Б. Кириллов. – М.: ЦАГИ, 1958. – 94 с.

ТОЛЬКО ДЛЯ ЧТЕНИЯ