

Ю.М. Терещенко, д.т.н.

К.В. Дорошенко, к.т.н.

Ю.Ю. Терещенко, к.т.н.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КІЛЬЦЕВОГО ВДУВУ НА ГАЗОДИНАМІЧНУ СТІЙКІСТЬ  
СТУПЕНЯ ОСОВОГО КОМПРЕСОРА

Національний авіаційний університет, м. Київ, terj@nuau.edu.ua

*В роботі представлено результати чисельного моделювання течії в ступені осового компресора з кільцевим вдувом. Показано, що застосування кільцевого вдуву в периферійній частині ступеня осового компресора перед робочим колом доцільно експлуатувати на передзривних і зривних режимах роботи на всіх частотах обертання.*

*Ключові слова: ступінь осового компресора, кільцевий вдув, газодинамічна стійкість компресора*

## Вступ

Одним з головних чинників, які визначають рівень втрат в компресорі газотурбінного двигуна (ТД) при зміні приведеної частоти обертання ротора і зміні ефективної роботи взовж лінії робочих режимів, є поразкова ступінь підвищення тиску.

На ефективність компресора істотно впливає кілька чинників: величина розрахункових параметрів, особливості розподілу роботи стиснення взовж радіусу ступеня та між ступеннями багатоступінчатого компресора та інші фактори [1, с.12-34].

Створення високоєфективних ТД вимагає застосування високо напірних компресорів з розвиненим і ефективним регулюванням. Компресорів вимагає їх розвиненого і ефективного регулювання.

Практика створення сучасних ТД з високонапірними компресорами показала необхідність застосування різних способів їх регулювання з метою зниження рівня втрат і забезпечення газодинамічної стійкості на нерозрахункових режимах. До найбільш досліджених шляхів підвищення ефективності компресорів ТД слід віднести наступні методи:

- ✓ оптимізація аеродинамічної проектування проточної частини компресорів з метою зменшення рівня втрат і підвищення ефективності їх роботи в широкому діапазоні режимів експлуатації;
- ✓ збільшення граничної аеродинамічної навантаженості ступенів за рахунок керування пограничним шаром в лопаткових віпнях;
- ✓ застосування високої механізації компресорів та оптимізація законів регулювання компресорів;
- ✓ підвищення газодинамічної стійкості високонапірних компресорів за рахунок впливу на стійкість течії в пограничному шарі в елементах проточної частини і лопаткових віпнях;

Впливу на фактори, які впливають на збільшення вимушених коливань.

Використання нових методів аеродинамічного вконалагення компресорів ТД є одним із шляхів вирішення загальної проблеми підвищення ефективності газотурбінних двигунів. Як на розрахунковому, так і на нерозрахункових режимах роботи компресорів визначається рівнем підравлічних втрат у проточній частині. Ціком очевидно, що найкращі характеристики компресор мав би при беззрівному отіканні лопаткових віпнів в широкому діапазоні робочих режимів. У зв'язку з тим, одне із завдань аеродинамічного вконалагення компресорів полягає в розробці методів зниження рівня втрат, зумовлених наявністю вихорів і зривних зон в лопаткових віпнях. Велими важливим завданням є також забезпечення необхідних за рівнем нерівномірності і нестационарності параметрів потоку перед компресором, усунення періодичної окружної нерівномірності потоку, обумовленою аеродинамічними силами за елементами статора компресора і двигуна в цілому [1, с.12-34].

Застосування газодинамічних методів управління отіканням елементів компресора у вигляді управління пограничним шаром має основою метою зниження рівня підравлічних втрат і вирінювання поліпшення стійкості і тиску в лопаткових віпнях ступенів осового компресора.

Отікання лопаткових віпнів при великих кутах атаки (при малих значеннях коефіцієнту витрати) характеризується тим, що тиск в пограничному шарі на поверхні лопаток менше, ніж у ядрі потоку. Пограничний шар на поверхні лопаток не в змозі подолати високий позитивний градієнт тиску і відбувається його відрив з поверхні. Відрив можна запобігти або локалізувати шляхом застосування енергетичних видів впливу на течію в пристіночних шарах. Підвищення стійкості пограничного шару - одна з актуальних проблем сучасної термодинаміки лопаткових машин.

Значного підвищення стійкості течії в пограничному шарі і зміщення точки переходу вниз по потоку можна досягти різними способами. Найбільш вивченими способами створення безвідривного отікання є [2,

с.5-12];

- ✓ відмокнування пограничного шару через щільні, отвори на поверхні лопаток;
- ✓ вдув газу в пограничний шар через щільні форми для створення ефекту вдуву газу в пограничний шар ефекту відмокнування пограничного шару;
- ✓ штучна турбулізація пограничного шару (ламнарного підшару) застосуванням турбулізаторів в акстинних резонаторах.

Особливий інтерес представляє метод управління вливом потоку за допомогою вдуву додаткової маси газу, це пов'язано з тим, що це один з методів, який дозволяє майже повністю усунути зривні явища.

#### Аналіз останніх досліджень та публікацій

У роботах [3, с. 197-208, 4, с. 185-198] представлено результати досліджень управління пограничним шаром в елементі високонавантаженого компресора шляхом імпульсного і постійного вдуву. Порівняння результатів у роботі [4, с. 185-198] показало, що використання імпульсного вдуву ефективніше, ніж постійного вдуву. В роботах [3, с. 197-208, 4, с. 185-198] досліджується вплив вдуву на всі довжинні лопатки через спеціальні отвори, при цьому застосування імпульсного вдуву вимикає розробки більш складної системи автоматичного керування.

У роботі [5, с. 112-118, 6, с. 572-579] представлено результати досліджень газодинамічної дії на течію в компресорі через канали в статорі. В роботі [5, с. 112-118] представлено результати досліджень кільцевих вливів на характеристики осевого компресора при кільцевому вдуві на різних відстанях перед робочим колесом. Показано, що при певних параметрах вдуву можна забезпечити вирівнювання поля швидкостей в периферійній частині робочого колеса. У роботі [6, с. 572-579] представляють експериментальні та обчислювальні дослідження течії в низьконапірному триступінчатому компресорі. Вдув додаткової маси повітря здійснювався через декілька вступаючих форсунок, розташованих на вході в перший ступінь. Авторами показано, що використання газодинамічної дії на потік приводить до поліпшення характеристик компресора. Однак, у роботах [5, с. 112-118, 6, с. 572-579] авторами встановлено, що вступачні канали вдуву є додатковим джерелом генерації вихорів перед робочим колесом, що може призвести до погіршення аеродинамічних характеристик компресора.

#### Постановка завдання

Аналіз результатів досліджень показав, що застосування газодинамічної дії на течію в компресорі є ефективним і дозволяє за певних умов розширити діпазон роботи компресора. В той же час, залишаються невирішеними задачі, пов'язані з впливом газодинамічної дії на течію на всіх режимах роботи компресора. Ціль роботи є оцінка впливу кільцевого вдуву на течію в периферійній частині та газодинамічну стійкість ступеня осевого компресора.

#### Вирішення поставленого завдання

Дослідження течії в ступені осевого компресора виконувалося за допомогою чисельного моделювання течії з використанням 3D моделі ступеня компресора. Була побудована неструктурована адаптивна розрахункова сітка, що складалася з 2,013 млн. комірок. Для коректного використання умови періодичності розрахункова область кожного лопаткового вішня складалася з однієї лопатки і міжлопаткового каналу. Моделювання турбулентної течії проводилося шляхом чисельного розрахунку рівнянь Нав'є-Стокса. Рівняння замикалися моделлю турбулентної в'язкості SST. Вибрана розрахункова схема другого порядку в локальним використанням розрахункової схеми першого порядку.

Об'єкт дослідження обрано ступінь осевого компресора, що складається з вхідного напрямного апарату (ВНА), робочого колеса (РК) і напрямного апарату (НА). Лопатковий вінець ВНА складається з 24 лопаток, РК і НА мають по 24 лопатки. На рис. 1 зображена схема досліджуваного ступеня осевого компресора.

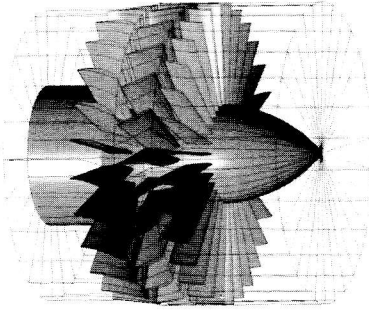
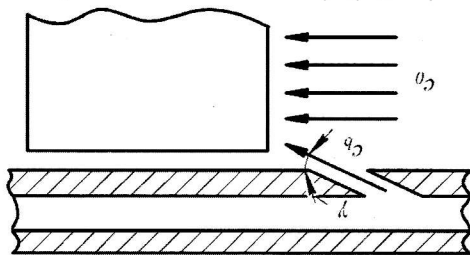


Рис. 1. Схема ступеня осевого компресора

За результатами розрахунку побудовано характеристику ступеня осового компресора (рис.4) для наступних приведених частот обертання:  $n_1=60\%$ ,  $n_2=75\%$ ,  $n_3=85\%$ ,  $n_4=100\%$ . Суцільними лініями

Рис.2. Схема газодинамічної дії кільцевим вдувом на потік перед робочим колесом



На другому етапі характеристика ступеня осового компресора розраховувалась із застосуванням адиабати.

де  $\lambda_c = \frac{a}{c}$  – коефіцієнт швидкості,  $c$  – осова швидкість потоку на вході,  $a$  – швидкість звуку,  $k$  – показник

$$q(\lambda_c) = \lambda_c \left( 1 - \frac{k+1}{k-1} \lambda_c^2 \right)^{\frac{1}{k-1}} \left( \frac{k+1}{k-1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \quad (2)$$

Газодинамічна функція  $q(\lambda_c)$  визначалась зі співвідношення:

в ступеня. Осередненні параметрів потоку здійснювалося за принципом середньомасового осереднення за

де  $p_1^*$  – середнє значення повного тиску на вході в ступінь,  $p_2^*$  – середнє значення повного тиску на виході

Ступінь підвищення тиску розраховувався за формулою:

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

Характеристика ступеня розраховувалась як залежність ступеня підвищення тиску від газодинамічної

частот обертання. На першому етапі було розраховано характеристику ступеня без газодинамічної дії.

Колова швидкість на кінцевому радіусі на розрахунковому режимі (відносна частота обертання  $n_1=60\%$ )

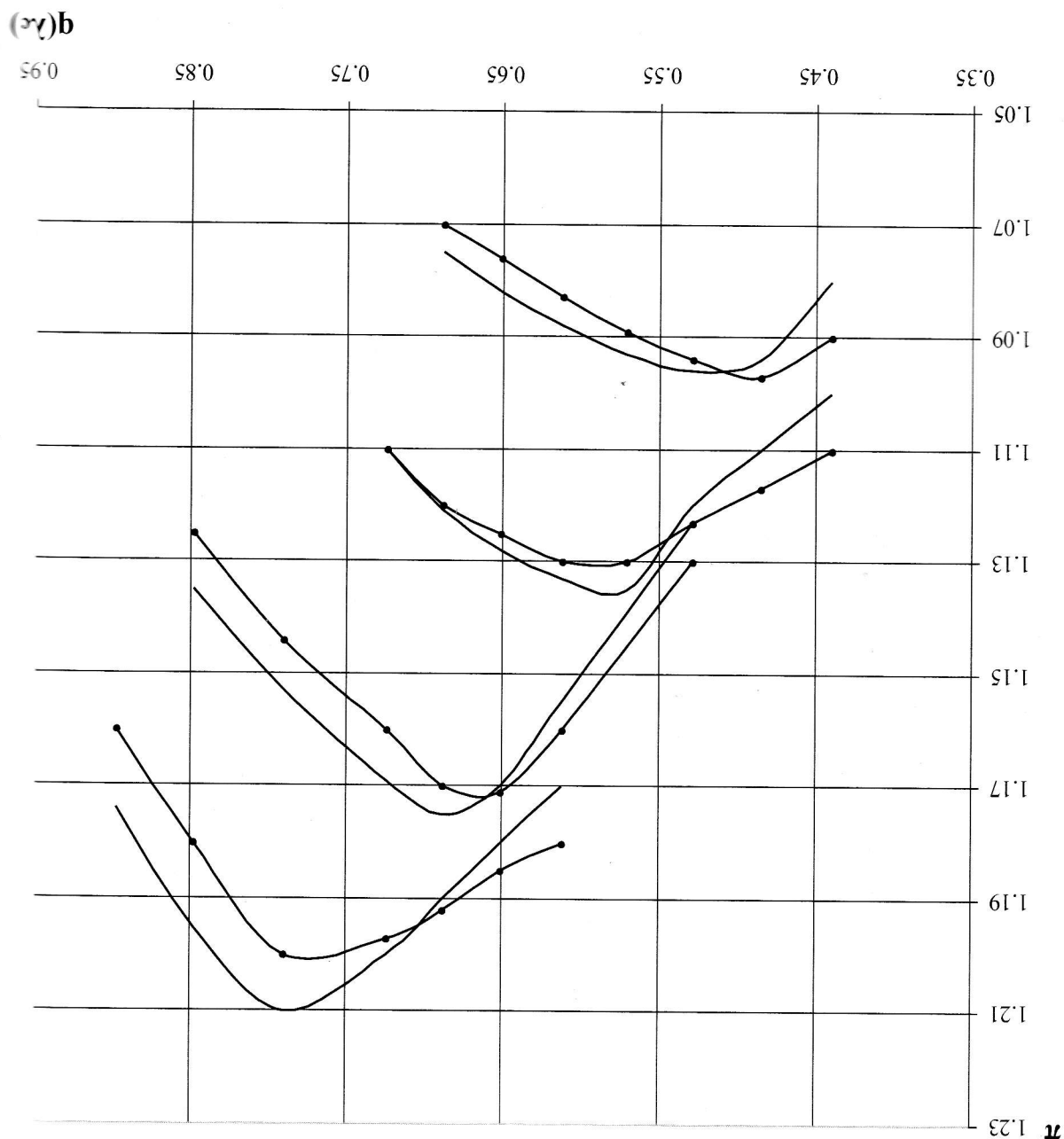
Вхідний напрямний апарат					
r, мм	80	104	136	168	200
rb	0,48	0,624	0,816	1,008	1,2
γ	89° 18'	87° 37'	85° 10'	83°	81° 46'
Робоче колесо					
r, мм	80	104	136	168	200
rb	0,468	0,589	0,742	0,878	1,005
β <sub>1</sub>	62° 37'	57° 55'	51° 47'	46° 42'	42° 09'
β <sub>2</sub>	101° 43'	96° 27'	88° 30'	80° 03'	71° 13'
γ	85° 01'	80° 23'	73° 40'	66° 57'	60° 02'
Напрямний апарат					
r, мм	80	104	136	168	200
rb	0,475	0,55	0,633	0,699	0,747
γ	76° 30'	74° 40'	72° 17'	69° 59'	67° 36'

Таблиця 1  
Геометричні характеристики лопаткових вінів

Нижче, в табл. 1, приведено геометричні характеристики лопаткових вінів [7, с. 8-11]: r – радіус перерізу,  $\beta_1, \beta_2$  – відносний кут решітки;  $\beta_1$  – кут входу потоку;  $\beta_2$  – кут виходу потоку;  $\gamma$  – кут між хордою профілю

Результати розрахунків показали, що застосування газодинамічної дії дозволяє підвищити напірність на всіх частотах обертання. Таким чином, застосування кільцевого вдуву повітря перед робочим колесом дозволяє підвищити стійкість компресора на передзривних і зривних режимах роботи. Однак застосування газодинамічної дії під час розрахункових режимів роботи не є ефективним, навпаки напірність ступеня зменшується. Позитивний ефект від застосування газодинамічної дії на передзривних і зривних режимах роботи обумовлено зменшенням нерівномірності потоку в периферійній ділянці лопаткових віньч: робочого колеса і напрямного апарату. Долавання енергії в периферійну зону робочого колеса сприяє руйнуванню вихорових структур, які утворюються на цих режимах роботи внаслідок периферійних перетікань. Кільцевий вдув сприяє зміні кутів атаки потоку на вході в робоче коло і напрямний апарат поза зоною кільцевого вдуву при роботі ступеня осового компресора на лівих гілках напірних ліній (при понижених значеннях параметра  $q(\lambda^2)$ ). Завдяки збільшенню осової складової вектора швидкості в основній частині лопаткового віньча (за висотою лопатки), кут атаки наближається до оптимального.

Рис. 3. Характеристика ступеня осового компресора



представлено результати для ступеня компресора без газодинамічної дії, лініями з крапками – результати для ступеня з газодинамічною дією шляхом кільцевого вдуву.



На рис. 4 представлено векторні поля в периферійній частині осового ступеня компресора без газодинамічної дії з частоти обертання  $n_1=60\%$  на зривному режимі обтікання.

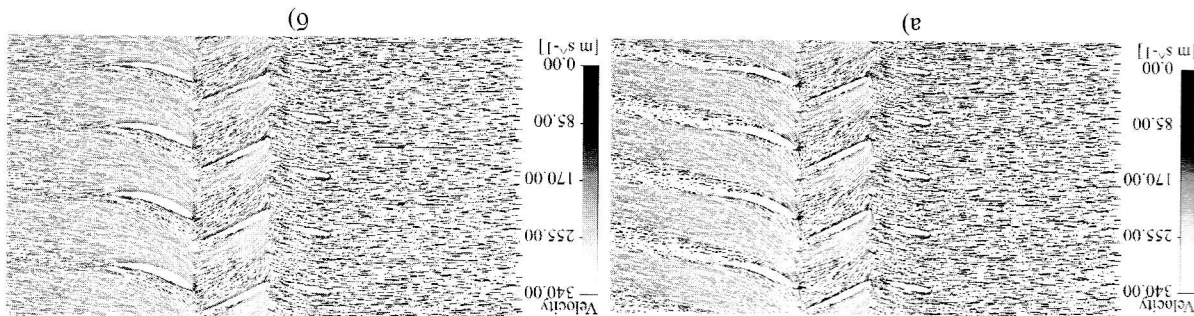


Рис. 4 Векторне поле швидкості ступеня осового компресора (а) ступінь осового компресора без газодинамічної дії; (б) ступінь осового компресора з газодинамічною дією

Як слід з аналізу течії в ступені осового компресора застосування кильцевого вдуву змінює інтенсивність вихрового характеру обтікання і підвищує стійкість течії (рис.4).  
Таким чином, кильцевий вдув у ступені осового компресора дозволяє розширити діапазон беззривного обтікання.

### Висновки

За результатами чисельного моделювання побудовано характеристику ступеня осового компресора для різних частот обертання. Результати чисельних досліджень показали, що застосування кильцевого вдуву в периферійній частині ступеня осового компресора перед робочим колесом доцільно на передзривних і зривних режимах роботи на всіх частотах обертання.

### Список літературних джерел

1. Терешенко Ю.М. Аэродинамические следы в компрессорах газотурбинных двигателей / Ю.М. Терешенко, Н.С. Кулик, И.А. Ластивка и др. – К.: НАУ, 2012. – 232с.
2. Терешенко, Ю. М. Аэродинамическое совершенствование лопаточных аппаратов компрессоров / Ю.М. Терешенко. – М.: Машиностроение, 1987. – 168с.

3. Staats, M. Closed-loop active flow control of a non-steady flow field in a highly-loaded compressor cascade // M. Staats, W. Nitsche, S. J. Steinberg, R. King // CEAS Aeronaut. J. – 2017. – V.8. – N. 1. – P.197–208. doi:10.1007/s13272-016-0232-1.

4. Gardner, A. D. Experimental investigation of high-pressure pulsed blowing for dynamic stall control // A. D. Gardner, K. Richter, H. Mai, D. Neuhaus // CEAS Aeronautical Journal. – 2014. – V. 5 – N. 2. – P. 185–198. doi:10.1007/s13272-014-0099-y.

5. Khaleghi H. Parametric Study of Injector radial Penetration on Stalling Characteristics of a Transonic Fan // H. Khaleghi // Journal of Aerospace Science and Technology. – 2017. – V. 66. – P. 112–118. doi: 10.1016/j.ast.2017.02.020.

6. Nie C. Micro Air Injection and Its Unsteady Response in a Low-Speed Axial Compressor // C. Nie, G. Xu, X. Cheng, J. Chen // Journal of Turbomachinery. – 2002. – V. 124. – P.572–579. doi: 10.1115/1.1508383