

УДК 33.6.3:629.7(075.8)

Ф.І. Кірчу

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛОСКИХ РЕШІТОК ТУРБОМАШИН

НАУ, кафедра авіаційних двигунів, e-mail: fkirchu@yandex.ru

*Розглянуто експериментальний стенд для дослідження плоских компресорних решіток турбомашин та спосіб удосконалення одного з пристроїв, в якому нове виконання поворотного механізму пакета лопаток дозволило забезпечити підвищення точності отримання аеродинамічних характеристик компресорних решіток.*

### Вступ

Досконалість компресорів об'єктів техніки з газотурбінними двигунами визначається не тільки рівнем конструкторських рішень і газодинамічних знань, але й досконалістю методів експериментального визначення характеристик лопаткових вінців [1–3].

На сьогодні не існує математичної або газодинамічної моделі, або програми, які були б повністю незалежними від експериментальних даних, тому необхідні створення й удосконалення експериментальних методів, які здатні визначити механізм взаємодії слідів із стрибками ущільнень, потенціальні зв'язки та інші механізми, через які нестационарність течії впливає на характеристики обтікання лопаток та їх навантаженість.

Узагальнені результати продувок решіток лопаток і лопаткових вінців стали достатньо надійною науковою підставою для розробки методів удосконалення компресорів. Вибір профілів лопаток для осевого компресора є основною складовою при його проектуванні. Протягом багатьох років це питання загострювало увагу багатьох конструкторів і вчених.

Під час проектування осевих компресорів найбільше поширення знайшли експериментальні методи дослідження компресорів, основані на дослідженні об'ємних тривимірних ступенів у високошвидкісному стисненому потоці газу [4]. У зв'язку зі швидким зростанням продуктивності обчислювальної техніки все частіше застосовують числові методи визначення характеристик компресорних решіток і ступенів [5–7]. Однак для збільшення продуктивності аеродинамічного проектування ступенів осевих компресорів учені та інженери переважно базують свої дослідження на аналізі течії через елементарні ступені, розташовані на різних радіусах. Причому вважається, що згадані елементарні ступені працюють незалежно один від одного. Якщо течія газу проходить на концентричних поверхнях, близьких до циліндричних, і радіальна довжина кожного елементарного ступеня нескінченно мала, можна замість осесиметричної течії розгляда-

ти її розгортку на площині, тобто течію газу через плоскі решітки.

Дослідження плоских решіток дозволяє більш точно визначити:

- середній кут виходу газу з решітки;
- коефіцієнт витрат енергії;
- коефіцієнт витрати;
- епюру тиску за профілем;
- сили, діючі на решітку в цілому або на окрему лопатку;
- спектр потоку;
- спеціальні питання, які належать, наприклад, до тривимірного дослідження решітки.

### Аналіз деяких існуючих низькошвидкісних аеродинамічних труб

Під час проектування експериментальної установки були проаналізовані деякі діючі низькошвидкісні аеродинамічні труби [8–10]. Проведений аналіз показав, що існуючі труби, переважно, відрізняються тільки розміром робочої частини і способами регулювання якістю потоку перед і за решіткою, а механізм зміни кута атаки принципово не відрізняється.

Відомі пристрої для визначення аеродинамічних характеристик плоских компресорних решіток, до складу яких належить поворотний пакет лопаткових вінців осевого компресора, що встановлюється в робочій частині аеродинамічної труби, містять, як і спроектований пристрій, поворотний пакет лопаткових вінців, горизонтальні обмежувальні стінки, механізм повороту пакета лопаткових вінців. На відміну від спроектованого пристрою перекладка обмежувальних горизонтальних стінок (забезпечення герметичності робочої частини, усунення перетікань повітря) здійснюється за допомогою електромеханічних пристроїв, поворот пакета лопаток – відносно центральної лопатки.

В основу розробки була поставлена задача вдосконалити пристрій для визначення аеродинамічних характеристик компресорних решіток, в якому нове виконання поворотного механізму пакета лопаток, горизонтальних обмежувальних стінок, кріплення ущільнювальних пластин доз-

волило б забезпечити підвищення точності отримання аеродинамічних характеристик компресорних решіток.

#### Автоматизований експериментальний комплекс

До складу автоматизованого експериментального комплексу належать установка для дослідження плоских компресорних решіток і автоматична система контролю й керування експериментом (АСККЕ).

Основними складовими експериментальної установки (рис. 1) для дослідження плоских компресорних решіток є аеродинамічна труба, механізм повороту пакета лопаток, джерело повітря (нагнітачі).

Основною задачею експериментальних досліджень є визначення коефіцієнтів втрат і кута виходу потоку. Крім того, при проектуванні ставилася задача про можливість проведення вимірювань полів швидкостей і тисків на вході та виході з решітки, а також вимірювання розподілу тиску за профілем лопатки.

До складу установки належать такі основні функціональні вузли:

- відцентрові нагнітачі 8, 9;
- ресивер 6;
- решітка для вирівнювання потоку (хонейкомб) 5;
- лемніската 4;
- робоча частина (механізм повороту лопаток) 3;
- вихідна лемніската 2;
- вихлопний патрубок 1;
- рама 10;
- сопло для вимірювання витрати повітря 7.

Основна задача, яка ставилася під час проектування експериментальної установки, – це розробка робочої частини 3 таким чином, щоб забезпечити необхідну якість потоку і підвищити технологічність (спростити заміну пакетів лопаток, спростити вимірювання параметрів потоку). Удосконалення пристрою для визначення аеродинамічних характеристик компресорних решіток потребує нового виконання поворотного механізму пакета лопаток, горизонтальних обмежу-

вальних стінок, кріплення ущільнювальних пластин дозволило забезпечити підвищення точності отримання аеродинамічних характеристик компресорних решіток [11].

Пристрій для визначення аеродинамічних характеристик компресорних решіток (рис. 2) містить поворотний пакет 2 лопаток 1, установлений в корпусі аеродинамічної труби, яка облаштована двома горизонтальними обмежувальними стінками 4, 6, що розташовані в трубі перпендикулярно площині повороту пакета 2 лопаток 1 і обмежують висоту робочого каналу 8.

Стінка 6 виконана нерухомою у вигляді пластины, один кінець якої нерухомо з'єднаний з нерухомими елементами труби, інший кінець шарнірно з'єднаний із поворотним пакетом 2 лопаток 1 в шарнірі 10. Стінка 4 виконана рухомою у вигляді пластины, один кінець якої шарнірно з'єднаний із корпусом труби в шарнірі 5, а інший кінець вільний і знаходиться між двома напрямними роликами 3 поворотного пакета 2. Для зменшення перетікання повітря між обмежувальними стінками 4, 6 і лопатками 1 використано ущільнювальні пластини 9, які вставляються в передні кромки крайніх лопаток.

Поворотний пакет може бути повернутий відносно корпусу труби за допомогою електромеханічного привода 7. Електромеханічний привід 7 повертає пакет 2, в якому закріплені напрямні ролики 3, відносно шарніра 10. При цьому напрямні ролики повертають пластину 4 відносно шарніра 5.

Поворот пакета лопаток буде можливим до тих пір, поки напрямні ролики не сядуть на обмежувальний упор поворотної пластины 4.

При повороті поворотного пакета 2 лопаток 1 відбувається ковзання ущільнювальних пластин 9 по обмежувальним стінкам 4, 6. За рахунок цього відбувається ущільнення зазорів і, як наслідок, зменшення перетікань повітря в робочій частині 8 аеродинамічної труби.

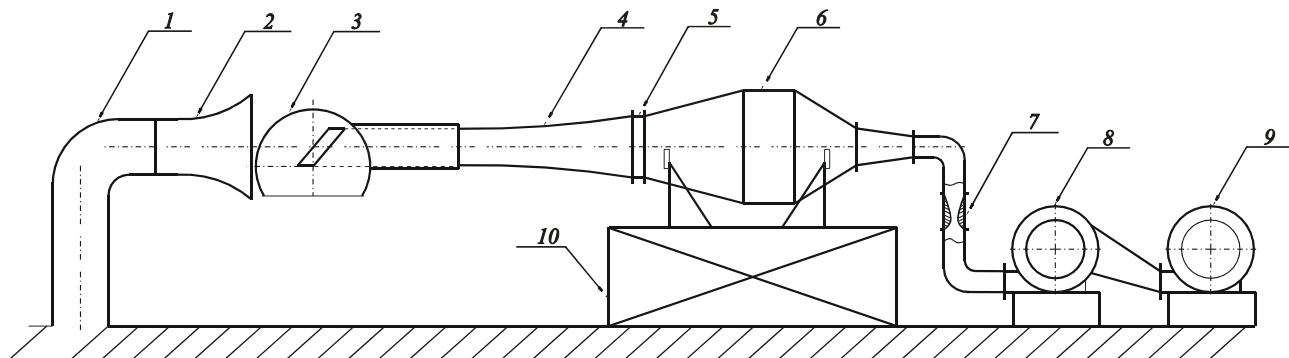


Рис. 1. Схема установки для продувки плоских решіток:

1 – вихлопний патрубков; 2 – вихідна лемніската; 3 – механізм повороту лопаток; 4 – лемніската; 5 – решітка для вирівнювання потоку; 6 – ресивер; 7 – сопло для вимірювання витрати повітря; 8, 9 – відцентрові нагнітачі; 10 – рама

### Принцип роботи експериментальної установки

Досліджувана решітка 2 (рис. 2) закріплена між двома рухомими секторами, які утворюють кінцеві поверхні. Повітря з відцентрових нагнітачів 8, 9 (рис. 1) надходить у ресивер 6, де на виході, для вирівнювання поля швидкостей і тисків поставлена решітка (хонейкомб) 5. Далі повітря через лемнікату 4 (рис. 1) і канал 8 (рис. 2) підводиться до решітки.

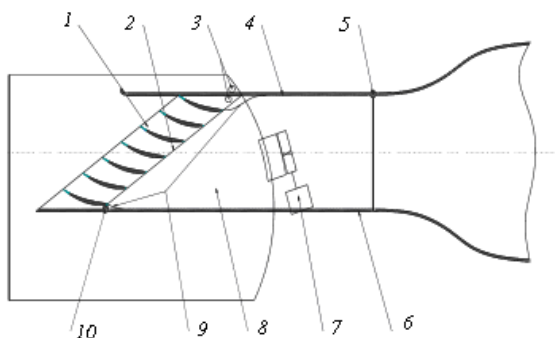


Рис. 2. Механізм повороту пакета лопаток:  
1 – лопатки; 2 – пакет; 3 – напрямні ролики;  
4, 6 – обмежувальні стінки; 5, 10 – шарнір;  
7 – електромеханічний привід; 8 – робочий канал;  
9 – ущільнювальні пластини

Перед і за решіткою проводиться “траверсування” потоку, тобто вимірюються за допомогою пневмометричних трубок повний і статичний тиски, а також напрямок потоку в будь-якій точці вздовж і за висотою решітки. Повний перелік реперних точок показаний на рис. 3.

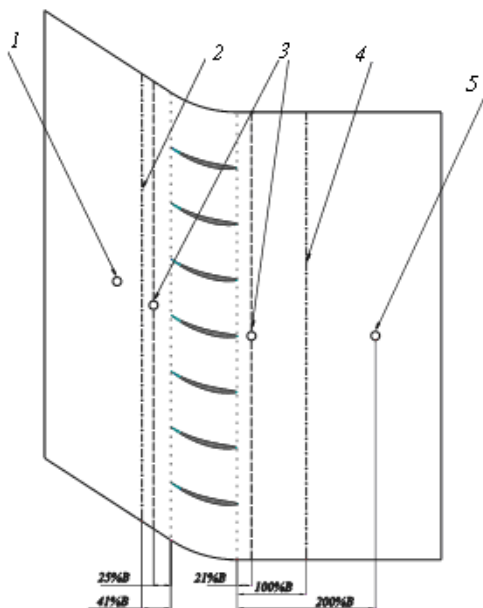


Рис. 3. Схема робочої частини експериментальної установки з розміщенням реперних точок:

1,5 – датчики температури; 2 – датчики статичного тиску на виході з решітки; 3 – аеродинамічні зонди для вимірювання величини і напрямку швидкості потоку; 4 – датчики статичного тиску на вході в решітку

### Автоматична система контролю і керування експериментом

Автоматична система контролю і керування експериментом призначена для збору інформації, яка надходить від датчиків, її обробки і відображення на моніторі робочої станції оператора про стан експерименту, формування технологічних звітів, і передачі необхідної інформації на засоби виводу.

Основу системи АСККЕ [12; 13] складає блок оператора. Саме на цьому рівні відбувається обробка даних, які надходять від датчиків, диспетчеризація і візуалізація всієї інформації про стан експерименту, формування керуючих сигналів для керування зовнішніми механізмами, формування звітів. Блок оператора базується на використанні промислового контролера.

Промислові контролери можна умовно розділити на дві основні групи:

– програмувальні логічні контролери PLC (Programmable Logical Controllers – PLC-контролер);

– промислові контролери, побудовані на основі РС (Personal Computer – РС-контролер).

У цій системі застосовується РС-контролер.

Головна особливість РС-контролерів [14] – це відкрита структура, що дає можливість користувачеві самостійно здійснювати:

– проектування структури промислового контролера шляхом вибору відповідних інтерфейсних компонентів;

– вибір процесорної плати для побудови процесорного ядра необхідної потужності і функціональних характеристик, практично без обмежень в обсязі використаної оперативної і програмної пам'яті;

– відображення інформації для РС-контролерів простим і природним способом виведення інформації, як і в традиційних ПК;

– програмування РС-контролера будь-яким зручним для нього способом будь-якою мовою програмування для РС-систем, що найбільш поширені й доступні;

– програмування в середовищах розробки додатків для РС-контролерів;

– швидку модернізацію або зміну в системі як для програмного компонента, так і для використовуваних апаратних засобів, вибір апаратних і програмних засобів різних виробників;

– просте і швидке увімкнення PC-контролерів у мережну структуру на підставі стандартних мережних протоколів;

– можливість використання стандартних мережних адаптерів, модемів і технології Internet.

### Висновок

Під час проектування експериментальної установки для продувки решіток турбомашин була зроблена робоча частина (поворотний механізм), що дозволило забезпечити необхідну якість потоку і підвищити технологічність – спростити заміну пакетів лопаток і вимірювання параметрів потоку.

Застосування даного вимірювального комплексу АСККЕ в науковому експерименті дозволить не тільки знизити час проведення експерименту, але і підвищити точність вимірювань. Оскільки при проектуванні системи ставилася задача формування файлів з результатами експерименту, то стає можливим застосування математичних пакетів (MathCad, Matlab і т.п.) для аналізу отриманих результатів та їхньої інтерпретації. Ця система також має можливість інтеграції з програмним продуктом ANSYS, в якому проводиться математичне моделювання обтікання газовим потоком лопаткових вінців. Така інтеграція дозволить у режимі реального часу порівнювати експериментальні результати з результатами математичного моделювання, що прискорить прийняття рішень з перепроектування або коректування вихідних лопаткових вінців.

### Література

1. *Гостелову Дж.* Аэродинамика решеток турбомашин: Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 392 с.
2. *Кампси Н.* Аэродинамика компрессоров: Пер. с англ. – М.: Мир, 2000. – 638 с.
3. *Терещенко Ю.М., Митрахович М.М.* Аэродинамика компрессоров с управлением отрывом потока. – К.: Ин-т математики НАН України, 1996. – 250 с.
4. *Робинсон С.И., Норталл Д.Д., Макфарлан С.У.* Экспериментальное и расчетное исследование трехмерного течения в направляющих аппаратах осевого компрессора с прямыми и изогнутыми концами лопаток // *Новости зарубеж. науки и техники.* – 1990. – №8. – С. 8–13.
5. *Маккормак Р.У.* Численный метод решения уравнений вязких сжимаемых течений // *Аэрокосмическая техника.* – 1983. – Т.1, №4. – С. 114–123.

6. *Wyss M.L., Chima R.V., Tweedt D.L.* Averaging techniques for steady and unsteady calculations of a transonic fan stage// *AIAA Paper 93-3065.* – Jul. 1993; Also NASA TM-106231.

7. *Development and Application of a Multistage Navier-Stokes Flow Solver.* P. II. Application to a High Pressure Compressor Design / C.R. LeJambre, R.M. Zacharias, B.P. Biederman a.o. // *ASME Paper 95-GT-343,* Jun., 1995.

8. *Sturm W., Fottner L.* The high-speed cascade wind tunnel of the german armed forces university munich// *8 Symposium on Measuring Techniques for Transonic and Supersonic Flows in Cascades and Turbomachines.* – Genoa, 1985.

9. *Acton P., Fottner L.* Investigation of the boundary layer development on a highly loaded low pressure turbine cascade under the influence of unsteady flow conditions// *Proceed. of the 8 International Symposium on Unsteady Aerodynamics and Aeroelasticity of Turbomachines.* – Stockholm, 1997.

10. *Kiock R., Lehthaus F., Baines N., Sieverding C.* The transonic flow through a plane turbine cascade as measured in four european wind tunnels// *J. Eng. for Gas Turbines and Power.* – 1986. – Vol. 108. – P. 277–284.

11. *Пристрій для визначення аеродинамічних характеристик компресорних решіток/ Ю.М. Терещенко, В.В. Панін, Ф.І. Кірчу, Л.Г. Волянська// Заявка на винахід № 20040907245 від 09.06.2004 р.*

12. *Панін В.В., Кірчу Ф.І., Кинашук І.Ф.* Діагностично-вимірювальний комплекс для дослідження структури газової течії в компресорах авіаційних ГТД // *Наука і молодь: Зб. наук. пр.* – К. – 2004. – Вип. 4. – С. 11–14.

13. *Панін В.В., Кірчу Ф.І., Кинашук І.Ф., Гвоздецкий И.И.* Информационно-измерительный комплекс для исследования квазитрёхмерных течений газовых потоков в решётках турбомашин // *Материали VI міжнар. наук.-техн. конф. «Авіа-2004».* Т. III. Виробництво та експлуатація авіаційної техніки, квіт. 2004 р. – С. 28–31.

14. *Starken H., Lichtfuss H.* Aerodynamic measurements in cascades// *AGARDograph 205,* AGARD, 1975.

Стаття надійшла до редакції 10.10.05.

Ф.И. Кирчу

Экспериментальный стенд для исследования плоских решёток турбомашин

Рассмотрены экспериментальный стенд для исследования плоских компрессорных решеток турбомашин и способ усовершенствования одного из устройств стенда, в котором новое исполнение поворотного механизма пакета лопаток позволило обеспечить повышение точности полученных аэродинамических характеристик компрессорных решёток.

---

F.I. Kirchu

The experimental stand for research turbomachine cascades

The experimental stand for research of flat compressor cascades turbomachine is considered in article. A way of improvement of one of devices of the stand also is considered, in which the new performance of the rotary mechanism of a blade cascade, has allowed to supply increase of accuracy of the received aerodynamic characteristics of turbomachine cascades.