

УДК 629.735.03-226.2:533.6.07(045)

0551 410-042 2- 0141 6643

Л.Г. Волянська

## СПОСІБ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВИЗНАЧЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОФІЛЮ В ПЛОСКИХ КОМПРЕСОРНИХ РЕШІТКАХ

Національний авіаційний університет, avsacsm@nau.edu.ua

*Розглянуто метод визначення аеродинамічних сил шляхом їхнього прямого вимірювання за допомогою трикомпонентних аеродинамічних ваг. Наведено схему установки для визначення аеродинамічних характеристик профілю в плоских компресорних решітках, а також схему й опис поворотного пакета лопаток, які складають плоскі компресорні решітки.*

### Вступ

При дослідженні характеристик решіток профілів особливо важливе значення мають методи експериментального дослідження. Експериментальні дослідження аеродинамічних характеристик профілів можуть бути проведені шляхом продувки моделей із нерухомими плоскими решітками профілів чи моделей обертових решіток в турбомашиних [1].

Кожна з двох методик має свої переваги і недоліки. Випробування обертових решіток дозволяють моделювати складну просторову структуру течії, але разом з тим створюють умови, що ускладнюють одержання дійсних значень тиску і температури, а також напрямку потоку в просторі між решітками профілів.

Характерною рисою іншого експериментального методу є ізолювання окремих явищ для їх детального вивчення, що дозволяє зрозуміти сутність кожного з них окремо, і потім об'єднання окремих спрощень потоків для визначення механізму складної течії газу в компресорі. Існує велика кількість проблем, що найкраще можна дослідити при експериментах із нерухомими моделями в аеродинамічній трубі. Багато осьових компресорів вдало спроектовано на основі продувок плоских решіток потоком із малою швидкістю [2], тому є необхідними розробка і створення нових методів експериментального дослідження плоских решіток.

Мета дослідження аеродинамічних характеристик профілю полягає в розробці методу, що дозволяв би одержати кількісні параметричні дані про потік відносно невеликих лопаток (із хордою меншою ніж 50 мм), не застосовуючи дренавання (отворів, виконаних на поверхні лопатки).

Методи розрахунку течії робочого тіла в компресорах на теперішній час отримали стрімкий розвиток. Існує багато моделей і способів розрахунку течії, але отримати повний опис течії в компресорі можна тільки в результаті розв'язання

рівнянь Нав'є-Стокса. Але навіть розв'язання цих рівнянь вимагає деяких емпіричних даних, тому важливе вдосконалення і створення нових методів теоретичного дослідження й удосконалення методів експериментального дослідження. Розвиток обчислювальної техніки не тільки вплинув на створення математичних моделей, але й призвів до появи нових датчиків, пристроїв реєстрації і збору інформації, методів планування експерименту.

Дослідження нерухомих решіток виконують в аеродинамічних трубах, схему і конструкцію яких визначають задачами дослідження, методикою експерименту і межовими значеннями параметрів робочого тіла.

Для дослідження аеродинамічних характеристик і одержання фізичної картини обтікання моделей необхідно здійснювати вимірювання у великій кількості точок і з високою точністю, тому до методики і техніки вимірювань пред'являються вимоги швидкодії датчиків і вимірювальних систем, можливість одночасного багатоканального вимірювання, можливість безпосереднього введення й обробки результатів вимірювань на ЕОМ. Виходячи з цього в Національному авіаційному університеті, на базі існуючих засобів вимірювань, був створений вимірювально-обчислювальний комплекс [3].

Метою експериментальних досліджень було визначення аеродинамічних характеристик профілю в однорядних і дворядних плоских компресорних решітках, визначення оптимального розміру і положення щілинного каналу, оцінка впливу ковзання на основні параметри компресорних решіток.

### Експериментальний пристрій

Дослідження проводилися в аеродинамічній трубі на модельних лопаткових решітках. Аеродинамічна труба обладнана трикомпонентними механічними вагами рейкового типу з ручним зрівноважуванням для вимірювань аеродинамічних навантажень. Ваги дозволяють вимірювати

три компоненти повної аеродинамічної сили у вертикальній площині  $P_1, P_2, Q$ , а також компенсацію ваги об'єкта і контрваг. Для зміни кута атаки ваги обладнані вбудованим  $\alpha$ -механізмом, діапазон зміни кута  $\alpha = -20 \dots +40^\circ$ . Вимірювання швидкісного напору  $q$  здійснюється рідинним манометром із похилою трубкою ММН-240 [3].

Експериментальний пристрій, загальний вид робочої зони якого показаний на рис. 1, являє собою атмосферну замкнуту аеротрубу з відкритою робочою частиною еліптичного перерізу розмірами  $750 \times 450$  мм, довжиною 900 мм.

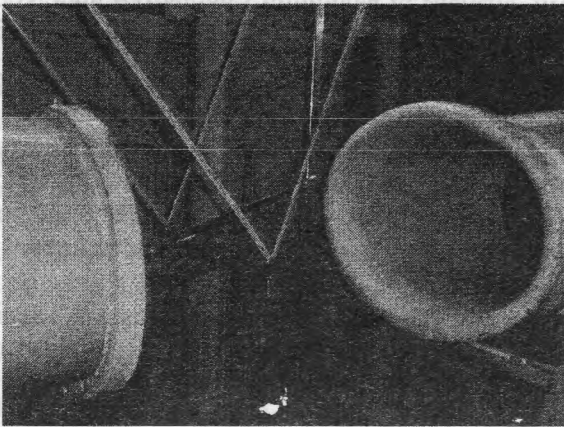


Рис. 1. Загальний вигляд робочої зони з об'єктом дослідження

За дифузором розташований вентилятор із двигуном постійного струму потужністю 2 кВт, який має систему плавного регулювання частоти обертання, що підтримує в робочій частині аеротруби повітряний потік постійної швидкості. Можливе регулювання швидкості потоку в межах 5–30 м/с. Дослідження проводилися на модельних однорядній і еквівалентній їй дворядній решітках із п'ятьма лопатками. Решітки склалися з профілів, середня лінія яких згиналася за параболою, кут вигину середньої лінії  $\theta = 30^\circ$ .

Геометрія профілів однорядної і дворядної решіток визначалася з умови еквівалентності. Хорда однорядних решіток і сумарна хорда дворядної  $b = b_\Sigma = 70$  мм, густина решіток  $b/t = b_\Sigma/t = 1$ . Перекриття і ширина щілини для дворядних решіток склали  $l/b_\Sigma = 0,143$ ,  $f/b_\Sigma = 0,07$ . Квазі-тривимірність обтікання решіток моделювалася стрілоподібністю передньої крайки лопаток, яка характеризувалася кутами ковзання решітки  $\varphi = 15^\circ$ .

#### Методика експерименту

Звичайно аеродинамічні характеристики плоских компресорних решіток визначаються у вигляді залежностей від кута атаки  $\alpha$  кута повороту потоку і коефіцієнта втрат повного тиску [4]:

$$\Delta\beta = \beta_2 - \beta_1;$$

$$\xi = \frac{P_2^* - P_1^*}{(\rho_\infty v_\infty^2)/2},$$

де  $\beta_2, \beta_1$  – кути виходу і входу потоку в решітку;  $P_2^*, P_1^*$  – повні тиски повітря на виході і вході в решітку;  $\rho_\infty$  – щільність повітря;  $v_\infty$  – швидкість незбуреного потоку.

При цьому вимірюються кінематичні і термодинамічні параметри повітряного потоку перед решіткою профілів і за нею. Усі лопатки, що досліджуються в плоских решітках, жорстко закріплюються в пакеті поворотної обойми. Вимір кута атаки решітки здійснюється поворотом усього пакета лопаток навколо осі обертання. Аеродинамічні сили (сили лобового опору і піднімальна) визначають розрахунковим шляхом інтегрування епюр розподілу статичного тиску на поверхні профілю лопатки.

Цей спосіб не дозволяє безпосередніми вимірюваннями визначати силові аеродинамічні характеристики лопатки в компресорних решітках і аеродинамічні коефіцієнти профілю в решітках. Значення аеродинамічних коефіцієнтів  $c_x$  і  $c_y$  обчислювалися на підставі розрахункового визначення піднімальної сили  $Y$  і сили лобового опору  $X$  за даними розподілу статичного тиску по поверхні лопатки [5]. Піднімальну силу  $Y$  визначали за формулою:

$$Y = \int_0^b (p_{iв} - p_0) dx - \int_0^b (p_{iн} - p_0) dx,$$

де  $p_{iв}, p_{iн}$  – статичні тиски на верхній і нижній поверхнях профілю в обраному перерізі;  $p_0$  – статичний тиск потоку;  $b$  – хорда профілю.

Для вимірювання статичних тисків  $p_{iв}$  і  $p_{iн}$  середня лопатка в решітках препарувалася в середньому перерізі. Перпендикулярно поверхні лопатки виконувались отвори, які за допомогою трубопроводів з'єднуються з манометрами. Точність розрахунку піднімальної сили залежить від кількості отворів, що обмежено технологічними можливостями. Точність експерименту в цілому зменшується через необхідність великої кількості вимірювань статичного тиску для розрахунку аеродинамічних сил [6].

У даному дослідженні, на відміну від загальноприйнятих способів, аеродинамічні сили визначалися прямим вимірюванням за допомогою трикомпонентних аеродинамічних ваг. Пакет лопаток, що складають компресорні решітки з заданими геометричними параметрами, виконаний поворотним. При цьому всі лопатки решіток, крім однієї (середньої), нерухомо закріплені в поворотній обоймі. Середня лопатка пакета, яка

непрепарована і незалежна від інших лопаток, закріплена на аеродинамічних вагах. Таке виконання пакета лопаток дозволяє здійснювати пряме вимірювання аеродинамічних сил, що діють на лопатку в решітках. Це забезпечує підвищення точності визначення аеродинамічних характеристик профілю в компресорних решітках (рис. 2).

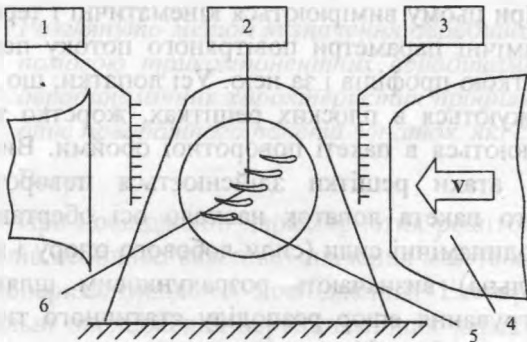


Рис. 2. Схема установки для визначення аеродинамічних характеристик профілю в плоских компресорних решітках:

1 – блок приймачів статичного і повного тиску потоку за решіткою; 2 – аеродинамічні трикомпонентні ваги; 3 – блок приймачів статичного і повного тиску потоку перед решіткою; 4 – повітродувка; 5 – поворотний пакет жорстко закріплених лопаток; 6 – лопатка, яка закріплена в аеродинамічних вагах

З метою безпосереднього визначення силових характеристик лопатки й аеродинамічних характеристик профілю в решітках середня лопатка в решітках закріплена в трикомпонентних аеродинамічних вагах незалежно від інших лопаток поворотної обойми. При повороті пакета лопаток навколо осі обертання решітки на кут  $\Delta\varphi$ , змінюється кут  $\varphi_i$  між фронтом решітки і вертикальною координатною віссю (рис. 3). Відповідно змінюється і кут атаки  $\alpha$  профілів у решітках на величину  $\Delta\alpha = \Delta\varphi_i$ .

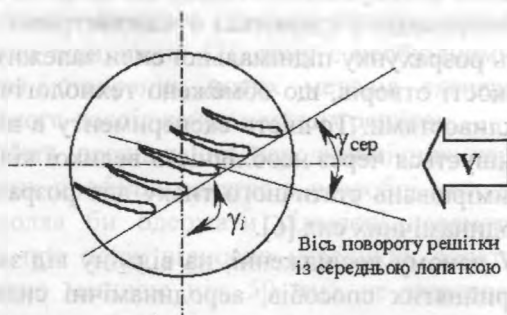


Рис. 3. Схема поворотного пакета лопаток

Для забезпечення незмінності геометричних параметрів компресорних решіток у цілому ( $\gamma = \text{const}$ ;  $\beta_{1к} = \text{const}$ ;  $\beta_{2к} = \text{const}$ ;  $l/t = \text{const}$ ) середня лопатка, яка закріплена в аеродинамічних вагах, також поверталася навколо своєї осі

на кут, що дорівнює  $\Delta\varphi_i$ , чим забезпечувалося виконання умови сталості кута установлення профілів у решітках ( $\gamma_{ср} = \text{const}$ ).

При обтіканні пакета лопаток (усіх плоских компресорних решіток) повітряним потоком визначаються зусилля, які діють на середню лопатку. За допомогою трикомпонентних аеродинамічних ваг виміряли піднімальну силу  $R_y$ , силу лобового опору  $R_x$ , параметри потоку (статичний тиск  $p_1$  і  $p_2$ , повний тиск  $p_1^*$  і  $p_2^*$ , температуру загальмованого потоку  $T_1$ ,  $T_2$ ) перед і за решітками, визначали величини і напрямки швидкості повітряного потоку перед  $\bar{W}_1$  і за решітками  $\bar{W}_2$ . За результатами вимірювань розраховували середню швидкість і середню щільність повітря [7].

Значення аеродинамічних коефіцієнтів визначали в діапазоні зміни кута атаки –  $15^\circ \dots +15^\circ$ . Зміна кута атаки всіх решіток профілів здійснювалася одночасним незалежним поворотом на однакові кути лопаток, жорстко закріплених у поворотній обоймі, і середньої лопатки, закріпленої в аеродинамічних вагах. Загальний вигляд об'єктів дослідження показано на рис. 4.

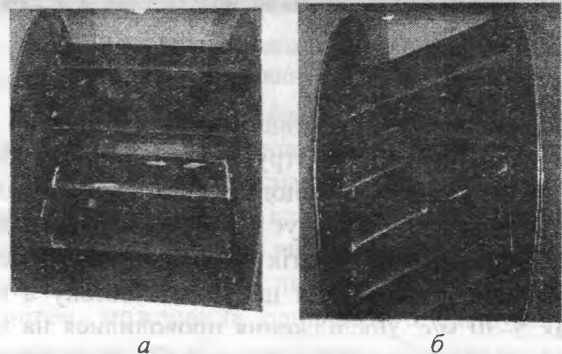


Рис. 4. Об'єкти дослідження:  
а – пряма решітка; б – решітка з ковзанням

Незмінність геометричних параметрів решіток профілів забезпечувалася сполученням осей повороту пакета лопаток і осі повороту середньої лопатки. Середню лопатку (рис. 3), а також усі інші лопатки плоских решіток, які закріплені між дисками, установлювали на нульовий кут атаки. Кут атаки середньої лопатки встановлювався спеціальним пристроєм аеродинамічних ваг, кут атаки інших лопаток – поворотом поворотних дисків навколо їхньої осі (рис. 5).

При одночасному незалежному повороті пакета лопаток і середньої лопатки на однаковий кут атаки всі геометричні характеристики компресорних решіток залишалися незмінними, тобто кут установки середньої лопатки не змінювався і дорівнював куту установки всіх лопаток у решітках. Після цього аеродинамічну трубу виводили на постійний режим роботи.

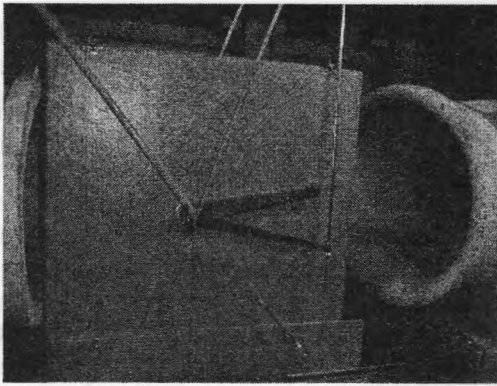


Рис. 5. Пристрій установки кута атаки середньої лопатки

При фіксованому куті атаки реєстрували параметри повітряного потоку перед і за решітками, виміряли силу лобового опору і піднімальну силу, що діють на середню лопатку. Після реєстрації даних параметрів кут установки лопаток змінювався, і при новому фіксованому значенні кута атаки повторювалася процедура узгодження кутів установки профілів у пакеті і середній лопатці.

#### Висновки

Запропоновано новий метод визначення аеродинамічних сил і його застосування до компресорних решіток. Виконано одне з перших прямих

Л.Г. Волянская

Способ экспериментального определения аэродинамических характеристик профиля в плоской компрессорной решетке

Описан способ определения аэродинамических сил путем их прямого измерения с помощью трехкомпонентных аэродинамических весов. Приведена схема установки для определения аэродинамических характеристик профиля в плоской компрессорной решетке. Представлена схема и описание поворотного пакета лопаток, которые составляют плоскую компрессорную решетку.

L.G. Volyanskay

Method determination of aerodynamic performances of profile in the plane airfoil cascade

Method determination of aerodynamic forces by direct measurement using three-component aerodynamic balance are given in the article. There are the schematic model of the facility for determination airfoil cascade aerodynamic performances in the article. Drawing and description of slewing pack of blades are shown in the article.

вимірювань силових характеристик лопатки в компресорній решітці.

#### Список літератури

1. Терещенко Ю.М., Мітрахович М.М. Авіаційні газотурбінні двигуни. – К.: КВІЦ, 2001. – 312 с.
2. Wisler D.C. Loss reduction in axial-flow copressors through low-speed model testing // Trans ASME J. of Engineering for gas turbines and Power. – 1985. – №107. – Р. 354–363.
3. Виноградський П.М., Волянська Л.Г. Автоматизація вагових випробувань в аеродинамічній трубі УТАД-2 / Вісн. НАУ. – 2002. – № 3. – С. 39–44.
4. Холщевников К.В., Емин О.Н., Митрохин В.Т. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. – М.: Машиностроение, 1986. – 432 с.
5. Горшенин Д.С., Мартынов А.К. Методы и задачи практической аэродинамики. – М.: Машиностроение, 1977. – 240 с.
6. Аэродинамика турбин и компрессоров // Аэродинамика больших скоростей и реактивная техника. Т.10. – М.: Машиностроение, 1968. – 742 с.
7. Аэродинамика літальних апаратів: Підруч. / За ред. Ю.М. Терещенка. – К.: Вища освіта, 2002. – 255 с.

Стаття надійшла до редакції 31.01.03.