



УДК 621.452.322

ДОСЛІДЖЕННЯ ДОЗВУКОВОЇ НАДКРИТИЧНОЇ ТЕЧІЇ У КОМПРЕСОРНІЙ ПРОФІЛІВ

Г. В. Фотенко, Н. В. Піжанкова

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
“Харківський авіаційний інститут”*

Високі навантаження ступенів компресорів сучасних авіаційних двигунів забезпечуються підвищенням частоти обертання роторів і, відповідно, швидкості течії у міжлопаткових каналах. Такі ступені мають над- та трансзвукове профілювання, у разі коли у дозвукових течіях виникають швидкості, які перевищують критичні значення (M_{w1} для робочих коліс, M_{c1} для напрямних апаратів) застосовують надкритичні решітки профілів. У якості критичного значення швидкості течії на вході приймають таке, при якому на стороні розрідження профілю виникає швидкість потоку, що дорівнює $M = 1,0$. Надкритичні профілі дають можливість загальмувати течію на спинці від надзвукових значень чисел Маха $M = 1,3 \dots 1,35$ до дозвукових без появи стрибків ущільнення і, відповідно, хвильових втрат.

Для проектування надкритичних ґраток профілів виконують спеціальне профілювання, з початку досліджують течію у вихідній решітці профілів, її особливості. Для цього використовують методи перевірного розрахунку, які дають можливість на підставі заданої геометрії решітки і профілю отримати структуру течії та її інтегральні характеристики.

У даній роботі для проведення перевірного розрахунку обрано метод визначення параметрів та структури у до-, транс- та надзвукової течії, розроблений на кафедрі теорії авіаційних двигунів «ХАІ», та використано відповідний комплекс програм TRANS [1].

Моделювання течії в плоских компресорних решітках профілів у даному методі засноване на використанні уявлення Л. Прандтля про умовний розподіл потоку на дві області – нев'язке ядро потоку і прикордонний шар.

Для обчислення задачі обтікання плоскої решітки профілів змішаним до-, транс- і надзвуковим потоком нев'язкого газу, що стискається, використовують різні числові методи, з яких найбільше поширення отримали методи, засновані на принципі встановлення рішення в часі

Для дослідження обтікання плоских решіток профілів нев'язким нетеплопровідним потоком система рівнянь: закони збереження маси, імпульсу у проєкції на осі координат і енергії, записані в дивергентній формі:



$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{W}) = 0 \\ \frac{\partial \rho W_x}{\partial t} + \text{div}(\rho W_x \bar{W}) + \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial \rho W_y}{\partial t} + \text{div}(\rho W_y \bar{W}) + \frac{\partial P}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \text{div}(\rho E \bar{W}) + \text{div}(P \bar{W}) = 0 \end{array} \right. , \quad (1)$$

де $t, \rho, P, T, \bar{W}, W_x, W_y, E$ – час, щільність, тиск, температура, вектор швидкості та його складові вздовж координатних осей OX і OY , питома повна енергія $E = c_v T$, c_v – питома ізохорна теплоємність. Для чисельної реалізації системи рівнянь (1), застосований метод «великих часток» Білоцерковського О. М., Давидова Ю. М. [2].

Для замикання системи використано рівняння стану ідеального газу:

$$P = \rho RT$$

Враховуючи, що метод «великих часток» дозволяє отримувати прийнятні за точністю результати на грубих, неадаптованих сітках, для проведення навчальних розрахунків використано рівномірну декартову сітку, що дозволяє виключити помилки апроксимації у сильно деформованих осередках криволінійної сітки та полегшити роботу користувача. Для опису форми досліджуваних профілів було використано апарат дрібних осередків.

Область інтегрування для випадку рівномірної декартової сітки представлена на рис. 1.

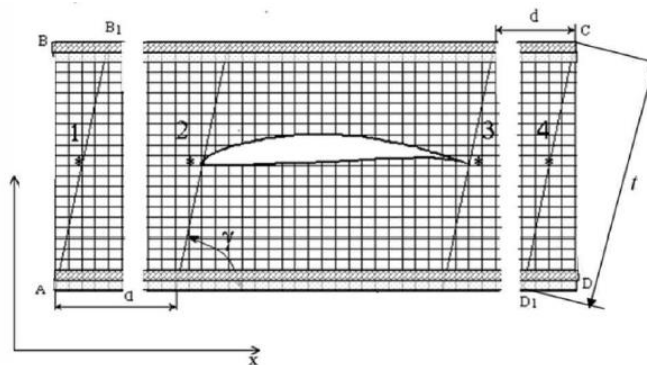


Рис. 1 – Розрахункова область

Наведена розрахункова область має чотири межі, де повинні бути задані граничні умови. Ліва та права межі розрахункової області розташовані на відстані d від фронту решітки, яка для проведення обчислювальних експериментів приймається рівною шагу міжлопаткового каналу t .

Відстань між верхньою та нижньою межами дорівнює шагу решітки t з урахуванням кута установки профілю γ . Уздовж ліній AD і BC задаються умови періодичності, які обумовлюють повторюваність течії у решітці на відстані шагу.



На межі АВ при дозвуковій швидкості течії на вході в решітку мають бути надані значення повної ентальпії, ентропійної функції та напрямку незбудженого потоку, які приймають незмінними за часом:

$$C_p T^* = const, \quad \frac{P}{\rho^k} = const, \quad tg\beta_1 = const$$

На правій межі області CD задають співвідношення статичного тиску на виході та вході в розрахункову область $\frac{P_2}{P_1} = const$.

Вихідними даними для розрахунку течії в решітці профілів є густина решітки, кут установки профілю, і його геометричні характеристики (координати профілю, хорда, геометричні кути, радіуси вписаних в носик і хвостовик кіл і координати їх центрів та інші), а також режимні параметри – степінь підвищення статичного тиску в решітці, температура, тиск і кут потоку на вході в решітку.

Після виконання розрахунку нев'язкої течії виконується розв'язання рівнянь примежевого шару в інтегральній постановці з метою отримання його параметрів і визначення складових втрат енергії.

Перед початком розрахунків за допомогою програмного комплексу TRANS проведено аналіз сходження обчислюваного процесу за кількістю розрахункових осередків та визначення необхідної кількості ітерацій за часом до повного встановлення рішення.

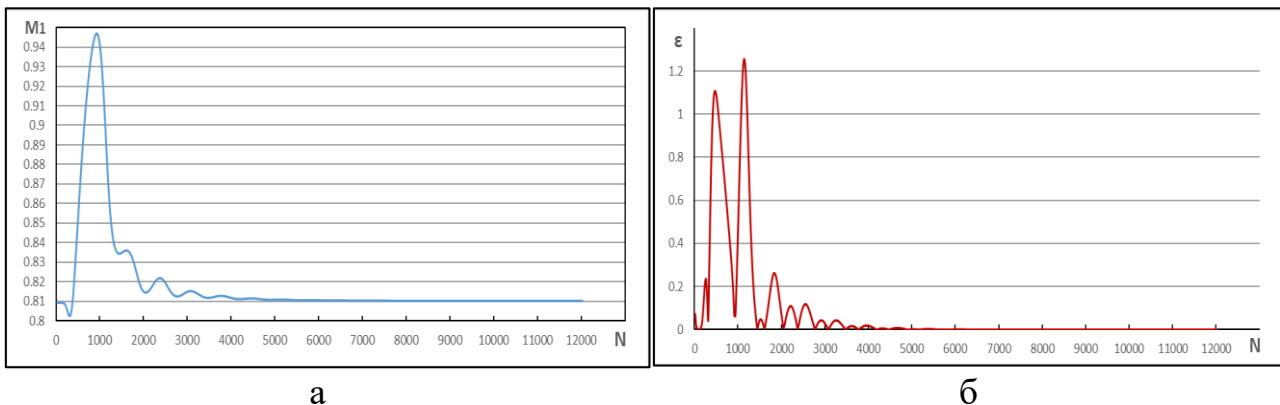


Рис. 2 – Зміна у процесі встановлення: а – числа Маха на вході в решітку; б – похибки розрахунку

На рис. 2(а), 2(б) наведено процес зміни числа Маха на вході в решітку та похибки розрахунку в залежності від кількості кроків за часом. У результаті аналізу цих графіків обрано достатню кількість ітерацій за часом – 6000 кроків, що дозволяє отримати необхідну точність розрахунків.

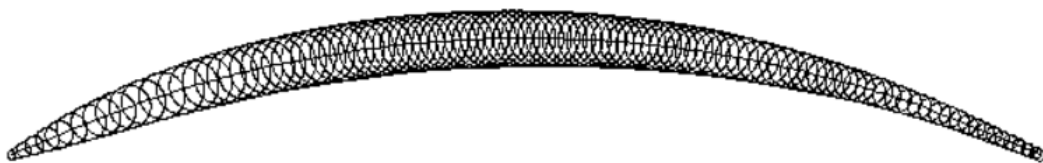


Рис. 3 – Профіль досліджуваної решітки



На рис. 3 надано профіль досліджуваної решітки, що має кут вигину $\theta = 48,46$ град, максимальну відносну товщину $\bar{C}_{max} = 0,054$, розташовану на відстані $\bar{x}_c = 39,4$ % від вхідної кромки, щільність решітки профілів $\frac{b}{t} = 1.28$. Дослідження структури течії у цій решітці здійснюється при куті натікання $i = +2$ град.

Для побудови характеристики решітки необхідно дослідити течію у досить широкому діапазоні режимів роботи від числа Маха на вході $M_1 = 0,7$ до $M_1 = 0,95$, визначити її структуру та значення коефіцієнтів втрат.

Режим на якому має бути використана решітка у реальному ступені:

$$M_1 = 0,81, i = +2 \text{ град}$$

Зміна числа Маха на вході реалізується за допомогою зміни значення протитиску $\frac{P_2}{P_1}$.

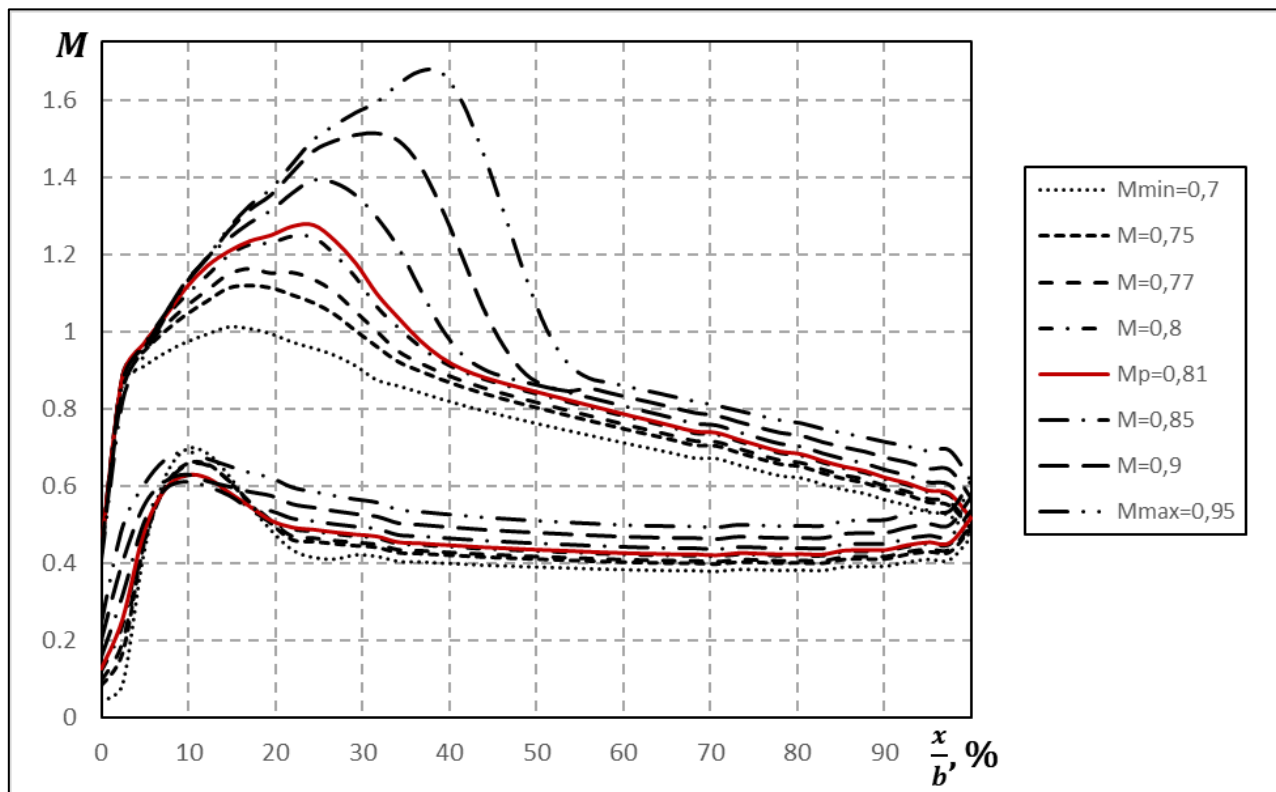


Рис. 4 – Розподіл чисел Маха уздовж хорди профілю на заданому режимі

На рис. 4 наведено розподіл чисел Маха на сторонах розрідження і тиску профілю у решітці при різних значеннях M_1 на вході. З рисунку видно, що навіть при найменшому значенні $M_1 = 0,7$ на спинці профілю є область, де числа Маха досягають критичного значення, а після значення $M_1 = 0,85$ гальмування течії відбувається у стрибку ущільнення.

Більш наглядними є рис. 5 (а, б, в), де показані ізолінії чисел Маха в досліджуваній решітці при $M_1 = 0,7$, $M_1 = 0,81$ та $M_1 = 0,95$.

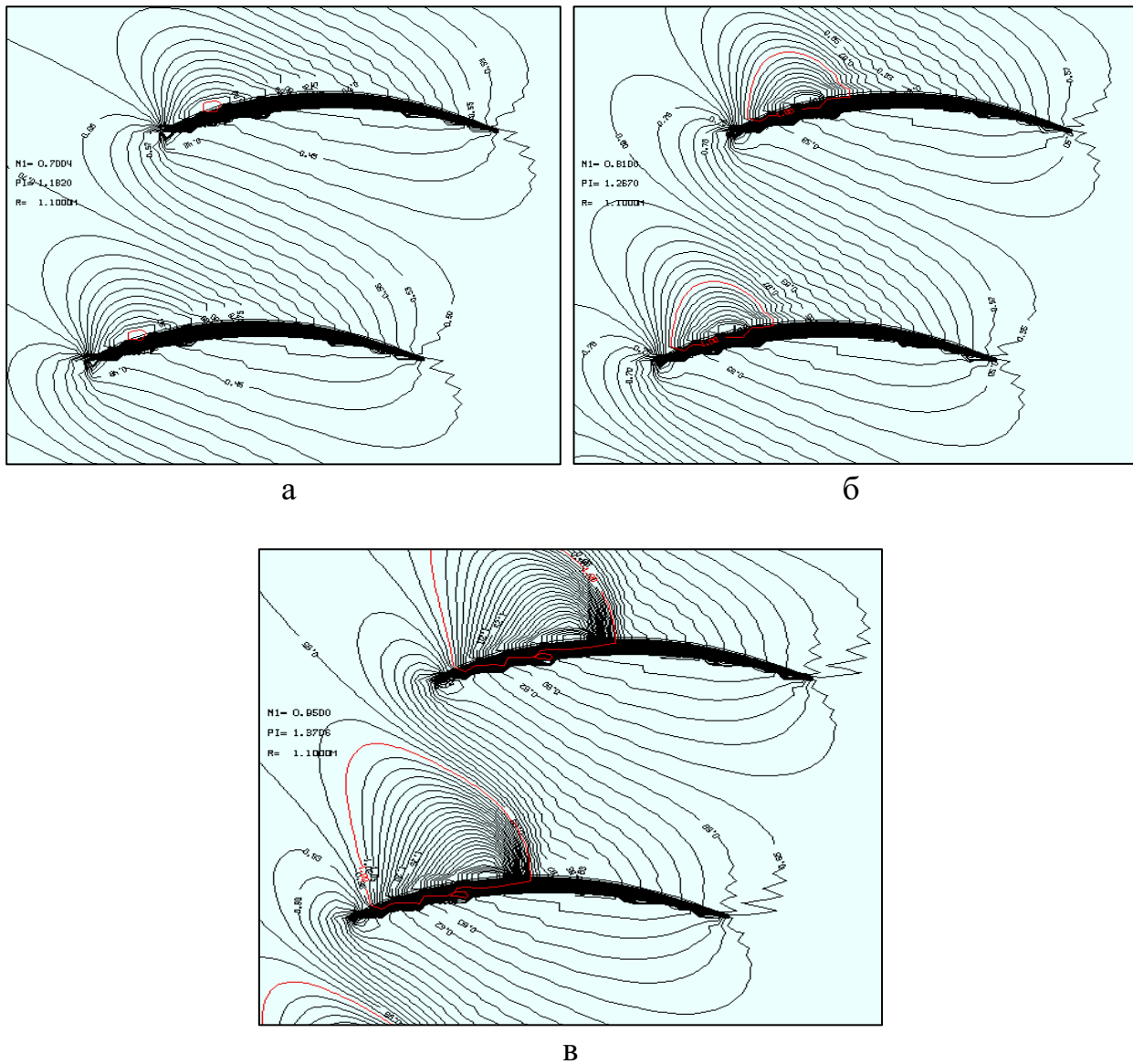


Рис. 5 – Ізолінії чисел Маха у решітках при незмінному значенні кута натікання $i = +2$ град та : а) $M_1 = M_{min} = 0,7$; б) $M_1 = M_p = 0,81$; в) $M_1 = M_{max} = 0,95$

При $M_1 = 0,7$ на рис. 5(а) червоною лінією показані значення числа $M = 1,0$, тобто цей режим вже є критичним. При збільшенні швидкості на вході до $M_1 = 0,81$ (розрахунковий режим для даної решітки) надзвукова зона розширюється, і течія гальмується у стрибку ущільнення. При $M_1 = 0,95$ (рис. 5(в)) відображено суттєвий стрибок ущільнення, який майже повністю перекриває міжлопатковий канал, у вигляді згущення ізоліній.

Характеристика решітки у вигляді залежностей коефіцієнту хвильових втрат від числа Маха на вході при заданому куті натікання $\xi_{хвил} = f(M_1)$ проілюстрована на рис. 6.

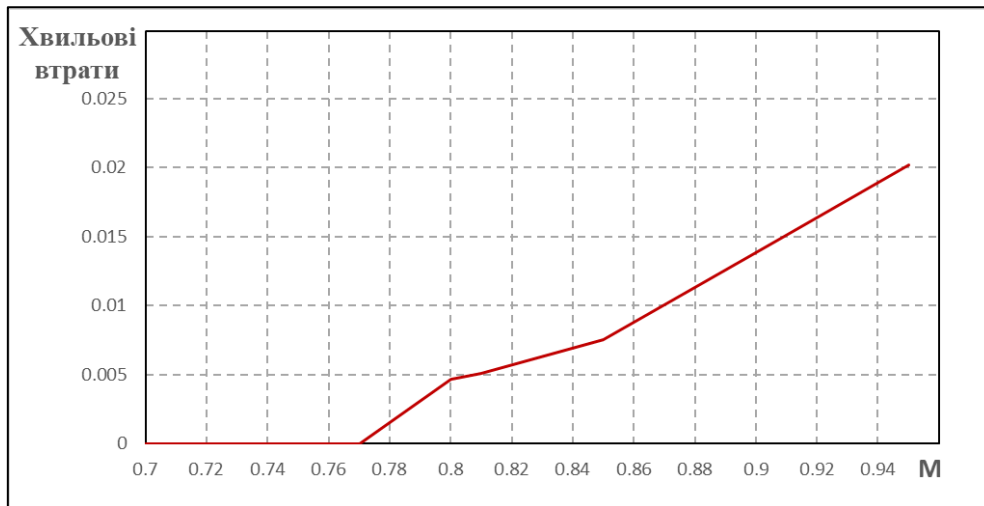


Рис. 6 – Характеристика решітки профілів при заданому значенні кута натікання $i = +2$ град

Таким чином, слід зробити висновок про те, що досліджувана решітка профілів при заданому куті натікання має критичне значення числа Маха на вході $M_{1кр} = 0,7$. На розрахунковому режимі при $M_1 = 0,81$ і тому ж значенні кута натікання, максимальне значення числа Маха дорівнює 1.275 та течія має досить розвинуту надзвукову зону, внаслідок чого гальмування супроводжується значним ростом хвильових втрат.

Тому для застосування решітки профілів на згаданому режимі з метою підвищення ККД ступеня, що проектується, та уникнення хвильових втрат профіль у решітці має бути змінений та спроектований як надкритичний.

Перелік використаної літератури:

1. Комплекс программ для расчета двумерного невязкого трансзвукового течения в решетках осевых компрессорных ступеней [Текст] / Л. Г. Бойко, В. Н. Ершов, Д. В. Калямин, А. Е. Демин // Изв. вузов. Машиностроение. – 1991. – № 3. – С. 38 – 42.
2. Белоцерковский, О. М. Метод крупных частиц в газовой динамике [Текст] / О. М. Белоцерковский, Ю. М. Давыдов. – М. : Наука, 1982. – 392 с.