

ния между экспериментом и теоретическими данными $k = P_{\text{экс}}/P_{\text{теор}}$ представлен в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты расхождения экспериментально полученной повреждаемости с теоретическими данными

Уровень повреждаемости блока плавучести, %	Коэффициент k для блоков плавучести разной плотности				
	0,4 г/см ³	0,5 г/см ³	0,6 г/см ³	0,7 г/см ³	0,8 г/см ³
5	1,40	1,60	1,63	1,65	1,77
10	1,45	1,50	1,67	1,68	1,70
20	1,32	1,30	1,30	1,28	1,26
30	1,28	1,20	1,10	1,07	0,95

6. Выводы

1. Построена математическая модель повреждаемости блока плавучести из закрытопористого пеностекла, что дает возможность прогнозировать его поведение при заданных рабочих давлениях.
2. Разрушающее давление зависит от соотношения толщины стенки поры в пеностекле к ее диаметру, то есть, чем больше диаметр пор, тем выше будет процент повреждаемости при одной и той же плотности блока.
3. Сравнение построенной математической модели с экспериментом показало, что модель дает ошибку в безопасную сторону, что обеспечивает запас плавучести для подводного аппарата.
4. Возможность прогнозирования повреждаемости блоков плавучести позволяет проектанту более полно и без затрат на эксперимент спрогнозировать их поведение при гидростатическом давлении и определить потерю подъемной силы подводного аппарата за счет накопления воды в блоках плавучести.

Литература

1. Демидович Б. К. Производство и применение пеностекла [Текст] / Б. К. Демидович. — Минск : Наука и техника, 1982. — 230 с.
2. Технология стекла [Текст] / под ред. И. И. Китайгородского. — М. : Химия, 1967. — 354 с.
3. Атрощенко С. А. Разрушение сферопластика при статических и динамических нагрузках [Текст] / С. А. Атрощенко, С. И. Кривошеев, Ю. В. Петров, А. А. Уткин, Г. Д. Федоровский // Журнал технической физики. — 2002. — Т. 72, вып. 12. — С. 54–58.
4. Копийка С. В. Экспериментальное исследование повреждаемости сферопластиков [Текст] / С. В. Копийка // Збірник наукових праць НУК. — Миколаїв, НУК, 2006. — № 3(408). — С. 48–56.
5. Mechanics of Cellular Plastics [Text] / Edited by N. K. Hilyard. — Applied Science Publishers LTD, London, 1982. — 506 p.
6. Шилл Ф. Пеностекло(производство и применение) [Текст] : пер. с чешского / Ф. Шилл. — М. : Мир, 1985. — 307 с.
7. Прочность. Устойчивость. Колебания [Текст]. Т. 1 / под общей ред. И. А. Биргера и Я. Г. Пановко. — В 3-х т. — М. : Машиностроение, 1968. — 811 с. Ошибка! Залка не определена.
8. Яценко В. Ф. Прочность композиционных материалов [Текст] / В. Ф. Яценко. — Киев : «Вища школа», 1988. — 192 с.
9. Салтыков С. А. Стереометрическая металлография [Текст] / С. А. Салтыков. — М. : Металлургия, 1978. — 271 с.
10. Соломонюк Н. С. Оптимизация состава и определение связи между свойствами закрытопористого пеностекла [Текст] / Н. С. Соломонюк // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2007. — № 1(412). — С. 47–53.
11. Соломонюк Н. С. Поверхностное водопоглощение и повреждаемость блока плавучести при гидростатическом обжатии [Текст] / Н. С. Соломонюк // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2009. — № 5 (428). — С. 54–58.

В роботі розглянута задача щодо розрахунку основних параметрів аеродинамічного сліду за вихідними кромками лопаток компресорної решітки газотурбінного двигуна.
Ключові слова: аеродинамічний слід, нерівномірність потоку, компресорна решітка.

В работе рассмотрена задача расчета основных параметров аэродинамического следа за выходными кромками лопаток компресорной решетки газотурбинного двигателя.
Ключевые слова: аэродинамический след, неравномерность потока, компрессорная решетка.

The problem of calculating the basic parameters of the aerodynamic wake behind the trailing edge of blades of compressor grating gas turbine engine is considered in the work.
Keywords: aerodynamic wake, uneven flow, compressor grating.

УДК 629.7.035.03-036.34

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ АЕРОДИНАМІЧНОГО СЛІДУ ЗА ЛОПАТКОЮ КОМПРЕСОРНОЇ РЕШІТКИ

І. О. Ластівка

Кандидат технічних наук, завідувач кафедри
 Кафедра вищої математики
 Національний авіаційний університет
 просп. Космонавта Комарова, 1, м. Київ-058, Україна, 03680
Контактний тел.: (044) 406-78-34, (067)503-67-56
E-mail: iola@nau.edu.ua

1. Вступ

Періодична колова нерівномірність потоку повітря на вході в робоче колесо компресора газотурбінного двигуна є однією з основних причин резонансних коливань лопаток компресорних решіток, що в свою чергу призводить до високих і навіть критичних рівнів вібронапружень в них [1, 2]. При обертанні ротора газотурбінного двигуна лопатки робочого колеса компресора проходять зони аеродинамічних кромкових слідів — зони підвищених і знижених значень швидкостей і тисків. Фізичні основи виникнення колової нерівномірності потоку в проточній частині осьового компресора полягають в утворенні аеродинамічних слідів за елементами статора (направляючого апарату) через явище в'язкості повітряного потоку [3, 4, 5, 6, 7].

2. Постановка задачі

Законо поширення вихрових кромкових слідів в зонах нерівномірності потоку аналогічні законам поширення сліду за плоским одиночним тілом, що обтікається в'язкою рідиною при великих числах Рейнольдса [8, 6]. Розв'язання цих задач базуються на напівемпіричних теоріях вільної турбулентності за умови слабкої неоднорідності потоку. Задачі розрахунку сліду за одиночним профілем розглянуті в роботах [8, 7, 9].

Оскільки робочі колеса компресора газотурбінного двигуна рухаються в зонах аеродинамічних слідів, важливою і актуальною є задача щодо розрахунку основних параметрів аеродинамічного сліду за вихідними кромками лопаток направляючого апарату.

3. Розв'язування задачі. Аналіз дослідження

Розглянемо один із турбулентних слідів за лопаткою вхідного направляючого апарату в системі координат Oxy (рис. 1).

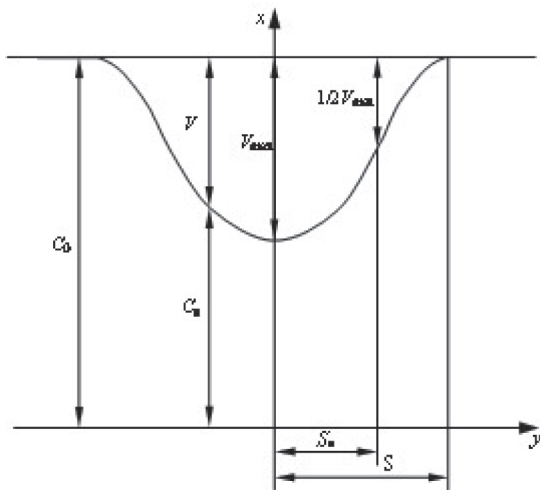


Рис. 1. Основні позначення до розрахунку аеродинамічного сліду

Розв'язок шукатимемо для ділянки, розташованої до зони зімкнення меж слідів сусідніх кромок і на такій від-

стані від вихідних кромок, де можна нехтувати впливом неоднорідності поля статичного тиску.

Для вільного турбулентного сліду рівняння руху має вигляд [10, 7]

$$c_k \frac{\partial c_k}{\partial x} + c_2 \frac{\partial c_k}{\partial y} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial y}, \tag{1}$$

де c_k, c_2 — усереднені складові швидкості по осях x, y ; ρ — густина рідини або газу; τ — дотичне напруження, викликане турбулентним тертям.

Рівняння нерозривності запишеться

$$\frac{\partial c_k}{\partial x} + \frac{\partial c_2}{\partial y} = 0. \tag{2}$$

На деякому віддаленні від кромок потік слабо неоднорідний, тому

$$c_k = c_0 - V, \quad V \ll c_0, \quad c_2 \ll c_0, \tag{3}$$

де c_0 — постійна швидкість в ядрі потоку між слідами; $V = V(x, y)$ — додаткова швидкість в сліді.

З урахуванням умови (2) рівняння руху спрощується (нехтуємо членами другого порядку малості):

$$-c_0 \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial y}. \tag{4}$$

Після інтегрування системи рівнянь (1), (2) з використанням напівемпіричних формул [7], отриманих на основі понять шляху перемішування і турбулентного обміну у вигляді

$$\tau = \rho l^2 \left| \frac{\partial V}{\partial y} \right| \frac{\partial V}{\partial y}, \quad \tau = \rho \epsilon \frac{\partial V}{\partial y}, \tag{5}$$

основне диференціальне рівняння приймає такий вигляд:

$$c_0 \frac{\partial V}{\partial x} = \epsilon \frac{\partial^2 V}{\partial y^2}; \tag{6}$$

$$\epsilon = AV_{max} \cdot S = \epsilon_0, \tag{7}$$

де A — емпіричний коефіцієнт; $V_{max} = V_{max}(x)$ — максимальна додаткова швидкість в сліді для даного поперечного перерізу сліду; $2S = 2S(x)$ — ширина сліду.

Згідно з [6] турбулентна в'язкість $\epsilon = \text{const}$, тоді з рівняння нерозривності випливає, що $V_{max} \cdot S = \text{const}$.

Аналіз даних досліджень показує, що при плоскій двовимірній течії профілі швидкостей в сліді ідентичні і можуть бути описані формулою [7] для перерізів, де

$$\frac{V}{c_0} = \frac{\sqrt{10}}{18\beta} \left(\frac{x}{c_x d} \right)^{-1/2} \left[1 - \left(\frac{y}{b} \right)^{3/2} \right]^2, \tag{8}$$

де b — ширина сліду; l — довжина шляху перемішування; $\beta = 1/b$ — коефіцієнт пропорційності; d — абсолютна товщина профілю; c_x — коефіцієнт аеродинамічного опору; x — відстань від задньої кромки профілю по осі Ox .

Для практичних цілей застосовується формула, запропонована в роботі [6] на основі розв'язку рівняння (6) з використанням поняття шляху перемішування:

$$\frac{V}{V_{\max}} = \left[1 - \left(\frac{Y}{S} \right)^{3/2} \right]^2, \quad S = 2,27S^*, \quad (9)$$

де S – половина ширини сліду в точках, де $V = 0$.

Приймати як масштаб ширину сліду S незручно, оскільки її важко виміряти (тут додаткова швидкість в сліді асимптотично наближається до нуля (рис. 1), тому, зазвичай, беруть у якості масштабу для побудови епюру величину $2S^*$, яка дорівнює відстані між точками сліду, де додаткові швидкості в сліді $V = 0,5 V_{\max}$ (рис. 1). Отже $2S = 4S^*$. Залежність ширини сліду від осьової відстані вздовж сліду визначається за методикою, викладеною у роботі [7], з якої випливає, що $b \sim x^{1/2}$.

У роботі [7] для практичних розрахунків приводиться формула

$$S = B \sqrt{\frac{\epsilon_0 x}{c_0}}, \quad (10)$$

де B – коефіцієнт пропорційності;

$$\epsilon_0 = 0,5 A c_0 \xi_{\text{пр}} t \sin \gamma_1, \quad (11)$$

або

$$S^* = 0,25 (c_0 / V_{\max}) \cdot t \cdot \xi_{\text{пр}} \cdot \sin \gamma_1, \quad (12)$$

де $\xi_{\text{пр}}$ – коефіцієнт профільних втрат в решітках; t – крок решіток; γ_1 – кут виходу потоку з решіток (тут і надалі для решіток плоских профілів вхідного направляючого апарату $\gamma_1 = 90^\circ$).

Одну з важливих характеристик сліду – ступінь неоднорідності $\alpha = \frac{V_{\max}}{c_0}$ – можна знайти з формули (12), замінивши $2S^* = S$ через формулу (10) і, підставивши ϵ_0 із формули (11), отримаємо:

$$\alpha = \frac{V_{\max}}{c_0} = A_1 \sqrt{\frac{t}{x} \xi_{\text{пр}}}, \quad (13)$$

де $\xi_{\text{пр}}$ – єдина в цій задачі постійна, яка визначається з експерименту.

Формулу для ширини сліду можна спростити, замінивши у формулі (12) ступінь неоднорідності виразом (13):

$$S^* = 0,38 \sqrt{t \xi_{\text{пр}} x}. \quad (14)$$

Таким чином, на ділянці до зімкнення слідів, де, зазвичай, працюють решітки робочого колеса турбомашини, параметри сліду визначені.

На рис. 2 нанесені експериментальні точки для слідів позаду круглого циліндра, виміряних на різних відстанях від циліндра вниз по потоку [7, 6]. Видно, що підтверджується залежність між безрозмірною додатковою швидкістю в сліді і безрозмірною координатою. Проте для більшої точності у формули (13) і (14) мають бути введені поправки, оскільки на вихідній кромці ($x=0$) сліди матимуть певну ширину і умовну неоднорідність [6].

Проведемо у формулі (13) перетворення, замінивши $\xi_{\text{пр}}$ на $\xi_{\text{пр}0}$, і тоді отримаємо

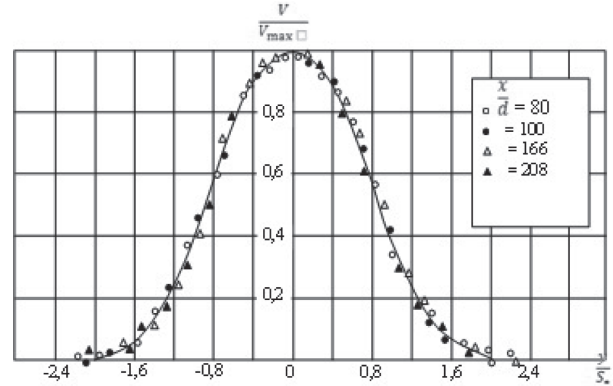


Рис. 2. Безрозмірний універсальний профіль додаткової швидкості в сліді на різних відстанях від решіток

$$\alpha = A_1 \sqrt{\frac{t}{b} \xi_{\text{пр}0} \frac{b}{x}}, \quad (15)$$

де t/b – густина решіток; $\xi_{\text{пр}0}$ – коефіцієнт втрат в початковій решітці при плоскому обтіканні.

Для турбінних решіток [11] після обробки вимірювань кромкових слідів визначено $A_1 = 0,66$. В результаті аналізу експериментальних досліджень показано, що з достатньою мірою точності в діапазоні чисел Маха $M = 0,4 - 0,8$ величина A_1 може розглядатися рівною

$$A_1 = 0,65 + \sin^2 \gamma_1. \quad (16)$$

Для плоского обтікання $\gamma_1 = 0$, $A_1 = 0,65$.

Таким чином, можна відзначити, що для основної ділянки аеродинамічного сліду поле швидкостей, що визначається залежністю $c_k = f(x, y)$, знаходиться спільним розв'язанням рівнянь (9)–(16).

На рис. 3 зображена залежність рівня нерівномірності потоку в сліді від відносної осьової відстані від решітки x/t .

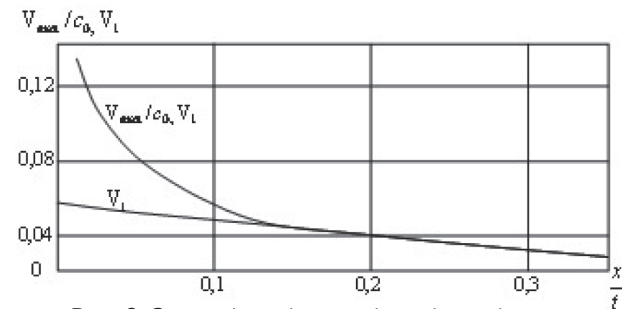


Рис. 3. Залежність рівня нерівномірності потоку від відносної осьової відстані від решітки

При $x/t > 0,15$ обидві характеристики збігаються, оскільки на відносно великій відстані додаткова швидкість в слідах описується синусоїдальною функцією. При малих осьових відстанях обидві характеристики різко розходяться.

3. Висновок

В результаті проведених досліджень можна зробити висновок про те, що вирівнювання потоку за вихідними

кромками лопаток вхідного направляючого апарату відбувається досить повільно. Його повне вирівнювання, коли ступінь нерівномірності потоку $\alpha \cong 0$, відбувається

лише на досить великому віддаленні від вихідної кромки, співрозмірному з хордою профілю лопатки вхідного направляючого апарату, а саме при $\bar{x} = x/b = 1,0$.

Література

1. Гинзбург С. И. Исследование неравномерного по окружности течения перед осевой компрессорной ступенью [Текст] / С. И. Гинзбург, А. А. Сусленников // Сб. «Лопаточные машины и струйные аппараты». — М. : Машиностроение, 1971.
2. Терещенко Ю. М. Вплив інтенсивності обтіканням на вібронапруження лопаток компресора газотурбінного двигуна [Текст] / Ю. М. Терещенко, І. О. Ластівка // Вісник Національного університету «ХПИ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. — Харків : НТУ «ХПИ», 2011. — № 23. — С. 144–151.
3. Дейч М. Е. Основы аэродинамики осевых турбомашин [Текст] / М. Е. Дейч, Г. С. Самойлович. — М. : Машгиз, 1959.
4. Писаренко Г. С. Проблемы аэроупругости лопаток турбомашин [Текст] / Г. С. Писаренко, А. Е. Ольштейн // Сб. «Проблемы прочности». — АН УССР. — 1974. — № 8.
5. Самойлович Г. С. Нестационарное обтекание и аэроупругие колебания решеток турбомашин [Текст] / Г. С. Самойлович. — М. : Наука, 1969.
6. Самойлович Г. С. Возбуждение колебаний лопаток турбомашин [Текст] / Г. С. Самойлович. — М. : Машиностроение, 1975.
7. Филиппов Г. В. Влияние поперечного градиента давления на параметры турбулентного пограничного слоя [Текст] / Г. В. Филиппов, В. Г. Шахов. — ИВУЗ, «Авиационная техника», 1969. — № 3.
8. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа [Текст] / Л. Г. Лойцянский. — М. : Наука, 1970.
9. Гиневский А. С. Теория турбулентных струй и следов [Текст] / А. С. Гиневский. — М. : Машиностроение, 1969.
10. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика [Текст] / Г. Н. Абрамович. — М. : Физматгиз, 1969.
11. Калихман А. Е. Исследование турбулентного пограничного слоя в области отрыва [Текст] / А. Е. Калихман. — Труды ЦАГИ. — 1937. — № 333.