

УДК 533.63, 534.23

Петро В. Лук'янов

ШУМ ВЗАЄМОДІЇ ВИХОРУ І ЛОПАТИ ГЕЛІКОПТЕРА

In this paper, a model of sound generation by blade–vortex interaction (BVI) is offered for helicopter rotor operating at subsonic regime ($M = 0,2$). We find the quantitative limits of its use. Based on three-dimensional non-stationary equation of small perturbations spreading, the problem of sound generation by parabolic blade and Taylor's vortex, situated at a certain distance from the blade, is solved. To solve this problem, we use the numerical-analytical method. The method allows calculating the near-field sound potential and its derivatives. The pressure coefficient analysis shows that the disposition of the blade–vortex interaction generates three surges like shock waves of A, B, C types (by Tijeman). However, interaction amplitudes are smaller than the ones for transonic regime. In addition, we reveal that BVI noise level is 10Db (with respect to $2 \cdot 10^{-5}$ Pa) more than the noise level in the similar problem without a vortex in the flux. The numerical calculation shows that the limit distance, where the model is acceptable, is more than $1,5R_c$ (R_c is core radius). When the distance between vortex core and rotor blade increases, the BVI-noise level decreases.

Вступ

Природа шуму гелікоптера аеродинамічного походження досить різноманітна. Він містить товщинний шум і високошвидкісний імпульсний шум (HSI), шум від навантаження на лопать гелікоптера, широкосмуговий шум, а також шум взаємодії лопать–вихор (BVI). Всі перелічені види шуму детерміновані, оскільки вони проявляються для лопаті будь-якої форми і тому є природними. Кожному з перелічених шумів відповідає свій характерний режим течії, де цей шум проявляється особливо.

Спочатку в роботах з дослідження шуму ротора гелікоптера основна увага приділялася вивченню товщинного шуму та шуму обертання [1]. Пізніше з'ясувалося, що існують високошвидкісний імпульсний шум і шум взаємодії лопать–вихор. Якщо перший з них зароджується з шуму діючих на лопать змінних навантажень за досить великих швидкостей у трансзвуковому діапазоні течії, то шум взаємодії лопать–вихор в основному проявляється при маневрах гелікоптера, тобто при його зниженні, розвороті тощо. Наявний у потоці вихор є додатковим фактором, який може посилити шум від навантажень на лопать ротора. Таким чином, шум взаємодії лопать–вихор не існує сам собою, а є похідним від шуму навантаження (частина шуму обертання) при взаємодії лопать–вихор.

У працях [2, 3] у двовимірній постановці вивчено дальнє та ближнє звукові поля від взаємодії лопаті та ізольованого вихору, який розміщений на різних відстанях від лопаті. В [2]

досліджено механізм трансзвукової взаємодії лопать–вихор. Зокрема, чисельно виявлені три типи ударних хвиль (типи А, В, С), які експериментально встановлені в працях [4–6].

Перелічені дослідження проводились для трансзвукового режиму течії, де шум найбільш інтенсивний. Як підкреслюється в експериментальній роботі [7], BVI-шум з'являється під час таких режимів польоту, як зниження–посадка, поворот, що відповідає діапазону чисел Маха ($M = 0,2$).

Ця робота присвячена одному з таких режимів взаємодії лопать–вихор – паралельному проходженню вихору над лопаттю, дослідження якого проводиться на основі тривимірної нестационарної моделі.

Постановка задачі

Метою роботи є: дослідити вплив взаємодії лопать–вихор ротора на характер і рівень BVI-шуму в дозвуковому режимі течії; порівняти отримані розрахункові дані з експериментальними даними, а також з даними розрахунку BVI-шуму для трансзвукового режиму течії.

Вихідні положення

Розглянемо лопать ротора (рис. 1), на яку набігає зустрічний потік зі швидкістю U . Переріз лопаті має параболічну форму, профіль NASA-0010. Введемо у розгляд прямокутну систему координат $Oxuz$. Лопать обертається з кутовою швидкістю Ω . На відстані y_d від ло-

паті розміщений вихор Тейлора [8] з розподілом дотичної швидкості за законом

$$v_{\theta} = v_{\theta \max} \cdot \frac{r}{R_c} \cdot e^{(1-(r/R_c)^2)}, \quad (1)$$

де $v_{\theta \max}$, R_c , r – максимум дотичної швидкості, радіус вихорового ядра і відстань від ядра вихору до поверхні лопаті відповідно. Вважаємо, що вихор розміщений на такій відстані, яка перевищує радіус ядра вихору R_c (див. рис. 1), а $v_{\theta \max}$ відповідає амплітуді вихору, що утворюється від проходження попередньої лопаті ротора. Але безпосередньо процес його утворення в цій моделі не розглядається: вважається, що вихор вже існує в полі течії на початку віддаленої взаємодії з лопаттю. При цьому фактично відбувається взаємодія потенційних течій навколо лопаті і периферійної частини (атмосфери) вихору. Кінцеві ефекти не розглядаються. Зауважимо, що відстань (між лопаттю і вихором), на якій таке припущення справедливе, визначається далі за даними розрахунків.

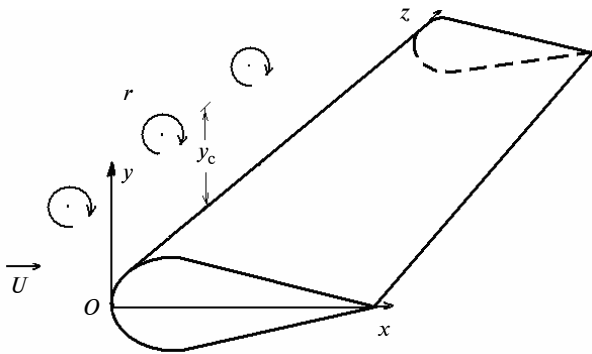


Рис. 1. Взаємодія лопаті з вихором

Рівняння, що описує генерацію шуму течією навколо лопаті при незначній зміні ентропії течії, має вигляд [9]

$$\left(\frac{kc}{U}\right)^2 f_{\tau\tau} + \left[1 - \frac{1}{M_1^2} + (1 + \gamma)\epsilon f_{\xi}\right] f_{\xi\xi} + 2\frac{kc}{U} f_{\xi\tau} - \left(\frac{\lambda c}{M_1}\right)^2 f_{\eta\eta} - \left(\frac{c}{M_1 R}\right)^2 f_{\zeta\zeta} = 0, \quad (2)$$

де f – безрозмірний потенціал малих збурень, c – довжина хорди поперечного перерізу лопаті, R – радіус (розмах) лопаті, k – часовий параметр, U – швидкість потоку, що набігає на лопать, M_1 – число Маха. Рівняння (2) за-

писано в безрозмірних координатах $\xi = x/c$, $\eta = \lambda y$, $\zeta = z/R$, $\tau = kt$.

На поверхні лопаті маємо таку граничну умову непроникності:

$$\delta[kg_{\tau} + (1 + \epsilon f_{\xi})g_{\xi}] = \epsilon \lambda f_{\eta}, \quad 0 < \xi < 1, \quad (3)$$

де g – функція, що задає форму поверхні поперечного перерізу лопаті. До взаємодії з лопаттю течія була незбуреною, тобто

$$f_{|\tau=0} = \frac{\partial f}{\partial \tau}_{|\tau=0} = 0. \quad (4)$$

Зауважимо, що, згідно з теоремою Крокко, незначні зміни ентропії можуть відбуватись не тільки за рахунок слабких стрибків ущільнювання, але й за наявності слабого завихрення в течії. В задачі, що розглядається, таке завихрення є в периферійній частині вихору. Дійсно, периферійний розподіл швидкості вихору (1) дуже близький до розподілу швидкості точкового вихору, який, як відомо, є потенціальним. Деякі відмінності вихору (1) від точкового вихору будемо вважати незначними відмінностями від потенціальної течії. Ось чому в [2, 3], так само, як і в цій роботі, з указаним ступенем наближення для описання генерації звуку використовується модель взаємодії потенціальних течій – навколо лопаті і в периферійній частині вихору. Але ця модель не працює в міру наближення до ядра вихору, яке не є потенціальним. Отже, в цій роботі взаємодія вихор–лопать розглядається лише на певній відстані лопаті від вихору.

У межах описаних припущень поставлена задача (2)–(4) розв'язується чисельно.

Метод розв'язання й аналіз розрахункових даних

Для розв'язання задачі (2)–(4) використано застосований при розв'язанні задач [9, 10] числово-аналітичний підхід [11]. Координатна сітка була близько 50×40 відповідно уперек та вздовж розмаху лопаті. Сукупна розрахункова система складалася з 15 рівнянь, що дало змогу отримати цілком стійкий числовий розрахунок. Коефіцієнт тиску розраховувався за формулою [10]

$$C_p = 2\epsilon \left[kf_{\tau} + f_{\xi} + \frac{1}{2}\epsilon \lambda^2 f_{\eta}^2 \right]. \quad (5)$$

Дані розрахунку, наведені на рис. 2, відповідають $y_d = 2,0$, $\Omega = 3000$ об/хв; y_d – відстань від центра вихору до поверхні лопаті. Як видно з рис. 2, спостерігаються три основні піки на поверхні розподілу тиску C_p , що дуже схоже на вказані вище три типи ударних хвиль (типи А, В, С) згідно з класифікацією, експериментально встановленою в працях [4–6]. Таким чином, за наявності в течії вихору недалеко від лопаті взаємодія лопать–вихор якісно нагадує аналогічну картину взаємодії в трансзвуковому діапазоні швидкостей [2]. Відмінною особливістю є кількісна структура піків, які в цій задачі (рис. 2) значно менші за величиною, ніж у трансзвуковій течії [2]. Зі зменшенням відстані $y_d < 1,5$ числовий розрахунок дає два локальні сплески впоперек лопаті, які не спостерігались в експерименті. Це означає, що з'являється індукована течія вздовж лопаті, яка вступає у взаємодію з основним потоком упоперек лопаті. Така взаємодія не передбачена моделлю, що описується рівнянням (2). Отже, модель взаємодії вихор–лопать прийнятна лише на певній відстані вихору від лопаті ($y_d > 1,5$).

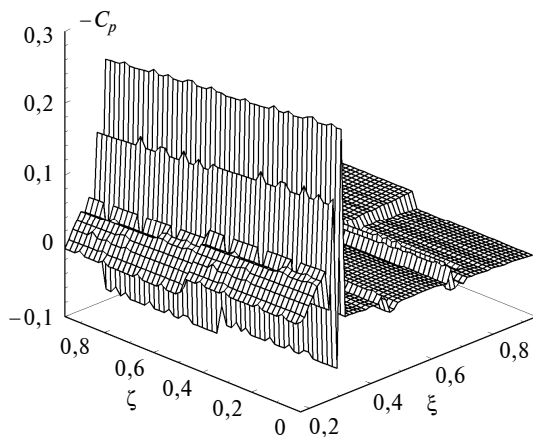


Рис. 2. Коефіцієнт тиску на поверхні лопаті

Дальнє поле

У результаті розрахунку ближнього поля згідно з числово-аналітичним підходом маємо всі необхідні значення потенціалу та його похідних, щоб дослідити поведінку BVI-шуму в дальньому полі.

Як розрахункові співвідношення використовуємо зображення дальнього поля у вигляді [9]

$$-M_1^2 \int_S \left[\frac{F}{R} \right]_{t^*} dS_x + \int_S [F_1]_{t^*} dS = 4\pi\phi'(x, t_1), \quad (6)$$

де

$$F = \phi'_x + \frac{1}{2}(1 + \gamma)(\phi'_x)^2 + \frac{2}{U}\phi'_t,$$

$$F_1 = \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial \phi'}{\partial n} + \frac{1}{Ra_\infty} \frac{\partial R}{\partial n} \frac{\partial \phi'}{\partial t} - \phi' \frac{\partial(1/R)}{\partial n}. \quad (7)$$

Зображення (6) дає змогу виконати розрахунок звукового потенціалу ϕ' на різній відстані від поверхні лопаті. На його підставі було вивчено розподіл рівня шуму, що генерується на поверхні лопаті в результаті взаємодії вихору–лопаті і потоку, що набігає на лопать. Розміри лопаті вибирались такими: $c = 0,3$ м, $R = 3,0$ м.

На рис. 3, а, б, в наведено дані розрахунку рівня L (децибел відносно рівня $2 \cdot 10^{-5}$ Па) генерованого шуму на відстані $y = 0,1$ м для різних розміщень лопаті й вихору: $y_d = 1,5; 2,0; 3,0$. Дані розрахунку свідчать про те, що шум найбільш високого рівня спостерігається тоді, коли лопать і вихор перебувають на відстані $y_d = 1,5$ (рис. 3, а). При цьому форма поверхні, що відображає розподіл рівня шуму, нагадує хвилю, що розповсюджується вздовж лопаті ротора. А рівень шуму приблизно на 10 Дб більший, ніж у схожій задачі за відсутності вихору [10]. Якщо збільшувати відстань між вихором і лопаттю, рівень шуму спадає. При цьому приблизно посередині лопаті вздовж її розмаху спостерігається невеликий локальний максимум шуму. Цього не спостерігалось в задачі [10], коли вихор у течії був відсутній. Таким чином, наявність у потоці вихору на близькій відстані від лопаті істотно підсилює генерований шум; при віддаленні вихору BVI-взаємодія спостерігається лише у вигляді незначних якісних змін.

У міру віддалення від лопаті можна помітити лише деяку кількісну зміну рівня шуму порівняно з аналогічними розрахунками за відсутності вихору [10]. Так, на рис. 3, з показано розподіл рівня шуму на відстані $y = 1$ м для випадку $y_d = 2,0$. Хвиля вже має чітко виражену форму, яка близька до плоскої хвилі.

На рис. 4 зображено частотні розподіли в спектрі генерованого шуму, які відповідають описаним вище чотирьом випадкам (див. рис. 3). Залежно від відстані між вихором і лопаттю амплітудний розподіл у спектрі шуму дещо різниться. Так, у випадку найменшої відстані між

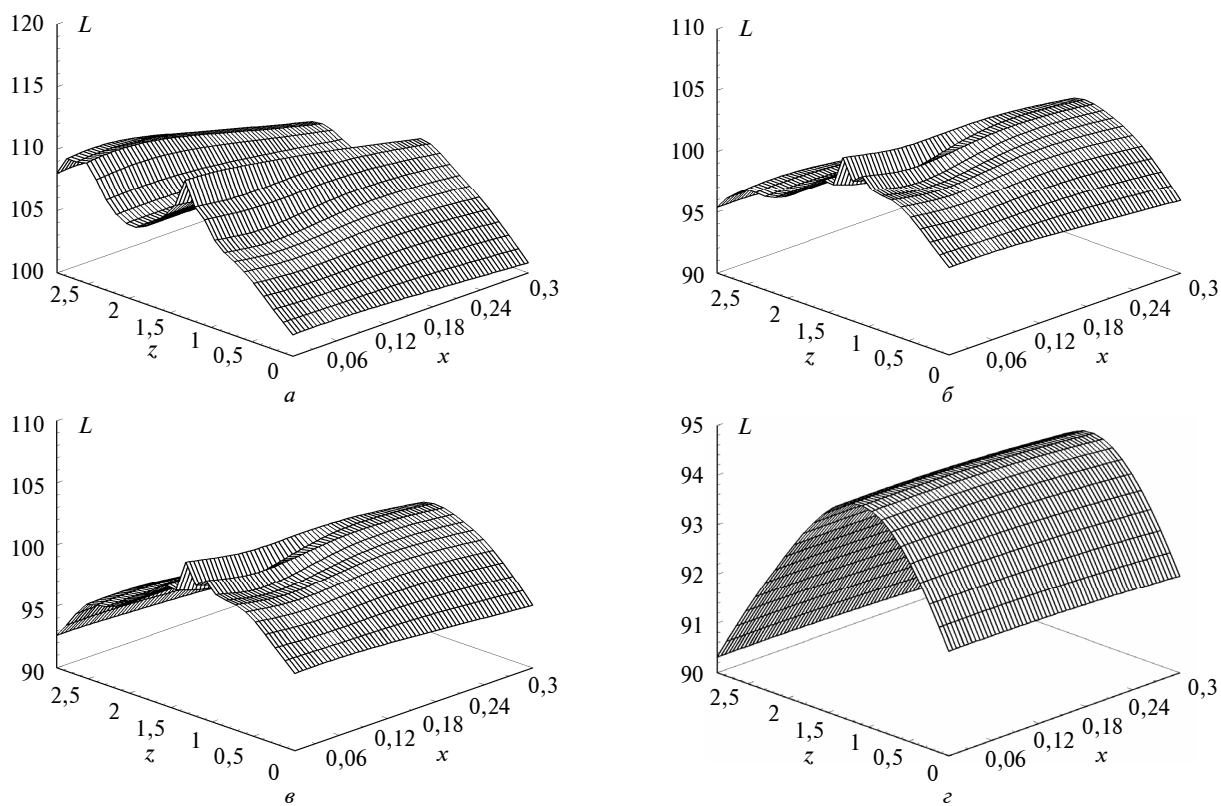


Рис. 3. Рівень шуму: $a - y_d = 1,5$; $б - y_d = 2,0$; $в - y_d = 3,0$; $г - y = 1 \text{ м}, y_d = 2,0$

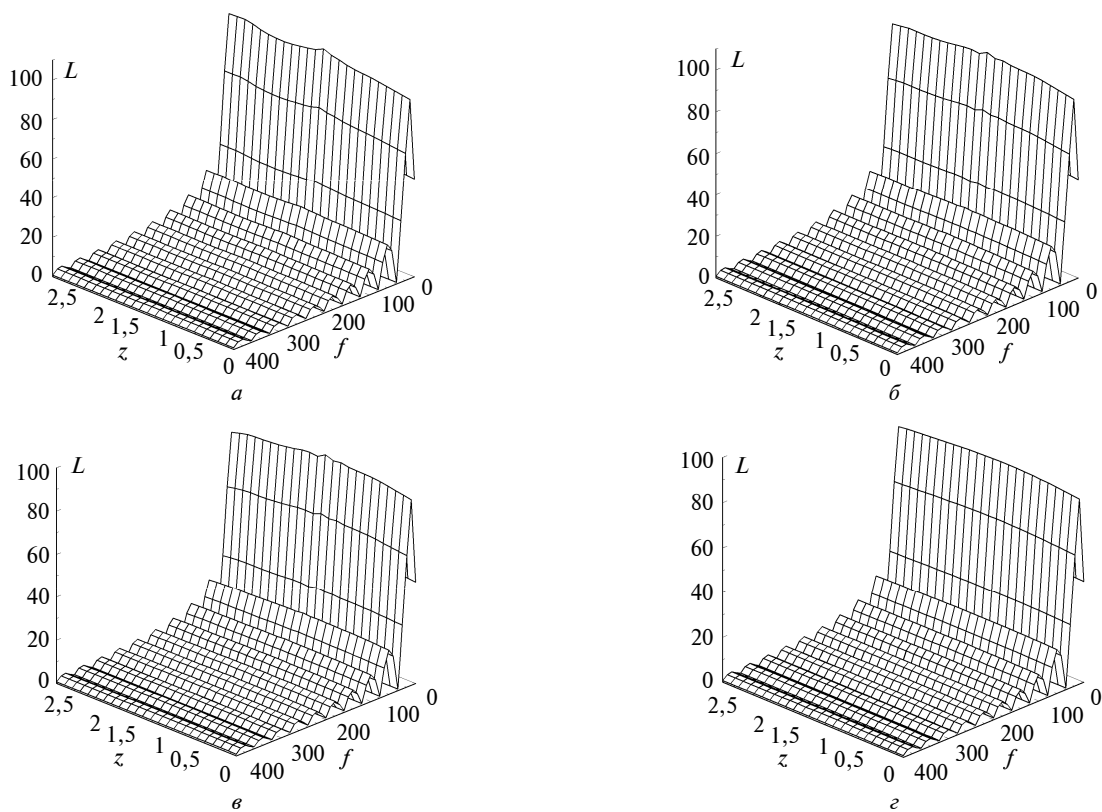


Рис. 4. Частотний спектр генерованого шуму: $a - y_d = 1,5$; $б - y_d = 2,0$; $в - y_d = 3,0$; $г - y = 1 \text{ м}, y_d = 2,0$

вихором і лопаттю (рис. 4, *a*) маємо максимальний рівень розподілу шуму по перших гармоніках. Зі збільшенням відстані між вихором і лопаттю рівень шуму помітно зменшується: для $y_d = 1,5$ максимум становить приблизно $L = 99,92$ Дб, а для $y_d = 2,0; 3,0$ – $L = 91,64; 90,82$ Дб відповідно. Ці дані свідчать про те, що значна відмінність в рівні шуму (~ 8 Дб) спостерігається лише для випадку, коли вихор найближче розміщений до лопаті (див. рис. 4, *a*). З віддаленням від лопаті, як видно з наведених розрахункових даних, ця відмінність становить менш ніж 1 Дб (рис. 4, *b, в*). Найбільший рівень у спектрі шуму збігається з частотою обертання лопаті. Це й підтверджує той факт, що шум напряму залежить від частоти обертання лопаті ротора гелікоптера і, як наслідок, є шумом обертання в своїй основі. Наявний у полі течії вихор лише додатково посилює цей шум.

Висновки

У роботі розглянуто модель генерації шуму взаємодії вихор–лопять ротора гелікоптера в дозвуковому діапазоні швидкостей. Визначено кількісні межі застосування цієї моделі.

Встановлено, що в разі найближчого розміщення лопаті та вихору BVI-шум вищий за рівнем шуму обертання приблизно на 10 Дб, ніж у задачі, де вихор відсутній. Зі зміною відстані кількісна BVI-взаємодія істотно зменшується.

У подальших дослідженнях планується використання непотенціальної моделі течії, що надає змогу моделювання процесів близької взаємодії вихору з лопаттю. Це дасть можливість вивчити природу безпосереднього впливу вихрової складової течії на генерацію шуму.

1. *Авиационная акустика* / Под. ред. А.Г. Мунина. – М.: "Машиностроение", 1986. – 244 с.
2. *A.S. Lyrantzis and A.R. George*, "Far Field Noise of Transonic Blade-Vortex Interactions", *Amer. Helicopter Soc. J.*, vol. 27, no. 7, pp. 30–39, 1989.
3. *A.S. Lyrantzis and Y. Xue*, "Study of the Noise Mechanisms of Transonic Blade-Vortex Interactions", *AIAA J.*, vol. 29, no. 10, pp. 1562–1572, 1991.
4. *H. Tijeman*, "Investigation of the Transonic Flow Around Oscillating Airfoils", Ph.D Thesis, Technische Hogeschool, Delft, Netherlands, 1977, 152 p.
5. *J.L. Tangler*, "Schlieren and Noise Studies of Rotors in Forward Flight", 33rd Annual National Forum of the American Helicopter Society, Washington, D.C., Paper 77, 33-05, May 1977.
6. *F.X. Caradonna et al.*, An Experimental Investigations of the parallel Blade-Vortex Interactions. Workshop on Blade-Vortex Interactions, NASA Ames Research Center, Oct. 1984.
7. *S.N. Koushik*, "A New Experimental Approach to Study Helicopter Blade-Vortex Interaction Noise", Ph.D Thesis, University of Maryland, 2007, p. 226.
8. *G. Taylor*, "On the Dissipation of Eddies", *Sci. Papers of Sir Geoffrey Ingram Taylor*, vol. 2, pp. 96–101, 1958.
9. *Лукьянов П.В.* Нестационарное распространение малых возмущений от тонкого крыла: ближнее и дальнее поле // *Акустичний вісник*. – 2009. – № 3. – С. 41–55.
10. *Лук'янов Петро В.* Генерація звуку при дозвуковому обтіканні лопаті гвинта гелікоптера // *Наукові вісті НТУУ "КПІ"*. – 2011. – № 4. – С. 143–148.
11. *Лук'янов П.В.* Об одном численно-аналитическом подходе к решению задачи генерации звука тонким крылом. Часть I. Общая схема применения для плоской стационарной задачи // *Акустичний вісник*. – 2011. – № 3. – С. 46–52.