

DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2026.01.026

ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ СЛІДУ ЗА КРУГОВИМ ЦИЛІНДРОМ, ЩО КОЛИВАЄТЬСЯ, ПРИ НИЗЬКИХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА

Весков Є. В.¹ [ORCID], Довгий С. О.² [ORCID], Редчиць Д.О.³ [ORCID]

¹Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
аспірант, України

²Інститут прикладних систем управління Національної академії наук, доктор
фізико-математичних наук, професор, України

³Інститут транспортних систем та технологій Національної академії наук,
доктор фізико-математичних наук, професор, України

³Інститут прикладних систем управління Національної академії наук,
доктор фізико-математичних наук, професор, України
³Дніпровський державний технічний університет,
доктор фізико-математичних наук, професор, України

Анотація. Проведено чисельне моделювання структури вихрового сліду за круговим циліндром, що здійснює вимушені поперечні коливання в нестисливій рідині при субкритичному числі Рейнольдса $Re = 2174$. Використано двовимірний підхід URANS з $k-\omega$ SST моделлю турбулентності та $\gamma-\tilde{Re}_\theta$ моделлю ламінарно-турбулентного переходу, реалізований у пакеті OpenFOAM. Досліджено залежність різних режимів вихроутворення (2S, 2P, 2P₀, P+S, C(2S), 2T) від безрозмірної амплітуди A^* та частоти f^* вимушених коливань у відповідності до експериментальної карти Т. Морзе і К. Х. К. Вільямсона. Отримано контури завихреності, залежності аеродинамічних коефіцієнтів від часу та амплітудно-частотні спектри. Показано, що 2D-моделювання якісно відтворює основні режими вихроутворення та межі переходів між режимами, проте режими із двома парами вихорів 2P і 2P₀ та комбіновані (2S/2P₀ та 2P₀/2P) виявляються нестабільними і з часом деградують до P+S або 2S через неможливість відтворити тривимірні явища у двовимірному моделюванні. Для точного обчислення гідродинамічних сил, моделювання режимів з двома парами вихорів (2P) та комбінованих режимів (2S/2P₀ та 2P₀/2P) необхідне проведення тривимірних розрахунків.

Ключові слова: вихрові коливання, круговий циліндр, вихровий слід, чисельне моделювання, URANS, модель ламінарно-турбулентного переходу, режими вихроутворення, число Рейнольдса, OpenFOAM.

Нестационарні вихори, індуковані потоком, становлять серйозну загрозу для надійності та міцності трубопроводів, мостів і вітрових турбін [0]. Дослідження структури сліду за осцилюючими тілами дозволяє прогнозувати режими навантаження та запобігати резонансним явищам. Особливий інтерес становить аналіз режимів вихроутворення та їх переходів [0].

В роботі розглядається круговий циліндр діаметром D , який коливається за синусоїдальним законом перпендикулярно потоку, який рухається зі швидкістю U в горизонтальному напрямку.

Течія описується нестационарними осередненими за Рейнольдсом рівняннями Нав'є-Стокса (URANS) для нестисливої рідини з $k-\omega$ SST моделлю турбулентності та $\gamma-\tilde{Re}_\theta$ моделлю ламінарно-турбулентного переходу [0].

Задача про циліндр, що коливається, може бути охарактеризована наступними трьома безрозмірними групами: числом Рейнольдса, $Re = UD/\nu$, безрозмірною амплітудою коливань $A^* = A/D$; і відношенням частоти вимушених коливань f_e до власної частоти вихроутворення $f^* = f_e/f_s$ [0]. Власна частота вихроутворення одиночного нерухомого циліндра f_s часто виражається через число Струхаля, $St = f_s D/U$. У деяких роботах замість f^* використовується безрозмірна довжина хвиль $\lambda^* = \lambda/D = U/f_e D$, де $\lambda = UT_e$ – довжина хвилі відповідної синусоїдальної траєкторії, вздовж якої рухається тіло відносно рідини; $T_e = 1/f_e$ – період коливань циліндру у напрямку перпендикулярному потоку рідини. Також використовується безрозмірний час $t^* = f_s t$, де t – час [0].

Обчислення виконувались у програмному комплексі OpenFOAM (розв'язувач `simpleFoam`) на структурованій сітці O-типу радіусом $25D$ з кількістю вузлів 240×500 зі згущенням поблизу поверхні циліндра (перша комірка дорівнює $0.0035D$, у примежовому шарі кількість шарів сітки дорівнює 40). У якості граничних умов на поверхні циліндра ставилась умова прилипання, а на зовнішній межі – умова потоку, що набігає.

На рис. 1, а зображено типи режимів вихроутворення, які можуть існувати при вертикальних коливаннях циліндру у потоці рідини за К. Х. К. Вільямсоном і А. Рошко [0]. На рис. 1, б наведено діаграму режимів вихроутворення, яка відображає залежність меж режимів вихроутворення від λ^* та A^* .

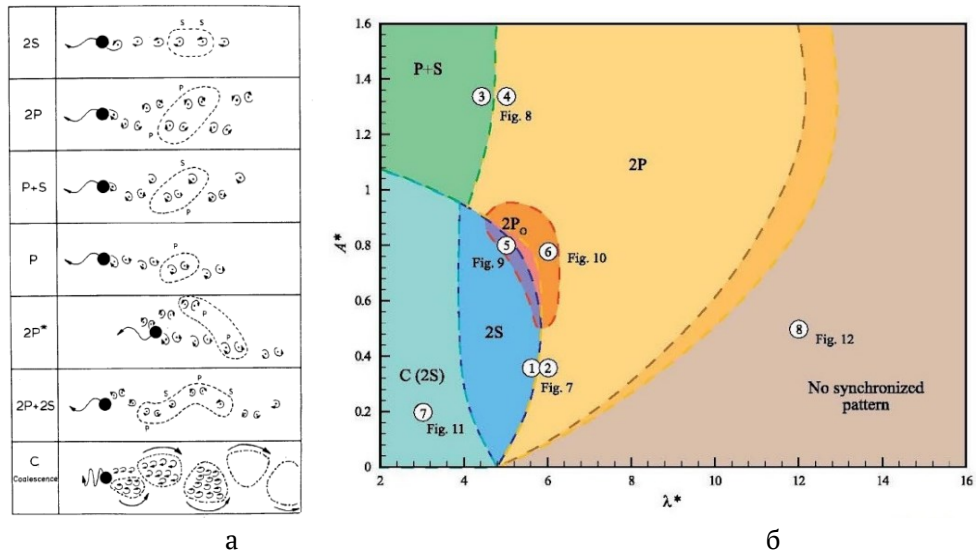


Рисунок 1 – Типи режимів вихроутворення за К. Х. К. Вільямсоном і А. Рошко [0] та діаграма режимів вихроутворення Т. Морзе і К. Х. К. Вільямсона [0]: а – типи режимів вихроутворення; б – діаграма режимів вихроутворення.

На основі аналізу контурів завихреності, залежностей аеродинамічних коефіцієнтів та спектрального аналізу підйомної сили ідентифіковано наступні режими:

1. **Режим 2S (синхронізований режим Кармана):** спостерігається при помірних амплітудах (рис. 1, б, точка 1). За один період формуються два одиночні вихори. Спектр підйомної сили має чіткий пік на частоті f_s .
2. **Режим 2P (дві пари вихорів):** при збільшенні амплітуди (рис. 1, б, точка 4) двовимірною моделлю фіксується формування двох пар вихорів за період. Однак режим виявляється нестабільним: при $t^* \geq 5$ трансформується в асиметричний P+S через неможливість відтворити тривимірні ефекти в двовимірному чисельному моделюванні [0, 0, 0].
3. **Режим 2P₀ (дві пари вихорів різної інтенсивності):** у точках 5–6 на рис. 1, б спостерігається формування пар вихорів в яких один з вихорів має суттєво меншу інтенсивність ніж інший.
4. **Режим P+S (асиметричний):** Слід характеризується асиметричним розподілом завихреності (рис. 1, б, точка 3), що призводить до збільшення середнього значення коефіцієнта опору. Спектральний

аналіз підтверджує асиметрію через наявність піків на частотах f_s та $2f_s$.

5. **Режим 2Т (два триплети):** виявлено на перших періодах коливань ((рис. 1, б, точка 3). точка 9), однак з часом деградує до 2S, що свідчить про критичну роль тривимірних ефектів для формування режимів вихроутворення [0, 0, 0].
6. **Десинхронізація:** при $f^* = 0.42$ ((рис. 1, б, точка 3). точка 8) частота коливань циліндра не контролює слід; домінує власна частота коливань (число Струхала для нерухомого циліндру).

Висновки

Двовимірне URANS-моделювання з моделлю переходу $\gamma - \tilde{Re}_\theta$ є ефективним інструментом для якісного відтворення основних режимів вихроутворення (2S, 2P, P+S) за циліндром, що коливається, при субкритичних числах Рейнольдса.

Розраховані межі синхронізації демонструють якісний збіг з експериментальною картою Т. Морзе і К. Х. К. Вільямсона [0] за винятком комбінованих режимів $2S/2P_0$ та $2P_0/2P$.

Показано, що двовимірний підхід не забезпечує стабільності складних режимів із парами вихорів (2P, $2P_0$, 2T). Ці режими з часом ($t^* \geq 3.65 \dots 5.85$) деградують до симетричного 2S або асиметричного P+S режимів. В роботах [0, 0] 2P-режиму відсутній при низьких числах Рейнольдса ($Re = 100 \div 300, 500$) у двовимірному моделюванні, хоча при $Re = 4000$ Ж. Хіонг і Х. Лю успішно відтворили режими вихроутворення 2P та $2P_0$ за допомогою двовимірного моделювання методом VLES [0]. Це означає, що існує мінімальне число Рейнольдса в діапазоні $2174 \leq Re \leq 4000$ при якому можливо стабільне відтворення всіх режимів вихроутворення за допомогою двовимірного чисельного моделювання.

Встановлено, що для якісного відтворення режимів обтікання циліндру, що коливається, з двома парами вихорів (2P) та комбінованих режимів ($2S/2P_0$ та $2P_0/2P$) необхідне проведення тривимірних розрахунків.

ЖИТЕПАТҮПА / REFERENCE

1. Blackburn H. M., Henderson R. D. A study of twodimensional flow past an oscillating cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*. 1999. Vol. 385. P. 255–286. URL: <https://doi.org/10.1017/S0022112099004309>.
2. Menter F. R., Langtry R., Völker S. Transition Modelling for General Purpose CFD Codes. *Flow, Turbulence and Combustion*. 2006. Vol. 77. P. 277–303. URL: <https://doi.org/10.1007/s10494-006-9047-1>.
3. Morse T. L., Williamson C. H. K. Fluid forcing, wake modes, and transitions for a cylinder undergoing controlled oscillations. *Journal of Fluids and Structures*. 2009. Vol. 25, iss. 4. P. 697–712. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2008.12.003>.
4. Wake state and energy transitions of an oscillating cylinder at low Reynolds number / J. S. Leontini et al. *Physics of Fluids*. 2006. Vol. 18. P. 067101–1 – 067101–9. URL: <https://doi.org/10.1063/1.2204632>.
5. Williamson C. H. K., Govardhan R. Vortex-Induced Vibrations. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2004. Vol. 36. P. 413–455. URL: <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.36.050802.122128>.
6. Williamson C. H. K., Roshko A. Vortex formation in the wake of an oscillating cylinder. *Journal of Fluids and Structures*. 1988. Vol. 2, iss. 4 : [https://doi.org/10.1016/S0889-9746\(88\)90058-8](https://doi.org/10.1016/S0889-9746(88)90058-8). P. 355–381.
7. Xiong Z., Liu X. Very Large-Eddy Simulations of the Flow Past an Oscillating Cylinder at a Subcritical Reynolds Number. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, iss. 5. URL: <https://doi.org/10.3390/app10051870>
8. Yang W., Masroor E., Stremler M. A. The wake of a transversely oscillating circular cylinder in a flowing soap film at low Reynolds number. *Journal of Fluids and Structures*. 2021. Vol. 105. P. 1–23. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2021.103343>.

NUMERICAL STUDY OF THE WAKE STRUCTURE BEHIND AN OSCILLATING CIRCULAR CYLINDER AT LOW REYNOLDS NUMBERS

Y. Vieskov, S. Dovgyi, D. Redchyts

Abstract. *Numerical simulation of the vortex wake structure behind a circular cylinder undergoing forced transverse oscillations in an incompressible fluid at a subcritical Reynolds number $Re=2174$ has been performed. A two-dimensional URANS approach with the SST turbulence model and a laminar-turbulent transition model, implemented in the OpenFOAM software package, was utilized. The dependence of various vortex shedding modes (2S, 2P, 2PO, P+S, C(2S), 2T) on the dimensionless amplitude and frequency of forced oscillations was investigated in accordance with the experimental map by T. Morse and C. H. K. Williamson. Vorticity contours, time histories of aerodynamic coefficients, and amplitude-frequency spectra were obtained. It is shown that 2D modeling qualitatively reproduces the primary vortex shedding modes and the*

boundaries of transitions between them; however, modes with two pairs of vortices (2P and 2P0) and combined modes (2S/2P0 and 2P0/2P) prove to be unstable and eventually decay into P+S or 2S due to the inability to capture three-dimensional phenomena in a two-dimensional simulation. To accurately calculate hydrodynamic forces and simulate 2P or combined modes, three-dimensional (3D) computations are required.

Keywords: *vortex-induced vibrations, circular cylinder, vortex wake, numerical simulation, URANS, laminar-turbulent transition model, vortex shedding modes, Reynolds number, OpenFOAM.*