

УДК 532.5

<https://doi.org/10.17721/1812-5409.2021/4.2>

Воскобійник В. А., д.т.н., с.н.с.,
Воскобойник О. А. к.т.н.,
Терещенко Л. М., к.ф.-м.н., с.н.с.,
Воскобійник А. В., к.т.н., с.н.с.

V. A. Voskoboinick, Dr.Sc.,
O. A. Voskoboinyk, PhD,
L. M. Tereshchenko, PhD,
A. V. Voskobiinyk, PhD

Вихрова динаміка сполучених течій

Vortex dynamics of junction flows

Інститут гідромеханіки НАН України, 03057,
м. Київ, вул. Марії Капніст, 8/4,
e-mail: vlad.vsk@gmail.com

Institute of Hydromechanics NAS Ukraine, 03057,
Kyiv, Marii Kapnist str., 8/4,
e-mail: vlad.vsk@gmail.com

Групові конструкції погано обтічних тіл широко використовуються у мостобудівній практиці. Сполучені течії таких конструкцій характеризуються значною складністю, нестационарністю та нестійкістю. В околі погано обтічних тіл формуються системи підковоподібних вихрових структур, зсувні шари, відривні області, струменеві течії, слідні вихори та вихрові доріжки Кармана. Мета роботи – визначення особливостей вихрової та струменевої течії в області сполучення трирядного пального ростверку з жорсткою плоскою поверхнею. Проведені експериментальні дослідження в лабораторних умовах за допомогою візуалізації та вимірювання полів швидкості сполученої течії. Визначено механізм генерації та еволюції вихрових і струменевих течій. Отримані інтегральні та спектральні характеристики поля швидкості в околі передньої групи циліндрів трирядного ростверку.

Ключові слова: сполучена течія, вихрова структура, трирядний ростверк, поле швидкості.

Group constructions of bluff bodies are widely used in bridge construction practice. The junction flows of such structures are characterized by considerable complexity, nonstationarity and instability. In the vicinity of bluff bodies, systems of horseshoe vortex structures, shear layers, separated regions, jet flows, wake vortices and vortex Karman's streets are formed. The study of the features of the generation and evolution of vortex and jet flows, the mechanisms of interaction of these flows with streamlined surfaces requires considerable effort during numerical and physical modeling. The purpose of the work is to determine the features of vortex and jet flow in the region of junction of three-row pile grillage with a rigid flat surface. Experimental studies were carried out in laboratory conditions in a hydrodynamic channel, where the three-row group of cylinders was installed on the hydraulically smooth rigid surface. Visual investigations and measurements of the velocity field were carried out inside and around the three-row grillage. The features of the formation and evolution of vortex and jet flows inside and near the cylindrical group were established. Integral and spectral characteristics of the velocity fluctuation field were obtained.

Key Words: junction flow, vortex structure, three-row grillage, velocity field.

Статтю представив член-кор. НАН України Жук Я.О.

Вступ

Складні опори, групи паль або погано обтічних тіл знаходять все більше застосування в будівництві мостових переходів, гідротехнічних споруд, в теплоенергетиці, на морських бурових платформах і вітрогенеруючих станціях та інших галузях з геотехнічних, екологічних, економічних і ресурсозберігаючих причин [1, 2]. Однак застосування результатів досліджень для одиночних

перешкод стає проблематичним через взаємодію вихрових і струменевих течій між елементами групової конструкції, а також слідних вихорів і вихрових доріжок Кармана. Це вимагає проведення окремих наукових досліджень особливостей течії в групах погано обтічних тіл і, зокрема, мостових опор у місцях їх сполучення з дном. Мета досліджень – визначення особливостей вихрової та струменевої течії в області сполучен-

ня трирядного пального ростверку з жорсткою пласкою поверхнею.

Програма та методика досліджень

Експериментальні дослідження проводилися у гідродинамічному каналі в гідравлічній лабораторії Інституту гідромеханіки НАН України. Довжина каналу була 14 м, ширина 1 м і глибина 0.8 м. Вимірювальна ділянка розташовувалася на відстані 6 м від входу в канал. Вода подавалася в канал за допомогою насосів через відстійник, дифузор, хонейкомби та решітки, які спрямовували та турбулізували потік. Вода скидалася з гідродинамічного каналу через екрани та клапани, що регулювали рівень, а також через конфузори та пристрої, які спрямовували потік та поглинали його шум [3, 4].

Модель трирядного циліндричного ростверку встановлювалася на спеціально виготовленій гідравлічно гладкій плоскій пластині. Під час візуальних експериментів на пластину наносили шар контрастного покриття, який змивався потоком. Пластина мала ширину 0.6 м і довжину 2 м. Модель трирядної циліндричної групи складалася з 31 циліндричної палі діаметром $d = 0.027$ м. Палі розташовувались у три ряди у шаховому порядку. Ширина трирядної циліндричної групи становила 0.1 м, а довжина - 0.6 м. Ростверк розташовувався посередині пластини. Рівень води над пластиною був 0.2 м, а швидкість потоку була від 0.06 м/с до 0.25 м/с.

Візуалізацію проводили за допомогою водорозчинних фарб і барвників, які вводили в досліджувану зону потоку через мініатюрні трубки, а також нанесенням контрастних покриттів, які змивалися потоком води з обтічної поверхні. Кінематичні характеристики сполученої течії вимірювали мініатюрними термісторними датчиками швидкості. Датчики мали діаметр чутливої поверхні $0.8 \cdot 10^{-3}$ м.

Всі контрольно-вимірювальні пристрої та реєстраційне обладнання були протестовані та відкалібровані. Датчики були сертифіковані та перевірені абсолютними та відносними методами на спеціалізованих стендах із відповідним обладнанням. Похибка вимірювання середньої швидкості не перевищувала 4% (за надійності 0.95 або 2σ), пульсації швидкості вимірювали з похибкою до 6%, а спектральні характеристики вимірювали з похибкою не більше 2 дБ в діапазоні частот від 0.2 Гц до 1250 Гц.

Результати досліджень

Результати візуальних експериментів сполученої течії навколо трирядного циліндричного

ростверку показали, що перед циліндрами утворювалися підковоподібні вихрові структури, які мали деяку відмінність від вихорів, що спостерігалися під час обтікання одиночних циліндрів. В умовах трирядного розташування циліндрів на рівній поверхні перед кожним з обтічних циліндрів утворювалися інтенсивні локальні підковоподібні вихрові структури (рис. 1).

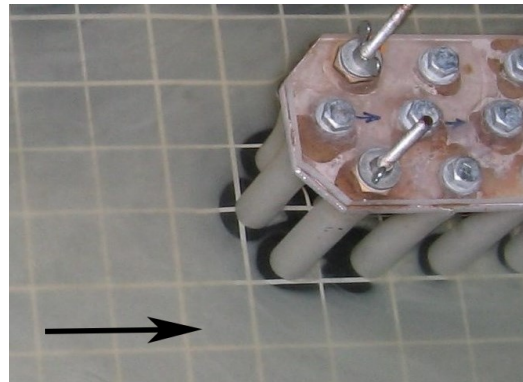


Рис. 1 Локальний розмив контрастного покриття

Розмив контрастного покриття починався поблизу передньої групи циліндрів внаслідок спадаючої течії, яка мала місце на фронтальній поверхні кожного циліндра, і дії підковоподібних вихрових структур перед кожним циліндром. Взаємодія вихрових структур і спадаючої течії призводило до значних дотичних напружень в області сполучення циліндрів з жорсткою пластиною. Результати досліджень показали, що найбільший розмив контрастного покриття спостерігався поблизу других бічних циліндрів трирядної конструкції. Тут додатково до підковоподібних вихрових структур і спадаючої течії додалися струменеві течії. Струменеві течії виникали внаслідок відривів зсувних шарів і формування слідних вихорів з циліндрів, що знаходилися вище за потоком. У середній частині циліндричної групи розмив контрастного покриття був мінімальним через гальмуючу дію групової конструкції на поле течії. У кормовій частині трирядної групи спостерігався інтенсивний розмив покриття, так як в цій частині конструкції швидкість течії і пристінні дотичні напруження між циліндрами збільшилися. Разом з локальними підковоподібними вихорами перед трирядною циліндричною групою виникала великомасштабна система підковоподібних вихрових структур, яка мала низьку

інтенсивність. Ця вихрова система охоплювала трирядний ростверк, як цілісну конструкцію.

Вимірювання швидкості мініатюрними термісторними датчиками дозволили визначити інтегральні і просторово-часові характеристики поля швидкості всередині і поблизу трирядної циліндричної групи в області сполучення її з жорсткою плоскою поверхнею. Результати дослідження показали, що ядро підковоподібного вихору перед першим центральним циліндром оберталося з лінійною швидкістю близько $0,41U$, а його периферія оберталося з лінійною швидкістю близько $0,57U$. Підковоподібний вихор перед другим бічним циліндром оберталося з лінійною швидкістю в ядрі $0,53U$ і на периферії $0,77U$. На периферії підковоподібних вихрових структур осереднені та пульсаційні складові швидкості в кілька разів вищі, ніж в ядрі цих вихрових структур.

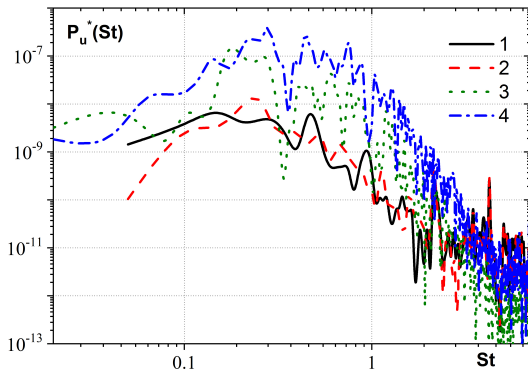


Рис. 2 Спектральні густини потужності пульсацій швидкості перед другим рядом циліндрів трирядного ростверку

Дослідження показали, що закон розподілу ймовірності значень пульсацій швидкості перед першим центральним циліндром швидкості у ядрі вихору близький до гаусівського або нормального закону розподілу. Однак максимум функції щільності ймовірності дещо зміщений в сторону негативних значень пульсацій швидкості у ядрі вихору перед першим центральним циліндром і в сторону позитивних значень у ядрі вихору перед другим боковим циліндром (вплив струменевої течії). Осцилюючий рух системи підковоподібних вихрових структур та періодичні відриви зсувних шарів і слідних вихорів призвели до бімодального характеру розподілу ймовірності пульсацій швидкості перед першим центральним циліндром [5, 6].

Спектральні характеристики поля пульсацій швидкості в області формування квазістійких

підковоподібних вихрових структур перед циліндрами трирядної групової конструкції представлені на рис. 2. Тут спектральні щільності потужності пульсацій швидкості представлені в залежності від числа Струхалія $St = fd / U$. Спектри нормовані наступним чином: $P_u^*(f) = P^2(f) d / U q^2$, де $q = \rho U^2 / 2$ — динамічний тиск і ρ — щільність води. Крива 1 виміряна в ядрі і крива 2 на периферії підковоподібного вихору перед другим центральним циліндром. Крива 3 виміряна в ядрі і крива 4 на периферії підковоподібного вихору перед другим бічним циліндром. Результати досліджень показали, що максимальні рівні пульсацій швидкості в ядрі квазістійкого підковоподібного вихору перед другим центральним циліндром спостерігалися на частоті $f = 0.56$ Гц, якій відповідало число Струхалія $St \approx 0.15$. Максимальні значення спектральних рівнів пульсацій швидкості на периферії цього вихору спостерігалися на частоті $f = 0.89$ Гц або $St \approx 0.24$. Максимуми спектрів перед другим бічним циліндром спостерігалися в ядрі підковоподібної вихрової структури на частоті $f = 0.67$ Гц або $St \approx 0.18$ і на периферії цього вихору максимуми спектральних рівнів спостерігалися на частоті $f = 1.04$ Гц або $St \approx 0.28$. Найбільші рівні спектральних щільностей потужності пульсацій швидкості спостерігалися перед другим бічним циліндром, де поряд з підковоподібною вихровою структурою мала місце струменева течія. Виявлено, що максимальні значення спектральних рівнів пульсацій швидкості спостерігалися на більш високих частотах на периферії підковоподібних вихрових структур, ніж в їх ядрах.

Висновки

Результати експериментальних досліджень показали, що обтікання групи циліндрів мало складний нестационарний характер, який обумовлений взаємодією вихрової та струменевої течії з трирядним циліндричним ростверком, який розташовувався на жорсткій плоскій поверхні.

Установлено, що перед кожним циліндром формувалися підковоподібні вихрові структури, а перед всією групою циліндрів генерувалася система великомасштабних підковоподібних вихорів. Між циліндрами трирядної конструкції виникали струменеві течії, які мали найбільшу інтенсивність в передній і кормовій групах циліндрів. Результати візуалізації течії показали

особливості генерації вихрових і струменевих течій, їх еволюцію та взаємодію між собою та обтічною поверхнею.

Вимірювання поля швидкості всередині та поблизу передньої групи циліндрів трирядного ростверку дозволили визначити інтегральні та спектральні характеристики поля швидкості. Виявлено, що поле швидкості в сполученій течії мало бімодальний характер, який обумовлений осциляціями підковоподібних вихрових структур в просторі і в часі та їх взаємодією з

нестационарною струменевою течією між циліндрами. Визначено, що спектральні щільності потужності пульсацій швидкості мали більші рівні на периферії квазістійких підковоподібних вихорів, ніж в їх ядрах. Максимальні рівні спектрів пульсацій швидкості спостерігалися перед другим бічним циліндром трирядного ростверку, де відбувалося взаємодія вихрової та струменевої течії.

Список використаних джерел

1. Singh N.B. The local scour around bridge piers—a review of remedial techniques / N.B. Singh, T.T. Devi, B. Kumar // *ISH Journal of Hydraulic Eng.* – 2020. – Vol. 27. P. 1-14.
2. Simpson R.L. Junction flows. / R.L. Simpson // *Annual Review of Fluid Mechanics.* – 2001. – Vol. 33. – P. 415-443.
3. Voskoboinick V.A. Junction flow around cylinder group on flat plate / V.A. Voskoboinick, I.M. Gorban, A.A. Voskoboinick [et al.] // In: Sadovnichiy V.A., Zgurovsky M.Z. (eds) *Contemporary Approaches and Methods in Fundamental Mathematics and Mechanics. Understanding Complex Systems.* Springer, Cham. – 2021. – P. 35-50.
4. Voskobijnyk A.V. Feature of the vortex and the jet flows around and inside the three-row cylindrical group / A.V. Voskobijnyk, V.A. Voskoboinick, O.A. Voskoboinyk [et al.] // *Proc. 8th International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2016)* Oxford, UK, 2016. – P. 897-903.
5. Voskoboinick V. Study of near wall coherent flow structures on dimpled surfaces using unsteady pressure measurements / V. Voskoboinick, N. Kornev, J. Turnow // *Flow Turbulence Combust.* – 2013. – Vol. 90, №4. – P. 709-722.
6. Voskoboinick A. Interaction of group of bridge piers on scour / A. Voskoboinick, V. Voskoboinick, V. Turick [et al.] // In: Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He M. (eds) *Advances in Computer Science for Engineering and Education III. ICCSEEA 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 1247.* Springer, Cham. – 2021. – P. 3-17.

References

1. SINGH, N.B., DEVI, T.T. and KUMAR, B. (2020) The local scour around bridge piers—a review of remedial techniques. *ISH Journal of Hydraulic Eng.* 27. p.1-14.
2. SIMPSON, R.L. (2001) Junction flows. *Annual Review of Fluid Mechanics.* 33. p.415-443.
3. VOSKOBOINICK, V.A. et al. (2021) Junction flow around cylinder group on flat plate. In: Sadovnichiy, V.A., Zgurovsky, M.Z. (eds) *Contemporary Approaches and Methods in Fundamental Mathematics and Mechanics. Understanding Complex Systems.* Springer, Cham. pp. 35-50.
4. VOSKOBIJNYK, A.V. et al. (2016) Feature of the vortex and the jet flows around and inside the three-row cylindrical group. *Proc. 8th International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2016)* 12-15 September 2016 Oxford, UK, pp. 897-903.
5. VOSKOBOINICK, V., KORNEV, N. and TURNOW, J. (2013) Study of near wall coherent flow structures on dimpled surfaces using unsteady pressure measurements. *Flow Turbulence Combust.* 90 (4). p.709-722.
6. VOSKOBOINICK, A. et al. (2021) Interaction of group of bridge piers on scour. In: Hu, Z., Petoukhov, S., Dychka, I., He, M. (eds) *Advances in Computer Science for Engineering and Education III. ICCSEEA 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 1247.* Springer, Cham. pp. 3-17.

Надійшла до редколегії 29.08.21