

УДК 532.517

Керування примежовим шаром нахиленим овальним лунковим генератором вихорів

Турик¹ В.М.; Воскобійник² В.А.; Воскобойник² О.А.; Воскобійник² А.В.

1–КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

2 – Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ, Україна

***Анотація.** Наведено результати експериментальних досліджень особливостей генерації та еволюції когерентних вихрових структур, які формуються усередині нахиленої овальної лунки в якості засобу керування примежовим шаром на плоскій обтічній поверхні. Формування вихрового руху усередині та околі овальної лунки досліджувалося за допомогою візуалізації течії і вимірюванням полів швидкості та пристінного тиску. Просторово-часові характеристики пульсації швидкості та тиску вимірювалися плівковими термоанемометрами та мініатюрними п'єзокерамічними датчиками пульсації тиску. Установлено, що для перехідного і турбулентного режиму течії усередині овальної лунки формуються великомасштабні веретеноподібні вихрові структури та дрібномасштабні вихори зсувного шару. Спектральні залежності пульсації швидкості та тиску мають тональні компоненти, які обумовлені частотами викиду великомасштабних вихорів назовні з лунки, частотами обертання циркуляційної течії усередині лунки та частотами автоколивань дрібномасштабних вихорів зсувного шару і їх взаємодії з кормовою стінкою овальної лунки.*

***Ключові слова:** нахилена овальна лунка; когерентна вихрова структура; керування примежовим шаром; пульсації швидкості та тиску*

Генератори вихорів у вигляді лункових поверхонь отримали широке застосування у зв'язку з тим, що вони збільшують турбулентність течії та викликають значне підвищення тепло- та масопереносу над обтічними поверхнями. Генерація когерентних вихрових структур з наперед заданими аеро- чи гідродинамічними характеристиками може бути здійснена одним із пасивних методів керування примежовим шаром – застосуванням заглиблень. Утворившись усередині обтічних заглиблень, великомасштабні вихрові структури викидаються назовні у примежовий шар, змінюючи його структуру. Застосування лункових рельєфів на обтічних поверхнях призводить до істотного виграшу в енергозберігаючих технологіях та пристроях, оскільки інтенсифікують теплообмін, зменшують гідродинамічний опір, підвищують якість аеродинамічних профілів та знижують гідродинамічні шуми [1, 2]. Сферичні лунки не є найкращими за умов турбулентного режиму течії теплоносія, а у ламінарних потоках їх використання практично не є виправданим [1, 3]. Усередині таких лунок залежно від ряду параметрів, у тому числі геометричних і гідродинамічних, формуються симетричні і асиметричні вихрові системи, які здійснюють біфуркації у просторі та часі [2–4]. У цих умовах в отворах сферичних лунок, особливо глибоких, генеруються симетричні аркоподібні або підковоподібні вихори та нахилені вихрові структури, розташовані під кутом відносно напрямку потоку. Джерело нахиленого вихору знаходиться на стінці лунки поблизу її дна, а стік викидається назовні з лунки [5, 6]. Надання лунці такої форми, яка б генерувала стійкі вихрові структурами з регульованою інтенсивністю і циркуляцією, що дозволить поліпшити техніко-економічні показники обтічних поверхонь, є одним з основних завдань керування примежовим шаром. До таких лунок можна віднести овальні лунки, які розташовують за певним розрахунковим кутом до напрямку потоку, що набігає. В овальних лунках поперечна завихреність, генерована у результаті взаємодії сил в'язкості та інерції, а також циркуляційної і вторинної течії усередині отвору лунки, трансформується, наприклад, у поздовжню завихреність, яка, викидаючись з лунки і пересуваючись у пристінному шарі, істотно впливає на примежовий шар та його структуру. Як показали дослідження [5], відносний тепловідвід сферичних лунок помітно нижчий, ніж від асиметричних овальних лунок. Здатність овальних

лунок створювати вихрові структури з інтенсивною вторинною течією зумовлює їх перевагу та забезпечує їх працездатність.

Мета роботи – визначення особливостей генерації та еволюції когерентних вихрових структур, які формуються усередині нахиленої овальної лунки в якості засобу керування прилежним шаром на плоскій обтічній поверхні.



Рис. 1. Розташування виміральної пластини з овальною лункою в гідродинамічному каналі (а) та датчиків пульсацій пристінного тиску на обтічній поверхні лунки та пластини (б)

Експериментальні дослідження проводилися в гідродинамічному каналі (рис. 1а) довжиною 16 м, шириною 1 м і глибиною 0,8 м з вільною поверхнею води глибиною 0,4 м, для швидкості потоку (U) від 0,05 м/с до 0,5 м/с. На висоті близько 0,1 м від дна каналу встановлювалася гідравлічно гладка пластинка, обладнана з боків кінцевими шайбами. Пластинка, виготовлена з полірованого органічного скла товщиною 0,01 м, шириною 0,5 м і довжиною 2 м, була загострена з двох сторін для забезпечення безвідривного її обтікання. На відстані 1 м від початку пластини було зроблено поодиноке заглиблення овальної форми у вигляді двох сферичних сегментів діаметром $d=0,04$ м, розділених циліндричною вставкою довжиною 0,04 м (рис. 1б). В результаті заглиблення набуло овальної форми діаметром 0,04 м, довжиною 0,08 м і глибиною 0,09 м, яке мало відносну глибину $0,22d$. Поворотний пристрій на плоскій пластині, в якому розташовувалося овальне заглиблення, дозволив повертати заглиблення навколо свого центру на кут від 0° до 360° з кроком 15° [8, 9].

Урівень з обтічною поверхнею овальної лунки і пластини поблизу заглиблення встановлювалися 13 мініатюрних датчиків пульсацій пристінного та абсолютного тиску (рис. 1б). Діаметр чутливої поверхні п'єзокерамічних датчиків мембранного типу складав $1,6 \cdot 10^{-3}$ м, а п'єзорезистивні датчики абсолютного тиску мали діаметр отвору $0,8 \cdot 10^{-3}$ м [3, 9]. Разом з датчиками пульсацій пристінного тиску в експериментах використовували плівкові термоанемометри фірми DISA Elektronik (Данія). Термоанемометри через відповідні державки та координатні пристосування вводилися усередину прилежного шару та у вихровий потік заглиблення для вимірювання поля швидкості. Виміряні сигнали подавалися на багатоканальні аналогово-цифрові перетворювачі, вбудовані у персональний комп'ютер, де реєструвалися, а згодом оброблялись за стандартними та спеціально розробленими програмами і методиками [10, 11].

Візуалізація потоку контрастними водорозчинними покриттями та кольоровим чорнилом дозволила визначити низку характерних особливостей формування течії всередині овальних заглиблень та в їхній області сліду. Результати досліджень показали, що всередині лунки не спостерігалася вихрової течії для малих швидкостей та кутів нахилу овальної лунки. Коли швидкість течії стала більше 0,06 м/с і кут нахилу лунки став більше 30° , то всередині лунки почала формуватися великомасштабна структура у вигляді спіралеподібного вихору (рис. 2). Максимальний розвиток цієї структури спостерігався для кута нахилу 60° . Потім вона

почала вироджуватись і коли лунку обтікав поперечний потік, то спіральний вихор припинив своє існування.

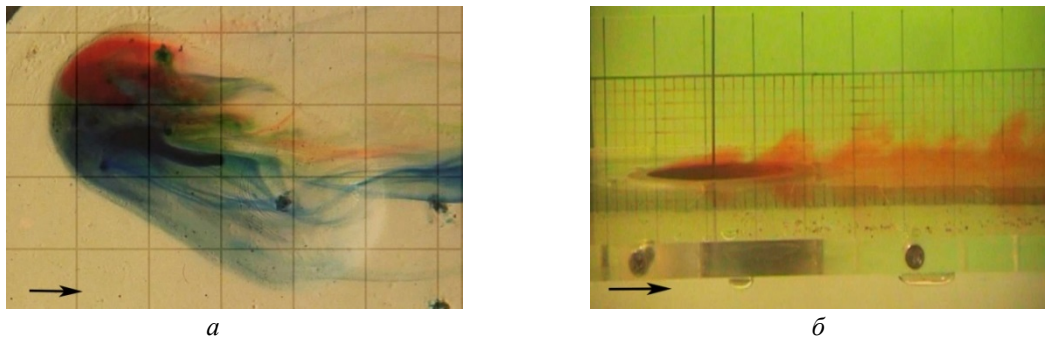


Рис. 2. Формування вихрових і струменевих течій усередині овальної лунки (а) та викид вихрових структур у примежовий шар (б)

Вимірювання полів швидкості над обтічною поверхнею нахиленої овальної лунки та над пластиною показали, що в передній відривній частині овальної лунки спостерігалися понижені швидкості відносно швидкості течії, а поблизу кормової стінки навпаки потік прискорювався. Усередині овальної лунки формувалася циркуляційна течія та зароджувалися когерентні вихрові структури, які викидалися назовні з овальної лунки над її кормовою частиною. Установлено, що для перехідного і турбулентного режимів течії усередині овальної лунки формувалися великомасштабні веретеноподібні вихрові структури та дрібномасштабні вихори зсувного шару.

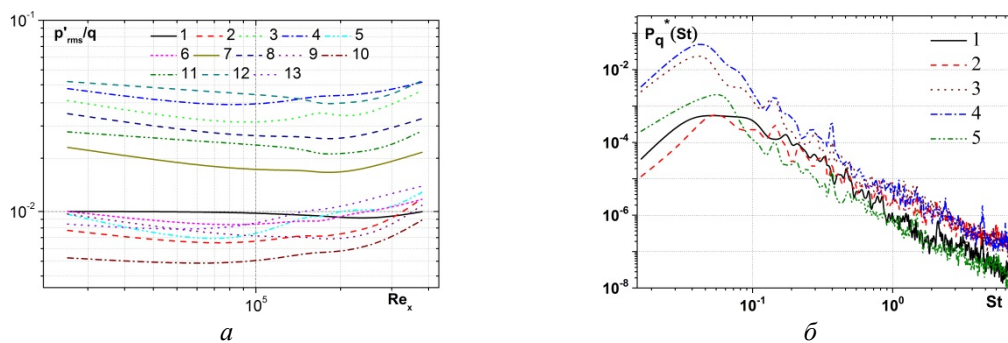


Рис. 3. Інтенсивність пульсацій пристінного тиску на обтічній поверхні (а) та спектральні густини потужності пульсацій пристінного тиску (б)

Середньоквадратичні значення пульсацій пристінного тиску усередині нахиленої під кутом 60 градусів овальної лунки та поблизу неї показані на рис. 3а. Номера кривих відповідають номерам датчиків, які зображено на рис. 1б, а нормування пульсацій тиску проводилося динамічним тиском ($q = \rho U^2 / 2$) в залежності від числа Рейнольдса $Re_x = UX / \nu$

Найбільша інтенсивність пульсацій тиску спостерігалася у місці взаємодії зсувного шару з кормовою стінкою лунки та в її ближньому сліді. На рис. 3б приведені результати вимірювання спектральних густин потужності пульсацій пристінного тиску вздовж поздовжньої осі пластины з овальною лункою для швидкості течії $U = 0,25$ м/с. Нормування даних проводилося за зовнішніми змінними $P_q^*(St) = (p')^2 U / q^2 d$ в залежності від числа Струхаля $St = fU / d$. Найбільші спектральні рівні пульсацій пристінного тиску спостерігалися на кормовій стінці лунки (крива 3) та в її ближньому сліді (крива 4) з

максимумом на відносній частоті викидів великомасштабних вихрових структур назовні з лунки $St \approx 0,05$. З віддаленням від овальної лунки примежовий шар поступово відновлювався.

Таким чином, експериментальні дослідження показали особливості генерації та еволюції когерентних вихрових структур, які формувалися усередині нахиленої овальної лунки в якості засобу керування примежовим шаром на пласкій обтічній поверхні. Надано просторово-часові характеристики поля пульсацій швидкості над обтічними поверхнями та поля пульсацій пристінного тиску на поверхні нахиленої овальної лунки та пластини. Спектральні залежності пульсацій швидкості та тиску мали тональні компоненти, які обумовлені частотами викиду великомасштабних вихорів назовні з лунки, частотами обертання циркуляційної течії усередині лунки та частотами автоколивань дрібномасштабних вихорів зсувного шару і їх взаємодії з кормовою стінкою овальної лунки.

Список літератури

1. Khalatov A.A. Heat transfer and hydrodynamics near surface cavities (dimples) / A.A. Khalatov. - Kiev: ITTFNASU, 2005. – 76 p.
2. Turnow J. Flow structures and heat transfer on dimples in a staggered arrangement / J. Turnow, N. Kornev, V. Zhdanov, E. Hassel // Int. J. Heat and Fluid Flow. – 2012. – Vol. 35, № 3. – P. 168–175.
3. 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.
4. Leontiev A.I. Experimental investigation of heat transfer and drag on surfaces coated with dimples of different shape / A.I. Leontiev, N.A. Kiselev, Yu.A. Vinogradov [ets] // Int. J. Therm. Sci. – 2017. – Vol. 118. – P. 152–167.
5. Isaev S.A. Vortex heat transfer enhancement in the narrow plane-parallel channel with the oval-trench dimple of the fixed depth and spot area / S.A. Isaev, A.V. Schelchikov, A.I. Leontiev [ets] // Int. J. Heat and Mass Transfer. – 2017. – Vol. 109. – P. 40–62.
6. Voskoboinick V.A. Influence of the deep spherical dimple on the pressure field under the turbulent boundary layer / V.A. Voskoboinick, V.N. Turick, O.A. Voskoboynik et al. // In: Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He M. (eds) *Advances in Computer Science for Engineering and Education. ICCSEE 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 754. Springer, Cham. – 2019. – P. 23–32.
7. Voskoboinick V.A. Space and time characteristics of the velocity and pressure fields of the fluid flow inside a hemispherical dimple generator of vortices / V.A. Voskoboinick, A.A. Voskoboinick, V.N. Turick, A.V. Voskoboinick // J. Eng. Physics and Thermophysics. – 2020. – Vol. 93, No. 5. – P. 1205–1220.
8. Воропаев Г.А. Визуализация ламинарного течения над овальной лункой / Г.А. Воропаев, А.В. Воскобойник, В.А. Воскобойник, С.А. Исаев // Прикладна гідромех. – 2009. – Т. 11, № 4. – С. 31–46.
9. Воскобойник В.А. Пульсации пристеночного давления в низкоскоростном потоке вблизи овального углубления / В.А. Воскобойник // Акустичний вісник. – 2009. – Т. 12, № 2. – С.3–15.
10. Voskoboinick V.A. Pseudo-sound behind an obstacle on a cylinder in axial flow / V.A. Voskoboinick, V.T. Grinchenko, A.P. Makarenkov // Intern. J. Fluid Mech. Res. – 2005. – Vol. 32, № 4. – P.488–510.
11. Voskoboinick V.A. Pressure fluctuations on the scour surface before prismatic pier / V.A. Voskoboinick, A.V. Voskoboinick, O.O. Areshkovych, O.A. Voskoboynik // Proc. 8th International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2016) 12–15 September 2016. – Oxford, UK, 2016. – P. 905–910.

Boundary layer control by inclined oval dimple vortex generator

Turick Volodymyr; Voskoboinick Volodymyr; Voskoboynik Oleksandr; Voskobiinyk Andrii

Abstract. *The results of experimental studies of the features of the generation and evolution of coherent vortex structures, which are formed inside an inclined oval dimple as a means of the boundary layer control on a flat streamlined surface, are presented. The formation of the vortex motion inside and around the oval dimple was studied by means of flow visualization and by measuring the velocity and wall pressure fields. The space-time characteristics of velocity and pressure fluctuations were measured by hot-films and miniature piezoceramic sensors of pressure fluctuations. It was found that large-scale spindle-like vortex structures and small-scale vortices of the shear layer are formed for the transitional and turbulent flow regime inside the oval dimple. The spectral dependences of velocity and pressure fluctuations have tonal components, which are determined by the emission frequencies of large-scale vortices break up from the dimple, the rotation frequencies of the circulation flow inside the dimple, and the self-oscillation frequencies of small-scale shear layer vortices and their interaction with the aft wall of the oval dimple.*

Keywords: *inclined oval dimple; coherent vortex structure; boundary layer control; velocity and pressure fluctuations*