УДК 532.5:534.6

Генерація вихрових структур парою овальних лунок

Воскобійник[1] В.А., **Воскобійник[1] О.А.**, **Воскобійник[1] А.В.**, **Турик[2] В.М**.
1 – Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ, Україна
2 – КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

Анотація: *Наведено результати фізичного моделювання генерації стійких протилежно обертових вихрових структур парою нахилених до напрямку течії овальних лунок. Проведено візуальні і інструментальні дослідження, а також статистичний аналіз полів пульсацій тиску вихрової течії, яка була утворена парою овальних лунок на гідравлічно гладкій плоскій поверхні. Визначено особливості генерації протилежно обертових вихрових структур лунками та їх гідродинамічні характеристики. Установлено місця зародження, формування і розвитку вихрових структур в залежності від режимів течії, а також області викидів вихорів у примежовий шар. Отримано інтегральні та спектральні характеристики пульсацій пристінного тиску на обтічній поверхні лунок і пластини. Визначені частоти обертання вихрових структур та їх викидів назовні з нахилених овальних лунок. Результати дослідження можуть бути використані для покращення гідроаеродинамічних, акустичних та теплообмінних показників ефективності швидкообтічних поверхонь.*
Ключові слова: овальна лунка, вихрова структура, візуалізація течії, пульсації швидкості та тиску, статистичний аналіз.

В останні роки у науковій літературі та на практиці велика увага приділяється проблемі керування течією, зокрема примежовим шаром, з метою зниження опору обтічних тіл, гідродинамічних шумів і вібрацій обтічних поверхонь, інтенсифікації тепло- і масопереносу, включаючи прискорення процесів перемішування різних рідин і компонентів, які наповнюють їх. Серед методів керування необхідно відзначити активні (що використовують додаткову енергію) та пасивні, до яких необхідно віднести лункові поверхні [1, 2]. Нанесення лунок різної конфігурації та розмірів на гладку обтічну поверхню призводить до формування додаткових вихрових структур і струминних течій, які взаємодіють із зовнішньою течією, змінюючи його структуру і гідродинамічні характеристики. Генерація штучних вихрових структур зі свідомо заданими параметрами є основним завданням керування примежовим шаром. Такі вихрові структури, до яких відносяться поздовжні вихрові пари, які протилежно обертаються, дозволяють реалізувати енергозберігаючі технології та поліпшити екологію навколишнього середовища. Відомо [3], що вихрові пари або закручені цівки, які протилежно обертаються та зароджуються у пристінній області примежового шару, підіймаючись над обтічною поверхнею, стабілізують вихороутворення у примежовому шарі. Генеровані вихрові пари певних масштабу і поділу здатні істотно знижувати опір тертя обтічної поверхні, усувати або звужувати області відриву примежового шару, зменшувати шум і вібрації обтічних тіл, покращувати теплообмін.

Метою даної роботи є дослідження процесу генерації системою овальних лунок стійких вихрових структур у вигляді пари протилежно обертових вихорів на гідравлічно гладкій поверхні, а також визначення їх кінематичних і динамічних характеристик.

Завдання генерації стійких вихрових структур заданих конфігурації та масштабів було реалізовано за допомогою фізичного моделювання. Для цього на гідравлічно гладкій обтічній поверхні були змонтовані дві пари овальних лунок, розташовані на деякій відстані одна від одної з орієнтацією щодо напрямку потоку під протилежними кутами. Усередині лунок генерувалися вихрові структури, які викидалися назовні з них у примежовий шар у вигляді поздовжніх вихорів, що мали протилежні напрямки обертання.

Експерименти проводились у гідродинамічному лотку довжиною 16м і шириною 1м з відкритою поверхнею води глибиною 0,4м. На висоті 0,1м від дна лотка

встановлювалася гідравлічно гладка пластина довжиною 2м завширшки 0,5м. У центрі пластини були зроблені дві овальні лунки у вигляді двох сферичних сегментів діаметром d=0,025м, які з'єднувалися циліндричною вставкою. Довжина кожної лунки була в два рази більша за ширину, а її глибина становила 0,22d. Дві лунки перебували під кутами +30 та -30 градусів відносно напрямку течії, розсунуті одна щодо одної у носовій частині, а їх кормові частини розташовувалися на відстані 0,2d.

У перших серіях дослідів проводилася візуалізація течії за допомогою контрастних водорозчинних покриттів і подачі кольорових чорнил та фарб. А згодом в характерних місцях зародження та еволюції вихрових структур проводилися вимірювання кінематичних та динамічних характеристик примежового шару і вихрового руху в цілому. Для цього використовувалася група мініатюрних датчиків швидкості та тиску. Плівкові одно- та двокомпонентні датчики термоанемометра фірми "DISA Electronik" (Данія) за допомогою добре обтічних і мініатюрних державок вводилися в досліджувані області рідини. П'єзокерамічні датчики пульсацій тиску і п'єзорезистивні датчики тиску, встановлені врівень з обтічної поверхнею, вимірювали поле пристінного тиску. Електричні сигнали датчиків через відповідні підсилювачі, фільтри і 16-канальний аналогово-цифровий перетворювач надходили до персонального комп'ютера, де вони реєструвались, оброблялись та аналізувалися згідно з алгоритмами і програмами, що базуються на апараті теорії ймовірності та математичної статистики [4, 5].

Результати візуальних досліджень показали, що при ламінарному режимі течії (Re_d <1000) усередині овальних лунок вихровий рух не спостерігався. Із збільшенням швидкості потоку фіксувалося утворення неінтенсивних вихрових структур, які скручувалися і повільно коливалися в межах лунок. У передній сферичної частини лунок формувалася циркуляційна течія, яка перероджувалась у вертикальний або нахилений вихор, вісь якого вигиналась у напрямку течії, що корелюється з даним роботи [6]. При переміщенні уздовж лунок вихор набував форми спіралеподібної вихрової структури, яка, збільшуючи швидкість закручування і зменшуючи свій поперечний масштаб, викидалася назовні з лунки над її кормовою частиною. Спіралеподібний вихор зберігав свою конфігурацію під час виходу з лунки і проходив у вигляді стійкого поздовжнього вихору досить велику відстань (близько 3–5 довжин лунки). У результаті системою овальних лунок генерувалися пари протилежно обертових поздовжніх вихорів. При турбулентному режимі течії (Re_d >5000) всередині овальних лунок формувалися спіралеподібні вихори, які зі збільшенням швидкості притискалися до передніх сферичних частин лунок. Ці вихори, досягаючи своїми розмірами масштабів овальних лунок, викидалися з них назовні, порушуючи структуру примежового шару. Викинутий спіралеподібний вихор як когерентна поздовжня вихрова структура, притискаючись до поверхні обтічної пластини, проходив відстань близько 5d, а далі розривався на частини і виносився у примежовий шар пластини, де припиняв своє існування.

З'ясовано, що профіль пульсацій поздовжньої швидкості відповідає їх максимальним значенням поблизу обтічної поверхні пластини, а також на межі зсувного шару, який формується над отворами овальних лунок. Інтенсивність поля пульсацій пристінного тиску спостерігалась максимальною в області взаємодії вихрових структур зсувного шару та великомасштабних вихрових структур, які викидаються з кормових стінок овальних лунок. Найменша інтенсивність пульсацій пристінного тиску має місце на дні овальної лунки в її передній за потоком сферичній частині. З наближенням до придонної частини овальних лунок спектральні рівні пульсацій поздовжньої швидкості помітно збільшуються, особливо в області низьких частот. Максимальні рівні пульсацій швидкості спостерігалися на глибині (0,08–0,1)d. Спектральним характеристикам притаманні тональні підйоми на частотах викидів назовні з лунок великомасштабних вихрових структур, яким відповідало число Струхаля St =0,05, а також на частотах обертання циркуляційної течії, яка

формувалося всередині лунок (St =0,13) і на частотах автоколивань вихрових структур зсувного шару (St =0,48).

Спектри поля пульсацій пристінного тиску та перші моменти спектральних густин потужності пульсацій пристінного тиску виявляють характерні особливості у вигляді дискретних піків [4, 6, 7]. Вони відповідають частотам, які спостерігалися в спектрах швидкості. Так, з віддаленням до 2d від лунок спостерігалися тональні підйоми у спектрах пульсацій пристінного тиску, які відповідали частотам викидів великомасштабних вихорів і частотам коливань вихрового руху всередині лунок як в серединному перерізі системи лунок, так і позаду їх кормових сферичних частин. З віддаленням від системи овальних лунок більше, ніж на 5d інтенсивність тональних коливань, характерних для вихрового руху всередині лунок, зменшувалася, а примежовий шар поступово відновлювався.

Щільності ймовірностей появи пульсацій поздовжньої швидкості при турбулентному режимі течії над овальними лунками і перед ними мають дзвоноподібний вид з коефіцієнтами асиметрії та ексцеса, близькими за значеннями до гауссівського випадкового процесу. Усередині лунки спостерігається взаємодія випадкового процесу з гармонічним процесом, в результаті чого функції щільності ймовірностей набувають двогорбого виду. При цьому третій і четвертий статистичні моменти поля пульсацій швидкості суттєво не змінюються. Це обумовлено тим, що на дрібномасштабні вихрові структури, які генерують пульсації швидкості малої амплітуди, істотно впливають великомасштабні вихори та інтенсивний коливальний рух.

Висновки

1. Наведено результати фізичного моделювання генерації пари стійких протилежно обертових вихрових структур, нахилених до напрямку течії овальних лунок. Проведено візуальні і інструментальні дослідження, а також статистичний аналіз полів пульсацій тиску вихрової течії, яка була утворена парою овальних лунок на гідравлічно гладкій плоскій поверхні.

2. Виявлено особливості генерації протилежно обертових вихрових структур лунками, визначено їх кінематичні та динамічні характеристики. Зафіксовано місця зародження, формування і розвитку вихрових структур в залежності від режимів течії, частоти обертання вихрових структур, їх коливань, а також частоти і області викидів вихорів назовні з нахилених овальних лунок у примежовий шар. Виявлено області взаємодії пар протилежно обертових вихрових структур з примежовим шаром та їх протяжність.

3. Отримано інтегральні та спектральні характеристики пульсацій пристінного тиску на обтічних поверхнях лунок і пластини. Установлено, що в профілях пульсацій швидкості над та усередині овальних лунок мають місце максимальні значення на рівні обтічної поверхні, а також на межі зсувного шару. При турбулентному режимі усередині лунки виявлено взаємодію випадкового процесу з гармонічним процесом.

4. Результати дослідження можуть бути покладено в основу практичних рекомендацій при проектуванні елементів обтічних поверхонь літальних апаратів, підводних і надводних суден, швидкісного наземного транспорту, теплообмінних і технологічних апаратів з покращеними гідроаеродинамічними, акустичними і теплофізичними показниками.

Vortex structures generation by pair of oval dimples

Voskoboinick V., Voskoboinick A., Voskoboinick A., Turick V.

Annotation: *The results of physical modeling of the generation of stable counter-rotating vortex structures by a pair of the oval dimples, that are inclined to the flow direction, are given. Visual and instrumental studies, as well as statistical analysis of the velocity and pressure fluctuation fields of the vortex flow, were made. The vortex flow was created by a pair of the oval dimples on a hydraulically smooth flat surface. The generation features of counter-rotating vortex structures by the dimples and their hydrodynamic characteristics were determined. The places of origin, formation and development of vortex structures, as well as the area of the ejection of vortices into the boundary layer, depending on the flow regimes have been established. The integral and spectral characteristics of*

the velocity and wall pressure fluctuations on the streamlined surface of the dimples and plates were obtained. The rotation frequencies of the vortex structures and the ejection frequencies of the vortices outside the inclined oval dimples were determined. Results of investigation may be used for improvement of hydroaerodynamic, acoustic and heat-transfer efficiency factors of high-speed streamlined surfaces.

Key words: oval dimple, vortex structure, flow visualization, velocity and pressure fluctuation, statistical analysis.

Генерация вихревых структур парой овальных лунок

Воскобойник В.А., Воскобойник А.А., Воскобойник А.В., Турик В.Н.

Аннотация: *Приведены результаты физического моделирования генерации устойчивых противоположно вращающихся вихревых структур парой наклоненных к направлению потока овальных лунок. Проведены визуальные и инструментальные исследования, а также статистический анализ полей пульсаций давления вихревого течения, образованного парой овальных лунок на гидравлически гладкой плоской поверхности. Определены особенности генерации противоположно вращающихся вихревых структур лунками и их гидродинамические характеристики. Установлены места зарождения, формирования и развития вихревых структур в зависимости от режимов течения, а также области выброса вихрей в пограничный слой. Получены интегральные и спектральные характеристики пульсаций пристеночного давления на обтекаемой поверхности лунок и пластины. Определены частоты вращения вихревых структур и их выбросов наружу из наклоненных овальных лунок. Результаты исследования могут быть использованы для улучшения гидроаэродинамических, акустических и теплообменных показателей быстрообтекаемых поверхностей.*

Ключевые слова: овальная лунка, вихревая структура, визуализация течения, пульсации скорости и давления, статистический анализ.

Список літератури:

1. *Gad-el-Hak M.* Flow control. Passive, active, and reactive flow management / M. Gad-el-Hak. – Cambridge : Cambridge Univ. Press, 2000. – 421 p.
2. *Kornilov V.I.* Reduction of turbulent friction by active and passive methods (review) / V.I. Kornilov // Thermophysics and Aeromechanics. – 2005. – V. 12, № 2. – P. 175–196.
3. *Rowley C.W.* Model reduction for flow analysis and control / C.W. Rowley, S.T.M. Dawson // Annu. Rev. Fluid Mech. – 2017. – V. 49. – P. 387–417.
4. *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. – V. 90, № 4. – P. 709–722.
5. *Бендат Дж.* Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М. : Мир, 1989. – 540 с.
6. *Voskoboinick V.* Generation of vortex structures by pair oval dimples on flat plate / V. Voskoboinick, A. Voskoboinick, V. Stepanovitch // Proc. European Drag Reduction and Flow Control Meeting – EDRFCM 2015, March 23–26, 2015. – Cambridge, UK, 2015. – P. 43–44.
7. *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. Voskoboinyk, A.V. Voskoboinick, I.A. Tereshchenko // In: Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He M. (eds) Advances in Computer Science for Engineering and Education. ICCSEEA 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 754. Springer, Cham. – 2019. – P. 23–32.