

УДК 532.517

## ГІДРОДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИХРОВОГО РУХУ УСЕРЕДИНИ НАПІВСФЕРИЧНОЇ ЛУНКИ

**Турик В.М.**

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

**Воскобійник В.А., Воскобійник А.В.**

Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ, Україна

***Анотація:** У роботі представлені результати експериментальних досліджень особливостей формування вихрових структур усередині напівсферичної лунки на гідравлічно гладкій плоскій поверхні, поля швидкості та тиску, які вони генерують. Експерименти проводилися у гідродинамічному лотку за допомогою візуалізації течії та вимірювання поля пульсацій швидкості, динамічного і пристінного тиску за допомогою термоанемометрів та мініатюрних п'єзокерамічних датчиків тиску. Візуалізація контрастними барвниками та водорозчинними покриттями показала, що усередині лунки генеруються квазістійкі великомасштабні вихрові структури і дрібномасштабні вихори, які викидаються назовні з лунки. Особливості вихрової течії усередині лунки обумовлюють появу дискретних підйомів у частотних та хвильових спектрах швидкості і тиску на частотах низькочастотних коливань вихрової течії, на частотах обертання і викиду великомасштабної вихрової структури та на частотах автоколивань вихрових структур зсувного шару*

***Ключові слова:** просторово-часові характеристики; взаємний спектр і кореляція; когерентна вихрова структура; півсферична лунка; пульсації швидкості та тиску*

Необхідність вивчення особливостей вихроутворення усередині заглиблень на обтічній поверхні обумовлює широке застосування лунковий поверхонь в гідродинаміки і теплоенергетиці. В залежності від режимів обтікання та геометричних параметрів заглиблень усередині них формуються різноманітні за формою та інтенсивністю вихрові структури. Генерація квазістійких когерентних вихрових структур за допомогою лунок дає можливість керувати примежовим шаром, що використовується при створенні засобів, які знижують гідродинамічний опір, шум обтікання та вібрації обтічної поверхні [1–3]. Такі вихрові структури, поряд з хаотичним або нестійким дрібномасштабним вихроутворенням усередині заглиблень, та їх викидом у зовнішній потік успішно застосовуються в енергозберігаючих технологіях, де вдається значно збільшити теплопереніс і процеси змішування рідини. Тому є актуальним вивчення особливостей вихроутворення усередині лунок, кінематичних та динамічних характеристик вихрової течії, що генерується лунковими поверхнями.

Результати експериментальних та чисельних досліджень з лунковими генераторами на обтічній поверхні, розташованими у вигляді рядів заглиблень, показують, що вихрова течія в лунках, головним чином, визначається структурою вихрового потоку в перших рядах. Вони ініціюють просторово-часові характеристики вихрових структур, які характерні для заданих умов течії, форми та розмірів лунок [1, 2]. Основні механізми вихроутворення, які притаманні одиночній лунці, зберігаються і в лунках, розташованих в ансамблях. Тому вивчення особливостей вихрової течії в одиночних лунках залишається актуальним з точки зору розробки нових прогресивних енергозберігаючих технологій, в основу яких закладені методи пасивного керування примежовим шаром за допомогою лункових генераторів вихорів. Цим обумовлена мета досліджень, а саме, вивчення особливостей вихрової течії усередині та поблизу напівсферичної лунки. Досліди проводились у гідродинамічному лотку за допомогою візуалізації потоку та застосування взаємного спектрального та кореляційного аналізу в умовах різних режимів течії над обтічною поверхнею пластини з локальною неоднорідністю. Для візуалізації потоку використовувались контрастні фарбники та водорозчинні покриття, траєкторії руху яких фіксувалися відео та фотоапаратурою, з подальшою обробкою відеоматеріалів на графічній комп'ютерній станції. Поле пульсацій пристінного тиску досліджувалося ансамблем датчиків, які було встановлено поблизу характерних місць формування та розвитку вихрових систем усередині лунки та навколо неї [4]. Урівень з обтічною поверхнею напівсферичної лунки та на пластині поблизу заглиблення

було встановлено 8 мініатюрних п'єзокерамічних датчиків пульсацій пристінного тиску, з діаметром чутливої поверхні  $1.6 \cdot 10^{-3}$  м. Разом з датчиками пульсацій пристінного тиску в експериментальних дослідженнях використовувались кореляційні блоки п'єзокерамічних датчиків пульсацій динамічного тиску або швидкісного напору та плівкових термоанемометрів, які пересувалися над обтічними поверхнями координатними пристроями.

Експериментальні дослідження обтікання напівсферичної лунки на плоскій пластині були проведені у гідродинамічному лотку. Більш детально про експериментальний стенд наведено у роботі [5]. Гідравлічно гладка пластина використовувалась в якості обтічної поверхні, в якій було зроблено локальну неоднорідність у вигляді напівсферичної лунки. Лунка діаметром  $d=0.1$  м знаходилась на повздовжній вісі пластини на відстані  $x=1$  м від її переднього краю, який, як і кормовий край пластини, було загострено для забезпечення безвідривного обтікання вимірювальної пластини. Детальний опис експериментальної установки, програми та методики проведення досліджень наведено, наприклад, у роботах [6, 7]. Під час проведення досліджень глибина потоку над вимірювальною пластинною складала 0.4 м, а швидкість течії ( $U$ ) змінювалась від 0.06 м/с до 0.4 м/с, якій відповідали числа Рейнольдса, розраховані за відстанню від переднього краю пластини до місця розташування лунки ( $x$ ) та за діаметром лунки ( $d$ ), відповідно  $Re_x=Ux/\nu$  від  $6 \cdot 10^4$  до  $4 \cdot 10^5$  та  $Re_d=Ud/\nu$  від  $6 \cdot 10^3$  до  $4 \cdot 10^4$ , де  $\nu$  – кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини. Перед проведенням вимірювань термоанемометрами та датчиками пульсацій тиску проводилася візуалізація потоку. Це дозволило визначити області формування та розвитку великомасштабних когерентних вихрових структур у лунці, оцінити їх розміри і форму, напрямки руху та обертання, місця викиду назовні з лунки. Це використано під час планування, підготовки та проведення подальших інструментальних досліджень, що неодноразово було застосовано у роботах [7, 8].

Картини візуалізованої течії реєструвались за допомогою швидкісних кінокамер, відеокамер та цифрових фотоапаратів. Відео та фотоматеріал за допомогою відповідного обладнання, програм та методик фіксувався на графічній комп'ютерній станції, де він оброблявся та аналізувався за відповідними методиками. Похибка вимірювань осереднених та інтегральних характеристик поля пульсацій швидкості та тиску не перевищувала 8 % з надійністю 95 % або  $2\sigma$ . Похибка вимірювань спектральних залежностей поля пульсацій швидкості та тиску складала не більше 2 дБ у діапазоні частот від 0.02 Гц до 1 кГц, а похибка вимірювань кореляційних характеристик не перевищувала 12 % за тієї самої надійності вимірюваних результатів.

Метою роботи було експериментальні дослідження характерних особливостей обтікання напівсферичного заглиблення на плоскій пластині та течії у примежовому шарі поблизу цієї неоднорідності. Вивчення механізму генерації та еволюції когерентних вихрових структур, які формуються усередині напівсферичного заглиблення, і просторово-часових характеристик полів пульсацій швидкості та тиску, які вони утворюють як усередині заглиблення, так і в його околі.

За результатами проведених візуальних експериментальних досліджень було встановлено, що для ламінарного режиму обтікання ( $Re_x < 10^5$ ) усередині напівсферичної лунки зафіксовано формування двох циркуляційних областей (рис. 1), між якими практично нема обміну рідиною. За допомогою траєкторій руху мічених частинок усередині лунки виявили великомасштабну вихрову структуру, яка нагадувала вихровий джгут з сильно викривленою віссю обертання вздовж розмаху лунки. У центральній частині лунки вісь джгута вигиналася угору, утворюючи петлю, та досягала верхнього перерізу лунки, а з боків заглиблювалася до низу, симетрично з обох боків лунки. Таким чином у центральній частині дві ділянки вихрового джгута (сторони петлі) були розташовані практично під прямим кутом до поверхні пластини. Це призвело, як відмічено у роботі [1], до утворення торнадо подібних вихорів під час нестійкості та розриву вихрових джгутів у лунці. Ця схема еволюції вихрових систем підтверджувалася чисельними розрахунками, представленими у роботі [2].

Для турбулентного режиму обтікання ( $Re_x > 2 \cdot 10^5$ ) візуально було зафіксовано поперечні осциляції течії усередині напівсферичної лунки. Так, для швидкості потоку в гідродинамічному каналі  $U=0.4$  м/с ( $Re_d=4 \cdot 10^4$ ) спостерігалися низькочастотні поперечні коливання усередині лунки з частотою біля 0.07 Гц ( $St=fd/U=0.017$ ). На фоні цього низькочастотного коливання усередині напівсферичної лунки формувалися вихрові системи у вигляді нахилених великомасштабних вихрових структур, розташованих під кутом приблизно  $45^\circ$  до набігаючого потоку (рис. 2). Періодично ці вихрові структури викидалися з лунки, а потім знов формувалася нахилена вихрова система, але вже на протилежних стінках лунки і викид вихору відмічався над іншим кормовим боком лунки. Формування асиметричних вихрових структур у вигляді великомасштабних нахилених вихорів підкорюється перемикаючому або тригерному режимові. Частота викидів цих вихорів складала близько 0.14 Гц, що відповідало числу Струхалія  $St \approx 0.035$ .

Загальними закономірностями результатів інтегральних характеристик, отриманих для обтікання напівсферичної лунки, є: по-перше, наявність областей збільшення та зменшення середніх значень поздовжньої швидкості над лункою, що чергувалися; по-друге, наростання середньої та пульсаційної швидкості з наближенням зсувного шару до кормової стінки лунки; по-третє, існування в придонній області лунки зворотної течії, яка зароджувалася у зоні взаємодії вихрових структур зсувного шару та кормової стінки напівсферичної лунки.

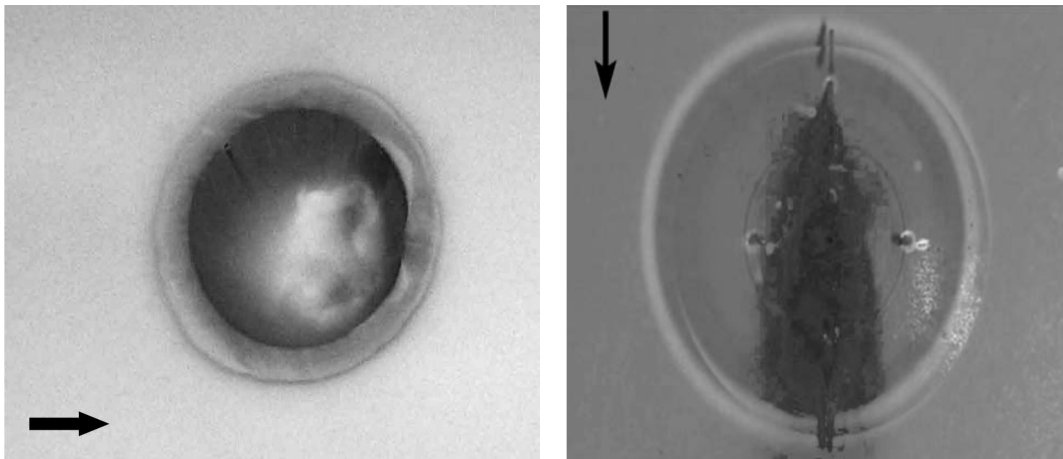


Рис. 1. Візуалізація вихрового руху в напівсферичній лункі та поблизу неї для ламінарного режиму течії

Спираючись на аналіз обробки візуальних досліджень датчики пульсацій пристінного тиску були встановлені в області взаємодії вихрових структур зсувного шару з кормовою стінкою заглиблення. Вони реєстрували резонансні пульсації тиску (дискретні підвищення у спектральних залежностях), які відповідали першій та другій модам автоколивань вихрових структур зсувного шару. Окрім цього, поле пульсацій пристінного тиску в області кормової стінки насичено періодичними коливаннями, які відповідали низькочастотній слідній моді осциляцій вихрової течії, що властиво внутрішній структурі потоку в заглибленні. Зі збільшенням швидкості обтікання плоскої поверхні з локальною неоднорідністю, спектральні рівні резонансних коливань, що відповідали слідним і зсувним модам осциляцій зменшувалися. Разом з цим в спектральних залежностях пульсацій пристінного тиску, особливо у придонній області півсферичного заглиблення, все більш виразно проявлялася тривимірна мода осциляцій, якій властиво значення числа Струхалія близько 0.025, що узгоджується з результатами робіт [1, 2]. Результати проведених досліджень показали, що на дні заглиблення максимум спектральних рівнів пульсацій пристінного тиску спостерігався на частоті близько 0.05 Гц ( $St \approx 0.05$ ) та її вищих гармоніках. На кормовій стінці заглиблення, з якою взаємодіють вихори зсувного шару, найбільші пульсації пристінного тиску зареєстровано на частотах близько 0.16 Гц та 0.4 Гц ( $St=0.16$  та 0.4).

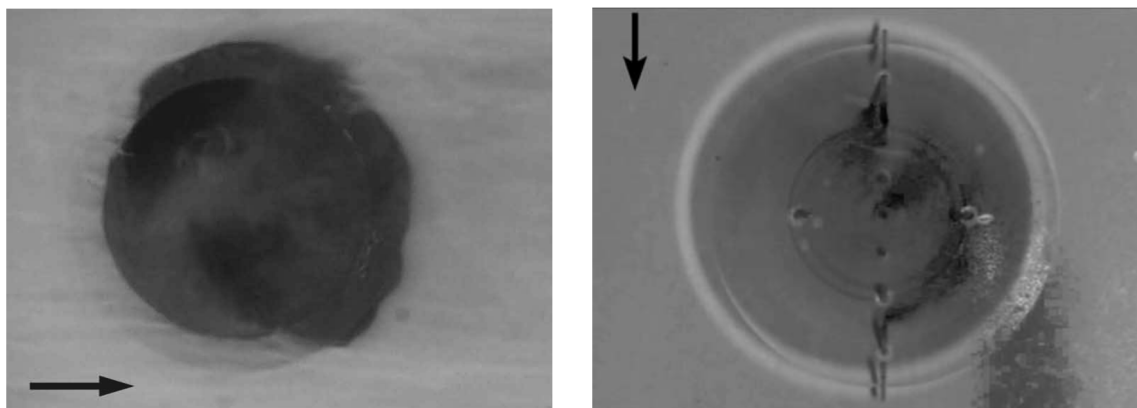


Рис. 2. Візуалізація вихрового руху в напівсферичній лунці та поблизу неї для турбулентного режиму течії

Отримані у роботі результати дозволяють показати, що з віддаленням углиб лунки уздовж її передньої стінки відбувається перерозподіл енергії спектральних пульсацій поздовжньої швидкості та тиску з високочастотної області у низькочастотну область. У спектрах з'являються яскраво виражені екстремуми спектральних рівнів, які відповідають першій та другій зсувним модам, слідній моді та низькочастотній тривимірній моді осциляцій, яка модулює коливальний процес усередині напівсферичної лунки.

Проведені просторово-часові або взаємні кореляційні характеристики полів пульсацій швидкості та тиску дали змогу визначити напрямок руху та швидкості вихрових структур зсувного шару. Ступінь корелюваності пульсацій швидкості над обтічною поверхнею заглиблення та пульсацій пристінного тиску на його поверхні та напрямок переносу корелюваного сигналу дав можливість оцінити взаємозв'язок між полями швидкості та тиску в досліджуваному вихровому русі. Показано, що взаємні кореляції поздовжньої швидкості майже вдвічі вищі, ніж взаємні кореляції пульсацій швидкості та пристінного тиску.

Отримані залежності змін у часі спектральних та кореляційних функцій, які використані для аналізу статистичних характеристик формування та розвитку вихрових структур, як у просторі, так і в часі. Це дало можливість судити про інтенсивність і напрямок руху когерентних вихрових структур та зробити кількісну оцінку групової конвективної швидкості цих структур, які генерують псевдозвукові пульсації тиску та швидкості.

#### Список літератури:

1. Халатов А.А. Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок) / А.А. Халатов. – К.: ИТТФ НАНУ, 2005. – 76 с.
2. Гортышов Ю.Ф. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования / Ю.Ф. Гортышов, И.А. Попов, В.В. Олимпиев [и др.]. – Казань : Центр инновационных технологий, 2009. – 531 с.
3. van Oudheusden M. Drag reduction by means of dimpled surfaces in turbulent boundary layers / M. van Nesselrooij, L. L. M. Veldhuis, B. W. van Oudheusden, F. F. J. Schrijer // Exp Fluids. – 2016. – V. 57. – P. 142-1-14.
4. Voskoboinick V. Study of near wall coherent flow structures on dimpled surfaces using unsteady pressure measurements / V. Voskoboinick, N. Kornev, J. Turnow // Flow Turbul. Combust. – 2013. – V. 90, № 2. – P. 86-99.
5. Воскобойник В.А. Поле швидкості у серединному перерізі напівсферичної лунки / В.А. Воскобойник, А.В. Воскобойник, О.А. Воскобойник, В.М. Турик // Прикладна гідромеханіка. – 2014. – Т. 16, № 4. – С. 17–27.
6. Voskoboinick V. Generation of vortex structures by pair oval dimples on flat surface / V. Voskoboinick, A. Voskoboinick, V. Stepanovitch // Abstract European Drag Reduction and Flow Control Meeting, EDRFCM15, 22-23 March 2015. – Cambridge, UK, 2015. – P. 43-44.
7. Voropaev G.A. Vortical flow features in a hemispherical cavity on a flat plate / G.A. Voropaev, V.A. Voskoboinick, N.V. Rozumnyuk, A.V. Voskoboinick // Sixth International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena, TSFP-6, 22-24 June 2009. - Seoul, Korea, 2009. – Vol. 2. – P. 563-568.
8. Турик В.М. Вплив локальних поперечно обтічних перешкод на пульсації швидкості та пристінного тиску / В.М. Турик, В.А. Воскобойник, А.В. Воскобойник // Наукові вісті НТУУ „КПІ”. – 2017. – № 1. – С. 106-114.