

УДК 532.517

**Воскобійник В.А., Воскобійник А.В.***Інститут гідромеханіки НАН України***ВИХРОВИЙ РУХ УСЕРЕДИНИ ПІВСФЕРИЧНОЇ ЛУНКИ НА ПЛОСКІЙ ПОВЕРХНІ**

Проведено експериментальні дослідження особливостей формування когерентних вихрових структур усередині півсферичної лунки на плоскій поверхні. Встановлено, що в залежності від режимів течії у лунці генеруються симетричні та асиметричні великомасштабні вихрові структури і дрібномасштабні вихори, які викликають появу дискретних піків у спектрах пульсацій швидкості та тиску на характерних частотах і хвильових числах.

Проведены экспериментальные исследования особенностей формирования когерентных вихревых структур внутри полусферической лунки на плоской поверхности. Установлено, что в зависимости от режимов течения в лунке генерируются симметричные и асимметричные крупномасштабные вихревые структуры и мелкомасштабные вихри, которые вызывают появление дискретных пиков в спектрах пульсаций скорости и давления на характерных частотах и волновых числах.

Experimental researches of the formation features of coherent vortical structures are conducted inside the hemispherical dimple on a flat surface. It is set that depending on the flow regimes the symmetric and asymmetric large-scale vortical structures and small-scale vortices are generated in the dimple which cause appearance of discrete peaks in the spectra of velocity and pressure fluctuations on characteristic frequencies and wave-numbers.

$d$  – діаметр лунки;  
 $f$  – частота;  
 $k$  – хвильове число;  
 $l$  – відстань між термоанемометрами;  
 $P(St)$  – спектральна густина потужності;  
 $p'$  – пульсації тиску;  
 $q$  – швидкісний напір;  
 $Re$  – число Рейнольдсу;  
 $St$  – число Струхалія;  
 $U$  – швидкість течії;  
 $u'$  – пульсації поздовжньої швидкості;  
 $X$  – відстань від носка пластини до розташування півсферичної лунки;  
 $x, y, z$  – декартові координати з початком у центрі півсферичної лунки;

$\delta$  – товщина примежового шару;  
 $\lambda$  – довжина хвилі;  
 $\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості води;  
 $\rho$  – густина води;  
 $\tau$  – час затримки корельованого сигналу.

**Індекси верхні:**

\* – нормована величина.

**Індекси нижні:**

$d$  – діаметр лунки;  
 $Do$  – однокомпонентний термоанемометр;  
 $D$  – двокомпонентний термоанемометр;  
 $X$  – відстань від носка пластини до розташування півсферичної лунки;  
 $x, y, z$  – поздовжня, поперечна і трансверсальна координати.

**Вступ**

Останніми роками широке застосування в теплоенергетиці, гідродинаміці та гідроакустиці отримали лункові технології на обтічних рідиною або газом поверхнях. Використання заглиблень різноманітної форми і розмірів призводить до істотного збільшення тепло- і масопереносу, зниженню, за певних умов, гідродинамічного опору і шуму, підвищенню якості аеродинамічних профілів і лопаток турбін. Добре відомо [1-4], що заглиблення на обтічній поверхні генерують вихрові структу-

ри, які під час взаємодії між собою, примежовим шаром і обтічною поверхнею змінюють теплофізичні і гідродинамічні характеристики течії, збільшують тепловіддачу і вібрації обтічних поверхонь.

Велика кількість публікацій присвячена вивченню особливостей генерації вихорів усередині заглиблень. Чисельне та фізичне моделювання показують, що це дуже складний механізм, який залежить від багатьох чинників, і його дослідження пов'язане з великими труднощами теоретичного та експеримен-

тального планів. Виявлено ряд особливостей формування та еволюції вихорів, як в одиночних заглибленнях, так і в ансамблях лунок, які покривають значну частину обтічних поверхонь, що відображене, наприклад, у роботах [5-7]. У той же час залишаються нез'ясованими питання, що стосуються миттєвих і статистичних характеристик полів швидкості та тиску усередині лунки і в її околі, які генеруються великомасштабними вихровими структурами та дрібномасштабними вихорами, що формуються усередині лунки. Також необхідні додаткові дослідження з вивчення взаємодії вихрових структур, які викидаються з лунки, з когерентними вихровими системами прилежового шару, а також з обтічною поверхнею.

У зв'язку з цим метою даних досліджень є експериментальне вивчення гідродинамічних особливостей вихроутворення усередині одиночної півсферичної лунки, а також взаємне дослідження полів швидкості та тиску усередині лунки і поблизу неї із застосуванням апарату теорії ймовірності та математичної статистики.

#### ***Експериментальна установка і методика досліджень***

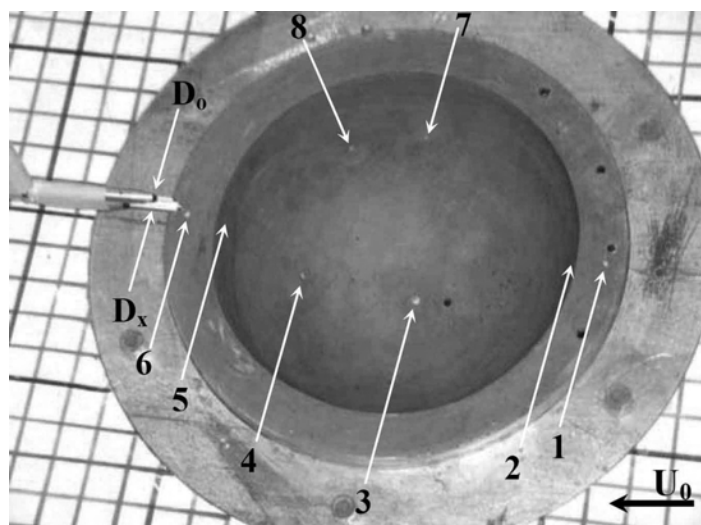
Експериментальні дослідження гідродинаміки вихрової течії, що формується у півсферичному заглибленні на плоскій поверхні, проводились у гідродинамічному лотку з вільною поверхнею води завдовжки близько 16 м, глибиною та шириною близько 1 м. Вода в лоток подавалася із заспокійливої камери через конфузори та пристрої, що випрямляють потік. Над дном лотка встановлювалась пластина завдовжки близько 2 м і шириною 0,5 м, на якій на відстані  $X = 0,8$  м розташовувалося одиночне півсферичне заглиблення діаметром  $d = 0,1$  м. Над поверхнею пластини з лункою глибина води складала близько 0,3 м. В ході експериментальних досліджень проводилась візуалізація потоку та інструментальні вимірювання поля швидкості і тиску.

Під час візуалізації контрастні речовини, мічені частинки та фарбники подавались у

потік: а) через спеціально зроблені отвори в обтічній поверхні; б) за допомогою мініатюрних трубок з контрольованими дозаторами, які переміщувались координатними пристроями поблизу обтічної поверхні, а також в) застосовувались контрастні водорозчинні покриття обтічних поверхонь. Нанесення покриття, що змивається, на досліджувану пластину в гідродинамічному лотку дало можливість визначити зони підвищених дотичних напруг та області дії вихрових систем, що викидаються із заглиблення, на пристінну область прилежового шару. Дослідження візуалізації потоку за допомогою покриттів, які змиваються, проводились для чисел Рейнольдсу  $Re_a = Ud/\nu$  від 3000 до 40000. Для кожного режиму готувалося окреме водорозчинне покриття (згущене молоко з добавками чорної та білої сажі), яке підсихало визначений час і пластина з покриттям, що змивалося, встановлювалась на дно лотку після того, як наступав сталий швидкісний режим. Додавання сажі різних кольорів дозволяло окрім зниження щільності згущеного молока (приблизно на 30 % вище за щільність води), також подати у приповерхневий шар мічені частинки, траєкторія руху яких і їх швидкість переміщення дозволяли оцінити кінематичні характеристики вихрової течії у ході обробки та аналізу картин візуалізації.

Дослідження поля швидкості проводилось за допомогою кореляційного блоку з одиночного та Х-подібного плівкового термоанемометрів фірми Disa, які за допомогою добре обтічних державок вводились у досліджувану область течії. Пульсації пристінного тиску реєструвались ансамблем мініатюрних п'єзокерамічних датчиків, діаметр чутливої поверхні яких не перевищував  $1,5 \cdot 10^{-3}$  м, встановлений урівень з обтічною поверхнею лунки або пластини. Розташування датчиків швидкості та тиску представлено на рис. 1. Докладніша інформація про експериментальний стенд, вимірювальну апаратуру та методику вимірювань представлено, наприклад, у роботах [8, 9].

Похибка вимірювань інтегральних та кореляційних характеристик не перевищувала



**Рис. 1. Розташування термоанемометрів і датчиків пульсацій пристінного тиску над і на обтічній поверхні півсферичної лунки.**

10 % при достовірності 0,95, а спектральних характеристик до 2 дБ в діапазоні частот від 0,2 Гц до 12,5 кГц.

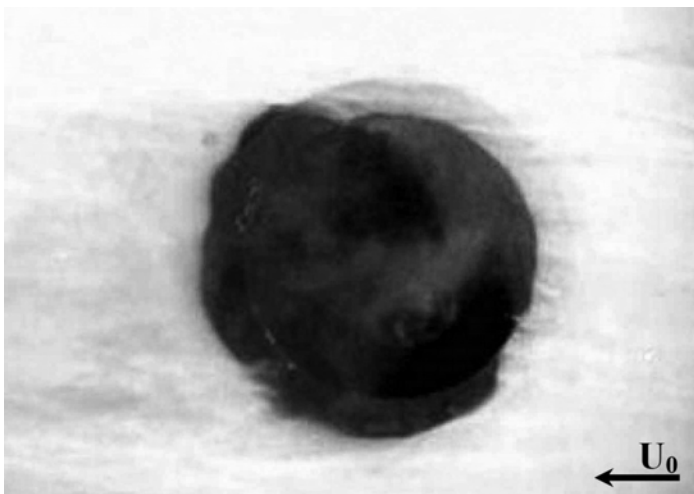
#### **Результати досліджень і аналіз даних**

В результаті проведення візуальних досліджень для найменшої швидкості гідродинамічного потоку ( $U = 0,03$  м/с) шар згущеного молока, через негативну плавучість, поволі змивався з обтічної поверхні і поступово заповнював півсферичне заглиблення. Унаслідок нерівномірного розподілу дотичних напруг та швидкості руху вихрових потоків і пристінних течій шар згущеного молока розмивався по різному поблизу півсферичної лунки. Так, для чисел Рейнольдсу  $Re_x = UX/\nu = 24000$  та  $Re_d = 3000$  поблизу кормового краю заглиблення покриття почало змиватися у двох місцях, симетрично розташованих щодо поздовжньої осі лунки. Місця інтенсивного розмиву розташувались приблизно під кутом (45...50) градусів відносно напрямку потоку. Усередині отвору півсферичної лунки, для цього режиму обтікання, формуються дві симетричні вихрові структури, джерела яких знаходяться на дні лунки ближче до її кормової сторони. Ці вихрові структури обертаються у протилежних напрямках одна до одної та

у своїх верхніх частинах об'єднуються (при своєму зростанні), формуючи аркоподібну або підковоподібну вихрову структуру, яка розташовується усередині лунки. Рідина в підковоподібну структуру потрапляє, головним чином, уздовж бічних схилів півсферичної лунки, закручується в області своїх фокусів по спіралеподібній траєкторії і викидається назовні в серединному перерізі лунки. Коли аркоподібна вихрова структура росте у своєму розвитку і набуває масштабу, що перевищує глибину лунки, то набігаючий потік зриває її верхню частину, генеруючи викид з лунки. При цьому симетрична вихрова система розривається у своїй верхній області, і її частини утворюють пару похилих у вертикальній площині вихрових структур, які протилежно обертаються. Пара вихорів, які викидаються назовні, кожен зі своєї половини лунки симетрично поздовжній осі, формують пару поздовжніх вихорів, що протилежно обертаються. Витягуючись набігаючим потоком, ці вихори розриваються і їх частини, що залишилися усередині лунки, знову з'єднуються своїми верхівками, утворюючи нову симетричну аркоподібну вихрову структуру. Новий аркоподібний вихор поступово росте за рахунок надходження рідини з циркуляційної течії, яка формується позаду передньої частини лунки. Процес формування вихрових систем та їх викид назовні не має однорідності через дію різних чинників, що обумовлюють генерацію коливального руху усередині лунки тривимірного характеру. В результаті усередині лунки зароджуються аркоподібні та нахилені вихори, спільно з формуванням циркуляційної течії і зсувного шару над нею, а також відбувається періодичний викид симетричних вихрових систем назовні з лунки у примежовий шар, який утворюється над обтічною поверхнею пластини.

Коли швидкість потоку збільшилася, у структурі вихрової течії усередині лунки відбуваються кардинальні зміни. Вони обумовлені переходом ламінарного режиму обтікання пластини із заглибленням у турбулентне. Вихор усередині заглиблення приймає

явно несиметричну форму і викидається назовні по черзі з кожної із бічних кормових сторін під кутом близько (40...60) градусів до напрямку потоку, що показано на рис. 2. Нерідко викиди відбуваються тільки з одного боку лунки, але згодом спостерігається перемикання асиметричної вихрової структури в протилежну сторону півсферичної лунки. Для цього режиму обтікання числа Рейнольдсу були наступними  $Re_x = 1,4 \cdot 10^5$  та  $Re_d = 1,7 \cdot 10^4$ . Когерентна вихрова система, що генерується в отворі лунки, має великий розмір, порівняний з розмірами самого заглиблення. Асиметричний великомасштабний вихор зароджується з джерела або фокусу, що знаходиться у придонній області лунки, поблизу її передньої частини, а верхівка цього вихору викидається над протилежною бічною стороною кормової стінки лунки. Формування та викид вихрової системи відбувається квазіперіодично з різних бічних сторін лунки. Викид не завжди спостерігається чітко по черзі з одного або з іншого боку. Іноді відбувається декілька викидів тільки з одного боку, ймовірно, це обумовлено проходженням великомасштабних вихрових систем примежового шару (хоча частота викидів великомасштабних вихорів примежового шару вища) та взаємодією



**Рис. 2. Асиметричне формування вихрових структур усередині півсферичної лунки для швидкості течії 0,17 м/с і числа Рейнольдсу  $Re_d = 17000$ .**

асиметричного вихору з вихровими системами зсувного шару або особливостями вихроутворення у лунці для цього режиму течії.

Під час викиду великомасштабної вихрової системи значна частина підфарбованої рідини виноситься назовні, досягаючи зовнішньої межі примежового шару, сформованого над обтічною плоскою поверхнею пластини. Після викиду всередину лунки спрямовується рідина із зовнішнього потоку і зароджується нова асиметрична нахилена (у вертикальній і горизонтальній площині) вихрова структура з протилежним напрямом обертання. Нова вихрова система розташовується у протилежній стороні лунки відносно вихрової структури, що викинулася, проходячи через серединний переріз лунки.

Збільшення швидкості обтікання призводить до значного зростання інтенсивності як вихроутворення усередині лунки, так і обміну енергією вихрового потоку між лункою і течією, що оточує її, у вигляді викиду вихрових структур із заглиблення і відриву примежового шару з передньої частини лунки і подальшого формування вихрового зсувного шару. Подача фарби всередину заглиблення і перед ним дала можливість візуально спостерігати етапи зародження, розвитку та викиду вихрових систем усередині заглиблення півсферичної форми. Приклад картини візуалізації формування та викиду вихрових структур, а також переміщення їх у сліді лунки для числа Рейнольдса  $Re_d = 1,7 \cdot 10^4$  показаний на рис. 3. Нахил вихрових структур, що викидаються з лунки з частотою, якій відповідає число Струхала  $St = fd/U = (0,04...0,06)$ , можна оцінити як (25...35) градусів. Висота, на яку вони підіймаються над обтічною поверхнею пластини, складає близько  $(0,25...0,35)d$ , а розділення між викидами у сліді півсферичної лунки приблизно дорівнює  $(0,6...0,8)d$ .

Інтенсивність поля пульсацій пристінного тиску усередині лунки і в її околі при зміні швидкості течії змінюється. Так, для ламінарного обтікання пластини із заглибленням середньоквадратичні значення пульсацій тиску пропорційні квадрату швидкості або



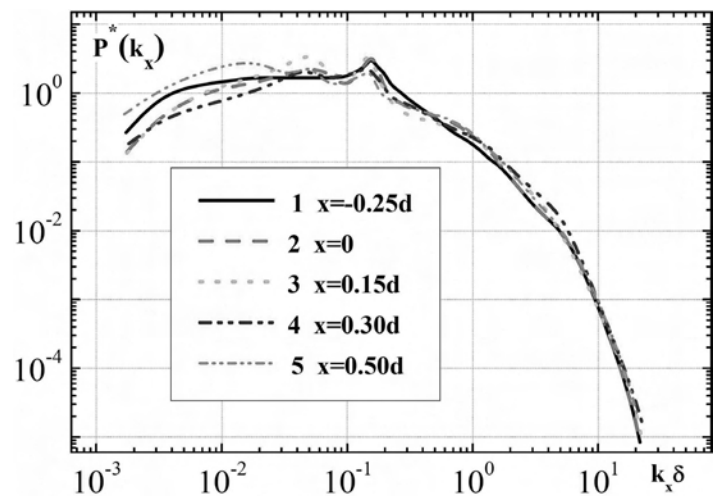
**Рис. 3. Викид великомасштабних вихрових структур назовні із лунки у примежовий шар для швидкості течії 0,17 м/с і числа Рейнольдсу  $Re_d = 17000$ .**

пропорційні швидкісному напору. При переході до турбулентного режиму обтікання пульсації тиску на поверхні лунки і в її ближньому сліді наростають з більшим темпом і показник їх пропорційності від швидкості потоку перевищує значення 2. Перед заглибленням, як для ламінарного, так і для турбулентного потоку середньоквадратичні значення пульсацій пристінного тиску залишаються пропорційними швидкісному напору. Перед заглибленням та в його дальньому сліді ( $>(5...10)d$ ) інтенсивність пульсацій тиску приблизно однакові. Найменші значення інтегральний параметр  $((p')^2)^{0.5}$  приймає на передній за потоком стінці лунки. Найбільші середньоквадратичні значення пульсацій пристінного тиску спостерігаються на кормовій стінці лунки, де відбувається взаємодія зсувного шару і вихрових структур, що викидаються з лунки, із обтічною поверхнею лунки. Слід зазначити, що на кормовій стінці лунки пульсації тиску майже на порядок перевищують рівні пульсацій тиску, що реєструються на передній стінці, незалежно від швидкості потоку.

Хвильовий спектр пульсацій поздовжньої швидкості, який зареєстровано в осьовому перерізі пластини та лунки з координатою  $z = 0$  для числа Рейнольдсу  $Re_d \approx 2 \cdot 10^4$ , представ-

лений на рис. 4. На цьому рисунку перші чотири криві поміряні у площині пластини, тобто  $y = 0$ , а п'ята крива – над пластиною на відстані  $y = 0,025d$ . Крива 1 відповідає вимірній точці з координатою  $x = -0,25d$ ; крива 2 –  $x = 0$ ; крива 3 –  $x = 0,15d$ ; крива 4 –  $x = 0,30d$  та крива 5 –  $x = 0,50d$ . Значення товщини примежового шару вимірювалося в області переднього краю лунки. У передній частині лунки має місце один дискретний підйом спектру для поздовжнього хвильового числа  $k_x \delta = 2\pi\delta/\lambda_x \approx 0,15$ , амплітуда якого зменшується під час переміщення униз за потоком. У центрі лунки ( $x = 0$ ) у спектрах спостерігається ще один підйом для  $k_x \delta \approx 0,05$ , який має максимум у перерізі  $x = 0,15d$ . Над кормовим краєм лунки відмічається третій дискретний підйом спектрів для  $k_x \delta \approx 0,015$ . Найбільший вклад в енергію поля пульсацій швидкості, для усіх досліджених перерізів вздовж поздовжньої координати, спостерігається для хвильового числа  $k_x \delta \approx 0,15$ .

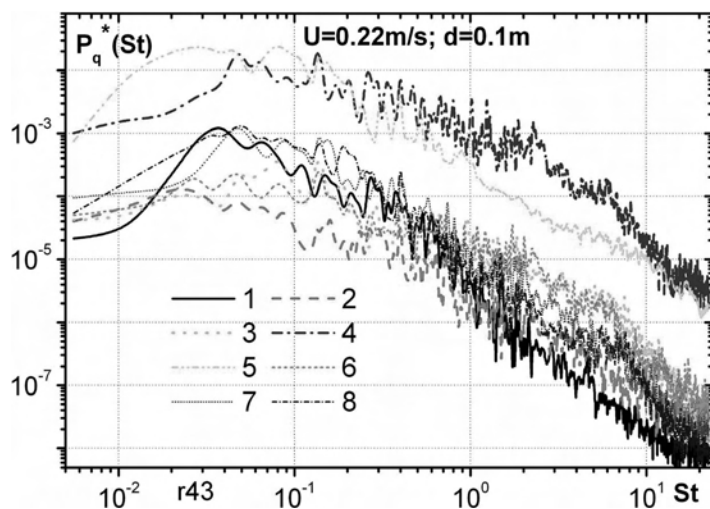
Спектральні густини потужності пульсацій пристінного тиску, що нормуються швидкісним напором ( $q = \rho U^2/2$ ) у вигляді  $P^*(St) = P(St)U/dq^2$  показані на рис. 5 для  $Re_x \approx 2 \cdot 10^5$  та  $Re_d \approx 2 \cdot 10^4$ . Тут номери кривих відповідають номерам датчиків пульсацій пристінно-



**Рис. 4. Хвильовий спектр пульсацій поздовжньої швидкості, виміряний на різних висотах ( $y = var$ ), у перерізі  $z = 0$  для числа Рейнольдсу  $Re_d = 20000$ .**

го тиску (див., рис. 1). Отже, перед заглибленням спектр пульсацій тиску має характер, типовий для пристінних пульсацій тиску, виміряних в течіях над плоскою поверхнею з прилежним шаром. У непорушеному лункою прилежним шарі спектр пульсацій тиску спадає в області низьких частот із зменшенням частоти, має так званий конвективний гребінь і спадає із збільшенням частоти з наростаючим темпом.

Пульсації тиску на поверхні лунки значно збільшуються в області високих частот у порівнянні з прилежним шаром на плоскій поверхні, особливо у серединному перерізі півсферичної лунки. У середині лунки максимальні рівні пульсацій тиску в області низьких частот спостерігаються у верхній частині кормової стінки, де відбувається інтенсивна взаємодія наближеного потоку з поверхнею лунки. У придонній частині кормової стінки найбільші спектральні рівні пульсацій тиску мають місце у високочастотній області, що показано на рис. 5 (крива 4). У спектральних залежностях, виміряних на поверхні кормової стінки лунки, тональні підйоми спектрів виявлені на частоті викидів великомасштабної вихрової системи із заглиблення ( $St \approx 0,05$ ), на частоті її обертання ( $St \approx 0,15$ ) і на частоті ( $St \approx 0,4$ ). Остання



**Рис. 5. Спектральні густини потужності пульсацій пристінного тиску виміряні на обтічній поверхні півсферичної лунки для числа Рейнольдсу  $Re_d = 22000$ .**

обумовлена автоколиваннями зсувного шару, унаслідок взаємодії його вихрових структур з кормовою стінкою лунки і відповідає першій моді автоколивань зсувного шару. На бічних стінках лунки тональні компоненти спектрів спостерігаються на тих же частотах, але їх амплітуди менші (див. криві 7 та 8 на рис. 5).

На поверхні передньої стінки лунки спостерігається найменша інтенсивність пульсацій пристінного тиску в області низьких частот (крива 2). Тут превалюють осциляції вихрового потоку, обумовлені впливом бічних стінок лунки або тривимірністю півсферичної лунки, що призводить до появи низькочастотних поперечних коливань рідини усередині заглиблення. Ці низькочастотні коливання стають модулюючими для всього вихрового руху в лунці і для них число Струхала складає (0,02...0,03).

На дні лунки (крива 3) найбільші значення пульсації пристінного тиску мають на частоті обертання великомасштабної вихрової структури, яка в цьому місцезнаходженні найближче розташовується до обтічної поверхні. Разом з цим пульсації пристінного тиску на дні лунки більш насичуються високочастотними компонентами спектру у порівнянні з передньою стінкою лунки, через дію циркуляційної течії. Ця течія наповнюється дрібномасштабними вихорами, що утворюються при взаємодії вихрових систем зсувного шару з кормовою стінкою, які конвектують над кормовою стінкою до дна лунки.

На бічній стінці лунки превалюють пульсації тиску, що відповідають частоті обертання великомасштабної вихрової системи, частоті її викидів та частоті автоколивань зсувного шару і взаємодії вихрових структур зсувного шару з кормовою стінкою лунки. Подібні підйоми в спектральних залежностях пульсацій тиску спостерігаються також і в ближньому сліді лунки (крива 6).

Одноточні вимірювання парою плівкових термоанемометрів та ансамблем датчиків пульсацій тиску, розташованих над обтічною поверхнею і урівень з нею, як показано на рис. 1, дозволили визначити взаємні статистичні ха-

рактики поля швидкості та тиску. Коефіцієнти взаємної кореляції пульсацій швидкості і пристінного тиску представлені на рис. 6. Слід зазначити, що на цьому рисунку разом із взаємною кореляцією між датчиками пульсацій швидкості приведені криві коефіцієнту взаємної кореляції між парами датчиків пульсацій швидкості та пульсацій пристінного тиску. Просторово-часові кореляції пульсацій швидкості та тиску отримані для швидкості обтікання пластини з локальним заглибленням  $U = 0,1$  м/с і чисел Рейнольдсу  $Re_x = 8 \cdot 10^4$  та  $Re_d = 1 \cdot 10^4$ . Пара плівкових термоанемометрів (на відстані  $l_{D_o-D_x} = 4,5 \cdot 10^{-3}$  м) у цих вимірюваннях знаходилась над отвором заглиблення у верхній частині зсувного шару та ближче до передньої стінки лунки. Взаємна кореляція між

поздовжніми компонентами пульсацій швидкості представлена кривою 1. Крива 2 – залежність коефіцієнта взаємної кореляції між пульсаціями пристінного тиску (датчик № 5) і пульсаціями поздовжньої швидкості (двокомпонентний датчик  $D_x$ ). Кореляція між поздовжніми компонентами швидкості вища, ніж між пульсаціями тиску та швидкості. Швидкість переносу корельованого сигналу між двома датчиками швидкості трохи нижча, ніж між датчиком пульсацій швидкості та датчиком пульсацій пристінного тиску. Напрямок руху корельованих сигналів наступний: від нижнього датчика швидкості до верхнього та від датчика швидкості до датчика пульсацій тиску, що знаходиться у верхній частині кормової стінки півсферичної лунки.

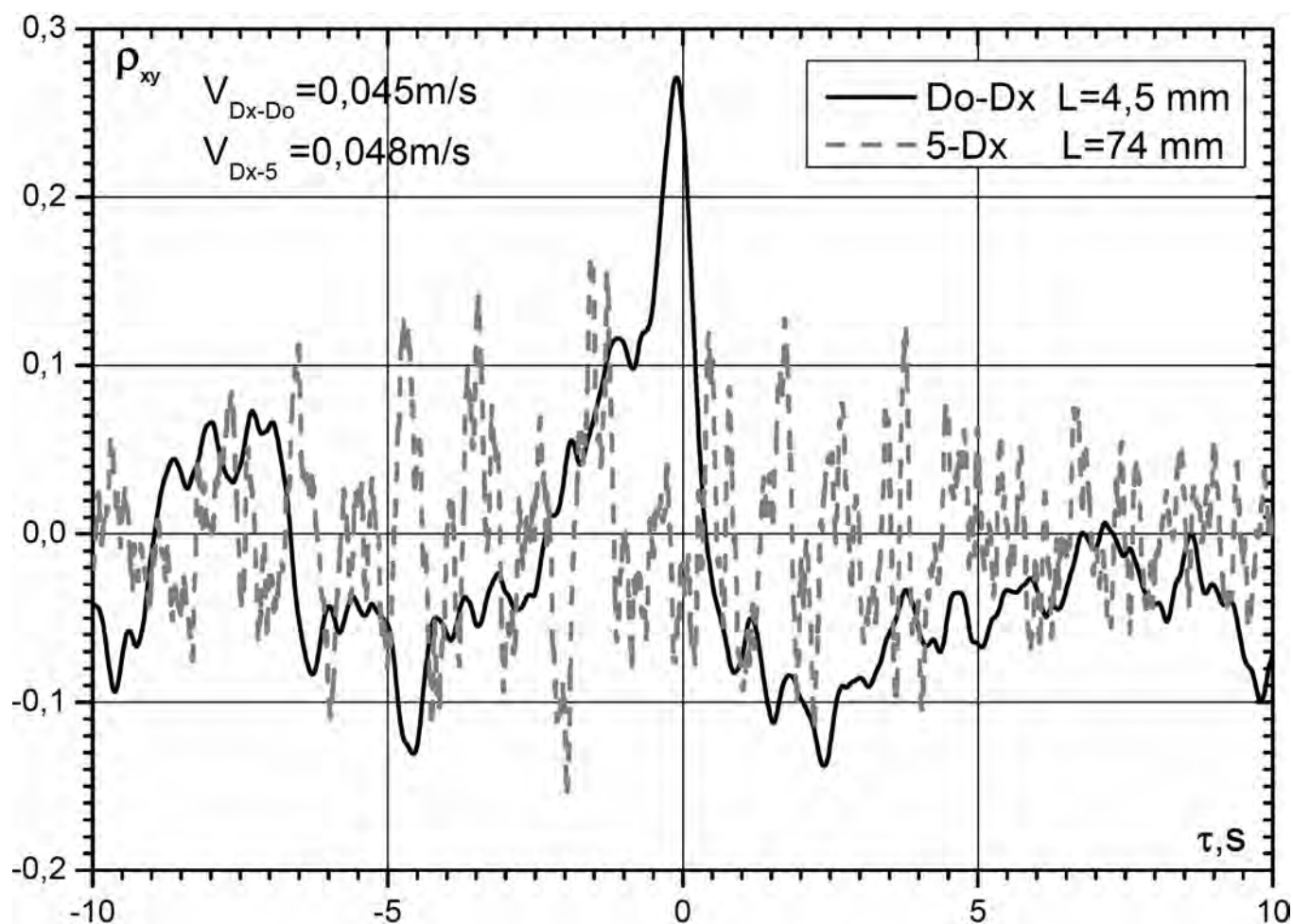


Рис. 6. Взаємні кореляції та групові швидкості переносу пульсацій пристінного тиску і пульсацій швидкості над обтічною поверхнею півсферичної лунки.

**Висновки**

1. Встановлено, що залежно від режиму течії усередині лунки генеруються симетричні та асиметричні квазістійкі великомасштабні вихори. Ці вихори для ламінарного режиму течії, утворюючи аркоподібну вихрову структуру, викидаються уздовж серединного перерізу лунки. Для турбулентної течії асиметричні вихори приймають нахилене положення та викидаються над бічними сторонами кормової стінки лунки. Їх джерело розташовується над протилежними бічними сторонами передньої стінки лунки поблизу її придонної частини. У цьому випадку спостерігається перемикання вихрових структур з одного нахиленого положення щодо напрямку течії в протилежне.

2. Частотні і хвильові спектри поля пульсацій пристінного тиску і поздовжньої швидкості показують, що усередині лунки і в її ближньому сліді спостерігаються домінуючі частотні або хвильові компоненти, які відповідають низькочастотним коливанням вихрової течії усередині лунки, частотам викидів і обертання квазістійких вихорів, а також частоті автоколивань зсувного шару.

3. Знайдено, що над отвором півсферичної лунки взаємні кореляції між поздовжніми компонентами швидкості вищі, ніж між пульсаціями тиску та швидкості. Швидкість конвекції корельованих сигналів, які генерують вихрові структури зсувного шару, близька до половини швидкості течії.

**ЛІТЕРАТУРА**

1. Гортышов Ю.Ф., Попов И.А., Олимпиев В.В., Щелчков А.В., Каськов С.И. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. – Казань: Центр инновационных технологий, 2009. – 531 с.

2. Халатов А.А. Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок). – К.: ИТТФ НАНУ, 2005. – 76 с.

3. Kiknadze G., Gachechiladze I., Oleinikov V. Tornadolike technology of heat and mass transfer intensification at lagging increase of hydraulic losses (Review of experimental results and intensification mechanisms). – Moscow: Basert Co Ltd, 1994-1995. – 102 p.

4. Терехов В.И., Калинина С.В. Структура течения и теплообмен при обтекании единичной сферической каверны. Состояние вопроса и проблемы // Теплофизика и аэромеханика. – 2002. – Т. 9, № 4. – С. 497-521.

5. Коваленко Г.В., Халатов А.А. Границы режимов течения в углублениях на плоской поверхности, имеющих форму сферических сегментов // Прикладна гідромеханіка. – 2008. – Т. 10, № 1. – С. 23-32.

6. Turnow J., Kornev N., Isaev S., Hassel E. Vortex mechanism of heat transfer enhancement in a channel with spherical and oval dimples // Heat and Mass Transfer. – 2011. – Vol. 47, № 3. – P. 301-313.

7. Isaev С.А., Леонтьев А.И., Корнев Н.В. Численное моделирование смерчевого теплообмена при обтекании поверхностей с лунками (состояние и перспективы) // VI Минский Межд. Форум по Теплообмену. – Минск, Беларусь. – 2008. – С. 1-9.

8. Voropayev G.A., Voskoboinick V.A., Rozumnyuk N.V., Voskoboinick A.V. Vortical flow features in a hemispherical cavity on a flat plate // Pap. Sixth Int. Sympos. on Turbulence and Shear Flow Phenomena, TSFP-6. Vol. 3. – Seoul, Korea. – 2009. – P. 563-568.

9. Воропаев Г.А., Воскобойник А.В., Воскобойник В.А., Гринченко В.Т., Isaev С.А., Розумнюк Н.В. Источники псевдозвуковых пульсаций давления при обтекании сферической лунки // Акустичний вісник. – 2008. – Т. 11, № 3. – С. 27-49.

Получено 03.09.2012 г.