

**ВЗАЄМНІ СТАТИСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПУЛЬСАЦІЙ ШВИДКОСТІ
ТА ТИСКУ В НАПІВСФЕРИЧНОМУ ЗАГЛИБЛЕННІ**

*В. А. Воскобійник, А. В. Воскобійник
Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ*

Представлені результати експериментальних досліджень формування та еволюції вихрової течії в напівсферичній лунці, розташованій на гладкій пластині. Поміряні взаємні кореляції і спектри поля пульсацій швидкості над обтічною поверхнею лунки та пластини і поля пристінного тиску на обтічній поверхні. Вказані характерні особливості зміни взаємних характеристик, отримані швидкості переносу джерел пульсацій швидкості та тиску. Для різних пар датчиків показаний ступінь корелюваності пульсацій швидкості та тиску і визначені напрями переносу корельованих сигналів.

Ключові слова: напівсферична лунка, вихрові структури, кореляція, спектр

Вступ. Обтічні поверхні багатьох конструкцій мають заглиблення різноманітної конфігурації та форми. Серед них можна виділити гідротехнічні споруди з технологічними нішами на які діє хвиловий рух у відкритому морі та поблизу берегів, заглиблення конструктивного або випадкового характеру, розташовані на корпусах підводних та надводних човнів, колодязі шасі та вантажні люки на літаках, корпуси пристроїв корегування траєкторії руху на космічних апаратах та в інших технічних конструкціях [1]. Залежно від режимів обтікання та геометричних параметрів таких неоднорідностей, усередині них формуються складні вихрові течії, які можуть призвести до збільшення опору тіл, шуму та вібрацій [2, 3]. Підвищений інтерес до використання, наприклад, сферичних заглиблень невеликої глибини пов'язаний також з тим, що спортивні снаряди, котрі мають на своїй поверхні елементи шорсткості у вигляді заглиблень різної форми мають можливість пролітати більшу відстань. В першу чергу це стосується м'ячів для гольфу, футболу, волейболу. Вирішенням проблеми зменшення опору кулі у польоті стало нанесення сферичних заглиблень на поверхню кулі. В цьому випадку рух повітря в примезовому шарі турбулізується, відривна зона зменшується, а відрив потоку затягується у кормову частину обтічної поверхні кулі. Довший рух потоку навколо кулі перед відривом створює набагато менший слід і значно зменшує опір, в першу чергу через зменшення опору форми. Коли у польоті м'яч з заглибленнями рухається з обертанням, то при цьому збільшується його підймальна сила [4]. На добре обтічних поверхнях в енергозберігаючих технологіях використовуються системи заглиблень з метою генерації вихрових структур, що суттєво збільшує тепло та масопереніс і процеси змішування, а також зменшує низькочастотний гідродинамічний шум та вібрації. Так, наприклад, досліді показали, що нанесення заглиблень на поверхню моделі швидкісного залізничного експресу зменшує опір на 15% [5]. Використання рядів сферичних заглиблень на найбільшому стовщенні аеродинамічних профілів, крил та пропелерів покращило аеродинамічні властивості крила та збільшило швидкість польоту майже на 10%. В автомобілебудуванні заглиблення розташовані на днищі автомобілів Lexus, Audi та Volkswagen використано для зменшення аеродинамічного опору, шуму у салоні та забруднення днища [4, 5]. У теплоенергетиці широко використовуються системи заглиблень на кожухах теплообмінних апаратів, на поверхні лопатей газових турбін та трубних теплообмінниках, що на практиці дозволило покращити їх теплогідравлічну ефективність [4, 6, 7].

Вихровий рух у локальному заглибленні, розташованому на обтічній поверхні, як показують результати чисельних та експериментальних досліджень, є край складним по своїй структурі, неоднорідним у просторі та нестационарним у часі [1, 4-7]. Залежно від геометричних параметрів та режимів обтікання усередині отвору заглиблення формується циркуляційна течія, генеруються великомасштабні когерентні вихрові структури і дрібномасштабні вихори, які взаємодіють як один з одним, так і з обтічною поверхнею. Результати робіт [8, 9] показали, що при збільшенні швидкості обтікання кількість дрібномасштабних вихрових структур зростає. При достатньо високих швидкостях потоку з передньої кромки заглиблення відривається примезовий шар, утворюючи зсувний шар, частина якого у результаті дії сил в'язкості та інерції згортається у вихрові структури та, взаємодіючи з внутрішнім вихровим рухом заглиблення, інтенсифікує турбулентність основного потоку. Ударна взаємодія вихрових структур зсувного шару з кормовою стінкою заглиблення породжує потужні пульсації швидкості та тиску, ініціює осциляції потоку, як усередині лунки, так і в її околі, генерує резонансні коливання усередині отвору заглиблення. Викид вихрових систем назовні з заглиблення, яке обтікається потоком, та їх взаємодія з останнім утворює інтенсивні поля пульсацій векторних і скалярних складових течії, що передаються у оточуюче середовище у тому числі і на обтічну поверхню.

Вихрові системи, які формуються у результаті взаємодії течії з локальною неоднорідністю обтічної поверхні, у вигляді одиночного заглиблення або ансамблю лунок можуть призвести до збільшення опору поверхні, її гідродинамічного шуму та вібрацій. Інтенсивність пульсацій, які генеруються усере-

дині і поблизу обтічного заглиблення, залежить від динамічних та кінематичних параметрів потоку і від форми та розміру самого заглиблення. Пульсації швидкості та тиску, обумовлені перенесенням джерел пульсацій у просторі і у часі, корелюють між собою і ступінь їх кореляції значною мірою залежить від віддалення від джерел пульсацій (вихрових структур) і їх інтенсивності. Одним з методів вивчення структури вихрового потоку і його особливостей є статистичний взаємний кореляційний і спектральний аналіз, який застосовується для полів випадкових змінних у вигляді пульсацій швидкості та тиску, виміряних відповідними датчиками, які мають необхідну просторову та часову роздільну здатність [10, 11].

Метою представлених експериментальних досліджень є вивчення просторово-часових характеристик вихрових структур, а також знаходження характерних частот коливального процесу, що формуються усередині напівсферичного заглиблення і в його околі. Для цього використовуються статистичні методи, зокрема взаємні кореляційні і спектральні характеристики поля пульсацій швидкості та пульсацій тиску над обтічною поверхнею та на ній.

Експериментальна установка та методика вимірювань. Експериментальні дослідження проводилися в гідродинамічному лотку завдовжки 16 м, шириною 1 м та глибиною 0,8 м. Глибина потоку води була близько 0,4 м, а його швидкість змінювалася від 0,03 м/с до 0,4 м/с. Досліджувана пластина з напівсферичним заглибленням встановлювалась на дно вимірювальної ділянки гідродинамічного лотку і розташовувалась на відстані 0,1 м від дна лотка паралельно його поверхні [12]. Гідравлічно гладка пластина, виготовлена з полірованого органічного скла завтовшки 0,01 м, шириною 0,5 м і завдовжки 2 м, була загострена з одного (фронтального) та з іншого (кормового) боку для забезпечення безвідривної її обтікання (рис. 1). На відстані 1 м від носка пластини було зроблено одиночний отвір напівсферичної

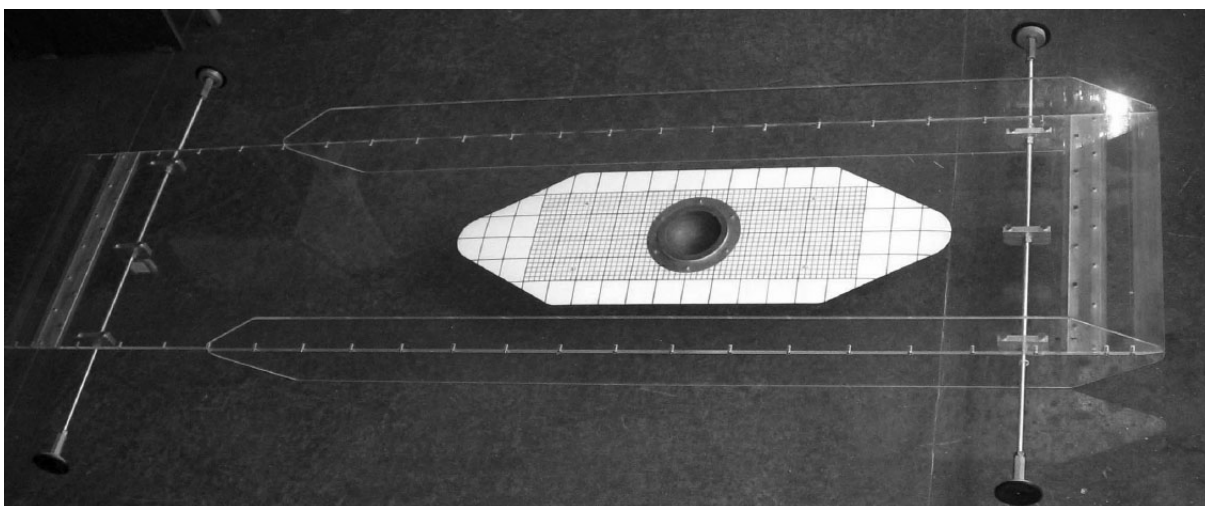


Рис. 1. Вимірювальна пластина з напівсферичним заглибленням та координатною сіткою, нанесеною на обтічній поверхні

форми діаметром 0,1 м. Урівень з обтічною поверхнею півсферичної лунки і на пластині поблизу заглиблення встановлювались 8 мініатюрних датчиків пульсацій пристінного тиску (рис. 2, а). Ці

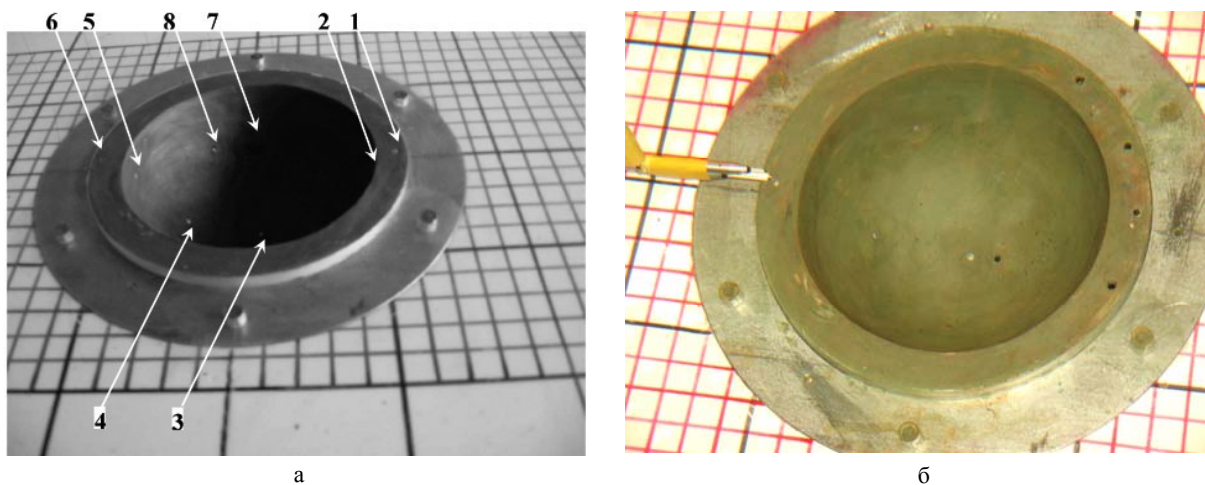


Рис. 2. Розташування датчиків у напівсферичному заглибленні та поблизу нього: а) – п'єзокерамічні датчики пульсацій пристінного тиску; б) – кореляційний блок плівкових термоанемометрів

п'єзокерамічні датчики мембранного типу мали діаметр чутливої поверхні $1,6 \cdot 10^{-3}$ м. Разом з датчиками пульсацій пристінного тиску в експериментальних дослідженнях використовувались плівкові термоане-

мометри фірми Діза. На рис. 2, б показано розташування одно та двокомпонентних плівкових термоанемометрів над пластиною позаду півсферичного заглиблення і датчиків пульсацій тиску, вмонтованих урівень з обтічною поверхнею пластини та заглиблення. Термоанемометри за допомогою відповідних державок і координатних пристроїв вводились усередину примежового шару та у вихровий потік заглиблення для вимірювання поля швидкості.

Електричні сигнали датчиків пульсацій пристінного тиску та плівкових термоанемометрів підсилювались, фільтрувались, вимірювались і реєструвались відповідною апаратурою. Виміряні аналогові сигнали подавались на багатоканальні аналогово-цифрові перетворювачі, вбудовані в персональний комп'ютер, де реєструвались, а потім оброблялись по стандартних та спеціально розроблених програмах і методиках з використанням алгоритму швидкого перетворення Фур'є у часовому та частотному представленнях експериментальних даних.

Усі датчики, незалежно від призначення і конструкції калібрувались та тестувались абсолютними і відносними методами. У ході експериментальних досліджень датчики тиску повірялися за допомогою генерації імпульсу надмірного тиску або його гармонійної форми в гідродинамічному лотку, що служило методом поточного контролю стану датчиків та їх чутливості. Разом з цим, перевірка датчиків проводилася як перед початком проведення досліджень, так і після їх закінчення. Калібрувальні та тестові криві і залежності використовувалися для визначення чутливості датчиків та коефіцієнтів перетворення фізичних величин в електричні сигнали вимірювальними трактами.

Похибка вимірювань осереднених та інтегральних характеристик поля пульсацій швидкості та тиску не перевищувала 8 % при надійності 0,95 або 2σ . Похибка вимірювань спектральних та кореляційних залежностей полів пульсацій швидкості і тиску складала не більше 2 дБ в діапазоні частот від 0 Гц до 12,5 кГц при тій же надійності вимірюваних результатів.

Результати вимірювань. Загальними закономірностями інтегральних результатів, отриманих для обтікання півсферичної лунки, є: по-перше, наявність областей збільшення та зменшення середніх значень поздовжньої швидкості, що чергуються, над лункою, обумовлене впливом лунки на примежовий шар; по-друге, наростання середньої та пульсаційної швидкості при наближенні шару змішування до кормової стінки лунки; по-третє, існування в придонній області лунки зворотньої течії, яка зароджується у зоні ударної взаємодії вихрових структур шару змішування та кормової стінки лунки.

Спектральні густини потужності пульсацій поздовжньої швидкості, пульсацій пристінного тиску та хвильовий спектр у примежовому шарі на пластині перед заглибленням якісно мають вигляд подібний до загальноприйнятих спектральних представлень поля швидкості та тиску над плоскою поверхнею [11] у вигляді монотонно змінних спектрів у частотному та хвильовому діапазонах. Але в області низьких частот частотний спектр пульсацій швидкості та тиску над пластиною в безпосередній близькості до заглиблення має декілька вищих рівнів, вказуючи на те, що поблизу заглиблення примежовий шар більшою мірою насичується великомасштабними низькочастотними вихровими системами [7]. З віддаленням углиб лунки уздовж її передньої стінки відбувається перерозподіл енергії спектральних складових пульсацій поздовжньої швидкості та тиску з високочастотної області в низькочастотну область. У спектрах з'являються яскраво виражені екстремуми спектральних рівнів для кривих, які отримано там де розташовуються квазістійкі великомасштабні когерентні вихрові системи у заглибленні. У центральній частині заглиблення спостерігається більш високочастотне наповнення спектрів з виразним проявом пульсаційної енергії вихрових систем в інерційній області частот, де спектри змінюються обернено пропорційно частоті.

Датчики пульсацій пристінного тиску, встановлені в області ударної взаємодії вихрових структур зсувного шару з кормовою стінкою заглиблення, виразно реєструють резонансні пульсації тиску (дискретні підвищення у спектральних залежностях), які відповідають першій та другій модам автоколивань вихрових структур зсувного шару. Окрім цього, поле пульсацій пристінного тиску в області кормової стінки насичено періодичними коливаннями, які відповідають низькочастотній слідовій моді осциляцій вихрової течії, що властиво внутрішній структурі потоку в заглибленні. При збільшенні швидкості обтікання плоскої поверхні з локальною неоднорідністю спектральні рівні резонансних коливань, що відповідають слідовим і зсувним модам осциляцій зменшуються. Разом з цим в спектральних залежностях пульсацій пристінного тиску, особливо у придонній області півсферичного заглиблення, все більш виразно проявляється тривимірна модулююча мода осциляцій, якій властиво значення числа Струхала ($St=fd/U_\infty$) порядку 0,025, що узгоджується з результатами робіт [3, 7, 8].

На рис. 3 наведені спектральні залежності, які отримані при обтіканні пластини з локальним заглибленням потоком зі швидкістю 0,1 м/с. Крива 1 відповідає результатам вимірювань за допомогою датчика пульсацій пристінного тиску 3, встановленого у центрі дна заглиблення (див. рис. 2, а). Крива 2 відповідає вимірюванням на кормовій стінці лунки (датчик 4). Для цього режиму обтікання числа Рейнольдсу, обраховані по швидкості потоку та відстані від носка пластини до розташування лунки і по діаметру лунки складають $Re_x=8 \cdot 10^4$ і $Re_d=1 \cdot 10^4$ відповідно. Результати досліджень показують, що на дні заглиблення максимум спектральних рівнів пульсацій пристінного тиску спостерігається на частоті порядку 0,05 Гц ($St \approx 0,05$) та її вищих гармоніках. На кормовій стінці заглиблення, з якою взаємодіють вихори

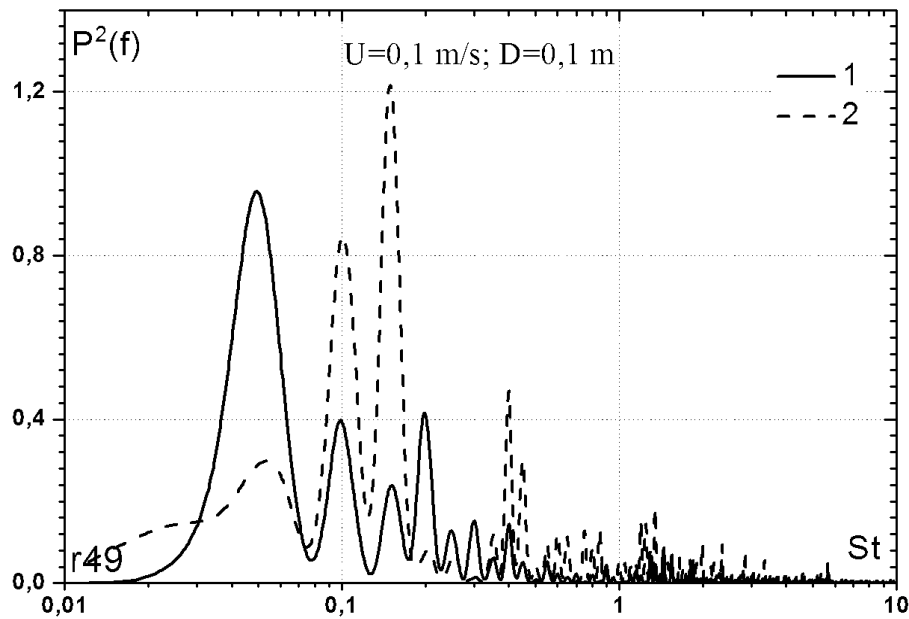


Рис.3. Спектральні густини потужності пульсацій пристінного тиску на обтічній поверхні напівсферичної лунки для швидкості потоку 0,1 м/с

зсувного шару, найбільші пульсації пристінного тиску зареєстровано на частотах близько 0,16 Гц та 0,4 Гц ($St=0,16$ та $0,4$).

Просторово-часові або взаємні кореляційні характеристики полів пульсацій тиску та швидкості експериментально досліджувались з використанням групи датчиків, які утворювали кореляційні блоки та розташовувались як усередині заглиблення, так і у рівень з обтічною поверхнею пластини та півсферичної лунки. У ході експериментальних досліджень вимірювалися автокореляційні функції пульсацій швидкості та тиску, що дозволило визначити розвиток у часі кореляційного сигналу, який сприймався датчиками. Взаємна кореляція між парами однойменних та відмінних один від одного за конструкцією та вимірюваним параметром датчиків дозволила отримати характерні особливості просторово-часового розвитку вихрового руху усередині заглиблення та поблизу нього. Проходження вихрових структур повз вимірювальні датчики дозволило оцінити їх ступінь кореляції, напрям переміщення, швидкість перенесення та час існування. Окрім цього, проведення кореляційного та спектрального аналізів дало можливість оцінити масштаби когерентних вихрових структур, напрям і частоту їх обертання.

На рис. 4 наведено залежності взаємних кореляцій між парами датчиків пульсацій пристінного тиску для різних швидкостей обтікання пластини з напівсферичним заглибленням. Крива 1 отримана для

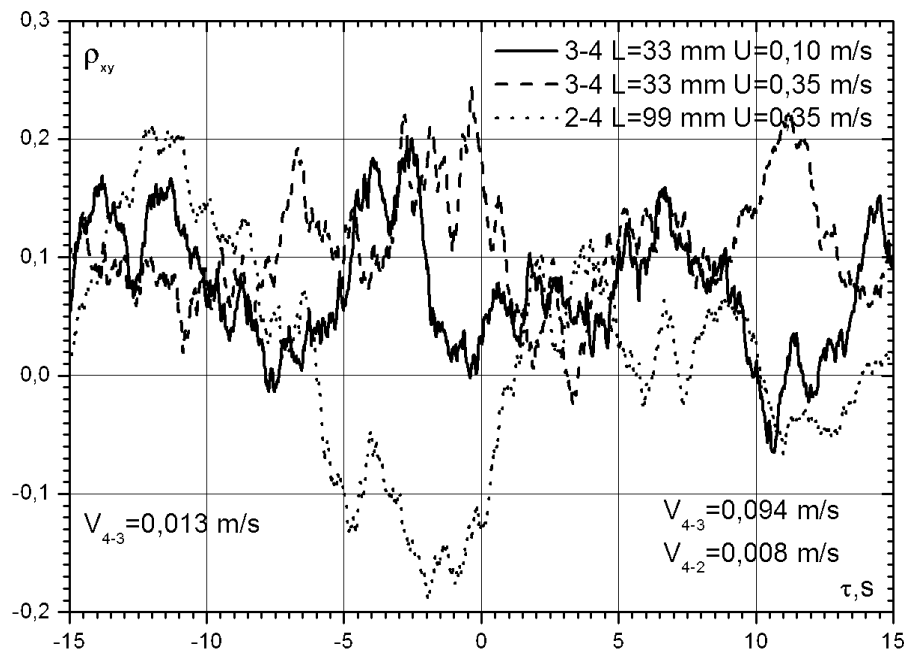


Рис.4. Взаємні кореляції між парами датчиків пульсацій пристінного тиску для різних швидкостей обтікання пластини з напівсферичним заглибленням

пари датчиків № 3 та № 4 (див. рис. 2, а) і режиму обтікання $U_\infty=0,1$ м/с, $Re_x=8 \cdot 10^4$ та $Re_d=1 \cdot 10^4$; крива 2 отримана для тієї ж пари датчиків, але для режиму обтікання $U_\infty=0,35$ м/с, $Re_x=2,8 \cdot 10^5$ та $Re_d=3,5 \cdot 10^4$, а крива 3 – для пари датчиків № 2 та № 4 і останнього режиму обтікання пластини з напівсферичним заглибленням. Відстань між датчиками пульсацій пристінного тиску уздовж поверхні заглиблення складала: $L_{3-4}=33$ мм або $L_{3-4}/d=0,33$ для датчиків № 3 та № 4 і $L_{2-4}=99$ мм ($L_{2-4}/d=0,99$) для датчиків № 2 та № 4. Збільшення швидкості обтікання пластини з локальним заглибленням призводить до зростання корелюваності пульсацій пристінного тиску, зареєстрованих на дні заглиблення і його кормовій стінці. При цьому максимум взаємної кореляції зміщується в область малих часових інтервалів, що вказує на вищу швидкість перенесення корелюваних сигналів, джерелами яких є вихрові структури. Окрім цього, максимумами взаємної кореляції між цією парою датчиків пристінного тиску спостерігаються для від'ємного часу затримки. Отже, найбільш корелюваний сигнал поступав від датчика № 4 до датчика № 3. Знаючи відстань між парою датчиків та час затримки, коли реєструється максимум взаємної кореляції, а також напрям розповсюдження цього корелюваного сигналу визначається групова швидкість перенесення вихрових систем, які генерують пульсації тиску, відповідно до рекомендацій [10, 12]. У приведених результатах експериментальних досліджень групова швидкість перенесення джерел пульсацій пристінного тиску на поверхні півсферичної лунки дорівнює $V_{cg4-3} \approx 0,13U_\infty$ для швидкості обтікання 0,1 м/с і $V_{cg4-3} \approx 0,27U_\infty$ для швидкості обтікання 0,35 м/с.

Коефіцієнт взаємної кореляції між датчиком пульсацій тиску, що знаходиться під зоною відриву примежового шару, та датчиком, розташованим на кормовій стінці заглиблення має як позитивне, так і негативне значення. При цьому значення коефіцієнтів кореляції і антикореляції (негативне значення коефіцієнта взаємної кореляції) приблизно однакові і їх максимуми розташовуються в області негативних часів затримки (крива 3 на рис. 4). Групова швидкість переносу синфазного корелюваного сигналу між датчиками № 4 і № 2 дуже мала і складає всього $0,02U_\infty$, а групова конвективна швидкість корелюваного протифазного сигналу дорівнює $0,14U_\infty$. Слід нагадати, що розрахунок вище приведених групових конвективних швидкостей проводився по відстані між парами датчиків пульсацій пристінного тиску уздовж кола напівсферичного заглиблення, а не по найкоротшій відстані між ними, оскільки допускається, що вихори у пристінній області заглиблення переміщуються паралельно обтічній поверхні.

Про ступінь корелюваності полів пульсацій пристінного тиску та швидкості над обтічною поверхнею лунки можна судити за допомогою даних наведених на рис. 5 для коефіцієнта взаємної кореляції пульсацій швидкості та пристінного тиску. Слід зазначити, що на цьому графіку разом з взаємною кореляцією

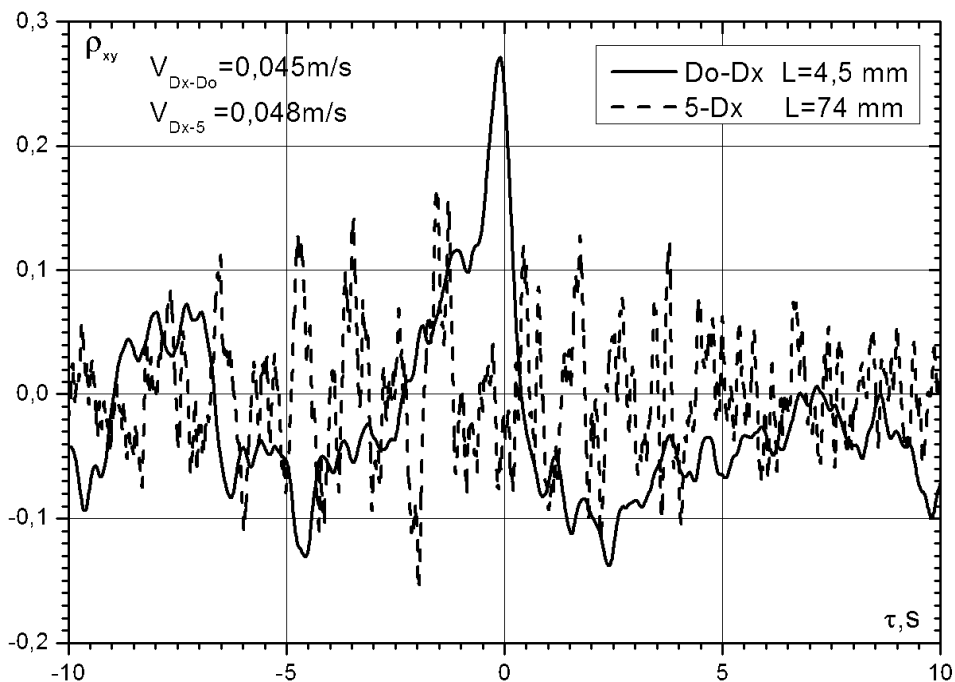


Рис.5. Взаємні кореляції між пульсаціями швидкості та пристінного тиску

ляцією між датчиками пульсацій швидкості приведені криві коефіцієнта взаємної кореляції між парами датчиків пульсацій швидкості та пульсацій пристінного тиску. Просторово-часові кореляції пульсацій швидкості і тиску отримані для швидкості обтікання пластини з локальним заглибленням $U_\infty=0,1$ м/с і чисел Рейнольдса $Re_x=8 \cdot 10^4$ та $Re_d=1 \cdot 10^4$. Пара плівкових термоанемометрів в цих вимірюваннях знаходилася над отвором заглиблення у верхній частині зсувного шару і ближче до передньої стінки лунки. Двокомпонентний датчик розміщувався ближче до площини обтічної пластини, а однокомпонентний датчик (вимірює поздовжню координату швидкості) знаходився над першим. Координатами розташу-

вання термоанемометрів відповідно до рис. 2, б були $l_{XDx}=-22$ мм або $-0,22d$; $l_{YDx}=5$ мм ($0,05d$) та $l_{ZDx}=0$ (двокомпонентний датчик) і $l_{XD0}=-22$ мм ($-0,22d$); $l_{YD0}=9,5$ мм ($0,095d$) та $l_{ZD0}=0$ (однокомпонентний датчик). Взаємна кореляція між поздовжніми компонентами пульсацій швидкості представлена кривою 1. Крива 2 відображає залежність коефіцієнта взаємної кореляції між пульсаціями пристінного тиску, які реєструвалися датчиком пульсацій тиску № 5, та пульсаціями поздовжньої швидкості, які вимірювалися двокомпонентним датчиком D_x . Як показують результати досліджень, кореляція між поздовжніми компонентами швидкості вища, ніж між пульсаціями тиску і швидкості. Швидкість перенесення корелюваного сигналу між двома датчиками швидкості трохи нижча, ніж між датчиком пульсацій швидкості та датчиком пульсацій пристінного тиску. Напрямок руху корелюваних сигналів наступний: від нижнього датчика швидкості до верхнього та від датчика швидкості до датчика пульсацій тиску, що знаходиться у верхній частині кормової стінки напівсферичної лунки.

Ступінь корелюваності пульсацій швидкості над обтічною поверхнею заглиблення та пульсацій пристінного тиску на його поверхні та напрямок переносу корелюваного сигналу дає можливість оцінити взаємозв'язок між полями швидкості та тиску в досліджуваному вихровому русі. Розташування датчиків пульсацій швидкості усередині зсувного шару, що формується при обтіканні напівсферичного заглиблення, і датчиків пульсацій пристінного тиску на кормовій стінці заглиблення показує, що вихрові структури зсувного шару переносяться із швидкістю порядку $0,48$ швидкості потоку. Це значення конвективної швидкості непогано узгоджується із загальноприйнятими значеннями швидкості перенесення вихрових структур у зсувному шарі над отвором заглиблення [1, 4, 10]. Як показують результати досліджень та підтверджують опубліковані дані теоретичних і експериментальних робіт вихрова течія усередині заглиблень незалежно від їх форми та розмірів і поблизу них є у великій мірі нестійкими процесами. Ця нестійкість виявляється в нестационарності фізичних явищ, що відбуваються у таких течіях, а також неоднорідності їх в просторі, що значно ускладнює їх реєстрацію в експериментальних дослідженнях і при чисельному моделюванні кінематики та динаміки вихрового руху.

Висновки. Результати експериментальних досліджень взаємних спектральних та кореляційних характеристик поля пульсацій швидкості та тиску усередині та поблизу напівсферичного заглиблення, розташованого на пласкій поверхні, яка обтікається потоком, дозволяють зробити наступні висновки:

1. Встановлено, що поблизу заглиблення примезовий шар більшою мірою насичується великомаштабними низькочастотними вихровими системами. З віддаленням углиб лунки уздовж її передньої стінки відбувається перерозподіл енергії спектральних пульсацій поздовжньої швидкості і тиску з високочастотної області в низькочастотну область. У спектрах з'являються яскраво виражені екстремуми спектральних рівнів, які відповідають першій та другій зсувним модам, слідовій моді та низькочастотній тривимірній моді осциляцій, яка модулює коливальний процес. У центральній частині заглиблення спостерігається більш високочастотне наповнення спектрів з розширенням інерційної області частот в енергії вихрових систем.

2. Виявлено, що кореляція між поздовжніми компонентами швидкості вища, ніж між пульсаціями тиску та швидкості. Збільшення швидкості обтікання пластини з локальним заглибленням призводить до зростання корелюваності пульсацій пристінного тиску, зареєстрованих на дні заглиблення та його кормовій стінці. Максимум взаємної кореляції зміщується в область малих часових інтервалів, що вказує на вищу швидкість переносу корелюваних сигналів, джерелами яких є когерентні вихрові системи. Групова швидкість переносу джерел пульсацій пристінного тиску на поверхні напівсферичної лунки дорівнює $V_{cg4-3} \approx 0,13U_\infty$ для швидкості обтікання $0,1$ м/с та $V_{cg4-3} \approx 0,27U_\infty$ для швидкості обтікання $0,35$ м/с, яка направлена від кормової частини лунки до її дна.

Робота виконана при фінансовій підтримці за грантом НАН України – 2009-2010 рр. (договори № 5-2009; № 4-2010, Держ. реєстр. № 0109U007050; № 0110U004182).

РЕЗЮМЕ

Представлены результаты экспериментальных исследований формирования и эволюции вихревого течения в полусферической лунке, расположенной на гладкой пластине. Измерены взаимные корреляции и спектры поля пульсаций скорости над обтекаемой поверхностью лунки и пластины и поля пристеночных давлений на обтекаемой поверхности. Указаны характерные особенности изменения взаимных характеристик, получены скорости переноса источников пульсаций скорости и давления. Для различных пар датчиков показана степень коррелированности пульсаций скорости и давления и определены направления переноса коррелированных сигналов.

Ключевые слова: полусферическая лунка, вихревые структуры, корреляция, спектр.

SUMMARY

The results of experimental researches of forming and evolution of vortical flow are presented into a hemispherical dimple, located on a flat surface. It is measured cross correlations and spectra of velocity fluctuation field over streamlined surface of the dimple and the plate and wall-pressure fluctuation field on streamlined surface. Typical changes of cross characteristics are shown and convective velocities of sources of velocity and pressure fluctuations are defined. It is shown correlation extent of velocity and pressure fluctuations for different pairs of sensors and direction of correlation signals are found.

Keywords: semispherical cavity, vortical structures, correlation, spectrum.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки // Под ред. А. В. Ермишина, С. А. Исаева. – М.: СПб., 2001. – 360 с.
2. Смольяков А. В. Шум турбулентных потоков / А. В. Смольяков. – С.-Пб.: ЦНИИ им. акад. А.И. Крылова, 2005. – 312 с.
3. Blake W. K. Mechanics of flow-induced sound and vibration: in 2 vols / W. K. Blake . – New York: Academic Press, 1986. – 974 p.
4. 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.
5. Кикнадзе Г.И. Явление самоорганизации смерчеобразных струй в потоках сплошной среды и технологий на его основе / Г. И. Кикнадзе // Труды XVI Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А. И. Леонтьева. Санкт-Петербург. В 2 т. – Т. 2. – М.: Изд-ский дом МЭИ, 2007. – С. 341–345.
6. Исаев С. А. Численное моделирование смерчевого теплообмена при обтекании поверхностей с лунками (состояние и перспективы) / С. А. Исаев , А. И. Леонтьев , Н. В. Корнев // VI Минский Межд. Форум по Теплообмену, ММФ 2008. – Минск, Беларусь, 2008. – С. 1–9.
7. Халатов А.А. Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок) / А. А. Халатов. – К.: ИТТФ НАН Украины, 2005. – 76 с.
8. Воскобойник В.А. Статистичні характеристики вихрових систем у напівциліндричному заглибленні на обтічній поверхні / В. А. Воскобойник, А. В. Воскобойник // Гідроакустичний журнал. – 2006. – № 3. – С. 57-65.
9. Халатов А.А. Режимы течения в единичном углублении, имеющем форму сферического сегмента) / А. А. Халатов , Г. В. Коваленко , В. И. Терехов // VI Минский Межд. Форум по Теплообмену, ММФ 2008. – Минск, Беларусь, 2008. – С. 10-19.
10. Источники псевдозвуковых пульсаций давления при обтекании сферической лунки / Г. А. Воропаев, А. В. Воскобойник, В. А. Воскобойник // Акустичний вісник.– 2008.– Т. 11, № 3.– С. 27–49.
11. Metzger M. M. A comparative study of near-wall turbulence in high and low Reynolds number boundary layers / M. M. Metzger, J. C. Klewicki // Phys. Fluids. – 2001. – V. 13, No 3. – P. 692-701.
12. Воскобойник А. В. Поле пульсаций пристеночного давления внутри и вблизи овальной лунки при малой скорости обтекания / А. В. Воскобойник // Вісн. Донецьк. нац. ун-ту. Сер. А: Природничі науки. – 2010. – №. 1. – С. 42-51.

Надійшла до редакції 27.05.2010 р.