

# Гідродинамічні характеристики вихрового руху усередині напівсферичної лунки

В.М. Турик<sup>1</sup> • В.А. Воскобійник<sup>2</sup> • А.В. Воскобійник<sup>2</sup>

1 – НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна;

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

Received: 11 October 2018 / Accepted: 19 November 2018

**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; напівсферична лунка; пульсації швидкості та тиску

## Вступ

У прикладній аеро і гідродинаміці та у багатьох гідротехнічних спорудах і конструкціях мають місце різноманітні неоднорідності обтічної поверхні у вигляді заглиблень, які викликають значні пульсації векторних і скалярних гідродинамічних параметрів потоку, таких як швидкість, тиск, температура, густина та інших. Через високі рівні пульсацій, які обумовлені нестационарними умовами формування та еволюції вихрових структур усередині та поблизу таких неоднорідностей поверхні, суттєво збільшується тепло- й масоперенос, поліпшуються змішувальні процеси та в багатьох випадках зростає опір обтічних поверхонь. Взаємодія інтенсивних пульсацій потоку з поверхнею викликає появу резонансних вібраційних коливань останньої, що нерідко стає причиною відмови або пошкодження інструментів і навігаційного устаткування, яке встановлено на обтічній поверхні. Генерація значних рівнів гідродинамічного шуму, як акустичної, так і псевдозвукової природи, через утворення вихрової течії усередині заглиблень та їх околі стає значною проблемою з точки зору екології навколишнього середовища.

Як показують результати чисельних та експериментальних досліджень [1-3], вихровий рух у локальному заглибленні, розташованому на обтічній поверхні, є украй складним по своїй структурі, неоднорідним у просторі та нестационарним у часі. Останніми роками інтенсивні дослідження в області аерогідродинаміки вихрової течії у заглибленнях спрямовані на розуміння фізики вихрових течій, які мають місце усередині заглиблень та пошук можливостей контролювати і керувати ними. Залежність виду когерентних вихрових структур від форми та розміру заглиблень, числа Рейнольдса, співвідношень геометричних параметрів заглиблень до динамічних характеристик примежового шару робить це завдання складним і багато параметричним [4].

Експериментальні та теоретичні роботи [1, 3, 4], які виконано у останній час, підтверджують, що картина течії усередині і околі заглиблення суттєво залежить від параметрів течії. Серед них швидкість потоку, товщина примежового шару, рівень турбулентності, а також основні характеристики самого заглиблення такі, як його конфігурація і відношення глибини до ширини або діаметру лунки, гострота кромки заглиблення. Визначальною особливістю течії у заглибленнях є наявність зсувного шару, що утворюється коли потік відривається від переднього краю лунки, через геометричний розрив поверхні обтікання. Осереднена у часі течія в заглибленні має дво і тривимірні особливості. Двомірна течія характеризує тип течії усередині заглиблення. Існує три типи

течії у заглибленні, які ідентифікували у роботі [5], а потім стали використовувати у літературі (закрита ( $d/h \geq 13$ , де  $d$  – діаметр чи довжина лунки, а  $h$  – її глибина), відкрита ( $d/h \leq 10$ ) та перехідна течія). Тривимірні структури також притаманні течіям у заглибленні, але вони вивчені та охарактеризовані менше, через складність визначення ідентифікуючих особливостей, тому що ці течії нестійкі.

Закриті течії спостерігаються у мілких заглибленнях, вони характеризуються приєднанням потоку до дна заглиблення. Відкриті течії притаманні глибоким лункам, із зсувним шаром, що перекидає довжину лунки, відділяючи внутрішню течію в заглибленні від течії вільного потоку. В такій течії зсувний шар відривається від переднього краю заглиблення, перетинає всю його довжину і приєднується до кормової стінки. Зсувний шар формує роздільну лінію току, яка відокремлює внутрішню течію усередині заглиблення від зовнішньої течії та закінчується у застійній точці на кормовій стінці лунки. Високий тиск перед кормовою стінкою заглиблення та низький тиск позаду його передньої стінки утворюють обернену течію усередині заглиблення, яка взаємодіючи із зсувним шаром створює внутрішній циркуляційний потік. Вихрова поведінка течії усередині відкритого заглиблення залежить в першу чергу від співвідношення його ширини до глибини. Так, наприклад, при  $d/h \approx 1$  у заглибленні формується один великомасштабний когерентний вихор. Зі збільшенням, чи зі зменшенням цього відношення з'являються додаткові протилежно обертові вихори, які розташовуються поруч вздовж поздовжньої вісі ( $d/h > 2$ ) чи нижче існуючих вихорів ( $d/h < 0,5$ ) [1, 4].

Нестійке поле течії у заглибленні складається із комбінації випадкових і періодичних пульсацій тиску та швидкості. Величина кожної із компонент змінюється в залежності від типу течії. Закрита течія в основному має випадкові пульсації та не проявляє особливості нестійкої осцилюючої течії. У відкритій течії переважають інтенсивні періодичні пульсації, які мають менше значимі випадкові компоненти.

### Мета досліджень

Мета представленої роботи — експериментальні дослідження характерних особливостей обтікання напівсферичного заглиблення на плоскій пластині та течії у примезовому шарі поблизу цієї неоднорідності. З'ясування 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.

### Експериментальна установка та методика проведення досліджень

Фізичне моделювання вихрових процесів, які генеруються у локальному заглибленні напівсферичної форми на плоскій поверхні, здійснювалося у гідродинамічному лотку з відкритою поверхнею води, швидкість та глибина потоку у якому регулювалися за допомогою відповідних пристроїв і механізмів. Гідродинамічний лоток мав довжину 16 м, ширину 1 м та глибину 0,8 м. Для проведення візуальних досліджень стінки лотка були зроблені скляними. Вода у лоток подавалася через заспокійливу камеру насосами. Потік води із заспокійливої камери поступав на вхід лотка через конфузорний відсік, хонейкомби та сітки, які спрямляли та турбулізували потік. На відстані 8 м від входу лотка розташовувалася вимірювальна ділянка. Вона була обладнана пристроями для фіксації досліджуваної моделі, координатними конструкціями, апаратурою та обладнанням для реєстрації гідродинамічних параметрів течії. Координатні пристрої дозволяли пересувати датчики у поздовжньому напрямку за течією з шагом  $10^{-4}$  м, у азимутальному –  $5 \cdot 10^{-5}$  м та у вертикальному (нормальному до обтічної поверхні вимірювальної пластини) –  $10^{-5}$  м.

Вимірювальна пластина довжиною 2,2 м та шириною 0,5 м, яка мала гідравлічно гладку поверхню та локальну неоднорідність у вигляді напівсферичної лунки, була закріплена паралельно напрямку потоку на відстані 0,1 м над дном вимірювальної ділянки гідравлічного лотка (рис. 1). Лунка діаметром  $d=0,1$  м знаходилась на повздовжній вісі пластини на відстані 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 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 води. Перед проведенням вимірювань термоанемометрами та датчиками пульсацій тиску проводилася візуалізація потоку за допомогою контрастних речовин та водорозчинних покриттів. Це дало змогу 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, що було використано під час планування, підготовки та проведення подальших інструментальних досліджень, що неодноразово було застосовано у роботах [7, 8].

Для вимірювань просторово-часових характеристик полів пульсацій швидкості та тиску використовували кореляційні блоки плівкових термоанемометрів та п'єзокерамічних датчиків пульсацій динамічного та пристінного тиску. Група датчиків пульсацій пристінного тиску розташовувалася врівень з обтічною поверхнею лунки та пластини, як показано на рис. 2. Координати датчиків пульсацій пристінного тиску на обтічній поверхні напівсферичної лунки та поблизу неї: датчик №1 ( $x/d=-0,58$ ,  $y/d=0$ ,  $z/d=0$ ); датчик №2 ( $-0,49$ ;  $-0,05$ ;  $0$ );

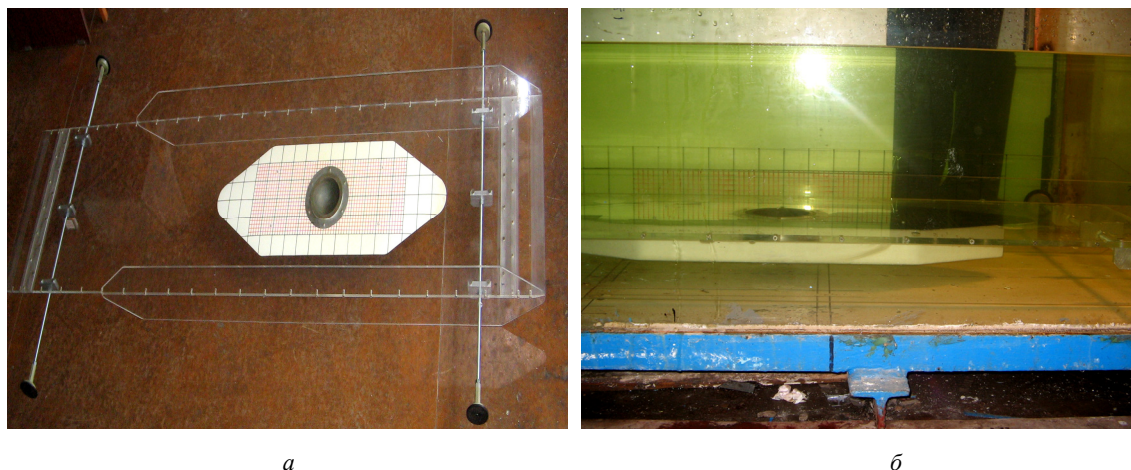


Рис. 1. Розташування напівсферичної лунки на вимірювальній пластині (а) та пластини у гідродинамічному лотку (б)

датчик №3 (0; -0,5; 0); датчик №4 (0,3; -0,36; 0); датчик №5 (0,48; -0,08; 0); датчик №6 (0,58; 0; 0); датчик №7 (0; -0,25; 0,38); датчик №8 (0,18; -0,25; 0,35). Два датчики швидкісного напору або динамічного тиску знаходилися у кореляційному блоці на фіксованій відстані один від іншого і розташовувалися над обтічною поверхнею пластини та лунки (рис. 2а). Одно- та двокомпонентні плівкові термоанемометри фірми “DISA Electronik”, які знаходилися також у кореляційному блоці, розташовувалися над обтічною поверхнею пластини та лунки (рис. 2б).

Вимірювання пульсацій динамічного та пристінного тиску проводилися за допомогою спеціально розроблених і виготовлених мініатюрних (діаметр чутливої поверхні 1,3 мм) п'єзокерамічних датчиків пульсацій тиску стрижневого типу. Ці датчики відрізнялися підвищеною просторовою здатністю та швидкодією [9]. У кореляційному блоці для вимірювання динамічного тиску чутлива поверхня датчиків пульсацій тиску розташовувалася назустріч потоку за допомогою добре обтічної державки та координатного пристрою.

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

Всі засоби інструментальних вимірювань калібрували та тестували за відповідними рекомендаціями та програмами з використанням абсолютних та відносних методів. Під час проведення експериментальних робіт датчики періодично перевірялися та проводився постійний контроль оточуючого середовища (вимірювання температури, тиску, електромагнітних, вібраційних та акустичних перешкод відповідними вимірювачами та датчиками). Будувалися калібрувальні криві, визначалася чутливість датчиків та проводилося співставлення

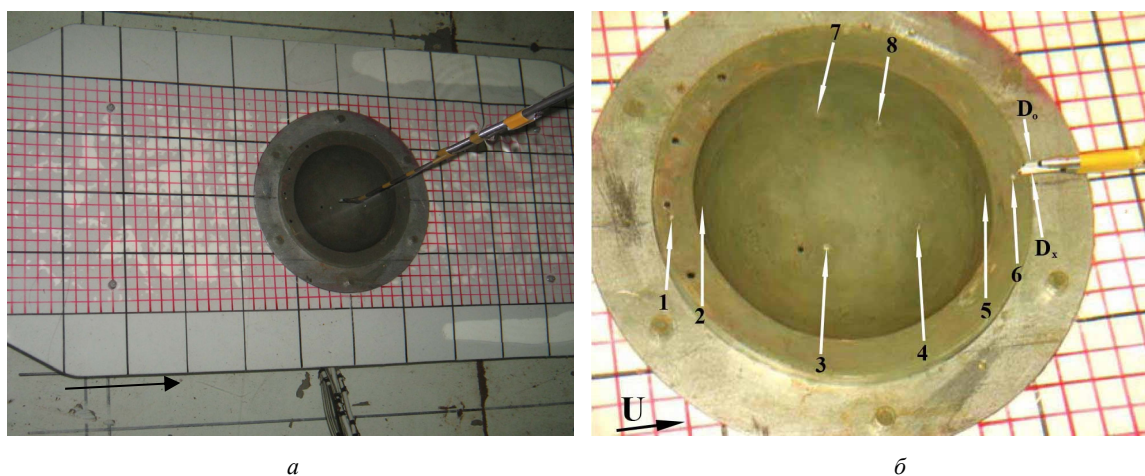


Рис. 2. Розташування датчиків динамічного тиску (а), плівкових термоанемометрів (б) та датчиків пульсацій пристінного тиску над і на обтічній поверхні

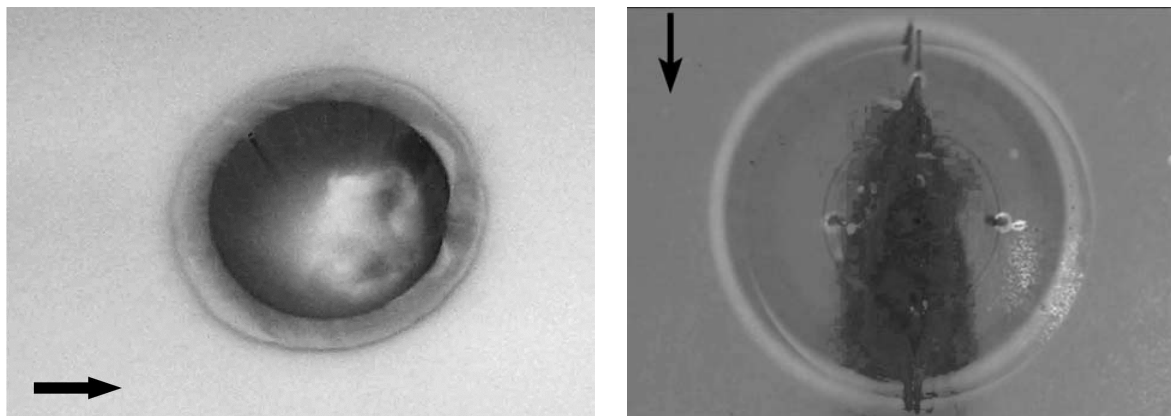


Рис. 3. Візуалізація вихрового руху в напівсферичній лунці та поблизу неї для ламінарного режиму течії

даних з паспортними характеристиками. За потреби застосовувалися компенсаційні розрахунки і вносилися корективи в виміряні параметри. Похибка вимірювань осереднених та інтегральних характеристик поля пульсацій швидкості та тиску не перевищувала 8 % з довірчою ймовірністю 0,95 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.

#### Результати досліджень та аналіз даних

Для ламінарного режиму обтікання ( $Re_x < 10^5$ ), використовуючи різноманітні методи візуалізації, зокрема водорозчинні покриття та кольорові фарбники і чорнила, було зафіксовано, що всередині напівсферичної лунки формуються дві циркуляційні області з боків від поздовжньої осі симетрії, між якими в придонній області лунки практично нема обміну рідиною (рис. 3а). Подача підфарбованої речовини з отвору на передній обтічній поверхні лунки показала, що переміщення кольорової рідини відбувається вздовж дна лунки симетрично відносно її поздовжньої осі (рис. 3б). За допомогою тривимірних траєкторій мічених частинок виявили у лунці вихровий рух, який нагадує вихровий джгут з сильно викривленою віссю обертання вздовж розмаху лунки. У центральній частині лунки вісь джгута вигинається угору, утворюючи петлю, та досягає верхнього перерізу лунки, а з боків заглиблюється до низу, симетрично з обох боків лунки. Таким чином у центральній частині дві ділянки вихрового джгута (сторони петлі) розташовані практично під прямим кутом до поверхні пластини. Це призводить, як відмічено у роботі [2], до утворення торнадо подібних вихорів під час нестійкості та розриву вихрових джгутів у лунці. Ця схема еволюції вихрових систем підтверджується чисельними розрахунками, представленими у роботі [7].

Під час турбулентного режиму обтікання ( $Re_x > 2 \cdot 10^5$ ) візуально було зафіксовано поперечні осциляції течії усередині напівсферичної лунки, як і в роботі [10] для глибокої лунки за відношенням глибини лунки до її діаметру  $h/d=0,26$ . Так, для швидкості потоку в гідродинамічному каналі  $U=0,4$  м/с ( $Re_d=4 \cdot 10^4$ ) візуально спостерігалися низькочастотні поперечні коливання усередині лунки з частотою порядку 0,07 Гц

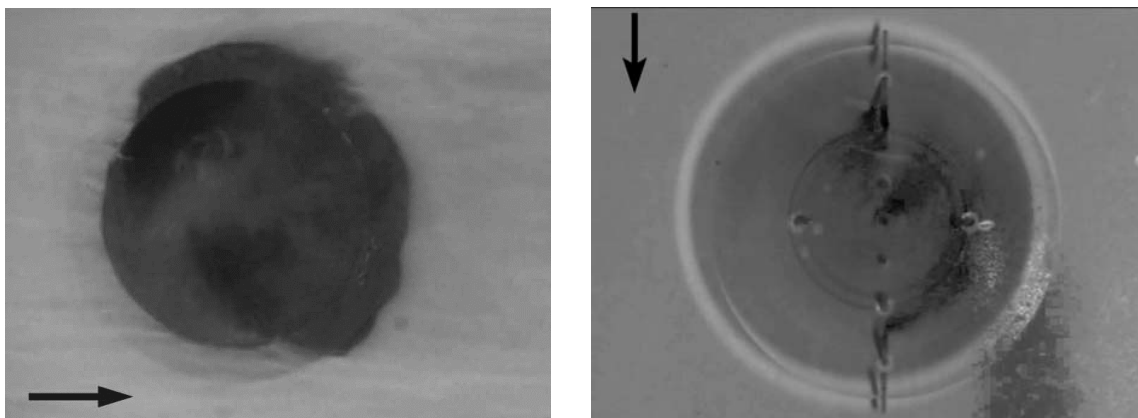


Рис. 4. Візуалізація вихрового руху в напівсферичній лунці та поблизу неї для турбулентного режиму течії

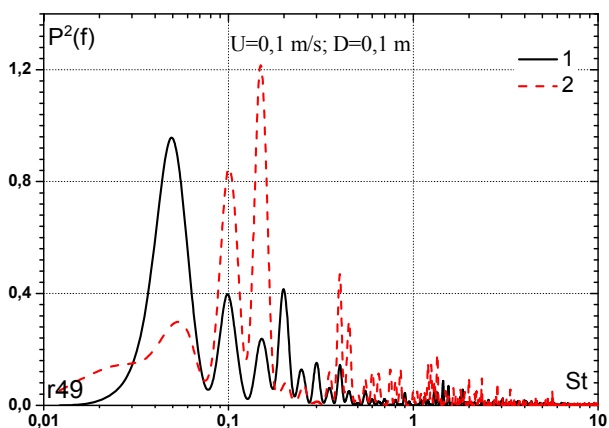


Рис. 5. Спектральні густини потужності пульсацій пристінного тиску на обтічній поверхні лунки

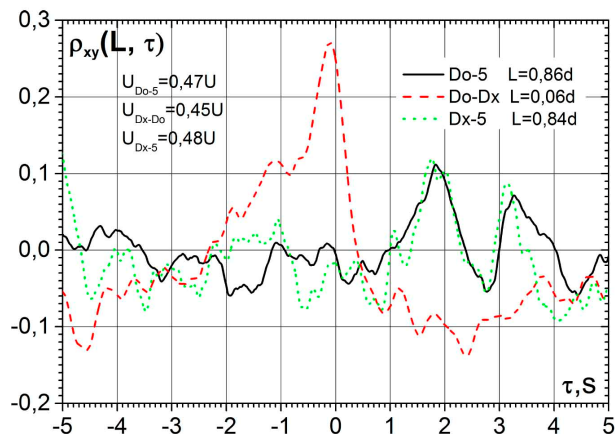


Рис. 6. Взаємні кореляції пульсацій швидкості та пристінного тиску для  $U=0,1$  м/с

( $St=fd/U=0,017$ ). На фоні цього низькочастотного коливання усередині напівсферичної лунки формуються вихрові системи у вигляді нахилених великомасштабних вихрових структур, розташованих під кутом приблизно  $45^\circ$  до потоку, що набігає [9, 11]. Як зазначено у роботах [9, 12], зі збільшенням швидкості кут нахилу асиметричного вихору збільшується. Так, наприклад, для числа Рейнольдса  $Re_d=6 \cdot 10^4$  кут нахилу досягав  $60^\circ$ . Джерело цих когерентних вихрових структур знаходиться на бічній стінці ближче до придонної передньої частини лунки, а викид їх назовні з лунки відбувається над протилежною бічною стінкою поблизу кормового краю лунки (рис. 4). Періодично ця вихрова структура викидається з лунки у вигляді смерчеподібного або торнадо подібного вихору, а потім знов формується нахилена вихрова система, але вже на протилежних стінках лунки і викид смерчеподібного вихору відмічається над іншим кормовим боком лунки. Формування асиметричних вихрових структур у вигляді великомасштабних нахилених смерчеподібних вихорів підкорюється перемикаючому або тригерному режимові. Частота викидів цих вихорів складає близько  $0,14$  Гц, що відповідає числу Струхала  $St \approx 0,035$ .

Загальними закономірностями результатів вимірювання інтегральних характеристик, отриманих для обтікання напівсферичної 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 з наближенням зсувного шару до кормової стінки лунки; по-третє, існування в придонній області лунки зворотної течії, яка зароджується у зоні взаємодії вихрових структур зсувного шару та кормової стінки напівсферичної 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 і криволінійною поверхнями [13, 14] у вигляді монотонно змінних спектрів у частотному та хвильовому діапазонах. Але в області низьких частот частотний спектр пульсацій швидкості та тиску над пластинною в безпосередній близькості до заглиблення має дещо вищі рівні, вказуючи на те, що поблизу заглиблення примежовий шар більшою мірою насичується великомасштабними низькочастотними вихровими системами [4]. 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.

Датчики пульсацій пристінного тиску, встановлені в області 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. Зі збільшенням 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 напівсферичного заглиблення, все більш виразно проявляється тривимірна мода осциляцій, якій властиво значення числа Струхала близько  $0,025$ , що узгоджується з результатами робіт [4, 6, 15]. На рис. 5 наведені спектральні залежності, які отримані під час обтікання пластини з локальним заглибленням потоком зі

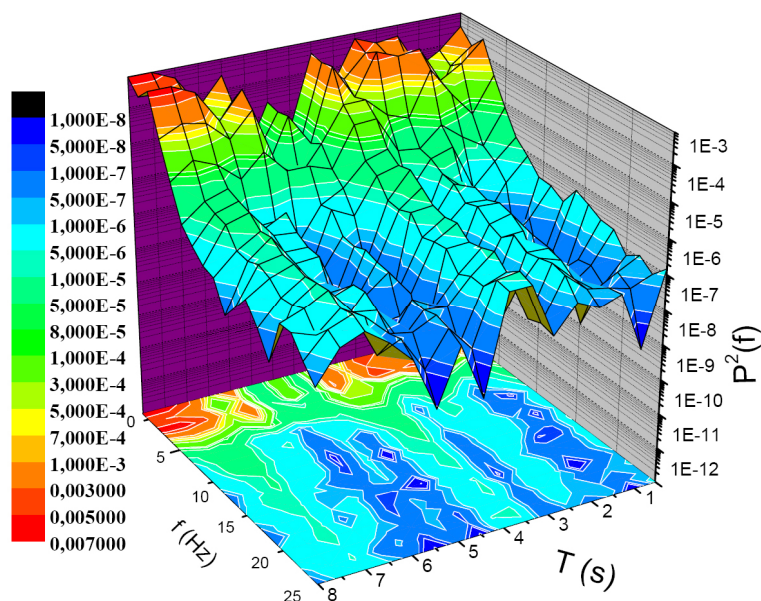
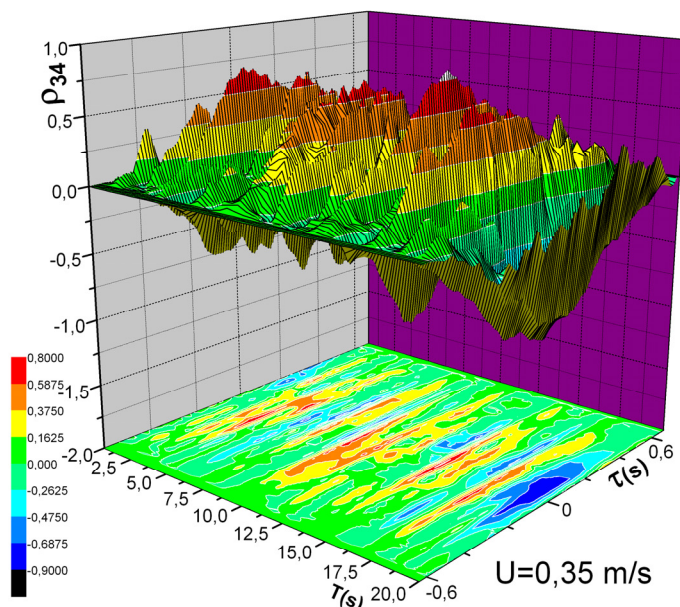


Рис. 7. Спектрограма пульсацій пристінного тиску на дні напівсферичної лунки для  $U=0,35$  м/с

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). Крива 2 відповідає вимірюванням на кормовій стінці лунки (датчик № 4). Для цього режиму обтікання числа Рейнольдса, обраховані по швидкості потоку та відстані від носка пластини до розташування лунки і по діаметру лунки складають  $Re_x=1 \cdot 10^5$  та  $Re_d=1 \cdot 10^4$  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 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 швидкості та тиску згідно до програми робіт експериментально досліджувались з використанням групи датчиків, які утворювали кореляційні блоки та розташовувались як усередині заглиблення, так і урівень з обтічною поверхнею пластини та напівсферичної лунки. У ході експериментальних досліджень вимірювалися кореляційні 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 [16]. Проходження вихрових структур повз вимірювальні датчики дозволило оцінити їх ступінь корельованості, 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.

Про корельованість полів пульсацій пристінного тиску та швидкості над обтічною поверхнею лунки можна судити за допомогою даних наведених на рис. 6 для коефіцієнта взаємної кореляції пульсацій швидкості та пристінного тиску. Слід зазначити, що на цьому графіку разом з взаємною кореляцією 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  $U=0,1$  м/с і чисел Рейнольдса  $Re_x=1 \cdot 10^5$  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 розташування термоанемометрів відповідно до рис. 2б 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). Крива 1 відображає залежність коефіцієнту взаємної кореляції пульсацій пристінного тиску, які виміряні датчиком пульсацій тиску № 5, та пульсацій повздовжньої швидкості, які виміряні двокомпонентним датчиком  $D_0$ . Залежність коефіцієнту взаємної кореляції повздовжніх компонент пульсацій швидкості наведена кривою 2. Крива 3 відображає залежність коефіцієнту взаємної кореляції пульсацій пристінного тиску, які виміряні датчиком пульсацій тиску № 5, та пульсацій повздовжньої швидкості, які виміряні двокомпонентним датчиком  $D_x$ . Коефіцієнт взаємної кореляції



**Рис. 8. Взаємна коррелограма пульсацій пристінного тиску на обтічній поверхні напівсферичного заглиблення для  $U=0,35$  м/с**

повздовжніх компонент пульсацій швидкості майже вдвічі більший, ніж коефіцієнт взаємної кореляції пульсацій тиску та швидкості [7, 16, 17]. Зокрема на рис. 6 представлено безрозмірні швидкості переносу коррельованого сигналу та відстані між датчиками. Установлено напрямок руху коррельованих сигналів: від нижнього датчика швидкості до верхнього та від датчиків швидкості до датчика пульсацій пристінного тиску, який знаходиться у верхній частині кормової стінки напівсферичної лунки. Швидкість переносу коррельованого сигналу між двома датчиками швидкості на (5–7)% нижча, ніж між датчиком пульсацій швидкості та датчиками пульсацій пристінного тиску.

Ступінь коррельованості пульсацій швидкості над обтічною поверхнею заглиблення та пульсацій пристінного тиску на його поверхні та напрямок переносу коррельованого сигналу дає можливість оцінити взаємозв'язок між полями швидкості та тиску в досліджуваному вихровому русі. Розташування датчиків пульсацій швидкості усередині зсувного шару, що формується під час обтікання напівсферичного заглиблення, і датчиків пульсацій пристінного тиску на кормовій стінці заглиблення показує, що вихрові структури зсувного шару переносяться із швидкістю близько 0,48 швидкості потоку. Це значення конвективної швидкості узгоджується із загальноприйнятими значеннями швидкості перенесення вихрових структур у зсувному шарі над отвором заглиблення [1, 4, 7].

Як показують численні теоретичні та експериментальні дослідження, вихрова течія усередині заглиблень і поблизу них є великою мірою нелінійним та нестійким процесом. Це проявляється у нестационарності фізичних явищ, які відбуваються в такого класу течіях, а також неоднорідності їх у просторі. Тому для досліджень їх використовують миттєві методи представлення розрахункових і експериментальних результатів, умовні статистичні методи, а також коротко часові спектральні характеристики, що дозволяють отримати спектрограми випадкових процесів [18]. У представлених дослідах запропоновано використовувати коротко часові спектральні та взаємні кореляційні функції. Це дозволяє розділити випадковий процес вихрового руху усередині заглиблення та поблизу нього на короткочасні реалізації, а згодом проаналізувати ці реалізації, припускаючи, що вони протягом часу аналізу ергодичні, та використовувати стандартні методи швидкого перетворення Фур'є [19, 20]. У результаті були отримані спектрограми та коррелограми, тобто залежності зміни у часі спектральних і кореляційних функцій, які використовуються для аналізу статистичних характеристик формування та розвитку вихрових структур, як у просторі, так і в часі.

Спектрограма або розвиток спектральної густини потужності пульсацій пристінного тиску в часі, виміряна на дні напівсферичної лунки для швидкості потоку  $U=0,35$  м/с і чисел Рейнольдса  $Re_x=3,5 \cdot 10^5$  та  $Re_d=3,5 \cdot 10^4$  показана на рис. 7. Максимуми спектральних залежностей на дні лунки спостерігаються на частоті викиду великомасштабної вихрової структури назовні з лунки, а також на частоті автоколивань вихрових структур зсувного шару (перша мода). Разом з цим, у часовій області спектру спостерігається чергування спектральних залежностей з періодом, який відповідає частоті низькочастотних коливань вихрової течії

усередині лунки, обумовлених тривимірністю останньої, а також частоті викидів великомасштабного когерентного асиметричного вихору назовні з лунки. Ці низькочастотні коливання, які модулюють весь осцилюючий вихровий рух усередині напівсферичної лунки, за умови збігу фаз призводять до істотних змін як низькочастотної, так і високочастотної області спектральних залежностей поля пульсацій тиску, що виразно видно на рис. 7.

Тривимірна коррелограма зміни коефіцієнта взаємної кореляції пульсацій пристінного тиску, виміряних на дні лунки та її кормовій стінці (датчики № 3 та № 4 на рис. 2) показана на рис. 8 для швидкості обтікання  $0,35 \text{ м/с}$  і чисел Рейнольдса  $Re_x=3,5 \cdot 10^5$  та  $Re_d=3,5 \cdot 10^4$ . Корреляційні залежності, представлені на цьому рисунку, мають періодичні у часі компоненти, що проявляється у смугастій структурі представлення коефіцієнтів взаємної кореляції на площині «частота – час». Ця періодичність обумовлена особливостями формування та розвитку вихрових структур усередині досліджуваного тривимірного заглиблення. Періодичність пов'язана з наявністю резонансних осциляцій усередині лунки. Слід зазначити, що через певні проміжки часу спостерігаються зміни кореляцій і антикорреляцій (коррельовані сигнали знаходяться у протифазі) пульсацій пристінного тиску, які виміряні двома датчиками. Період появи коррельованих або антикоррельованих сигналів вказує на наявність резонансних осциляцій, властивих вихровій течії у заглибленні. Зміна у часі максимальних значень коефіцієнта взаємної кореляції пульсацій пристінного тиску між фіксованими точками на поверхні напівсферичної лунки дає можливість судити про короточасні зміни напрямів і швидкостей перенесення вихрових структур усередині лунки, які генерують псевдозвукові пульсації тиску. Аналіз місць розташування максимумів коефіцієнта просторово-часової кореляції, показаних на рис. 8, дає можливість судити про інтенсивність, напрямок руху та робити кількісну оцінку зміни групової конвективної швидкості протягом формування та розвитку тискоутворюючих вихрових структур.

Розроблений і апробований метод аналізу нестационарних у часі та неоднорідних у просторі випадкових процесів, до класу яких відноситься вихровий рух усередині заглиблення, який має велику різноманітність просторово-часових масштабів, дозволяє на більш високому рівні вивчити особливості фізичних процесів течії у заглибленні. Використання картин візуалізація, які синхронізуються з інструментальними дослідженнями, дає можливість не лише виявити характерні особливості складних тривимірних вихрових течій, але й визначити їх кінематичні та динамічні характеристики. У наступних науково-дослідних роботах, які проводитимуться під час фізичного моделювання тривимірних вихрових течій, поза сумнівом, будуть використані отримані результати досліджень і напрацьовані програми та методики дослідження нестационарних і неоднорідних випадкових процесів.

### Висновки

На підставі отриманих експериментальних результатів з вивчення особливостей генерації та розвитку когерентних вихрових структур, які формуються усередині напівсферичної лунки, і просторово-часових характеристик полів пульсації швидкості та тиску, які вони утворюють як усередині заглиблення, так і в його ближньому сліді, можна зробити наступні висновки:

1. Установлено, що використання картин візуалізації, які синхронізуються з інструментальними дослідженнями, дає можливість не лише виявити характерні особливості складних тривимірних вихрових течій усередині та поблизу напівсферичної лунки, але й визначити їх кінематичні та динамічні характеристики.

2. Виявлено симетричні та асиметричні великомасштабні вихрові системи усередині лунки залежно від режиму течії та показано місцеположення і періодичність їх викиду назовні. Установлено, що у ближньому сліді лунки примежовий шар більшою мірою насичується великомасштабними низькочастотними вихровими системами, які викидаються назовні з напівсферичної лунки.

3. Показано, 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, слідовій моді та низькочастотній тривимірній моді осциляцій, яка модулює коливальний процес усередині напівсферичної лунки.

4. Проведені просторово-часові або взаємні кореляційні характеристики полів пульсацій швидкості та тиску дали змогу визначити напрямок руху та швидкості вихрових структур зсувного шару. Ступінь коррельованості пульсацій швидкості над обтічною поверхнею заглиблення та пульсацій пристінного тиску на його поверхні та напрямок переносу коррельованого 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.

5. Отримано 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.



## Гидродинамические характеристики вихревого движения внутри полусферической лунки

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

**Аннотация.** В работе представлены результаты экспериментальных исследований особенностей формирования вихревых структур внутри полусферической лунки на гидравлически гладкой плоской поверхности, поля скорости и давления, которые они генерируют. Эксперименты проводились в гидродинамической лотке посредством визуализации течения и измерения поля пульсаций скорости, динамического и пристеночного давления с помощью термоанемометров и миниатюрных пьезокерамических датчиков давления. Визуализация контрастными красителями и водорастворимыми покрытиями показала, что внутри лунки генерируются квазустойчивые крупномасштабные вихревые структуры и мелкомасштабные вихри, которые выбрасываются наружу из лунки. Особенности вихревого течения внутри лунки обуславливают появление дискретных подъемов в частотных и волновых спектрах скорости и давления на частотах низкочастотных колебаний вихревого течения, на частотах вращения и выброса крупномасштабной вихревой структуры и на частотах автоколебаний вихревых структур сдвигового слоя.

**Ключевые слова:** пространственно-временные характеристики; взаимный спектр и корреляция; когерентная вихревая структура; полусферическая лунка; пульсации скорости и давления

## Hydrodynamic characteristics of vortex motion inside the hemispherical dimple

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

**Abstract.** Experimental researches of the features of the generation and evolution mechanism of coherent vortex structures, which are formed inside the hemispherical cavity, and space-time characteristics of the fields of velocity and pressure fluctuations that they create, both within the cavity, and in its wake, were conducted. Experiments were carried out in hydrodynamic flume on the hydraulically smooth plate with hemispherical dimple. The symmetric and asymmetric large-scale vortical systems inside a dimple are found out depending on the flow regime, and location and periodicity of their ejections are shown. The evolution of tornado-like vortices subjected to a switch mechanism that is result in appearance of low-frequency modulating transversal oscillations of vortex motion inside the hemispherical dimple. The fields of velocity, dynamic and wall pressure fluctuations by a group of hot-films, miniature piezoelectric sensors of pressure fluctuations are studied. Space-time correlations of velocity and pressure fluctuations, which generate the coherent large-scale vortex structures, the circulation flow and the vortex structure of the shear layer, which are formed inside the hemispherical dimple and ejected out into the boundary layer, are obtained. It was determined that the largest values of the coefficient of the space-time correlations of the wall pressure fluctuations observed on the aft and side walls of the hemispherical dimple, and the lowest – in its forward bottom part. It was established that the cross-correlations of the longitudinal velocity fluctuations are higher than the cross-correlations of the velocity and wall pressure fluctuations, and the cross-correlations of the dynamic and wall pressure fluctuations. On the basis of short-time spectrum and correlation analyses, the non-stationary in time and non-uniform in space characteristics of the coherent vortical systems inside and past the open dimple have been found. Temporal periodicity of cross-correlation characteristics of the wall pressure fluctuations between two sensors, located on the fixed distance corresponds to frequencies of the shear and wake modes of resonance oscillations in the dimple. Registration of the time lag, at which the cross-correlation or anticorrelation has maximum, enables to determine the group convective velocity of the coherent vortical structures during their formation and evolution, as well as the phase of development and direction of vortex motion inside the dimple.

**Keywords:** space-time characteristics; cross spectrum and correlation; coherent vortex structure; hemispherical dimple; velocity and pressure fluctuations

### References

1. 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.
2. Kiknadze G.I. Self-organization of tornado-like jets in flows of gases and liquids and the technologies utilizing this phenomenon / G.I. Kiknadze, I.A. Gachechiladze, A.Yu. Gorodkov // ASME 2009 Heat Transfer Summer Conference HT2009 : proc. conf. – San Francisco, California, USA, 2009. – HT2009-88644. – P. 1–14.

3. Isaev S.A. Influence of the Reynolds number and the spherical dimple depth on turbulent heat transfer and hydraulic loss in a narrow channel / S.A. Isaev, N.V. Kornev, A.I. Leontiev, E. Hassel // *Int. J. Heat Mass Transfer*. – 2010. – 53. – P. 178–197.
4. Kovalenko G.V. Flow regimes in a single dimple on the channel surface / G.V. Kovalenko, V.I. Terekhov, A.A. Khalatov // *J. Appl. Mech. Techn. Physics*. – 2010. – 51, № 6. – P. 839–848.
5. Charwat A.F. An investigation of separated flows – Part II Flow in the cavity and heat transfer / A.F. Charwat, J.N. Roos, C.F. Dewey, J.A. Hiltz // *J. Aerospace Sci.* – 1961. – 28, № 6, – P. 457–470.
6. 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. – Том 16, № 4. – С. 17–27.
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. 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.
9. 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, № 2. – P. 86 – 99.
10. Терехов В.И. Экспериментальное исследование развития течения в канале с полусферической каверной / В.И. Терехов, С.В. Калинина, Ю.М. Мшвидобадзе // *Сиб. физ.-тех. журнал*. – 1992. – № 1. – С. 77–85.
11. Abo Amsha K. Computational modelling of the flow and heat transfer in dimpled channels / K. Abo Amsha, T.J. Craft, H. Iacovides // *Aeronautical journal*. – 2017. – Vol. 121, Issue 1242. – P. 1066–1086.
12. Воскобойник А.В. Бифуркация вихревого течения внутри сферической лунки в узком канале / А.В. Воскобойник, В.А. Воскобойник, С.А. Исаев [та інші] // *Прикладна гідромеханіка*. – 2011. – Т. 13, № 4. – С. 3–21.
13. 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. – 13, № 3. – P. 692–701.
14. Voskoboinick V.A. Spectral characteristics of the hydrodynamical noise in a longitudinal flow around a flexible cylinder / V.A. Voskoboinick, A.P. Makarenkov // *Intern. J. Fluid Mech.* – 2004. – 31, № 1. – P. 87–100.
15. Bres G.A. Three-dimensional instabilities in compressible flow over open cavities / G.A. Bres, T. Colonius // *J. Fluid Mech.* – 2008. – 599. – P. 309–339.
16. Воскобойник В.А. Просторово-часові кореляції пульсацій швидкості й тиску всередині півсферичного заглиблення / В.А. Воскобойник // *Акустичний вісник*. – 2015. – 17, № 3. – С. 3–12.
17. Voskoboinick A.V. Cross correlations between velocity and pressure fluctuations in the open cavity flow / A.V. Voskoboinick, G.A. Voropaev, A.A. Voskoboinick, V.A. Voskoboinick // *EFMC7 : 7th EUROMECH Fluid Mechanics Conf. : Abstract, 14-18 Sept. 2008.* – Manchester, UK, 2008. – P. 356.
18. Basley J. Experimental investigation of global structures in an incompressible cavity flow using time-resolved PIV / J. Basley, L.R. Pastur, F. Lusseyran [et al] // *Exp Fluids*. – 2011. – Vol. 50. – P. 905–918.
19. Бендат Дж. Измерение и анализ случайных процессов : Пер. с англ. / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М. : Мир, 1974. – 464 с.
20. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения : Пер. с англ. / С.Л. Марпл-мл. – М. : Мир, 1990. – 584 с.