

# ПРОСТОРОВО-ЧАСОВІ КОРЕЛЯЦІЇ ПУЛЬСАЦІЙ ШВИДКОСТІ Й ТИСКУ ВСЕРЕДИНИ ПІВСФЕРИЧНОГО ЗАГЛИБЛЕННЯ

В. А. ВОСКОБІЙНИК

Інститут гідромеханіки НАН України, Київ  
вул. Желябова, 8/4, 03680, МСП, Київ-180, Україна  
E-mail: vlad.vsk@gmail.com

Одержано 07.05.2015

Проведено експериментальні дослідження щодо визначення особливостей механізму зародження та еволюції когерентних вихрових структур, які формуються усередині півсферичного заглиблення, і просторово-часових характеристик полів пульсацій швидкості й тиску, генерованих усередині заглиблення і в його сліді. Експерименти проведено в гідродинамічному лотку на гідравлічно гладкій пластині з півсферичною лункою. Поля пульсацій швидкості, динамічного та пристінного тиску досліджено за допомогою групи плівкових термоанемометрів і мініатюрних п'єзокерамічних датчиків пульсацій тиску. Отримано просторово-часові кореляції пульсацій швидкості й тиску, генерованих когерентними великомасштабними вихровими структурами, циркуляційною течією та вихровими структурами зсувного шару, які формувались усередині півсферичної лунки та викидалися назовні у прилеглий шар. Найбільші значення коефіцієнтів просторово-часової кореляції пульсацій пристінного тиску спостерігались на кормовій і бічній стінках півсферичної лунки, а найменші – у її придонній частині. Встановлено, що взаємні кореляції пульсацій позадвожньої швидкості перевищують величини взаємних кореляцій пульсацій швидкості й пристінного тиску, а також пульсацій динамічного й пристінного тиску.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** просторово-часова кореляція, когерентна вихрова структура, півсферична лунка, пульсації швидкості й тиску

Проведены экспериментальные исследования по определению особенностей механизма зарождения и эволюции когерентных вихровых структур, которые формируются внутри полусферического углубления, и пространственно-временных характеристик полей пульсаций скорости и давления, генерируемых внутри углубления и в его следе. Эксперименты проведены в гидродинамическом лотке на гидравлически гладкой пластине с полусферической лункой. Поля пульсаций скорости, динамического и пристеночного давления исследованы с помощью группы пленочных термоанемометров и миниатюрных пьезокерамических датчиков пульсаций давления. Получены пространственно-временные корреляции пульсаций скорости и давления, генерируемых когерентными крупномасштабными вихревыми структурами, циркуляционным течением и вихревыми структурами сдвигового слоя, которые формировались внутри полусферической лунки и выбрасывались наружу в пограничный слой. Наибольшие значения коэффициентов пространственно-временной корреляции пульсаций пристеночного давления наблюдались на кормовой и боковой стенках полусферической лунки, а наименьшие – в ее придонной части. Установлено, что взаимные корреляции пульсаций продольной скорости превышают величины взаимных корреляций пульсаций скорости и пристеночного давления, а также пульсаций динамического и пристеночного давления.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** пространственно-временная корреляция, когерентная вихревая структура, полусферическая лунка, пульсации скорости и давления

The specific features of mechanism of emergence and evolution of the coherent vortex structures forming inside the hemispherical cavity are experimentally studied along with the space-time characteristics of the velocity and pressure fluctuations fields generated inside the cavity and in its wake. The experiments are carried out in a hydrodynamic tray upon the hydraulically smooth plate with a hemispherical dimple. The fields of the velocity, dynamic and wall pressure fluctuations were recorded by a group of the hot-film thermoanemometers and miniature piezoelectric sensors of pressure fluctuations. The space-time correlations are obtained for the velocity and pressure fluctuations generated by the coherent large-scale vortex structures, circulation flow and vortex structure of the shear layer, which were formed inside the hemispherical dimple and ejected out into the boundary layer. The largest values of the space-time correlation coefficient for wall pressure fluctuations were observed on the aft and side walls of the hemispherical dimple, while the lowest ones occurred in its bottom part. The cross-correlations of the longitudinal velocity fluctuations were found to be higher than cross-correlations of the velocity and wall pressure fluctuations or those of the dynamic and wall pressure fluctuations.

**KEY WORDS:** space-time correlation, coherent vortex structure, hemispherical dimple, velocity and pressure fluctuations

## ВСТУП

Паливно-енергетична криза змусила розвинені індустріальні країни світу використовувати новітні технології для збереження й раціонального використання енергоресурсів. Зокрема, це стало стимулом для розширення застосування в гідродинаміці й теплоенергетиці лункових рельєфів при об-

тіканні різноманітних поверхонь конструкцій чи апаратів. Як наслідок, науковий інтерес до поверхневих заглиблень (лунок) значно зріс за останні кілька десятиріч [1–3]. Такі об'єкти мають унікальні гідродинамічні властивості, що виражається у зменненні гідравлічних витрат, виникненні флуктуючого вихору в сферичному заглибленні та стійких вихрових структур в асиметричних

лунках, перевищенні теплообміну над гідравлічними витратами та ін. Перераховані особливості можуть бути корисними для застосування в ядерній енергетиці, теплообмінних системах, газотурбінних установках транспортних засобах [4–6]. Аналіз попередніх робіт у цій галузі показує, що нестационарні властивості вихрових структур, які виникають в заглибленнях різної форми наразі вивчені далеко не до кінця. Загалом такі дослідження обмежувались визначенням частоти флуктуацій вихрової структури та усереднених чи інтегральних швидкості та температури. Тому вивчення нестационарних характеристик потоку – просторово-часових параметрів когерентних структур, полів швидкості й тиску на плоскій жорсткій поверхні з неоднорідністю у вигляді лунки є доволі актуальною науково-прикладною проблемою.

Вихрова взаємодія між профільованою поверхнею та потоком, що її обтікає, належить до розряду вкрай складних аеродинамічних явищ. Варто зазначити, що, оскільки різноманітні представники плаваючих та пернатих істот мають регулярно профільовані покрови шкіри, згадана проблематика ґрунтується, зокрема, на здавна відомих, але досі не вивчених досконало гідробіонічних принципах упорядкування пристінного вихроутворення [7–9]. Відомо досить багато вдалих експериментальних спроб відтворення ефекту зменшення тертя за рахунок профільовання поверхонь, у ході яких було продемонстровано певну універсальність механізмів, що відповідають за регуляризацию вихроутворення [10–12]. Водночас з'ясувалося, що спроби впровадження цієї технології на реальних технічних об'єктах (перш за все, на транспортних засобах) виявляються зазвичай неефективними або обмежуються дуже вузькими діапазонами геометричних характеристик профільовання й режимних параметрів обтікання. Так само, за необхідності інтенсифікації теплообмінних процесів через профільовану обтічну поверхню виникає проблема знаходження компромісу між покращенням теплообміну і збільшенням гідродинамічного тертя.

Утворення штучних когерентних структур заданої інтенсивності, форми й розмірів у лункових генераторах вихорів змінює структуру прилежових шарів і самої течії, що забезпечує підвищення якості обтічних поверхонь. Незважаючи на велику кількість існуючих теоретичних і експериментальних досліджень вихрової течії усередині локальних заглиблень [13–15], досі немає єдиної точки зору на механізм генерації вихорів та супутні зміни структури турбулентності, обумовленої дією вихрових структур, які викидаються

з лунок назовні. Це пов'язано зі складністю явища, що вивчається, великою кількістю визначальних параметрів і відсутністю достатньо повної теорії пристінної та відривної турбулентності. Тому залишаються відкритими питання щодо визначення просторово-часових характеристик когерентних структур, полів швидкості й тиску у лункових генераторах вихорів для різних режимів течії за допомогою чисельного та фізичного моделювання з високою точністю, швидкодією та просторовим розділенням.

Можливість доведення технологій профільовання поверхонь до практичного використання потребує глибинного розуміння процесів вихроутворення всередині й поблизу неоднорідностей рельєфу. Малі розміри останніх і, відповідно, дрібні масштаби генерованих вихрових структур суттєво ускладнюють проведення експериментальних досліджень. Зауважимо, що, хоча технічні пристрої, побудовані з використанням регулярної системи шорсткості у вигляді поверхневих лунок, зазвичай виявляються більш економічними з енергетичної точки зору, ніж їхні аналоги з гладкими обтічними поверхнями [16, 17], проте не в усіх випадках ефекти вихроутворення й відриву досягаються на різних режимах обтікання. Таким чином, вивчення процесів вихроутворення на лункових поверхнях, особливостей відриву вихорів та їхній вплив на розвиток прилежового шару слід безсумнівно визнати актуальним напрямком досліджень, а одержані при цьому результати мають широку перспективу практичного застосування.

Враховуючи сказане, метою цієї роботи було визначення особливостей механізму генерації та еволюції когерентних вихрових структур, які формуються всередині півсферичного заглиблення, і просторово-часових характеристик полів пульсацій швидкості й тиску, утворених при цьому всередині заглиблення і в його сліді.

## 1. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження проводилося в гідродинамічному лотку з відкритою поверхнею води, швидкість і глибина потоку в якому регулювалися за допомогою відповідних пристроїв і механізмів. Лоток мав довжину 16 м, ширину 1 м і глибину 0.8 м. Для забезпечення можливості візуального спостереження стінки лотка були зроблені скляними. Вода у лоток подавалася насосами через заспокійливу камеру, з якої потік рідини поступав на вхід лотка через конфузори відсік, хонейкомби та сітки, які спрямляли й турбулізували течію. На від-



Рис. 1. Розташування півсферичної лунки на вимірювальній пластині (а) та їхнє місце знаходження у гідродинамічному лотку (б)

стані 8 м від входу лотка розташовувалась вимірювальна ділянка, обладнана пристроями для фіксації досліджуваної моделі, координатними конструкціями, засобами реєстрації характеристик течії. Координатні пристрої дозволяли пересувати датчики у поздовжньому напрямку за течією з кроком  $10^{-4}$  м, в азимутальному –  $5 \cdot 10^{-5}$  м, а у вертикальному (нормальному до обтічної поверхні вимірювальної пластини) –  $10^{-5}$  м.

Пластина довжиною 2.2 м й шириною 0.5 м з гідравлічно гладкою поверхнею та локальною неоднорідністю у вигляді півсферичної лунки (рис. 1, а) була закріплена паралельно напрямку потоку на відстані 0.1 м над дном вимірювальної ділянки гідравлічного лотка (рис. 1, б). Лунка діаметром  $d=0.1$  м знаходилась на поздовжній вісі пластини на відстані 1 м від її переднього краю. Для забезпечення безвідривного обтікання передній і кормовий край вимірювальної пластини було загострено. Під час проведення досліджень глибина потоку над пластиною становила 0.4 м, а швидкість течії  $U$  змінювалась від 0.1 до 0.4 м/с. Їй відповідали такі числа Рейнольдса, розраховані за відстанню від переднього краю пластини до місця розташування лунки  $X$  і за діаметром лунки  $d$ :  $Re_X = UX/\nu = (1 \dots 4) \cdot 10^5$  і  $Re_d = Ud/\nu = (1 \dots 4) \cdot 10^4$  відповідно. Тут  $\nu$  – кінематичний коефіцієнт в'язкості води.

Під час вимірювань просторово-часових характеристик полів пульсацій швидкості й тиску використовувались плівкові термоанемометри та п'єзокерамічні датчики пульсацій динамічного та пристінного тиску. Одно- й двокомпонентні плівкові термоанемометри фірми *Disa*, які знаходи-

Таблиця. Координати датчиків пульсацій пристінного тиску на обтічній поверхні півсферичної лунки та поблизу неї

№ датчика	$x/d$	$y/d$	$z/d$
1	-0.58	0	0
2	-0.49	-0.05	0
3	0	-0.50	0
4	0.30	-0.36	0
5	0.48	-0.08	0
6	0.58	0	0
7	0	-0.25	0.38
8	0.18	-0.25	0.35

лись у кореляційному блоці, розташовувались над обтічною поверхнею пластини та лунки (рис. 2, а). Група датчиків пульсацій пристінного тиску розташовувалась у рівень з обтічною поверхнею лунки та пластини як показано на рис. 2 (див. також таблицю). Датчики швидкісного напору або динамічного тиску разом з термоанемометрами знаходились у кореляційному блоці й розташовувались над обтічною поверхнею пластини та лунки (рис. 2, б).

Реєстрація пульсацій динамічного й пристінного тиску проводилася за допомогою спеціально розроблених і виготовлених мініатюрних п'єзокерамічних датчиків пульсацій тиску стрижневого типу з діаметром чутливої поверхні 1.3 мм, які відрізнялись підвищеним просторовим розділенням і швидкодією [18, 19]. Для того, щоб забезпечити вимірювання динамічного тиску, чутлива поверхня

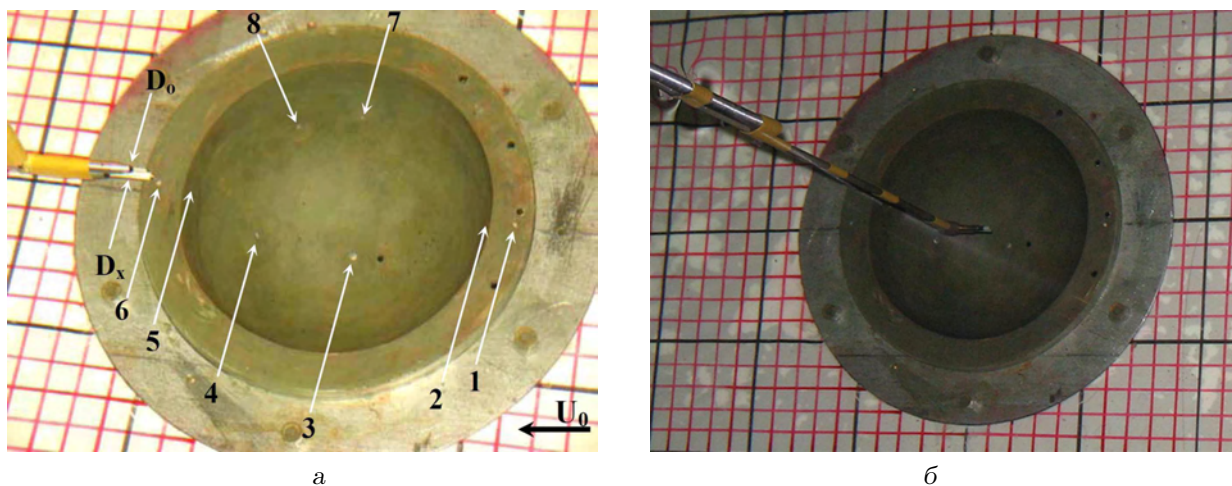


Рис. 2. Розташування плівкових термоанемометрів (а), датчиків динамічного тиску (б) над обтічною поверхнею і датчиків пристінного тиску на поверхні лунки та в її околі

датчиків пульсацій тиску в кореляційному блоці за допомогою добре обтічної державки та координатного пристрою розташовувалась назустріч потоку.

Електричні сигнали від термоанемометрів поступали на комплект апаратури фірми *Disa*, який забезпечував роботу датчиків у режимі сталої температури. Сигнали датчиків пульсацій тиску підсилювались і фільтрувались відповідною апаратурою, а потім разом із сигналами від термоанемометрів подавались на восьми- або шістнадцятиканальні аналого-цифрові перетворювачі, під'єднані до персональних комп'ютерів.

Під час проведення експериментальних досліджень використовувались стандартні й спеціально виготовлені засоби вимірювання фізичних величин. Стандартні (заводські) перетворювачі мали технічні паспорти, а для спеціально виготовлених перетворювачів у метрологічних лабораторіях та на калібрувальних стендах було проведено градування й калібрування абсолютними та відносними методами. Під час дослідів проводились реєстрація і контроль акустичних, вібраційних і електромагнітних завад. Ці результати використовувались під час обробки і аналізу експериментальних даних.

У більшості досліджень когерентних вихрових структур [20–22], у яких використовуються перетворювачі й датчики різних типів, застосовуються групи (ансамблі) мініатюрних високочувливих датчиків, розташовані певним чином у просторі над обтічною поверхнею та безпосередньо на ній. При цьому принциповим є урахування довжини чи діаметра чутливого елемента і його швидко-

дії, необхідних для того, щоб зареєструвати найменші масштаби вихрових структур і високочастотні пульсації вимірюваних параметрів пристінної течії. Окрім того, важливо застосовувати такий інструментарій, який зводив би до мінімуму порушення структури досліджуваних течій. Цим вимогам відповідають датчики, які розташовуються урівень з обтічною поверхнею, не збурюють потік і не порушують його структури. Серед них, зокрема, можна назвати датчики зсувних напружень і пристінного тиску.

Для реєстрації чотирирівимірної (у просторі та часі) структури організованих турбулентних рухів і оцінки їхнього кількісного внеску в загальні статистичні властивості течії широко застосовуються методи статистичного аналізу [23–25]. Використання ансамблів датчиків, згрупованих у кореляційні блоки, і статистичних методів обробки й аналізу експериментальних даних дозволяє визначити кінематичні та динамічні характеристики джерел пульсацій швидкості й тиску. Властивості отриманих при цьому функцій просторово-часових або взаємних кореляцій дають можливість адекватно оцінити масштаби джерел, які генерують пульсаційні поля, їхній напрямок руху та швидкості переносу, час життя і ступінь виродження у просторі та часі.

Просторово-часові кореляції полів пульсацій швидкості та тиску досліджувались групами датчиків, які формували кореляційні блоки та розташовувались над обтічною поверхнею й урівень з нею на пластині та всередині лунки. Під час проведення експериментальних досліджень розраховувались взаємні кореляції між парами одинмен-

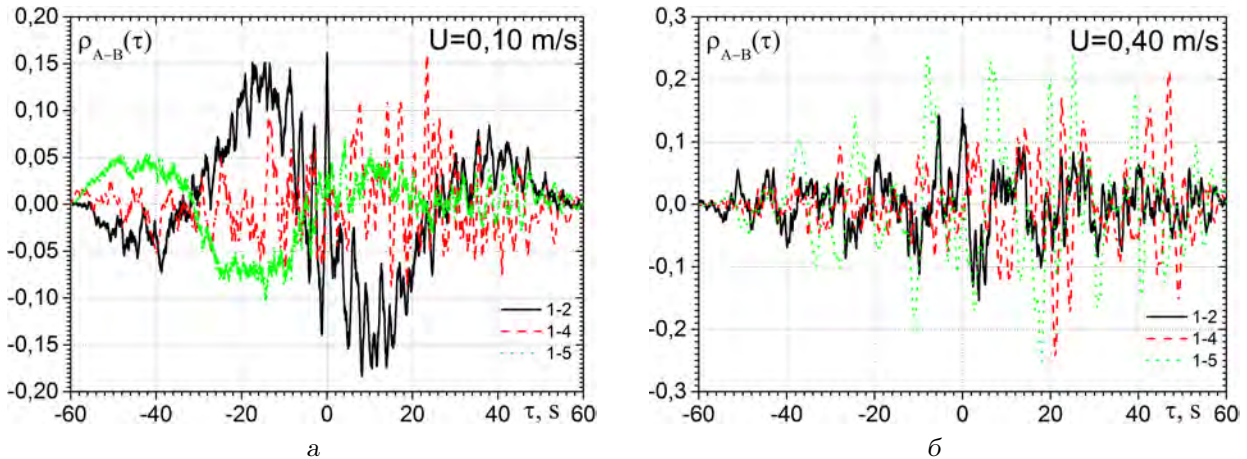


Рис. 3. Просторово-часові кореляції пульсацій пристінного тиску на поверхні пластини та лунки:  
а –  $Re_d = 10000$ ; б –  $Re_d = 40000$

них і відмінних за конструкцією та вимірюваними параметрами датчиків [23, 26]:

$$R_{12}(\vec{x}, \vec{\xi}, \tau) = \overline{u_1(\vec{x}, t) u_2(\vec{x} + \vec{\xi}, t + \tau)}, \quad (1)$$

Тут  $R_{12}(\vec{x}, \vec{\xi}, \tau)$  – просторово-часова кореляція між випадковими змінними  $u_1(\vec{x}, t)$  і  $u_2(\vec{x} + \vec{\xi}, t + \tau)$ , зареєстрованими у точках 1 та 2;  $\vec{x}$  – вектор просторових координат точки 1;  $t$  – час вимірювання;  $\vec{\xi}$  – просторове розділення;  $\tau$  – час затримки. Характер взаємних кореляцій дозволив визначити характерні особливості просторово-часової еволюції вихрового руху всередині лунки та поблизу неї. Але кореляція як міра статистичного зв'язку залежить від амплітуд вимірюваних величин. Цей недолік відсутній у коефіцієнта взаємної кореляції, який представляє собою кореляційний момент, віднесений до добутку стандартних відхилень пульсацій випадкових змінних. Нормовані взаємні кореляції у вигляді коефіцієнтів взаємної або просторово-часової кореляції розраховувались як

$$\rho_{12}(\vec{\xi}, \tau) = \frac{\overline{u_1(\vec{x}, t) u_2(\vec{x} + \vec{\xi}, t + \tau)}}{\sigma_1(\vec{x}, t) \sigma_2(\vec{x} + \vec{\xi}, t + \tau)}, \quad (2)$$

де за стандартне відхилення бралось додатне значення кореня квадратного від дисперсії випадкової величини

$$\sigma^2(\vec{x}, t) = \lim \frac{1}{T} \int_0^\infty [u(\vec{x}, t) - \mu(\vec{x}, t)]^2 dt, \quad (3)$$

а середні значення (математичні сподівання) визначалися за формулою

$$\mu(\vec{x}, t) = \lim \frac{1}{T} \int_0^\infty u(\vec{x}, t) dt. \quad (4)$$

Експериментальні дослідження проводилися з досить високим ступенем достовірності й повторюваності результатів, що дозволило проводити статистичний аналіз отриманих даних, які реєструвалися на протязі однієї хвилини у кожному вимірюванні. Рівні акустичного випромінювання в місці розташування заглиблення становили не більше 90 дБ відносно  $2 \cdot 10^{-5}$  Па у діапазоні частот (від 20 до 20000 Гц), а рівні вібрацій вимірювальної ділянки гідродинамічного лотка, досліджуваної пластини та координатних пристроїв не перевищували –55 дБ відносно  $g$  у частотному діапазоні від 2 Гц до 12,5 кГц. Похибка вимірювань усереднених чи інтегральних величин не перевищувала 10 % з надійністю 95 %, а кореляційних залежностей полів швидкості та тиску –  $\leq 12\%$  з довірчою ймовірністю 0.95 або  $2\sigma$ .

## 2. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Розраховані на основі залежності (2) коефіцієнти просторово-часових кореляцій між парами датчиків пульсацій пристінного тиску, розташованих на обтічній поверхні перед лункою та всередині неї, для швидкості течії 0.1 м/с, чисел Рейнольдса  $Re_x = 100000$  та  $Re_d = 10000$  представлені на рис. 3, а і для швидкості 0.4 м/с, чисел Рейнольдса  $Re_x = 400000$  та  $Re_d = 40000$  – на рис. 3, б. Тут і далі на графіках взаємних кореляційних залежностей пульсацій тиску на обтічній поверхні пластини й лунки номери кривих співпадають з номерами датчиків, вказаних на рис. 2. Встановлено, що між датчиками, розташованими перед лункою, і датчиками, що знаходяться на її поверхні, спостерігаються корельовані сигнали, які

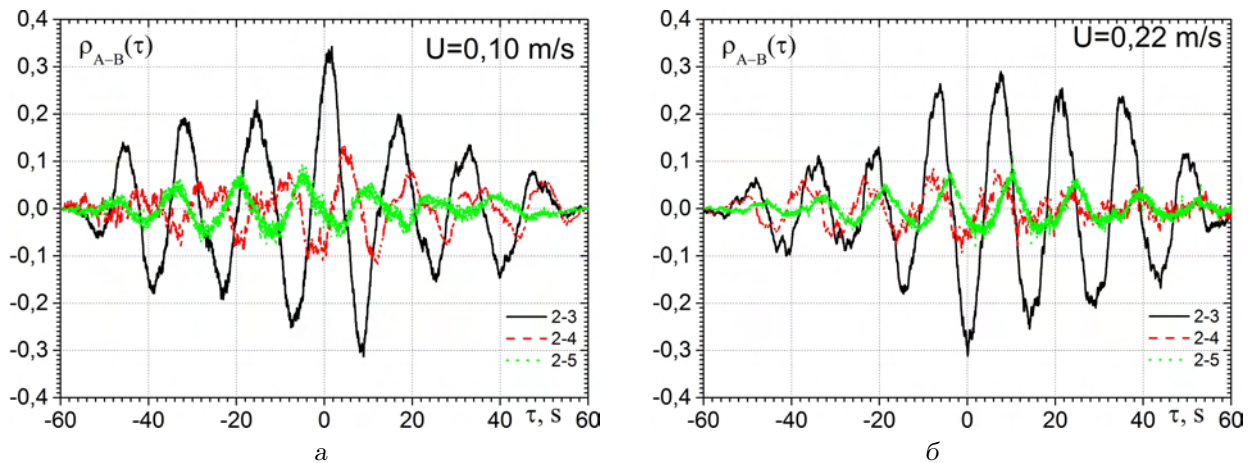


Рис. 4. Просторово-часові кореляції пульсацій пристінного тиску на обтічній поверхні лунки:  
а –  $Re_d = 10000$ ; б –  $Re_d = 22000$

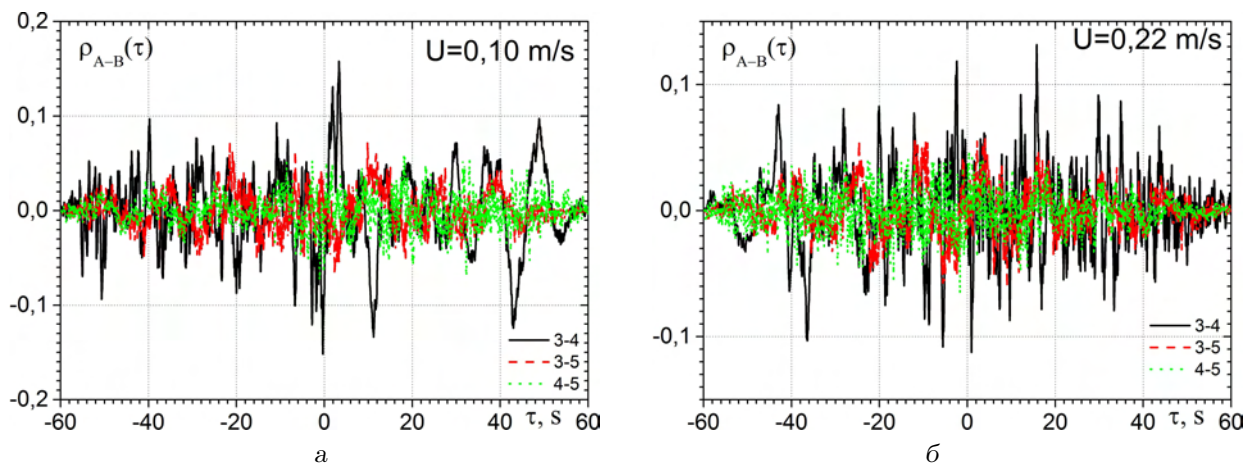


Рис. 5. Просторово-часові кореляції пульсацій пристінного тиску на кормовій стінці напівсферичної лунки:  
а –  $Re_d = 10000$ ; б –  $Re_d = 22000$

змінюються з низькою та високою частотою. При цьому рівні взаємних кореляцій невисокі. Низькочастотні осциляції корельованих сигналів відбуваються з частотою, для якої число Струхаля  $St = fd/U \approx 0.02$ , а високочастотні осциляції – для  $St \approx 0.4$ . Зі збільшенням швидкості течії до  $0.4 \text{ м/с}$  ( $Re_d = 40000$ ) корельованість пульсацій пристінного тиску зростає, особливо між вимірювальними точками, розташованими перед лункою та на її кормовій стінці (див. рис. 3, б). Паралельно з цим зростають і частоти осциляцій корельованих сигналів, для яких числа Струхаля складають близько  $0.02$ ,  $0.05$ ,  $0.2$  і  $0.4$ . Ці значення  $St$  відповідають частоті коливань рідини усередині лунки, частоті викидів великомасштабних вихрових систем, частоті обертання циркуляційної течії та

частоті викидів дрібномасштабних вихрових структур зсувного шару назовні з півсферичної лунки у приміжовий шар [27–29].

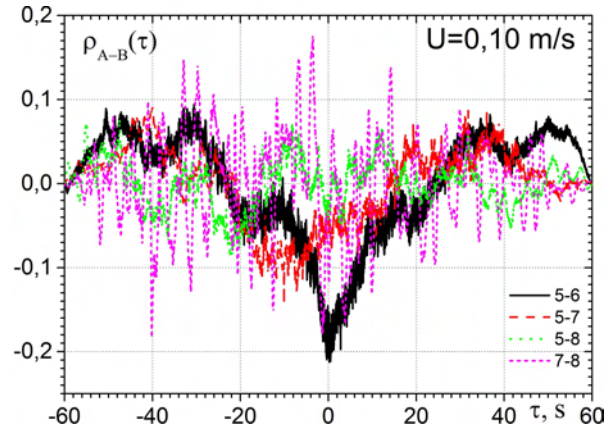
Залежності від  $\tau$  взаємних кореляцій пульсацій пристінного тиску, виміряних на передній та кормовій стінках лунки, показані на рис. 4. У середині півсферичної лунки явно прослідковуються періодичні коливання з частотою ( $0.06 \dots 0.08$ ) Гц, для якої число Струхаля має значення ( $0.04 \dots 0.06$ ). Водночас найбільш корельовані сигнали вздовж отвору лунки у зсувному шарі переносяться зі швидкостями  $(0.4 \dots 0.5)U$ .

У придонній частині лунки та на її кормовій стінці для просторово-часових кореляцій, окрім частоти викидів великомасштабних вихрових систем з лунки назовні, спостерігаються також висо-

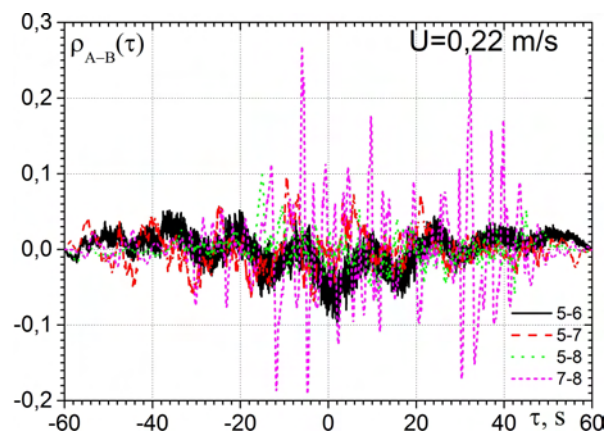
кочастотні осциляції (див. рис. 5). Вони обумовлені значною корельованістю дрібномасштабної вихрової течії, яка генерується під час взаємодії вихрових структур зсувного шару з кормовою стінкою ( $St \approx 0.4$ ). Переміщення сигналів, корельованих між кормовою стінкою (датчик № 5) і, наприклад, дном лунки (датчик № 3), спостерігається зі швидкостями  $0.15U$  для  $Re_d = 10000$  і  $0.21U$  для  $Re_d = 22000$ . Рух корельованого сигналу вихрової течії направлено від кормової стінки до дна лунки.

Залежності коефіцієнтів просторово-часової кореляції на бічній стороні лунки та в її ближньому сліді від швидкості течії або числа Рейнольдса представлені на рис. 6. Як відзначалося раніше, зі збільшенням числа Рейнольдса корельованість пульсацій пристінного тиску зростає, особливо в області взаємодії вихрових структур з кормовою та бічною стінками лунки. Це проілюстровано кривими 5-7, 5-8 і 7-8 на рис. 6, а, б та в.

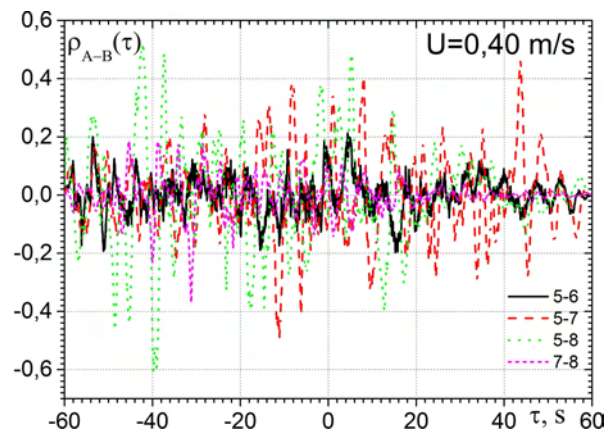
На рис. 7 наведені взаємні кореляції між парами датчиків пульсацій пристінного тиску вздовж серединного перерізу лунки для різних швидкостей обтікання пластини з півсферичним заглибленням. Крива 1 відповідає парі датчиків № 3 і № 4 та режиму обтікання  $U = 0.1$  м/с ( $Re_x = 1 \cdot 10^5$  і  $Re_d = 1 \cdot 10^4$ ); крива 2 отримана для тієї ж пари датчиків, в режимі обтікання  $U = 0.35$  м/с ( $Re_x = 3.5 \cdot 10^5$  і  $Re_d = 3.5 \cdot 10^4$ ), а крива 3 – для пари датчиків № 2 і № 4 при  $U = 0.35$  м/с ( $Re_x = 3.5 \cdot 10^5$  і  $Re_d = 3.5 \cdot 10^4$ ). При цьому відстань між датчиками вздовж поверхні заглиблення була  $L_{3-4} = 0.33d$  для датчиків № 3 і № 4 та  $L_{2-4} = 0.99d$  для датчиків № 2 і № 4. Із графіку видно, що збільшення швидкості обтікання пластини з локальним заглибленням обумовлює зростання корельованості пульсацій пристінного тиску, зареєстрованих на дні та кормовій стінці лунки (датчики № 3 і № 4). При цьому максимум взаємної кореляції зміщується в область малих часових інтервалів, що свідчить про зростання швидкості переносу джерел корельованих сигналів пульсацій пристінного тиску. Зокрема, максимумами взаємної кореляції між цією парою датчиків спостерігаються для різних інтервалів часу затримки. Оскільки найбільший корельований сигнал пульсацій пристінного тиску реєструвався від датчика № 4 до датчика № 3, то, знаючи відстань між ними і час затримки, що відповідав максимуму взаємної кореляції, і напрямок поширення цього сигналу, у відповідності до рекомендацій [23, 24, 26, 30] визначали групову швидкість переносу вихрових систем, якими генерувались пульсації пристінного тиску. В наведених експериментальних резуль-



а



б



в

Рис. 6. Просторово-часові кореляції пульсацій пристінного тиску на боковій стінці півсферичної лунки:

а –  $Re_d = 10000$ ;  
б –  $Re_d = 22000$ ;  
в –  $Re_d = 40000$

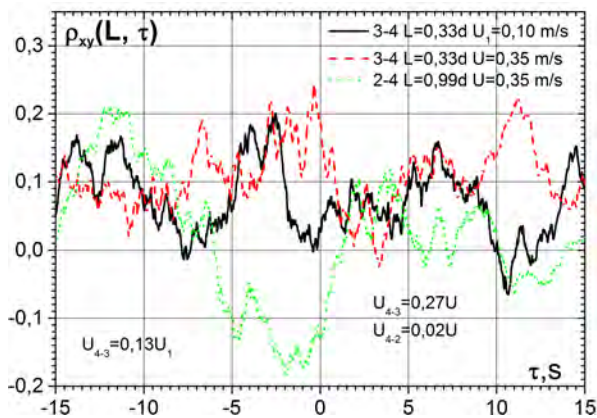


Рис. 7. Взаємні кореляції та групові швидкості переносу пульсацій пристінного тиску на обтічній поверхні півсферичної лунки

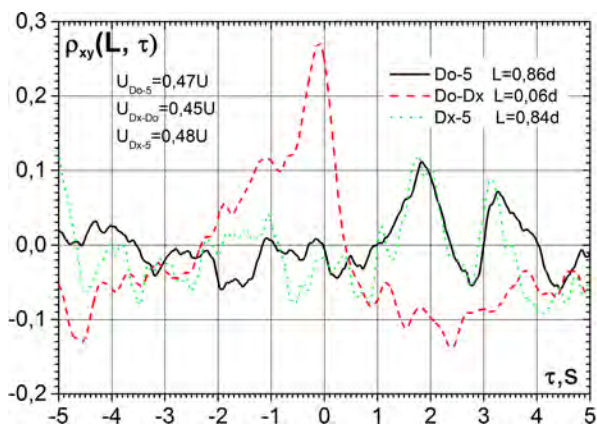


Рис. 8. Взаємні кореляції та групові швидкості переносу пульсацій динамічного тиску над обтічною поверхнею півсферичної лунки

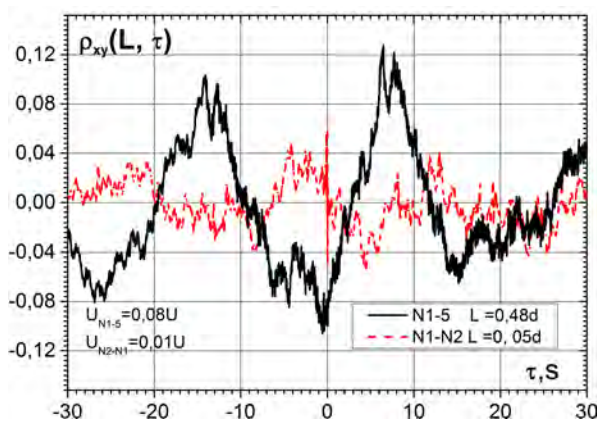


Рис. 9. Взаємні кореляції та групові швидкості переносу пульсацій динамічного тиску над обтічною поверхнею півсферичної лунки

татах групова швидкість переносу псевдозвукових джерел пульсацій пристінного тиску на поверхні півсферичної лунки становила  $u_{cg4-3} \approx 0.13U$  для швидкості обтікання 0.1 м/с і  $u_{cg4-3} \approx 0.27U$  для швидкості обтікання 0.35 м/с.

Коефіцієнт взаємної кореляції між датчиком пульсацій тиску, який знаходився під областю відриву примежового шару (№ 2), та датчиком на кормовій стінці заглиблення (№ 4), має як додатні, так і від’ємні значення. При цьому величини коефіцієнтів кореляції та антикореляції (яка відповідає від’ємним значенням взаємної кореляції) приблизно однакові, а їхні максимуми розташовуються в області від’ємних діапазонів часу затримки (див., криву 3 на рис. 7). Групова швидкість переносу синфазного корельованого сигналу між датчиками № 4 і № 2 дуже мала і складає всього  $0.02U$ , а групова конвективна швидкість протифазного корельованого сигналу дорівнює  $0.14U$ . Нагадаємо, що розрахунок вище наведених групових конвективних швидкостей проводився за відстанями між парами датчиків пульсацій пристінного тиску вздовж окружності півсферичного заглиблення.

Одновременні вимірювання парою плівкових термоанемометрів і групою датчиків пульсацій пристінного тиску, розташованих над обтічною поверхнею та у рівень з нею (див. рис. 2), дозволили визначити спільні кореляційні характеристики полів пульсацій швидкості й тиску. Нагадаємо, що плівкові термоанемометри, також як і датчики пульсацій динамічного тиску, які знаходилися на добре обтічних державках і ножах, пересувалися за допомогою відповідних координатних пристроїв у трьох взаємно перпендикулярних площинах. В залежності від поставлених завдань, датчики і термоанемометри встановлювались поблизу обтічних поверхонь пластини й півсферичного заглиблення, усередині самого заглиблення, а також у зсувному і примежовому шарах.

Характерний приклад поведінки коефіцієнта взаємної кореляції пульсацій швидкості та пристінного тиску наведено на рис. 8. Слід відзначити, що на цих графіках разом із залежністю коефіцієнта взаємної кореляції пульсацій швидкості наведено криві для коефіцієнтів взаємних кореляцій пульсацій швидкості й пульсацій пристінного тиску. Просторово-часові кореляції отримано для швидкості обтікання пластини з локальним заглибленням  $U = 0.1$  м/с і чисел Рейнольдса  $Re_x = 10^5$  та  $Re_d = 10^4$ . У цих вимірюваннях пара плівкових термоанемометрів знаходилась над отвором заглиблення у верхній частині зсувного шару поблизу передньої стінки лунки.



Двокомпонентний термоанемометр розташовувався ближче до площини обтічної пластини, а однокомпонентний датчик для вимірювання повздовжньої компоненти швидкості – над ним. Координатами місця знаходження термоанемометрів були  $X_{D_x} = -0.22d$ ;  $Y_{D_x} = 0.05d$ ;  $Z_{D_x} = 0$  (двокомпонентний датчик) і  $X_{D_o} = -0.22d$ ;  $Y_{D_o} = 0.095d$ ;  $Z_{D_o} = 0$  (однокомпонентний датчик). Залежність коефіцієнта взаємної кореляції повздовжніх компонент пульсацій швидкості дана кривою 1. Крива 2 відображає коефіцієнт взаємної кореляції пульсацій пристінного тиску (вимірювались датчиком пульсацій тиску № 5) та пульсацій повздовжньої швидкості (вимірювались двокомпонентним датчиком  $D_x$ ). Встановлено, що взаємна кореляція поздовжніх компонент пульсацій швидкості вища, ніж взаємна кореляція пульсацій пристінного тиску та швидкості. Швидкість переносу корельованого сигналу між двома датчиками швидкості виявилась на (5...7) % нижчою, ніж швидкість переносу сигналу між датчиком пульсацій швидкості та датчиком пульсацій пристінного тиску. Напрямок руху корельованих сигналів – від нижнього датчика швидкості до верхнього датчика швидкості й від датчика швидкості до датчика пульсацій пристінного тиску, який знаходився у верхній частині кормової стінки півсферичної лунки.

Залежності коефіцієнтів взаємної або просторово-часової кореляції пульсацій тиску між вимірювальними точками, в яких розташовувались датчики пульсацій динамічного тиску, рознесені у просторі над обтічною поверхнею, та датчики пульсацій пристінного тиску, встановлені у рівень поверхнею, представлені на рис. 9. Дослідження проводилися для швидкості течії  $U = 0.1$  м/с і чисел Рейнольдса  $Re_x = 1 \cdot 10^5$  та  $Re_d = 1 \cdot 10^4$ . Тут крива № 1-5 побудована для коефіцієнтів взаємної кореляції пульсацій динамічного тиску, зареєстрованих датчиком № 1, який було розташовано над дном півсферичної лунки (координати  $X_{N1} = 0$ ,  $Y_{N1} = 0.48d$ ,  $Z_{N1} = 0$ ), і пульсацій пристінного тиску, зареєстрованих датчиком № 5, який знаходився у верхній частині кормової стінки лунки (див. рис. 2). Крива № 1-№ 2 відображає поведінку коефіцієнтів взаємної кореляції пульсацій динамічного тиску, зареєстрованих двома датчиками пульсацій динамічного тиску. Датчик № 2 знаходився над датчиком № 1 і мав координати  $X_{N2} = 0.03d$ ,  $Y_{N2} = 0.455d$ ,  $Z_{N2} = 0$ . Відзначимо, що коефіцієнт просторово-часової кореляції пульсацій динамічного тиску доволі низький –  $\rho_{12}(L, \tau) < 0.06$ , – у той час як коефіцієнт просторово-часової кореляції пульсацій динамічного та пристінного тиску майже вдвічі

вищий. Групові швидкості переносу когерентних вихрових структур становили  $0.08U$  і  $0.01U$  для сигналів, згенерованих корельованими псевдозвуковими пульсаціями тиску між датчиками пульсацій динамічного тиску № 1 і пристінного тиску № 5, а також між датчиками динамічного тиску № 2 і № 1 відповідно.

## ВИСНОВКИ

На підставі отриманих експериментальних результатів щодо особливостей генерації та еволюції когерентних вихрових структур, які формуються усередині півсферичного заглиблення, і просторово-часових характеристик полів пульсацій швидкості й тиску, утворених ними всередині заглиблення і в його сліді можна зробити такі висновки.

1. Між датчиками, розташованими перед лункою, і датчиками на її поверхні спостерігались корельовані сигнали, які змінювалися з низькою та високою частотою. При цьому числа Струхалія були близько 0.02, 0.05, 0.2 і 0.4. Ці частоти відповідали частоті коливань рідини усередині лунки, частоті викидів великомасштабних вихрових систем, частоті обертання циркуляційної течії й частоті викидів дрібномасштабних вихрових структур зсувного шару назовні з півсферичної лунки у примезовий шар. Вищі значення коефіцієнтів просторово-часової кореляції пульсацій пристінного тиску спостерігались на кормовій та бічній стінках півсферичної лунки, а найнижчі – у її придонній частині.
2. Показано, що взаємні кореляції пульсацій поздовжньої швидкості майже вдвічі вищі, ніж взаємні кореляції пульсацій швидкості й пристінного тиску. Коефіцієнт просторово-часової кореляції пульсацій динамічного тиску, визначений над дном заглиблення виявився майже вдвічі меншим, ніж коефіцієнт кореляції пульсацій динамічного й пристінного тиску.
3. Вихрові структури зсувного шару, якими генеруються корельовані пульсації швидкості та тиску, переносились уздовж отвору лунки в напрямку течії з груповими швидкостями порядку  $(0.4 \dots 0.5)U$ . У придонній області лунки корельовані пульсації пристінного тиску, джерелом яких виступають циркуляційна течія й когерентні великомасштабні вихрові структури, переносилися від кормової стінки

лунки до її дна з груповою швидкістю майже  $0.2U$ . При переміщенні точки вимірювань від дна лунки до її передньої відривної стінки групова швидкість переносу зменшилася до  $0.02U$ .

1. Афанасьев В. Н., Веселкин В. Ю., Леонтьев А. И., Скибин А. П., Чудновский Я. П. Гидродинамика и теплообмен при обтекании одиночных углублений на исходно гладкой поверхности. – М.: Изд-во МГТУ, 1991. – 56 с.
2. Kiknadze G., Gachechiladze I., Oleinikov V. Tornado-like technology of heat and mass transfer intensification at lagging increase of hydraulic losses. – Moscow: Basert Co. Ltd, 1995. – 103 p.
3. Гортышов Ю. Ф., Попов И. А., Олишнев В. В., Щелчков А. В., Касьяков С. И. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. – Казань: Центр инновационных технологий, 2009. – 531 с.
4. Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки (численное и физическое моделирование) / Под ред. А. В. Ермишина и С. А. Исаева. – М./С-Пб.: б/и, 2001. – 360 с.
5. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок). – К.: ИТГФ НАНУ, 2005. – 140 с.
6. Исаев С. А., Леонтьев А. И., Корнев Н. В. Численное моделирование смерчевого теплообмена при обтекании поверхностей с лунками (состояние и перспективы) // VI Минск. межд. форум по теплообмену, ММФ 2008. – Минск, Беларусь, 2008. – С. 1–9.
7. Bixler G. D., Bhushan B. Bioinspired rice leaf and butterfly wing surface structures combining shark skin and lotus effects // *Soft Matter*. – 2012. – **8**. – P. 11271–11284.
8. Dean B., Bhushan B. Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: A review // *Phil. Trans. Roy. Soc.* – 2010. – **A368**. – P. 4775–4806.
9. Bechert D. W., Bruse M., Hage W., van der Hoeven J. G. T., Hoppe G. Experiments on drag reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry // *J. Fluid Mech.* – 1997. – **338**. – P. 59–87.
10. Bauer R. C., Dix R. E. Engineering model of unsteady flow in a cavity // *Arnold Eng. Develop. Center*. – 1991. – **AEDC-TR-91-17**. – P. 1–91.
11. Кикнадзе Г. И., Гачечиладзе И. А., Олейников В. Г., Городков А. Ю. Самоорганизация смерчеобразных струй в потоках сплошной среды и технологии, сопровождающие это явление // Тепло-массообмен и гидродинамика в закрученных потоках: Третья межд. конф. – Москва, Россия. – 2008. – С. 1–3.
12. Donnelly K. J. Reduction of ship resistance through induced turbulent boundary layers. – Melbourne, FL: Florida Inst. Technol., 2010. – 74 p.
13. Кикнадзе Г. И., Гачечиладзе И. А., Алексеев В. А. Самоорганизация смерчеобразных струй в потоках вязких сплошных сред и интенсификация тепло-массообмена, сопровождающая это явление. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 82 с.
14. Ligrani P. M., Harrison J. L., Mahmood G. I., Hill M. L. Flow structure due to dimple depressions on a channel surface // *Phys. Fluids*. – 2001. – **13**, № 11. – P. 3442–3451.
15. Rockwell D., Knisely C. The organized nature of flow impingement upon a corner // *J. Fluid Mech.* – 1979. – **93**. – P. 413–434.
16. Халатов А. А. Поверхневi генератори вихорiв: фундаментальнi досягнення i новi застосування // Вісн. НАН України. – 2005. – № 11. – С. 14–18.
17. Barber J. Golf ball flight dynamics // *A&EP Final Project*. – 2007. – № 434. – P. 1–37.
18. Воскобойник В. А. Трансформация энергии турбулентного течения в поле пульсаций пристеночного давления // *Акуст. вісн.* – 2012. – **15**, № 1. – С. 12–23.
19. Voskoboynick V., Kornev N., Turnow J. Study of near wall coherent flow structures on dimpled surfaces using unsteady pressure measurements // *Flow Turbulence Combust.* – 2013. – **90**, № 2. – P. 86–99.
20. Воскобойник В. А., Воскобойник А. В., Воскобойник О. А., Турик В. М. Поле швидкостi у середньому перерiзі пiвсферичної лунки // *Прикл. гiдромех.* – 2014. – **16**, № 4. – С. 17–27.
21. Воскобойник В. А., Воскобойник А. В. Измерение поля пульсаций пристеночного давления ансамблем миниатюрных датчиков // Тез. докл. Всерос. науч. школы молодых ученых “Волны и вихри в сложных средах”. – М.: МАКС Пресс, 2012. – С. 51–54.
22. Воскобойник В. А., Воскобойник А. В. Структура течiї та пульсацiї тиску усерединi овальної лунки // *Наукоємнi технологiї*. – 2012. – **13**, № 1. – С. 12–18.
23. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных : Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 540 с.
24. Voskoboynick V. A., Grinchenko V. T., Makarenkov A. P. Correlation characteristics of a wall pressure fluctuation field in a turbulent boundary layer induced by a longitudinal flow along a flexible extended cylinder // *Int. J. Fluid Mech. Res.* – 2003. – **30**, № 6. – P. 644–650.
25. Voskoboynick V. A., Makarenkov A. P. Spectral characteristics of the hydrodynamical noise in a longitudinal flow around a flexible cylinder // *Int. J. Fluid Mech. Res.* – 2004. – **31**, № 1. – P. 87–100.
26. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990. – 584 с.
27. Воскобойник А. В. Формування когерентних вихрових структур у закручених потоках та заглибленнях: Автореф... дис. канд. техн. наук. – К.: Ін-т гiдромех. НАН України, 2005. – 20 с.
28. Воскобойник В. А. Просторово-часовi характеристики когерентних структур, полiв швидкостi та тиску у лункових генераторах вихорiв: Автореф... дис. докт. техн. наук. – Київ: Інститут гiдромеханiки НАН України, 2013. – 40 с.
29. Воскобойник В. А., Воскобойник А. В. Вихровий рух усерединi пiвсферичної лунки на плоскiй поверхнi // *Пром. теплотех.* – 2012. – **34**, № 6. – С. 7–14.
30. Воскобойник В. А., Гринченко В. Т., Макаренко А. П. Скоростi переноса когерентних вихрових структур в турбулентном пограничному слое на цилиндре // *Акуст. вісн.* – 2000. – **3**, № 4. – С. 21–29.