

УДК 532.517

ВИХРОВИЙ РУХ УСЕРЕДИНИ ЛУНКИ СКЛАДНОЇ ГЕОМЕТРІЇ

В. А. ВОСКОВІЙНИК, А. В. ВОСКОВІЙНИК,
О. А. ВОСКОВОЙНИК, В. М. СТЕПАНОВИЧ, І. А. ХИЖА

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

Одержано 23.09.2015

У роботі представлені результати візуального дослідження особливостей генерації та еволюції вихрового течії усередині заглиблень на плоскій поверхні у вигляді одиночних V і Λ -подібних лунок, які потік обтікав під різними кутами. Візуалізація проводилася за допомогою водорозчинних покриттів і контрастних фарб, які вводилися в пристінний шар потоку. В умовах ламінарної течії усередині заглиблень складної геометричної форми вихрові структури не генерувалися. Для перехідного і турбулентного режиму течії усередині V-подібної лунки формувалися підковоподібні вихрові структури, які зі збільшенням швидкості зменшувалися за розміром і притискалися до відривної стінки лунки. У серединному перерізі такої лунки спостерігалися періодичні викиди пелени дрібномасштабних вихорів. Усередині Λ -подібної лунки генерувалися спіралеподібні вихрові структури, які періодично викидаються і переміщуються у сліді за лункою формували пари протилежно обертових поздовжніх вихорів. При зміні кута нахилу V і Λ -подібних лунок у площині пластини формування та викид вихрових структур змінюється. Для ламінарної течії число Струхала викидів потенційної рідини змінювалося від 0.05 до 0.14. В умовах перехідної і турбулентної течії число Струхала викидів вихрових структур і вихрової пелени збільшилося від 0.15 до 0.5.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: заглиблення, візуалізація, когерентна вихрова структура, вихрова пелена, викид

В работе представлены результаты визуального исследования особенностей генерации и эволюции вихревого течения внутри углублений на плоской поверхности в виде одиночных V и Λ -образных лунок, которые обтекались потоком под различными углами. Визуализация проводилась с помощью водорастворимых покрытий и контрастных красок, которые вводились в пристеночный слой потока. В условиях ламинарного течения внутри углублений сложной геометрической формы вихревые структуры не генерировались. Для переходного и турбулентного режима течения внутри V-образной лунки формировались подковообразные вихревые структуры, которые с увеличением скорости уменьшались по размеру и прижимались к отрывной стенке лунки. В срединном сечении такой лунки наблюдались периодические выбросы пелены мелкомасштабных вихрей. Внутри Λ -образной лунки генерировались спиралевидные вихревые структуры, которые периодически выбрасываясь и перемещаясь в следе за лункой формировали пары противоположно вращающихся продольных вихрей. При изменении угла наклона V и Λ -образных лунок в плоскости пластини формирование и выброс вихревых структур изменяется. Для ламинарного течения число Струхала выбросов потенциальной жидкости изменялось от 0.05 до 0.14. В условиях переходного и турбулентного течения число Струхала выбросов вихревых структур и вихревой пелены увеличилось от 0.15 до 0.5.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: углубление, визуализация, когерентная вихревая структура, вихревая пелена, выброс

The visual research results of the generation and evolution of the vortex flow inside the cavities on a flat surface in the form of single V and Λ -shaped dimples that streamlined flow at different angles are presented. Visualization was performed using water-soluble coatings and contrast dyes, which were introduced in the flow wall layer. In conditions of a laminar flow inside the cavities of complex geometric shapes vortex structures are not generated. For a transitional and turbulent flow inside the V-shaped dimple were formed horseshoe vortex structures that with the increase in velocity is reduced in size and is pressed to the separation wall of the dimple. The periodically ejections of small-scale vortex sheet were observed in the midsection of such dimple. The spiral vortex structures were generated inside the Λ -shaped dimple that periodically ejecting and moving in the wake of the dimple formed a pair of counter-rotating vortices. The formation and emission of vortex structures were difference when the angle V and Λ -shaped hole in the plane of the plate was changed. For the laminar flow of the Strouhal number of potential fluid ejection was ranged from 0.05 to 0.14. In conditions of the transition and turbulent flow the Strouhal number of the vortex structure and vortex sheet ejections was increased from 0.15 to 0.5.

KEY WORDS: cavity, visualization, coherent vortex structure, vortex sheet, ejection

ВСТУП

Важливим чинником, що визначає ефективність руху тіл за заданої швидкості – це мінімум енергетичних втрат, котрі можливо забезпечити керуванням течії або примежового шару, які пов'язані з мінімізацією опору тертя та форми. У багатьох гідротехнічних спорудах та конструкціях присутні різноманітні неоднорідності обтічної поверхні у вигляді заглиблень. За відповідних умов обтікання

заглиблень усередині них утворюються когерентні вихрові системи, які генерують інтенсивні пульсації швидкості, тиску, температури, завихореності та інших параметрів турбулентності, що використовується у засобах керування примежовим шаром. У залежності від режиму обтікання, геометричних параметрів і форми заглиблення усередині останніх генеруються вихрові структури різних масштабів, напрямків руху, частот обертання та осциляцій як у просторі, так і у часі. Ці вихро-

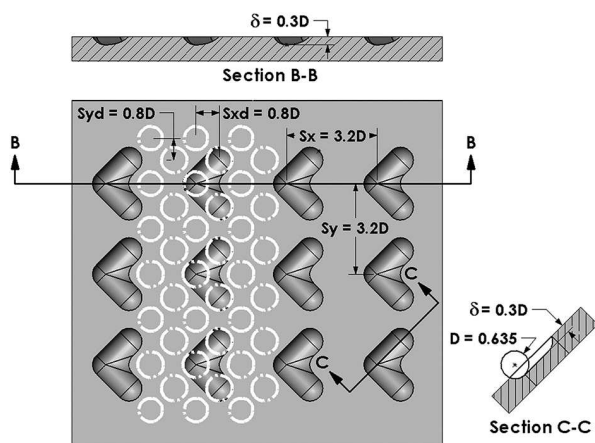


Рис. 1. Розташування системи V-подібних лунок на обтічній плоскій поверхні прямокутного каналу

ві структури, взаємодіючи між собою та обтічною поверхнею, за певних умов викидаються назовні із заглиблення, змінюючи структуру примежового шару та інтегральні характеристики тіл обтікання, процесів теплообміну та змішування, якість аеродинамічних профілів та інше [1–3].

У другій половині минулого сторіччя системно почали вивчати вихрові структури, які формуються під час обтікання заглиблень на криволінійній або плоскій поверхні [2, 4, 5]. Так, результати експериментальних аеродинамічних і теплофізичних досліджень показали досить високу ефективність деяких рельєфів заглиблень, які забезпечували збільшення тепло- і масопереносу за незначного зростання рівня гідродинамічних втрат. Але у роботах [5, 6] було відмічено, що сферичні заглиблення на плоскій поверхні за теплогідрравлічною ефективністю не є найкращими для турбулентного режиму обтікання теплоносія, а у ламінарному режимі їх використання практично не виправдане. Розрахунки показали, що відносний тепловідвід від околу сферичних лунок суттєво нижчий, ніж від овальних заглиблень. Здатність овальних лунок створювати вихрові структури з інтенсивною вторинною течією визначає їх перевагу та забезпечує їм конкурентоспроможність під час ламінарного режиму обтікання. Тому існування біфуркації вихрової картини у випадку сферичної форми лунки суттєво зменшує тепловідведення лункового рельєфу, що необхідно враховувати під час проектування енергозберігаючих технологій, які використовують лункові поверхні, як один з методів керування пристінними потоками. Як показано в роботі [7], овальні лунки, розташовані на стінці вузького мікроканалу, на відміну

від сферичних заглиблень, здатні інтенсифікувати теплообмін, збільшуючи тепловіддачу приблизно на 10%. За рахунок зниження гідрравлічних втрат теплогідрравлічна ефективність лункової поверхні зростає ще вище – до 13%.

В останні роки зроблено багато дослідів з метою визначення оптимальної конфігурації лункової поверхні. Так, у роботі [8] було проведено чисельне моделювання з визначення особливостей теплопереносу на лункових поверхнях семи різних за формою лунок. Знайдено, що найбільша теплофізична ефективність і найбільша вихрова інтенсивність спостерігаються на нахилених циліндричних лунках. У роботі [9] експериментально досліджувався переніс тепла у прямокутному каналі (видовженням 3:1), в якому зроблено V-подібні лунки (рис. 1). Результати показали, що запропоновані V-подібні лунки були ефективніші за визначених умов, ніж традиційні виступи або сферичні лунки. Для малих чисел Рейнольдса, розрахованих по еквівалентному діаметру каналу та середньовитратній швидкості потоку, коефіцієнти теплопереносу та тертя для V-подібних і сферичних лунок подібні. Але коли числа Рейнольдса більші ніж 30000, вторинні течії, які виникають усередині V-подібних заглиблень, призводять до підвищення теплопереносу на такій лунковій поверхні (подібно нахиленим виступам чи крильцям у вигляді латинської букви V). Таке підвищення теплопереносу відбувається за умови незначного зростання опору тиску.

Необхідність практичного використання лункових рельєфів на обтічній поверхні з метою керування примежовим шаром для реалізації енергозберігаючих технологій у багатьох галузях науки і техніки, диктує вивчення механізмів вихроутворення усередині обтічних заглиблень і виявлення їх гідродинамічних особливостей. Створення генераторів вихорів, які мали б мінімальний гідродинамічний опір і генерували б штучні вихрові системи із заданими кінематичними і динамічними параметрами, можливе, як показують останні наукові дослідження [10–13], за умови використання овальних заглиблень помірної глибини.

У зв'язку з цим була поставлена мета експериментально дослідити механізми та закономірності формування і еволюції вихрових структур у заглибленнях складної геометричної форми, на основі пари овальних лунок, та визначити їх взаємодію між собою і з примежовим шаром.

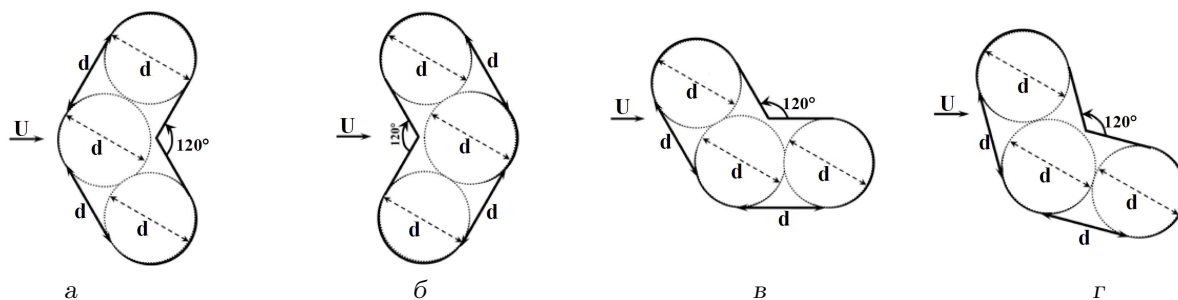


Рис. 2. Розташування заглиблення складної геометричної форми відносно напрямку потоку, який натікає: а – у вигляді літери "V"; б – літери "Λ"; в – під кутом 60°; г – кутом 75°

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТА ПРОГРАМА ДОСЛІДЖЕНЬ

Генерація вихрових структур з керованими геометричними, кінематичними і динамічними характеристиками є актуальною проблемою в теорії та на практиці керування примежовими шарами і відривними течіями активними та пасивними методами. Формування стійких вихрових систем, які взаємодіють між собою та вихровими структурами у зсувних течіях, лунковими генераторами вихорів є багатофакторним процесом, що вимагає проведення кропітких і трудомістких чисельних та експериментальних науково-дослідних робіт. Особливості вихроутворення усередині лунки складної геометрії у вигляді латинської літери "V" або грецької літери "Λ", які розташовано під різними кутами до напрямку потоку на гідравлічно гладкій плоскій поверхні, досліджувалися за допомогою візуалізації течії. Нанесення на поверхню водорозчинних покриттів або введення у потік різнокольорових барвників дозволило спостерігати місця формування вихрового руху усередині заглиблень, зробити оцінку масштабів вихрових структур, їх форму і напрямок руху, а також місця викидів та взаємодії з вихровими структурами примежового шару і частоти цих викидів. За допомогою візуалізації та аналізу експериментальних результатів визначено вплив орієнтації лунки складної геометричної форми на просторово-часові характеристики когерентних вихрових структур, які зароджувалися усередині лунки під дією набігаючого потоку та відривної течії, що утворювалася над отвором лунки.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Експерименти були проведені в гідродинамічно-

му лотку з відкритою поверхнею води довжиною 16 м, шириною 1 м та глибиною 0.4 м. На відстані близько 8 м від вхідної частини лотку розташовувалася вимірювальна ділянка, обладнана контрольно-вимірювальною апаратурою та засобами візуалізації і реєстрації характеристик потоку, координатними пристроями, освітлювальною апаратурою та іншими допоміжними інструментами, необхідними для проведення експериментальних досліджень. Конструкція та устаткування гідродинамічного лотку дозволили у широких межах регулювати швидкість потоку і його глибину. Наявність різноманітних добре обтічних координатних елементів і ножів дала можливість точно, відповідно до розрахункових значень, встановлювати досліджувані моделі, вимірювальні прилади та інструменти. Прозорі стінки гідродинамічного лотку, виготовлені з товстого протиударного скла, забезпечили проведення якісних візуальних досліджень.

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 безвідривного її обтікання. До бічних сторін пластини кріпилися кінцеві шайби (органічне скло завтовшки 0.005 м і шириною 0.2 м). На відстані $X=0.8$ м від фронтального краю пластини знаходився отвір, де було зроблено заглиблення у вигляді лунки складної геометричної форми, в якій три сферичні лунки були об'єднані циліндричними вставками (рис. 2). До нижньої частини пластини, у місці розташування овального заглиблення, кріпився лист з масштабною сіткою та обтічник з пінопласту (див., рис. 3). Конструкція досліджуваної пластини дозволяла обертати заглиблення навколо своєї осі у площині пластини на довільний кут.

Для проведення візуальних досліджень в якості контрастного покриття, що змивалося, засто-

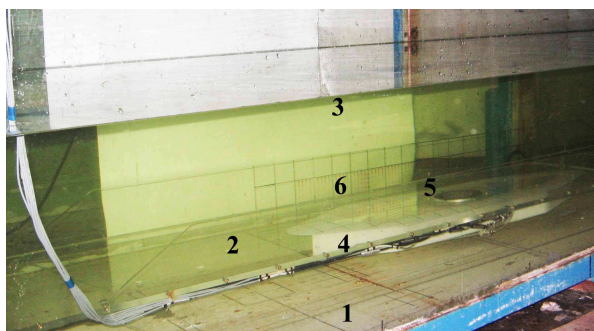


Рис. 3. Розташування пластини з лункою складної геометрії в гідродинамічному лотку:
1 – лоток; 2 – пластина; 3 – рівень води; 4 – обтічник;
5 – заглиблення; 6 – координатна сітка

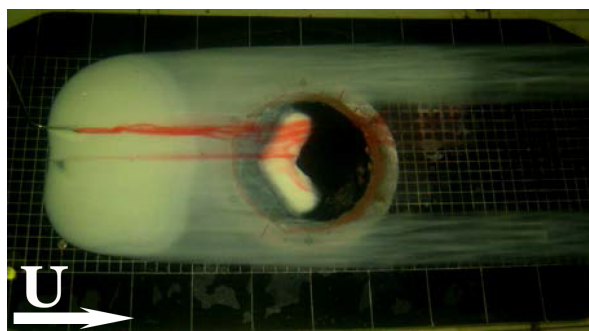


Рис. 4. Візуалізація вихрової течії водорозчинним покриттям та подачею кольорового фарбника

совувалося згущене молоко (щільність якого в 1.3 вища, ніж щільність води), котре попередньо було змішане із білою або чорною сажею для придання розчину нейтральної плавучості та нанесено на поверхню пластини. Картини розмиву цього покриття та темп його розмивання дали можливість зафіксувати зони підвищених дотичних напруг, області дії вихрових систем, що викидалися із лунки, оцінити частоти їхніх викидів, напрям переносу та обертання [14–16]. Реєстрація руху крупинок сажі, які змивалися з обтічної поверхні, дала можливість оцінити швидкості та траєкторію руху досліджуваних вихрових структур. Візуалізація була проведена для швидкості потоку $U=(0.1\ldots 0.5)$ м/с, чисел Рейнольдса, розрахованих за відстанню від початку пластини до місця розташування лунок та за діаметром лунок, а саме $Re_x = UX/\nu=(80000\ldots 400000)$ і $Re_d = Ud/\nu=(4000\ldots 20000)$, де ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості. Фарбники та мічені частинки, щільність яких була близька до щільності води, через трубки малого діаметру вводились у приміжовий шар перед заглибленням та/або всередину заглиблення (рис. 4). Використання відповідної відео- та фотоапаратури дало можливість реєструвати картини течії, які у подальшому оброблялись та аналізувались за допомогою графічних станцій на базі персональних комп'ютерів з використанням штатного і спеціально розробленого програмного забезпечення [17–19].

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Спираючись на попередньо проведені дослідження та їхній аналіз [20–22], були визначені оптимальні параметри асиметричної овальної лунки з погляду найбільшої теплогідрравлічної ефективно-

сті і формування стійких вихрових структур в її сліді, а саме: довжина циліндричної вставки дорівнювала діаметру сферичного сегменту і кут розташування лунки складав 60 градусів відносно прямого потоку [23–25]. Але усередині такої лунки формувалася моновихрова структура у сліді за нею, а стійкою може бути тільки пара протилежно обертових вихрових структур схожої інтенсивності. З метою формування більш стійких вихрових структур були досліджені заглиблення складної геометричної форми, розташовані під заданими кутами, які можуть генерувати пару протилежно обертових вихрових структур [26–28].

Так, для швидкостей течії 0.1 м/с, 0.25 м/с та 0.5 м/с було досліджено конфігурацію заглиблення, обидві частини якого розташовані під кутами 60 градусів відносно поздовжньої осі пластини (рис. 2,а), у вигляді літери "V". Як показано на рис. 5,а, для швидкості обтікання 0.1 м/с ($Re_x=80000$ і $Re_d=4000$) водорозчинне покриття заходило усередину заглиблення вздовж усього переднього за потоком його краю. Під час подачі контрастного фарбника у логарифмічну та зовнішню область приміжового шару не спостерігалося заходу його у лунку (рис. 4). Усередині лунки контрастна речовина (згущене молоко), яка потрапляла усередину лунки з пристінної області приміжового шару, не здійснювала обертального або циркуляційного руху, а заповнювала собою майже усе заглиблення та повільно коливалося. Періодично викиди підфарбованої рідини відбувалися з обох кормових боків лунки з частотою $f=0.23$ Гц ($St=f d/U=0.09$, де $d=0.04$ м), але не одночасно з обох частин лунки (рис. 5,а). Під час викиду підфарбована рідина робила синусоподібні коливання і пересувалася у слід лунки. Коливання підфарбованої рідини спостерігалося на відстані $z=(0.6\ldots 0.7)d$ від осі лунки у середньому з частотою $f=0.12$ Гц ($St=0.05$). Зона викидів розташовува-

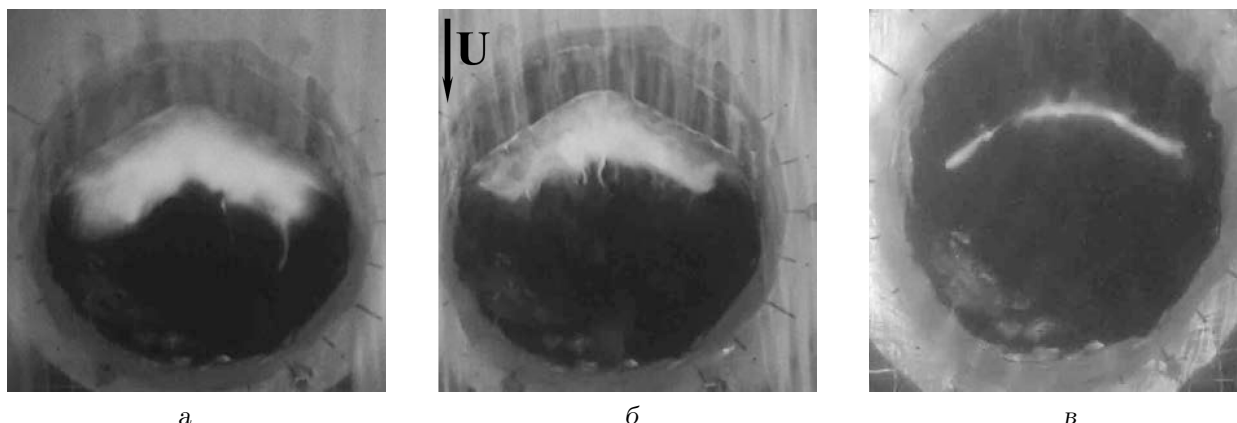


Рис. 5. Формування вихрового руху усередині V-подібної лунки для чисел Рейнольдса Re_d :
а – 4000; б – 10000 та в – 20000

лася на проміжку ($0.3d < z < d$) в обох напрямках від поздовжньої осі пластини. Вплив заглиблення на структуру примежового шару для цього режиму течії фіксувався на віддаленні близько (7...9) діаметрів лунки.

Зі збільшенням швидкості до 0.25 м/с ($Re_x = 2 \cdot 10^5$ і $Re_d = 10^4$) усередині заглиблення формувалися дві веретеноподібні вихрові системи, які знаходилися у лівій та правій частинах заглиблення. Вони оберталися в одному напрямку у площині XOY , а їхні верхні частини рухалися за потоком. У серединній або осевій частині лунки ці вихрові структури об'єднувалися, утворюючи підковоподібну вихрову систему, яка мала джерела в кормових сферичних частинах лунки. Серединна частина цієї вихрової системи, досягаючи розмірів лунки, зносилася потоком у вигляді вихрової пелени, що утворювалася дрібномасштабними вихровими структурами зсувного шару та верхівками підковоподібної вихрової системи. Викиди цих вихрових структур відбувалися поблизу поздовжньої осі пластини, у передній за потоком частині заглиблення з частотою $f=2.09$ Гц ($St=0.33$) у проміжку ($-0.2d; 0.2d$) від поздовжньої осі пластини (рис. 5, б). Усередині лунки поблизу осі пластини підковоподібна вихрова система мала поперечний масштаб близько $0.8d$, з віддаленням від осі він монотонно зменшувався до $0.25d$ на відстані $0.5d$ до бічних країв лунки. У проміжках ($-d; -0.5d$) та ($0.5d; d$) (кормові частини V-подібної лунки) не спостерігалось формування когерентних вихрових структур. Слід вихрової пелени спостерігався за лункою на віддаленні близько (9...11) її діаметрів.

Для швидкості обтікання 0.5 м/с ($Re_x = 4 \cdot 10^5$ і $Re_d = 2 \cdot 10^4$) зафіксовано обертання рідини з фарбником у площині XOY поблизу поздовжньої

осі пластини. Усередині заглиблення підковоподібні вихрові структури займали тільки четверту частину усього об'єму лунки, тому що вони були притиснуті до відривної стінки лунки шаром змішування (рис. 5, в), який взаємодіяв з кормовою стінкою майже відразу за осьовим перерізом заглиблення. Більша частина контрастного покриття, відірвавшись від переднього краю заглиблення, відразу виносилася потоком з лунки, практично не переміщуючись на її дно. Кількісних параметрів вихрової течії для такої швидкості обтікання пластини з заглибленням встановити не вдалось, але викиди контрастного покриття фіксувалися як поблизу поздовжньої осі лунки, так і поблизу її бічних країв.

Коли V-подібну лунку розвернули на 180 градусів у площині пластини, то була отримана інша конфігурація заглиблення у вигляді грецької літери "Λ" (рис. 2, б). Досліди також проводилися для швидкостей обтікання 0.1 м/с, 0.25 м/с та 0.5 м/с. Для швидкості обтікання 0.1 м/с контрастне покриття заходило усередину заглиблення вздовж усього його переднього за потоком краю перпендикулярно поперечному перерізу кожної (лівої та правої) частини заглиблення (рис. 6, а). Викид контрастного покриття відбувався періодично в області поздовжньої осі симетрії пластини з частотою $f=0.22$ Гц ($St=0.09$). Усередині лунки контрастна речовина не здійснювала обертального або циркуляційного руху, заповнювала усе заглиблення та рухалася поблизу кормової стінки від бокових країв лунки до поздовжньої осі пластини. Після викиду контрастне покриття, коливаючись у просторі та пересуваючись вздовж серединного перерізу лунки, починало поступово та повільно скручуватися у джгут у сліді за лункою. Зона викиду розта-

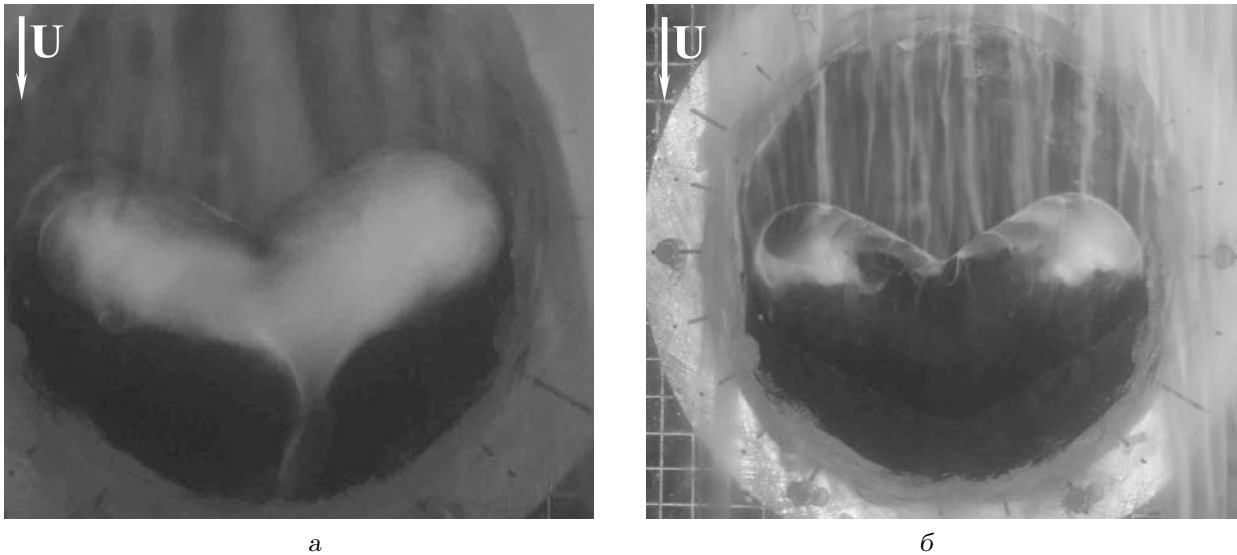


Рис. 6. Формування вихрового руху усередині Λ -подібної лунки для чисел Рейнольдса Re_d :
а – 4000 та б – 10000

шовувалася на проміжку $(-0.1d; 0.1d)$ від поздовжньої осі пластини, а сама структура, яка вийшла з лунки, зберігала свою ідентичність за заглибленням до $(9...11)$ діаметрів лунки.

Під час обтікання пластини з лункою зі швидкістю 0.25 м/с картина руху контрастної речовини у заглибленні суттєво змінилася. Контрастне покриття знаходилося в обох бічних областях заглиблення у проміжках $(-0.6d; -1.4d)$ та $(0.6d; 1.4d)$ відносно поздовжньої осі пластини (рис. 6, б). У цих областях відбувалися викиди спіралеподібних вихрових структур з лівого та правого боків заглиблення у проміжках $(-0.8d; -1.2d)$ та $(0.8d; 1.2d)$ відносно поздовжньої осі пластини з частотою $f=3.3$ Гц ($St=0.53$). Викиди відбувалися майже одночасно з обох частин лунки. У лунці обидва вихори оберталися у площині XOZ , у протилежних напрямках один від одного. Якщо дивитись проти напрямку потоку, то у лівій частині лунки вихор обертався проти годинникової стрілки, а у правій – за годинниковою стрілкою (див., рис. 6, б). У сліді за лункою спіралеподібні вихори утворювали пару протилежно обертових поздовжніх вихорів, які розташовувалися на відстані $(1.2...1.5)d$ один від одного. Вплив вихрових систем, які викидалися назовні з заглиблення, на структуру примежового шару реєструвався на віддаленні близько $(8...9)$ діаметрів лунки.

Для швидкості обтікання 0.5 м/с контрастне покриття усередині лунки, що показувало застійні області у ній, переважно сконцентрувалося поблизу бічних країв заглиблення, де спостерігалися не-

інтенсивні викиди спіралеподібних вихрових структур з частотами приблизно $f \approx 4$ Гц або $St \approx 0.32$. Ці вихрові структури також утворювали у сліді лунки пару протилежно обертових вихорів, які знаходилися на відстані приблизно $1.5d$ один від одного.

Візуальні дослідження особливостей формування і розвитку вихрової течії усередині заглиблення складної геометричної форми та взаємодії його з примежовим шаром над плоскою пластинною показали ряд закономірностей еволюції течії в лунці залежно від кута розташування заглиблення. Як показали дослідження, у лунках V -подібної та Λ -подібної форми в залежності від режиму течії генерувалися як пари протилежно обертових вихорів, так і поодинокі спіралеподібні вихори та вихрові пелени. Для створення стійкої когерентної вихрової структури, яка могла би зберігати свою ідентичність довгий час, впливаючи на пристінну течію за заглибленням, було запропоновано розвернути лунку складної геометрії на різні кути відносно напрямку потоку у площині пластини. Так, для розташування на пластині передньої за потоком частини заглиблення складної геометричної форми під кутом 60 градусів, а обтікання кормової її частини під кутом 0 градусів (рис. 2, в) та найменшої досліджуваної швидкості обтікання ($U=0.1$ м/с), контрастна речовина заходила усередину лунки уздовж передньої за потоком частини лунки, в основному вздовж центрального півкола і циліндричної частини, які сполучалися один з одним. Відривної області за переднім кра-

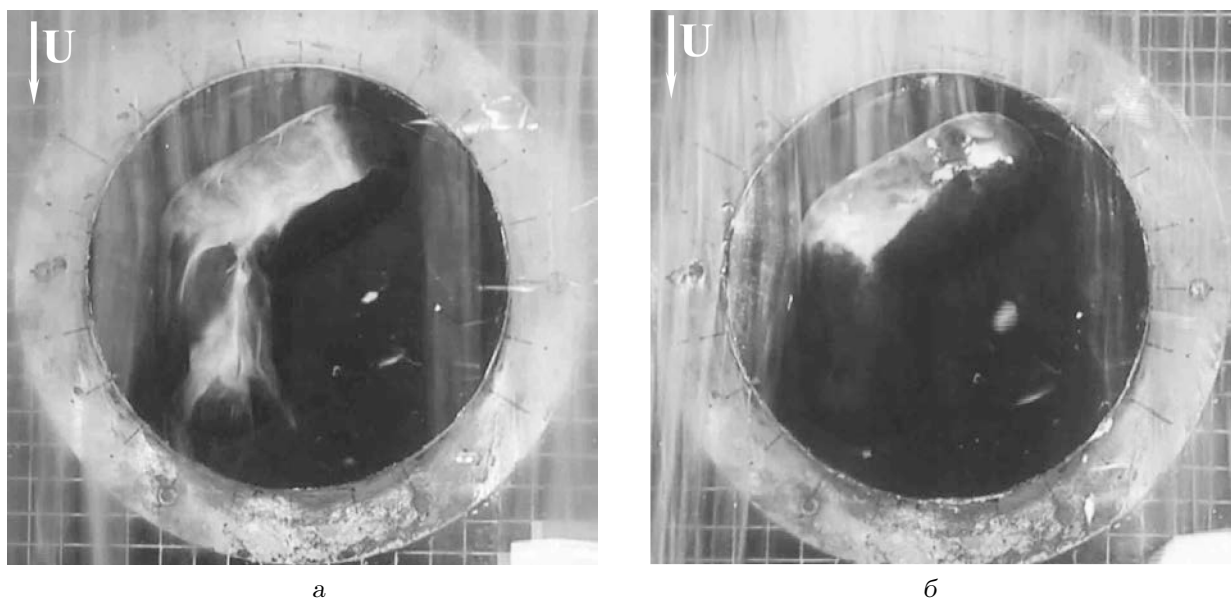


Рис. 7. Формування вихрового руху усередині лунки складної геометрії, яку розташовано під кутом 60° , для чисел Рейнольдса Re_d : а – 4000 та б – 10000

єм заглиблення для цього ламінарного режиму течії ($Re_x = 8 \cdot 10^4$) не спостерігалось і усередині лунки контрастна речовина не здійснювала обертального або циркуляційного руху. Вона рухалася уздовж поздовжньої осі заглиблення у кормову за потоком частину лунки, де відбувався її періодичний викид назовні з частотою $f=0.24$ Гц ($St=0.09$). Перед викидом верхня частина рідини у заглибленні (на рівні площини пластини) здійснювала осциляції у вигляді пакету хвиль, що біжать (у середньому (3...4) хвили). Фронт цих хвиль був перпендикулярним до напрямку потоку, а довжина хвиль складала майже половину діаметру заглиблення. Хвилі переносилися із швидкістю близько $(0.4...0.5)U$. Викид спостерігався за частиною лунки, розташованої під кутом $\alpha = 0$ градусів, на відстані $(-0.25...1)d$ від поздовжньої осі пластини (рис. 7,а). Викинута рідина, коливаючись, виносилася, головним чином, до середини товщини прилежового шару, але іноді і до його верхньої межі та переносилася паралельно поздовжній осі пластини у сліді кормової частини заглиблення. Слід контрастної речовини простежувався на віддаленні близько $(10...12)$ діаметрів лунки.

Зі збільшенням швидкості обтікання до 0.25 м/с спостерігалось комірчасте розділення вихрового руху всередині лунки на дві частини (на рис. 7,б видно це розділення у передній за потоком частині лунки). Одна спіралеподібна вихрова структура утворювалася у передній за потоком сферичній частині лунки та мала джерело майже по центру

цієї сферичної частини лунки. Вона оберталася за годинниковою стрілкою відносно вертикальної до площини пластини вісі, як показано на рис. 7,б, та викидалася з частотою $f=1.61$ Гц ($St=0.26$). Інша вихрова структура, яка мала вигляд великомасштабного викривленого спіралеподібного вихору, заповнювала більше $2/3$ площі лунки і рухалася з передньої у кормову частину лунки. Її джерело знаходилося на дні передньої овальної лунки ближче до її кормової сферичної частини і вихрова структура мала напрямок обертання протилежний першій вихровій структурі. Викривлена спіралеподібна вихрова структура підіймалася над кормовою частиною заглиблення на кут $(5...10)$ градусів, коливалася у просторі та викидалася з частотою $f=0.95$ Гц ($St=0.15$). Ці викиди спостерігалися за тією частиною досліджуваної лунки, яка розташовувалася під кутом $\alpha = 0$ градусів, на відстані $(0.1...1)d$ від поздовжньої осі пластини. Зі збільшенням швидкості слід контрастної речовини простежувався вже тільки на віддаленні $(8...9)$ діаметрів лунки.

Для заглиблення, передня частина якого була розташована під кутом 75 градусів, а кормова – під кутом 15 градусів відносно поздовжньої осі пластини (рис. 2,з) та швидкості обтікання 0.1 м/с контрастний фарбник заходив усередину лунки не тільки вздовж переднього краю частини овальної лунки, яка розташована під кутом 75 градусів, але й тієї частини лунки, яка розташована під кутом 15 градусів (рис. 8,а). Усередині лунки

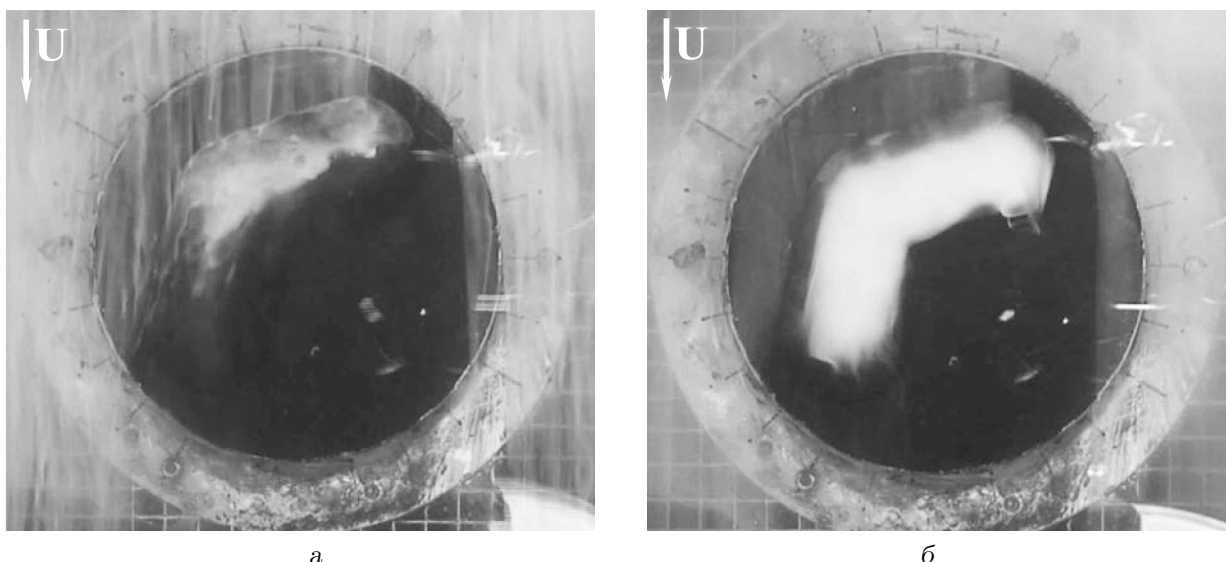


Рис. 8. Формування вихрового руху усередині лунки складної геометрії, яку розташовано під кутом 75° , для чисел Рейнольдса Re_d : а – 4000 та б – 10000

контрастний фарбник не здійснював обертально-го або циркуляційного руху, а поступово заповнював усе заглиблення. Періодично розмите покриття викидалося назовні з обох нахилених частин лунки. Інтенсивні викиди спостерігалися над кормовою частиною передньої овальної лунки з частотою $f=0.26$ Гц ($St=0.12$), а над кормовою овальною лункою – з частотою $f=0.31$ Гц ($St=0.14$). Момент викиду контрастного фарбника назовні з передньої частини лунки для швидкості потоку 0.1 м/с представлено на рис. 8,а. Над кормовою овальною лункою, яка була розташована під кутом 15 градусів, викид спостерігався на відстані $(0...1)d$ від поздовжньої осі пластини, подібно попередній конфігурації лунки (див., рис. 7,а), але з меншою інтенсивністю. Після викиду із кормової частини лунки слід контрастного фарбника простежувався на відстані близько $(8...10)$ діаметрів лунки.

Під час обтікання пластини із заглибленням, розташованим як показано на рис. 2,з, зі швидкістю 0.25 м/с також спостерігалася розділення вихрового руху усередині лунки на дві частини (рис. 8,б) з протилежно обертовими вихорами, подібно результатам, які представлено на рис. 7,б. Одна спіралеподібна вихрова структура утворювалася у передній за потоком сферичній частині лунки, вона оберталася за годинникову стрілкою та викидалася над кормовою стінкою передньої сферичної частини овальної лунки з частотою $f=1.89$ Гц ($St=0.3$). Друга спіралеподібна вихрова структура більшого масштабу зароджувалася

на відстані діаметру від переднього за потоком краю лунки та заповнювала усю кормову частину лунки. Ця вихрова структура, коливаючись, рухалася вздовж придонної частини передньої овальної лунки до кормової овальної лунки, яка розташовувалася під кутом 15 градусів до напрямку потоку. Над кормовою стінкою лунки за місцем спряження двох овальних лунок на відстані $(0.2...1)d$ від поздовжньої осі пластини великомасштабна спіралеподібна вихрова структура періодично та інтенсивно викидалася назовні з лунки, підіймаючись над пластиною на кут до 10 градусів.

ВИСНОВКИ

На підставі отриманих експериментальних результатів з вивчення особливостей формування вихрової течії усередині лунки складної геометричної форми, складеної з двох овальних лунок видовженням 2 і розташованої на плоскій поверхні під різними кутами відносно напрямку потоку, та в її ближньому сліді можна зробити наступні висновки:

1. Установлено, що для ламінарного режиму течії усередині лунок складної геометричної форми не спостерігалася вихрового руху. В лунках відбувалося коливальне переміщення рідини, яка періодично викидалася над кормовими частинами лунок. Слід викинутої речовини спостерігався до 10 діаметрів лунки.

2. В умовах перехідного та турбулентного режиму течії усередині лунок складної геометричної форми зароджувалися великомасштабні когерентні вихрові структури, які мали різні місця генерації, переміщення вздовж лунок та викидів назовні з лунок у примезовий шар у залежності від кута розташування лунок на обтічній поверхні пластини.

3. Визначено, що усередині лунок генерувалися пари протилежно обертових спіралеподібних вихрових структур, які, викидаючись назовні із лунок, набували вигляду пари протилежно обертових поздовжніх вихорів, що взаємодіяли з вихровими структурами примезового шару у сліді лунок до 10 їхніх діаметрів. В залежності від розташування лунок складної геометричної форми на обтічній поверхні пластини ці пари протилежно обертових вихорів мали різні відстані одна від одної та різну інтенсивність.

4. Установлено, що усередині лунок V-подібної форми для перехідного та турбулентного режиму течії генерувалися підковоподібні вихрові структури, які зі збільшенням швидкості, зменшуючись за масштабом, притискалися до відривної стінки лунки. Викид вихрових структур назовні з такої лунки спостерігався у вигляді вихрової пелени і мав місце над кормовою стінкою у серединному перерізі лунки.

5. Визначено, що число Струхала для частоти викидів водорозчинного покриття назовні з лунок в умовах ламінарного режиму течії складало від 0.05 до 0.14, а для перехідної та турбулентної течії число Струхала для частоти викидів великомасштабних когерентних вихрових структур, які зароджувалися усередині овальних лунок, дрібномасштабних вихорів зсувного шару та вихорів, які утворювали вихрову пелену, збільшилося від 0.15 майже до 0.5.

1. 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., СПб.: 2001. – 360
2. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок). – К.: ИТГФ НАНУ, 2005. – 140 с.
3. Grinchenko V. T., Voropaev G. A., Isaev S. A., Voskoboinick V. A., Rozumnyuk N. V., Voskoboinick A. V. Vortex formation control by an asymmetry of the streamlined dimple // Abstracts VIII-th International Conference Problems of Industrial Heat Engineering. – Kyiv: IET NASU. – 2013. – P. 35–36.
4. Kiknadze G. I., Gachechiladze I. A., Gorodkov A. Yu. Self-organization of tornado-like jets in flows of gases and liquids and the technologies utilizing this phenomenon // Proceedings of the ASME 2009 Heat Transfer Summer Conference HT2009 July 19-23, 2009. – San Francisco, California USA. – HT2009-88644. – P. 1–14.
5. Исаев С. А., Леонтьев А. И., Корнев Н. В. Численное моделирование смерчевого теплообмена при обтекании поверхностей с лунками (состояние и перспективы) // VI Минский Межд. Форум по Теплообмену, ММФ 2008 : сб. докл. – Минск (Беларусь). – 2008. – С. 1–9.
6. Гринченко В. Т., Воропаев Г. А., Исаев С. А., Воскобойник В. А., Воскобойник А. А., Воскобойник А. В. Управление ламинарным пограничным слоем вихрями, генерируемыми овальной лункой // Вісник Донецького Університету, Сер. А: Природничі науки. – 2009. – Вип. 1. – С. 191–198.
7. Isaev S., Voropaev G., Grinchenko V., Sudakov A., Voskoboinick V., Rozumnyuk N. Drag reduction of lifting surfaces at the use of oval dimples as vortex generators // Abstract of the European Drag Reduction and Flow Control Meeting "EDRFCM 2010" 2-4 September, 2010. – Kyiv, Ukraine. – 2010. – P. 7–8.
8. Najm H. N., Ghoniem A. F. Numerical simulation of the convective instability in a dump combustor // AIAA J. – 2007. – 29, № 6. – P. 911–919.
9. Jordan C. N., Wright L. M. Heat transfer enhancement in a rectangular (AR = 3:1) channel with V-shaped dimples // J. Turbomach. – 2013. – 135, № 1. – P. 011028–1–10.
10. Гортышов Ю. Ф., Попов И. А., Олишпиев В. В., Щелчков А. В., Каськов С. И. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. – Казань: Центр инновационных технологий, 2009. – 534 с.
11. Su B. High-resolution temperature measurement during forced convective heat transfer at a wall with a dimple structure: PhD Dissertation. – Darmstadt, Germany : TU Darmstadt, 2015. – 124 p.
12. Tay C. M. J., Khoo B. C., Chew Y. T. Mechanics of drag reduction by shallow dimples in channel flow // Phys. Fluids. – 2015. – 27, № 3. – P. 035109–1–22.
13. Voskoboinick 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.
14. Воскобойник В. А., Воскобойник А. В. Когерентні вихрові структури в поперечно обтічній овальній лунці // Наукоємні технології. – 2014. – 23, № 3. – С. 352–358.
15. Воскобойник В. А., Воскобойник А. В. Вихровий рух усередині півсферичної лунки на плоскій поверхні // Промышленная теплотехника. – 2012. – 34, № 6. – С. 7–14.
16. Воскобойник В. А., Воскобойник А. В. Структура течії та пульсації тиску усередині овальної лунки // Наукоємні технології. – 2012. – 13, № 1. – С. 12–18.
17. Faure T. M., Adrianos P., Lusseyran F., Pastur L. Visualizations of the flow inside an open cavity at medium range Reynolds numbers // Exp. Fluids. – 2007. – 42, № 2. – P. 169–184.
18. Воскобойник В. А., Воскобойник А. А., Воскобойник А. В. Визуализация вихревого течения внутри и вблизи поперечно обтекаемой овальной лунки на плоской поверхности // Промышленная теплотехника. – 2014. – 36, № 3. – С. 13–21.

19. Воскобійник В. А. Вихроутворення усередині поперечно обтічної овальної лунки // Прикладна гідромеханіка.– 2012.– 14, № 4.– С. 37–46.
20. Turnow J., Kornev N., Isaev S., Hassel E. Vortex mechanism of heat transfer enhancement in a channel with spherical and oval dimples // Heat Mass Transfer.– 2011.– 47, № 3.– P. 301–313.
21. Kornev N., Turnow J., Hassel E., Isaev S., Wurm F.-H. Fluid mechanics and heat transfer in a channel with spherical and oval dimples // Turbulence and Interactions, NNFM 110, M. Deville, T.-H. Le, and P. Sagaut (Eds.).– Springer-Verlag Berlin Heidelberg.– 2010.– P. 231–237.
22. Воскобійник В. А. Просторово-часові характеристики когерентних структур, полів швидкості та тиску у лункових генераторах вихорів: Автореф. дис. д. т. н.: 01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми.– Київ: Інститут гідромеханіки НАН України, 2013.– 40 с.
23. Воропаєв Г. А., Воскобойник А. В., Воскобойник В. А., Исаев С. А. Визуалізація ламинарного обтекания овального углубления // Прикладна гідромеханіка.– 2009.– 11, № 4.– С. 31–46.
24. Turnow J., Kornev N., Zhdanov V., Hassel E. Flow structures and heat transfer on dimples in a staggered arrangement // Int. J. Heat and Fluid Flow.– 2012.– 35, № 3.– P. 168–175.
25. Гринченко В. Т., Исаев С. А., Воропаев Г. А., Воскобойник В. А. Управление пограничным слоем луночным рельефом на обтекаемой поверхности // Модели и методы аэродинамики: X международная школа-семинар : материалы семинара.– М.: МЦНМО.– 2010.– С. 51–52.
26. Воскобійник В. А., Воскобойник О. А., Воскобойник А. В. Формування вихрових структур у системі овальних лунок та генерація пульсацій тиску // Матеріали V міжнар. наук. конф. “Прикладні проблеми аерогідромеханіки та тепломасопереносу”.– Дніпропетровськ: ДНУ.– 2014.– С. 65–69.
27. Voskoboinick V., Voskoboinick A., Stepanovitch V. Generation of vortex structures by pair oval dimples on flat plate // Proc. European Drag Reduction and Flow Control Meeting – EDRFCM 2015, March 23–26, 2015.– Cambridge, UK.– 2015.– P. 43–44.
28. Voskoboinick V., Artemiev A., Voskoboinick A., Smoljar V., Stepanovitch V. Generation features of the coherent vortex structures by cavities and bumps on a streamlined surface // Proc. 3rd EUMLS Conference “Mathematics for Life Sciences” .– Rivne, Ukraine.– 2015.– P. 50.