

УДК 532.517

ВИХРОВИЙ РУХ УСЕРЕДИНИ ЛУНКИ СКЛАДНОЇ ГЕОМЕТРІЇ

В. А. Воскобійник[†], А. В. Воскобійник, О. А. Воскобойник,
В. М. Степанович, І. А. Хижа

Інститут гідромеханіки НАН України
вул. Желябова, 8/4, 03057, Київ, Україна
[†]E-mail: vlad.vsk@gmail.com

Отримано 04.11.2016

У роботі представлені дані візуального дослідження особливостей генерації та еволюції вихрової течії води всередині заглиблень на плоскій поверхні у вигляді одиночних V- і Λ -подібних лунок при обтіканні їх під різними кутами. Лунки зазначеної геометрії були сформовані в результаті спряження двох овальних фрагментів з видовженням 2. Швидкості основного потоку варіювалися в межах $U = (0.1 \dots 0.5)$ м/с, що відповідало діапазону чисел Рейнольдса $Re_d = Ud/\nu = (4 \dots 20) \cdot 10^3$, розрахованих за діаметром заокруглення лунки. Візуалізація проводилася за допомогою спеціально підібраних водорозчинних покриттів і контрастних фарб з нульовою плавучістю, які вводилися в пристінний шар потоку. В умовах ламінарної течії усередині заглиблень складної геометрії генерація вихрових структур не спостерігалась. Для перехідного й турбулентного режимів течії усередині V-подібної лунки формувалися підковоподібні вихрові структури, які зі збільшенням швидкості зменшувалися за розмірами й притискалися до відривної стінки лунки. Водночас у серединному перерізі такої лунки спостерігалися періодичні викиди пелени дрібномасштабних вихорів. Усередині Λ -подібної лунки генерувалися спіралеподібні вихрові структури, які, періодично викидаючись і переміщуючись у сліді за лункою, формували пари поздовжніх вихорів із взаємно протилежними напрямками обертання. При зміні кута нахилу V- і Λ -подібних лунок у площині пластини було відзначено зміну характеру формування й викиду вихрових структур. Для ламінарної течії число Струхала викидів потенційної рідини знаходилось у межах від 0.05 до 0.14. В умовах перехідної й турбулентної течій значення числа Струхала викидів вихрових різномасштабних структур і вихрової пелени зросло з 0.15 до 0.5.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: заглиблення, візуалізація течії, когерентна вихрова структура, вихрова пелена, викид, число Рейнольдса, число Струхала

1. ВСТУП

Важливий чинник, який визначає ефективність руху тіл при заданій швидкості — мінімізація енергетичних втрат, пов'язаних опором тертя і форми за рахунок керування течією або примежовим шаром. У багатьох гідротехнічних спорудах і конструкціях наявні різноманітні неоднорідності обтічної поверхні у вигляді заглиблень. За відповідних умов обтікання таких заглиблень усередині них утворюються когерентні вихрові системи, які генерують інтенсивні пульсації швидкості, тиску, температури, завихреності й інших параметрів турбулентності. Згадане явище широко використовується як засіб керування примежовим шаром. У залежності від режиму обтікання, геометричних параметрів і форми заглиблення, усередині них виникають вихрові структури, яким притаманні різні масштаби, напрямки руху, частоти обертання й осциляцій у просторі і в часі. Ці вихрові структури, взаємодіючи між собою та обтічною поверхнею, за певних умов викидаються з заглиблення назовні, змінюючи структуру примежового шару й інтегральні характеристики процесів обтікання, теплообміну та змішування, якість аеродинамічних профілів і т. ін. [1–3].

У другій половині минулого сторіччя розпочалося системне вивчення вихрових структур, які формуються під час обтікання заглиблень на криволінійній або плоскій поверхні [2, 4, 5]. Результати експериментальних аеродинамічних і теплофізичних досліджень показали досить високу ефективність деяких рельєфів заглиблень, які забезпечували збільшення тепло- і масопереносу при незначному зростанні гідродинамічних втрат. У роботах [5, 6] було відзначено, 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 відносне тепловідведення від околиць сферичних лунок суттєво нижче, ніж у випадку овальних заглиблень. Перевагу овальних лунок визначає здатність створювати вихрові структури з інтенсивною вторинною течією, яка забезпечує їм конкурентоспроможність під час ламінарного режиму обтікання. Існування біфуркації вихрової картини у випадку сферичної форми лунки суттєво зменшує тепловідведення лункового рельєфу. Це слід враховувати при проектуванні енергозберігаючих систем, у яких лункові поверхні використовуються як один із методів керування пристінними потоками. У роботі [7] показано, що розташовані на стінці вузького мікроканалу овальні лунки, на відміну від сферичних заглиблень, здатні інтенсифікувати теплообмін, збільшуючи тепловіддачу приблизно на 10 %. За рахунок зниження гідрравлічних втрат теплогідрравлічна ефективність лункової поверхні зростає ще більше — до 13%.

Протягом останніх років багато досліджень було присвячено визначенню оптимальної конфігурації лункової поверхні. Так, у роботі [8] проведено чисельне моделювання задля визначення особливостей теплопереносу на лункових поверхнях семи різних конфігурацій. Визначено, що більш високі теплофізична ефективність і вихрова інтенсивність спостерігаються на нахилених циліндричних лунках. У роботі [9] експериментально досліджувалось перенесення тепла у прямокутному каналі з видовженням 3:1, у якому зроблено V-подібні лунки (Рис. 1). Як результат показано, що лунки запропонованої форми за визначених умов обтікання виявились ефективнішими, ніж традиційні виступи або сферичні лунки. Для малих чисел Рейнольдса, розрахованих за еквівалентним

діаметром каналу та середньовитратною швидкістю потоку, коефіцієнти теплоперенесення й тертя для V-подібних і сферичних лунок демонструють схожу поведінку. Але при числах Рейнольдса понад 30000 вторинні течії, які виникають усередині V-подібних заглиблень, призводять до підвищення теплоперенесення на такій лунковій поверхні за умови незначного зростання опору тиску.

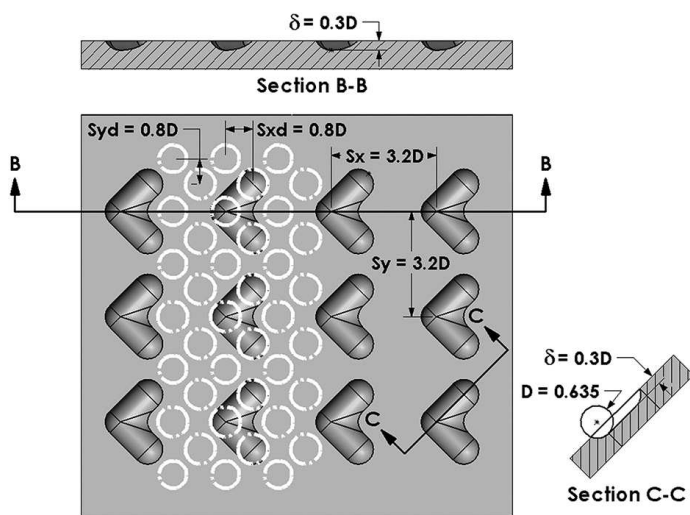


Рис. 1. Розташування системи V-подібних лунок на обтічній плоскій поверхні прямокутного каналу

мічними параметрами, можливе за умови використання овальних лунок помірної глибини. У зв'язку з цим за мету було поставлено на прикладі пари овальних лунок експериментально дослідити механізми й закономірності формування та еволюції вихрових структур у заглибленнях складної форми, визначити їхню взаємодію між собою і з примежовим шаром.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТА ПРОГРАМА ДОСЛІДЖЕНЬ

Генерація вихрових структур з керованими геометричними, кінематичними і динамічними характеристиками є актуальною проблемою в теорії та практиці керування примежовими шарами й відривними течіями за допомогою активних і пасивних методів. Формування лунковими генераторами вихорів стійких вихрових систем, які взаємодіють між собою та з вихровими структурами у зсувних течіях, — багатофакторний процес, вивчення якого вимагає проведення кропітких і трудомістких чисельних та експериментальних науково-дослідних робіт. Особливості вихроутворення усередині лунки у вигляді латинської літери V або грецької літери Λ , розташованої під різними кутами до напрямку потоку на гідравлічно гладкій плоскій поверхні, досліджувались за допомогою візуалізації течії. Нанесення на поверхню водорозчинних покриттів або уведення в потік різноколірних барвників дозволяло спостерігати місця формування вихрового руху усередині заглиблень, оцінювати масштаби вихрових структур, їхню форму й напрямок руху, а також місця й частоти викидів, спостерігати взаємодію останніх із вихровими структурами примежового шару. У результаті аналізу експериментальних даних визначено вплив орієнтації лунки складної геометрії на просторово-часові хара-

Необхідність практичного використання лункових рельєфів на обтічній поверхні з метою керування примежовим шаром з метою реалізації енергозберігаючих технологій у багатьох галузях науки і техніки диктує вивчення механізмів вихроутворення всередині обтічних заглиблень і виявлення їхніх гідродинамічних особливостей. Як показують останні наукові дослідження [10–13], створення генераторів вихорів, які б мали мінімальний гідродинамічний опір і генерували штучні вихрові системи з заданими кінематичними і дина-

ктеристики когерентних вихрових структур, які зароджувалися всередині лунки під дією набігаючого потоку та відривної течії, що утворювалася над отвором лунки.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД І МЕТОДИКА

Експерименти було проведено в гідродинамічному лотку з відкритою поверхнею води, який мав довжину 16 м, ширину 1 м і глибину 0.4 м. На відстані близько 8 м від вхідної частини лотку розташовувалась вимірювальна ділянка, обладнана контрольно-вимірювальною апаратурою й засобами візуалізації і реєстрації характеристик потоку, координатними пристроями, освітлювальною апаратурою та іншими допоміжними інструментами, необхідними для проведення досліджень. Конструкція й устаткування гідродинамічного лотка дозволили в широких межах регулювати швидкість і глибину потоку. Наявність різноманітних добре обтічних координатних елементів і ножів дала можливість з необхідною точністю (відповідно до розрахункових значень) встановлювати досліджувані моделі, вимірювальні прилади й інструменти. Виготовлені з товстого протиударного скла прозорі стінки гідродинамічного лотка забезпечили проведення якісних візуальних досліджень.

Гідравлічно гладку пластину, виготовлену з полірованого органічного скла 0.01 м завтовшки, 0.5 м завширшки і 2 м завдовжки було загострено з фронтального й крмового кінців для забезпечення безвідривного її обтікання. До бічних сторін пластини кріпилися кінцеві шайби з органічного скла товщиною 0.005 м і шириною 0.2 м. На відстані $X = 0.8$ м від фронтального краю пластини знаходився отвір, у якому робилося заглиблення складної форми у вигляді трьох сферичних лунок, об'єднаних циліндричними вставками (Рис. 2). До нижньої частини пластини в місці розташування овального заглиблення кріпився аркуш з масштабною сіткою та обтічник із пінопласту (Рис. 3). Конструкція моделі дозволяла обертати заглиблення навколо своєї осі в площині пластини на довільний кут.

При проведенні візуалізації течії в якості змивного контрастного покриття застосовувалося згущене молоко (його густина у 1.3 вища за густину води), попередньо змішане з білою або чорною сажею для надання розчину нейтральної плавучості й нанесене на поверхню пластини. Картини розмиву покриття та його темп дали можливість зафіксувати зони підвищених дотичних напружень, області дії вихрових систем, які викидалися із лунки, оцінити частоти викидів, напрями переносу та обертання [14–16]. Реєстрація руху частинок сажі, які змивалися з обтічної поверхні, дала можливість оцінити швидкості й траєкторію руху досліджуваних вихрових структур. Візуалізацію було проведено для швидкості потоку $U = (0.1 \dots 0.5)$ м/с, чисел Рейнольдса $Re_x = UX/\nu = (0.8 \dots 4) \cdot 10^5$ і $Re_d = Ud/\nu = (0.4 \dots 2) \cdot 10^4$, розрахованих за відстанню від початку пластини до місця розташування лунок та за діаметром лунок відповідно (ν — кінематичний коефіцієнт в'язкості). Барвники й мічені частинки з густиною, близькою до густини води, через трубки малого діаметру вводились у примежовий шар перед заглибленням та/або всередину заглиблення (Рис. 4). Використання відео- та фотоапаратури дало можливість реєструвати картини течії, які у подальшому оброблялись і аналізувались за допомогою графічних станцій на базі персональних комп'ютерів з використанням штатного і спеціально розробленого програмного забезпечення [17–19].

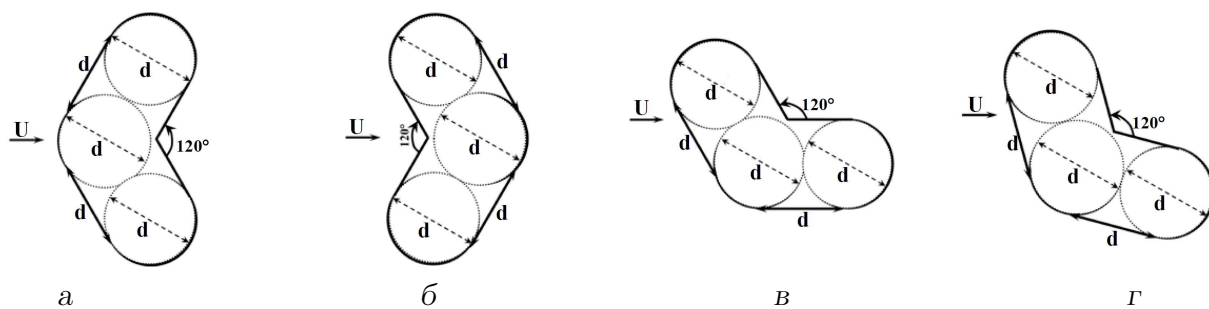


Рис. 2. Розташування заглиблення складної форми відносно напрямку основного потоку:
а – V-подібне, б – Λ -подібне, в – V-подібне під кутом 60° , г – V-подібне під кутом 75°

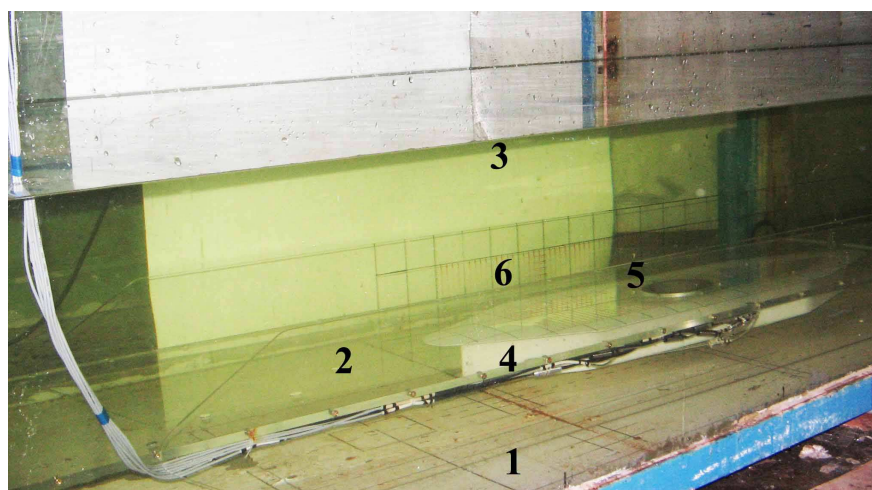


Рис. 3. Розташування пластини з лункою складної геометрії в гідродинамічному лотку:
1 – лоток, 2 – пластина, 3 – рівень води, 4 – обтічник, 5 – заглиблення, 6 – координатна сітка

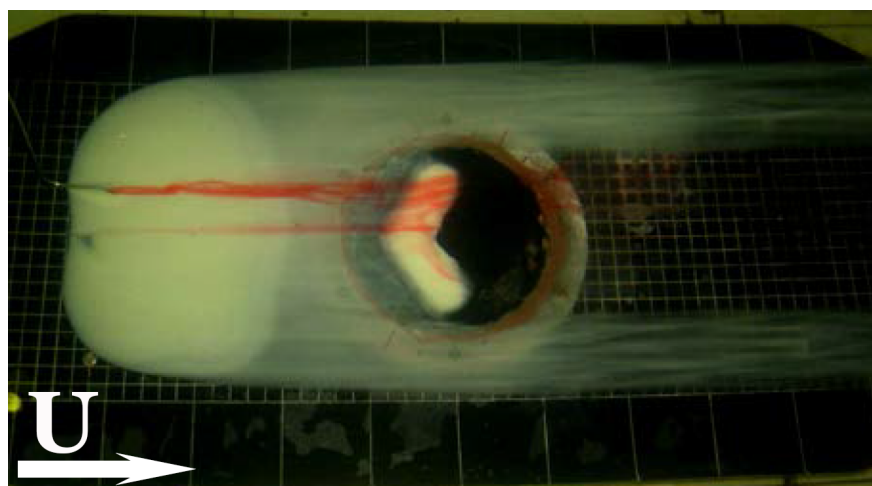


Рис. 4. Візуалізація вихрової течії водорозчинним покриттям і подачею кольорового барвника

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Аналіз результатів попередніх досліджень [20–22] дозволив визначити оптимальні параметри асиметричної овальної лунки з точки зору найбільшої теплогідравлічної ефективності, а також формування стійких вихрових структур в її сліді. Так, в експериментах довжина циліндричної вставки дорівнювала діаметру сферичного сегмента при куті розташування лунки 60° відносно напрямку потоку [23–25]. Однак при наявності такої лунки формувалась моновихрова структура у сліді за нею, а стійкою може бути тільки пара вихрових структур приблизно однакової інтенсивності з протилежними напрямками обертання. Виходячи з цього, з метою формування більш стійких вихрових структур було досліджено розташовані під заданими кутами заглиблення складної форми, які можуть генерувати пару вихрових структур з описаними вище властивостями [26–28].

Так, для швидкостей течії 0.1, 0.25 і 0.5 м/с було досліджено конфігурацію заглиблення, обидві частини якого розташовані під кутами 60 градусів відносно поздовжньої осі пластини у вигляді літери V (див. Рис. 2а). Як показано на Рис. 5а, для швидкості обтікання 0.1 м/с ($Re_x = 8 \cdot 10^4$ і $Re_d = 4 \cdot 10^3$) водорозчинне покриття заходило всередину заглиблення вздовж усього переднього за потоком його краю. Під час подачі контрастного барвника в логарифмічну та зовнішню області примежового шару заходу його в лунку не спостерігалось (Рис. 4). Усередині лунки контрастна речовина, яка зайшла з пристінної області примежового шару, не здійснювала обертового чи циркуляційного руху, а заповнювала собою майже усе заглиблення, повільно коливаючись. Періодично викиди підфарбованої рідини відбувалися з обох кормових боків лунки з частотою $f = 0.23$ Гц ($St = fd/U = 0.09$, де $d=0.04$ м), але не синхронно (див. Рис. 5а). Під час викиду підфарбована рідина робила синусоподібні коливання й пересувалася у слід лунки. Коливання підфарбованої рідини з середньою частотою $f = 0.12$ Гц ($St = 0.05$) спостерігалось на відстані $z = (0.6 \dots 0.7)d$ від осі лунки. Зона викидів розташовувалась 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 до $(7 \dots 9)$ 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 знаходились його у лівій та правій половині. Вони обертались в одному напрямку у площині XOY , а їхні верхні частини рухалися за потоком. В серединній (осьовій) частині лунки ці вихрові структури об'єднувались, утворюючи підковоподібну вихрову систему з джерелами у кормових сферичних частинах лунки. Серединна частина цієї вихрової системи, досягаючи розмірів лунки, зносилася потоком у вигляді вихрової пелени, яка утворювалась дрібномасштабними вихровими структурами зсувного шару й верхівками підковоподібної вихрової системи. Викиди описаних вихрових структур відбувались поблизу поздовжньої осі пластини у передній за потоком частині заглиблення з частотою $f = 2.09$ Гц ($St = 0.33$) у проміжку $|z| < 0.2d$ відносно поздовжньої осі пластини (див. Рис. 5б). Усередині лунки поблизу осі пластини підковоподібна вихрова система мала поперечний масштаб близько $0.8d$, а з віддаленням від осі він монотонно зменшувався до $0.25d$ на відстані $0.5d$ від бічних країв лунки. У проміжках $-d < z < -0.5d$ і $0.5d < z < d$ (кормові частини V-подібної лунки) формування когерентних вихрових структур не спосте-

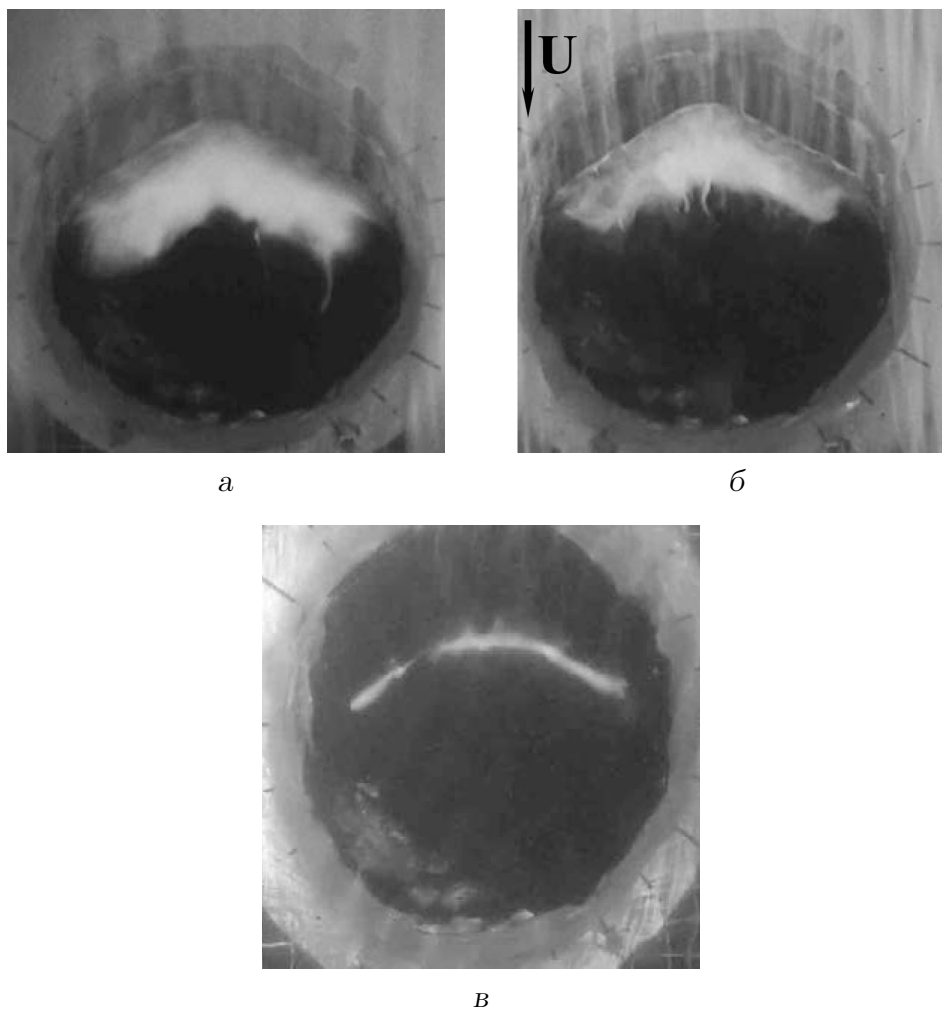


Рис. 5. Вихрові структури всередині V-подібної лунки для різних чисел Рейнольдса:
 а – $Re_d = 4000$, б – $Re_d = 10000$, в – $Re_d = 20000$

рігалось. Слід вихрової пелени поширювався за лункою до відстані 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 барвником 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, який взаємодіяв із кормовою стінкою майже відразу за осьовим перерізом заглиблення (див. Рис. 5в). Більша частина контрастного покриття, відірвавшись від переднього краю заглиблення, одразу виносилося потоком із 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 фіксувались як в околі поздовжньої осі лунки, так і поблизу її бічних країв.

Після розвертання V-подібної лунки на 180° у площині пластини було отримано іншу конфігурацію заглиблення — у вигляді грецької літери Λ (див. Рис. 2б). Для неї досліди також проводилися для швидкостей обтікання 0.1, 0.25 і 0.5 м/с. При швид-

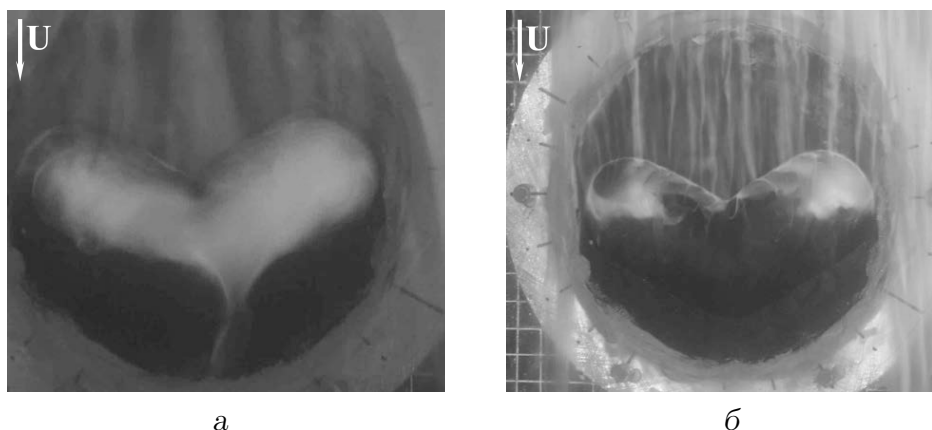


Рис. 6. Вихрові структури всередині Λ -подібної лунки для різних чисел Рейнольдса:
 а — $Re_d = 4000$, б — $Re_d = 10000$

кості обтікання 0.1 м/с контрастне покриття заходило всередину заглиблення вздовж усього його переднього за потоком краю перпендикулярно поперечному перерізу кожної з частин заглиблення, лівої та правої (див. Рис. 6а). Викиди контрастного покриття відбувались періодично в околі поздовжньої осі симетрії пластини з частотою $f = 0.22$ Гц ($St = 0.09$). Усередині лунки обертального чи циркуляційного руху контрастної речовини не спостерігалось, вона заповнювала все заглиблення й рухалася поблизу кормової стінки від бокових країв лунки до поздовжньої осі пластини. Після викиду контрастне покриття, коливаючись у просторі й пересуваючись уздовж серединного перерізу лунки, поступово та повільно скручувалось у джгут у сліді за нею. Зона викиду розташовувалась на проміжку $|z| < 0.1d$ від поздовжньої осі пластини, а сама структура, яка вийшла з лунки, зберігала свою ідентичність на відстані до $(9 \dots 11)$ діаметрів лунки за заглибленням.

Під час обтікання пластини з лункою зі швидкістю 0.25 м/с картина суттєво змінилась. Тепер контрастне покриття концентрувалось в обох бічних областях заглиблення — у проміжках $-1.4d < z < -0.6d$ і $0.6d < z < 1.4d$ відносно поздовжньої осі пластини (див. Рис. 6б). Тут відбувались викиди спіралеподібних вихрових структур із лівого та правого боків заглиблення у проміжках $-1.2d < z < -0.8d$ і $0.8d < z < 1.2d$ відносно поздовжньої осі пластини з частотою $f = 3.3$ Гц ($St = 0.53$). Викиди з обох частин лунки відбувались майже синхронно. У самій лунці обидва вихори оберталися у площині XOZ , у протилежних напрямках. Якщо дивитись проти напрямку потоку, вихор у лівій частині лунки обертався проти годинникової стрілки, а у правій — за нею (див. Рис. 6б). У сліді за лункою спіралеподібні вихори утворювали пару поздовжніх вихорів з протилежними напрямками обертання, які розташовувались на відстані $(1.2 \dots 1.5)d$ один від одного. Вплив вихрових систем, які викидались назовні з заглиблення, на структуру примежового шару реєструвався на віддаленні до $(8 \dots 9)$ діаметрів лунки.

Для швидкості обтікання 0.5 м/с контрастне покриття усередині лунки, яке показувало застійні області у ній, концентрувалось переважно в околі бічних країв заглиблення, де спостерігались неінтенсивні викиди спіралеподібних вихрових структур з частотами $f \approx 4$ Гц ($St \approx 0.32$). Згадані вихрові структури також утворювали у сліді

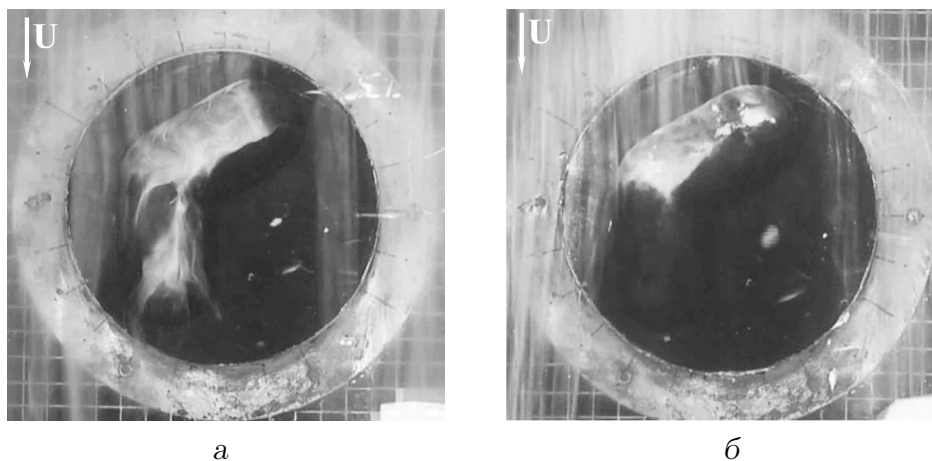


Рис. 7. Вихрові структури всередині розташованої під кутом 60° лунки складної геометрії для чисел різних Рейнольдса:
 а — $Re_d = 4000$, б — $Re_d = 10000$

лунки пару вихорів з протилежними напрямками обертання, які розташовувались на відстані приблизно $1.5d$ один від одного.

Візуальні дослідження особливостей формування й розвитку вихрової течії всередині заглиблення складної геометричної форми і його взаємодії з примежовим шаром над плоскою пластиною виявили ряд закономірностей еволюції течії в лунці в залежності від кута розташування заглиблення. У лунках V- та Λ -подібної форми в різних режимах течії генерувалися пари вихорів з протилежними напрямками обертання, поодинокі спіралеподібні вихори або вихрові пелени. Для створення стійкої когерентної вихрової структури, яка б зберігала свою ідентичність довгий час, впливаючи на пристінну течію за заглибленням, було запропоновано розвернути лунку складної геометрії відносно напрямку потоку в площині пластини.

При розташуванні передньої за потоком частини заглиблення під кутом 60° і обтіканні кормової її частини під кутом 0° (див. Рис. 2в) для швидкості обтікання $U=0.1$ м/с ($Re_x = 8 \cdot 10^4$) контрастна речовина заходила до середини лунки уздовж передньої частини лунки в основному вздовж центрального півкола і сполученої з ним циліндричної частини. Відривної області за переднім краєм заглиблення для цього ламінарного режиму течії не спостерігалось, а контрастна речовина всередині лунки не демонструвала обертального або циркуляційного руху. Натомість відзначався її рух у напрямку поздовжньої осі заглиблення у кормову за потоком частину лунки, де відбувались періодичні викиди назовні з частотою $f = 0.24$ Гц ($St = 0.09$). Перед викидом поверхня контрастної рідини в заглибленні (на рівні площини пластини) здійснювала осциляції у вигляді хвильового пакету — як правило, (3...4) біжучих хвиль, фронт яких був перпендикулярним до напрямку потоку, а довжина становила майже половину діаметра заглиблення. Згадані хвилі переносились зі швидкістю близько $(0.4 \dots 0.5)U$. Викиди спостерігались за частиною лунки, розташованою під кутом $\alpha = 0^\circ$ на відстані $(-0.25 \dots 1)d$ від поздовжньої осі пластини (див. Рис. 7а). Викинута рідина, коливаючись, виносилася здебільшого до середини товщини примежового шару (але іноді й до його верхньої межі) та переносилася паралельно до поздовжньої осі пластини у сліди

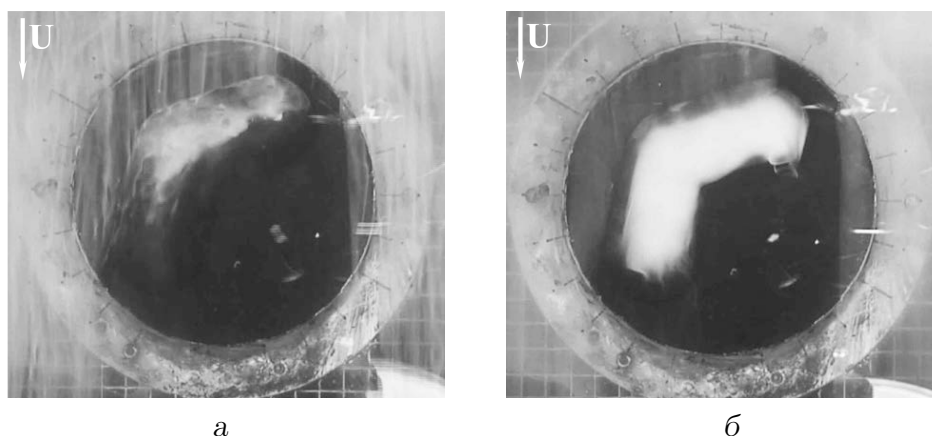


Рис. 8. Вихрові структури всередині розташованої під кутом 75° лунки складної геометрії для різних чисел Рейнольдса:
 а — $Re_d = 4000$, б — $Re_d = 10000$

кормової частини заглиблення. Слід контрастної речовини простежувався на віддаленнях до $(10 \dots 12)$ діаметрів лунки.

При збільшенні швидкості обтікання до 0.25 м/с спостерігалось комірчасте розділення вихрового руху в лунці на дві частини (див. Рис. 7б). Перша спіралеподібна вихрова структура утворювалась у передній за потоком сферичній частині лунки з джерелом майже в її центрі. Вона оберталась за годинниковою стрілкою відносно нормальної до площини пластини вісі та викидалась із частотою $f = 1.61$ Гц ($St = 0.26$). Інша структура, яка мала вигляд великомасштабного викривленого спіралеподібного вихору, заповнювала більше двох третин площі лунки й рухалась з її передньої частини в кормову. У цьому випадку джерело знаходилося на дні переднього овального сегменту лунки (ближче до його кормового сферичного закінчення), а сама вихрова структура оберталась у напрямку, протилежному до першої структури, піднімаючись над кормовою частиною заглиблення на кут $(5 \dots 10)^\circ$. При цьому вона коливалась у просторі та викидалась із частотою $f = 0.95$ Гц ($St = 0.15$), причому викиди спостерігалися на відстані $(0.1 \dots 1)d$ від поздовжньої осі пластини за фрагментом досліджуваної лунки, розташованим під кутом $\alpha = 0^\circ$. Зауважимо, що для цієї швидкості слід контрастної речовини простежувався вже тільки на віддаленні до $(8 \dots 9)$ діаметрів лунки.

Для заглиблення з передньою частиною, розташованою під кутом 75° , а кормовою — 15° відносно поздовжньої осі пластини (див. Рис. 2г) при швидкості обтікання 0.1 м/с контрастний барвник заходив усередину вже не тільки вздовж краю переднього овального фрагмента лунки, але й частини її кормового фрагмента (див. Рис. 8а). Усередині лунки не відзначалось обертого або циркуляційного руху, і контрастний барвник поступово заповнював усе заглиблення. Періодично розмите покриття викидалося назовні з обох нахилених частин лунки. Так, інтенсивні викиди спостерігались над переднім овальним фрагментом із частотою $f = 0.26$ ($St = 0.12$), а над кормовим — із частотою $f = 0.31$ Гц ($St = 0.14$).

Характерний момент викиду контрастного барвника назовні з передньої частини лунки для швидкості потоку 0.1 м/с представлено на Рис. 8а. Як і для попередньо розглянутої конфігурації лунки (Рис. 7а), викиди спостерігались на відстані $(0 \dots 1)d$ від

поздовжньої осі пластини над кормовим овальним фрагментом лунки, але з меншою інтенсивністю. Після викиду із кормової частини лунки слід контрастного барвника простежувався на відстані близько (8...10) діаметрів лунки.

Аналогічно до показаної на Рис. 7б картини течії, під час обтікання зі швидкістю 0.25 м/с пластини з заглибленням, конфігурація якого відповідає Рис. 2г, також спостерігалось розділення вихрового руху усередині лунки на дві частини з вихорами із взаємно протилежними напрямками обертання (див. Рис. 8б). Одна спіралеподібна вихрова структура утворювалась у передній за потоком сферичній частині лунки, оберталась за годинниковою стрілкою й викидалась над кормовою стінкою передньої сферичної частини овальної лунки з частотою $f = 1.89$ Гц ($St = 0.3$). Друга спіралеподібна структура з більшим масштабом зароджувалась на відстані одного діаметра від переднього краю лунки й заповнювала усю її кормову частину. Ця вихрова структура, коливаючись, рухалась уздовж придонної частини переднього овального фрагмента лунки до кормового овального фрагмента, розташованого під кутом 15° до напрямку потоку. Над кормовою стінкою лунки за місцем спряження двох овальних лунок на відстані $(0.2 \dots 1)d$ від поздовжньої осі пластини спостерігались періодичні інтенсивні викиди великомасштабної спіралеподібної вихрової структури назовні з підйомом її над пластиною на кут до 10° .

5. ВИСНОВКИ

На підставі отриманих експериментальних результатів щодо особливостей формування вихрової течії всередині лунки складної геометрії, сформованої з двох овальних фрагментів з видовженням 2 і розташованої на плоскій поверхні під різними кутами відносно напрямку потоку, та в її ближньому сліді можна зробити такі висновки.

1. Встановлено, що для ламінарного режиму течії всередині лунок складної геометрії вихрового руху не спостерігалось. Натомість, у лунках відбувалося коливальне переміщення рідини, яка періодично викидалася над їхніми кормовими частинами. Слід викинутої речовини спостерігався на відстані до десяти діаметрів лунки вниз за потоком.
2. В умовах перехідного й турбулентного режимів течії всередині досліджуваних лунок зароджувалися великомасштабні когерентні вихрові структури. Для них були характерні різні місця генерації, переміщення вздовж лунок і викиди у прилежний шар, залежно від кута розташування лунок на обтічній поверхні пластини.
3. Визначено, що всередині лунок генерувалися пари протилежно закручених спіралеподібних вихрових структур. Після викиду з лунок назовні вони набували вигляду пари поздовжніх вихорів з протилежними напрямками обертання, які взаємодіяли з вихровими структурами прилежового шару у сліді лунок до десяти їх діаметрів. В залежності від розташування лунок складної геометричної форми на обтічній поверхні пластини, згадані пари характеризувалися різними відстанями між вихорами та різними їхніми інтенсивностями.
4. Усередині лунок V-подібної форми для перехідного й турбулентного режимів течії спостерігалась генерація підковоподібних вихрових структур, які зі збільшенням

швидкості зменшувались за масштабом і притискалися до відривної стінки лунки. Викид вихрових структур назовні у вигляді вихрової пелени відбувався над кормовою стінкою у серединному перерізі лунки.

5. Визначено, що число Струхаля для частоти викидів водорозчинного покриття з лунок в умовах ламінарного режиму течії складало від 0.05 до 0.14. Для перехідної й турбулентної течій число Струхаля, яке характеризує частоту викидів великомасштабних когерентних вихрових структур, зароджених усередині овальних лунок, дрібномасштабних вихорів зсувного шару та вихорів, які утворювали вихрову пелену, зростало від 0.15 до майже 0.5.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки (численное и физическое моделирование) / Под ред. А. В. Ермишина, С. А. Исаева. — Москва, Санкт-Петербург, 2001.
- [2] Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок). — Киев : Институт технической теплофизики НАН Украины, 2005.
- [3] Vortex formation control by an asymmetry of the streamlined dimple / V. T. Grinchenko, G. A. Voropayev, S. A. Isaev et al. // Abstracts of VIII International Conference “Problems of Industrial Heat Engineering”. — Kyiv : Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2013. — P. 35–36.
- [4] Kiknadze G. I., Gachechiladze I. A., Gorodkov A. Y. 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. — No. HT2009-88644. — San Francisco, CA, 2009. — 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 международный форум по теплообмену, ММФ 2008: Сборник докладов. — Минск, Беларусь, 2008. — С. 1–9.
- [6] Управление ламинарным пограничным слоем вихрями, генерируемыми овальной лункой / В. Т. Гринченко, Г. А. Воропаев, С. А. Исаев и др. // Вісник Донецького національного університету. — 2009. — № 1. — С. 191–198.
- [7] Drag reduction of lifting surfaces at the use of oval dimples as vortex generators / S. Isaev, G. Voropaev, V. Grinchenko et al. // Proceedings of the European Drag Reduction and Flow Control Meeting “EDRFCM 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 Journal. — 2007. — Vol. 29, no. 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 // *Journal of Turbomachinery*. — 2013. — Vol. 135, no. 1. — P. 011028(1–10).
- [10] 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.
- [11] Su B. High-resolution temperature measurement during forced convective heat transfer at a wall with a dimple structure : Ph.D. thesis / B. Su ; Technische Universität Darmstadt. — Darmstadt, Germany, 2015.
- [12] Tay C. M. J., Khoo B. C., Chew Y. T. Mechanics of drag reduction by shallow dimples in channel flow // *Physics of Fluids*. — 2015. — Vol. 27, no. 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 and Combustion*. — 2013. — Vol. 90, no. 2. — P. 86–99.
- [14] Воскобійник В. А., Воскобійник А. В. Когерентні вихрові структури в поперечно обтічній овальній лунці // *Наукоємні технології*. — 2014. — Т. 23, № 3. — С. 352–358.
- [15] Воскобійник В. А., Воскобійник А. В. Вихровий рух усередині півсферичної лунки на плоскій поверхні // *Промышленная теплотехника*. — 2012. — Т. 34, № 6. — С. 7–14.
- [16] Воскобійник В. А., Воскобійник А. В. Структура течії та пульсації тиску усередині овальної лунки // *Наукоємні технології*. — 2012. — Т. 13, № 1. — С. 12–18.
- [17] Visualizations of the flow inside an open cavity at medium range Reynolds number / T. M. Faure, P. Adrianos, F. Lusseyran, L. Pastur // *Experiments in Fluids*. — 2007. — Vol. 42, no. 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. — Т. 36, № 3. — С. 13–21.
- [19] Воскобійник В. А. Вихроутворення усередині поперечно обтічної овальної лунки // *Прикладна гідромеханіка*. — 2012. — Т. 14(86), № 4. — С. 37–46.
- [20] Vortex mechanism of heat transfer enhancement in a channel with spherical and oval dimples / J. Turnow, N. Kornev, S. Isaev, E. Hassel // *Heat and Mass Transfer*. — 2011. — Vol. 47, no. 3. — P. 301–313.
- [21] Fluid mechanics and heat transfer in a channel with spherical and oval dimples / N. Kornev, J. Turnow, E. Hassel et al. // *Turbulence and Interactions*. — Berlin, Heidelberg : Springer, 2010. — Vol. NFM 110 of Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multi-disciplinary Design. — P. 231–237.

- [22] Воскобійник В. А. Просторово-часові характеристики когерентних структур, полів швидкості та тиску у лункових генераторах вихорів: Автореферат дисертації ... доктора технічних наук. — Київ : Інститут гідромеханіки НАН України, 2013.
- [23] Визуализация ламинарного обтекания овального углубления / Г. А. Воропаев, А. В. Воскобойник, В. А. Воскобойник, С. А. Исаев // Прикладна гідромеханіка. — 2009. — Т. 11(83), № 4. — С. 31–46.
- [24] Flow structures and heat transfer on dimples in a staggered arrangement / J. Turnow, N. Kornev, V. Zhdanov, E. Hassel // International Journal of Heat and Fluid Flow. — 2012. — Vol. 35. — P. 168–175.
- [25] Управление пограничным слоем луночным рельефом на обтекаемой поверхности / В. Т. Гринченко, С. А. Исаев, Г. А. Воропаев, В. А. Воскобойник // X міжнародна школа-семинар “Моделі і методи аеродинаміки”. — Москва : МЦНМО, 2010. — С. 51–52.
- [26] Воскобійник В. А., Воскобойник О. А., Воскобійник А. В. Формування вихрових структур у системі овальних лунок та генерація пульсацій тиску // Матеріали V міжнародної наукової конференції “Прикладні проблеми аерогідромеханіки та тепломасопереносу”. — Дніпропетровськ : Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара, 2014. — С. 65–69.
- [27] Voskoboinick V., Voskoboinick A., Stepanovitch V. Generation of vortex structures by pair oval dimples on flat plate // Proceedings of the European Drag Reduction and Flow Control Meeting “EDRFCM 2015”. — Cambridge, UK, 2015. — P. 43–44.
- [28] Generation features of the coherent vortex structures by cavities and bumps on a streamlined surface / V. Voskoboinick, A. Artemiev, A. Voskoboinick et al. // Proceedings of 3rd EUMLS Conference “Mathematics for Life Sciences”. — Rivne, Ukraine, 2015. — P. 50.

REFERENCES

- [1] A. V. Ermishina and S. A. Isaeva, eds., *Control of the flow of bodies with vortex cells in the application to the flying machines of the integrated configuration (numerical and physical modeling)*. 2001.
- [2] A. A. Halatov, *Heat transfer and hydrodynamics near the surface deepenings (dimples)*. Kiev: Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2005.
- [3] V. T. Grinchenko, G. A. Voropayev, S. A. Isaev, V. A. Voskoboinick, N. V. Rozumnyuk, and A. V. Voskoboinick, “Vortex formation control by an asymmetry of the streamlined dimple,” in *Abstracts of VIII International Conference “Problems of Industrial Heat Engineering”*, (Kyiv), pp. 35–36, Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2013.

- [4] G. I. Kiknadze, I. A. Gachechiladze, and A. Y. Gorodkov, “Self-organization of tornado-like jets in flows of gases and liquids and the technologies utilizing this phenomenon,” in *Proceedings of the ASME 2009 Heat Transfer Summer Conference HT2009*, no. HT2009-88644, (San Francisco, CA), pp. 1–14, 2009.
- [5] S. A. Isaev, A. I. Leontiev, and N. V. Kornev, “Numerical simulation of tornado heat transfer in flow past surfaces with holes (state and prospects),” in *Proceedings of VI Minsk International Forum on Heat Transfer, MMF 2008*, (Minsk, Belarus), pp. 1–9, 2008.
- [6] V. T. Grinchenko, G. A. Voropayev, S. A. Isaev, V. A. Voskoboinick, A. A. Voskoboinick, and A. V. Voskoboinick, “Controlling the laminar boundary layer by vortices generated by an oval dimple,” *Visnik Donec’kogo Unìversitetu*, no. 1, pp. 191–198, 2009.
- [7] S. Isaev, G. Voropaiev, V. Grinchenko, A. Sudakov, V. Voskoboinick, and N. Rozumnyuk, “Drag reduction of lifting surfaces at the use of oval dimples as vortex generators,” in *Proceedings of the European Drag Reduction and Flow Control Meeting “EDRFCM 2010”*, (Kyiv, Ukraine), pp. 7–8, 2010.
- [8] H. N. Najm and A. F. Ghoniem, “Numerical simulation of the convective instability in a dump combustor,” *AIAA Journal*, vol. 29, no. 6, pp. 911–919, 2007.
- [9] C. N. Jordan and L. M. Wright, “Heat transfer enhancement in a rectangular (AR=3:1) channel with V-shaped dimples,” *Journal of Turbomachinery*, vol. 135, no. 1, pp. 011028(1–10), 2013.
- [10] Y. F. Gortyshov, I. A. Popov, V. V. Olimpiev, A. V. Shchelchkov, and S. I. Kas’kov, *Thermohydraulic efficiency of promising methods of intensification of heat transfer in the channels of heat-exchange equipment*. Kazan, Russian Federation: Center of the Innovation Technologies, 2009.
- [11] B. Su, *High-resolution temperature measurement during forced convective heat transfer at a wall with a dimple structure*. PhD thesis, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Germany, 2015.
- [12] C. M. J. Tay, B. C. Khoo, and Y. T. Chew, “Mechanics of drag reduction by shallow dimples in channel flow,” *Physics of Fluids*, vol. 27, no. 3, pp. 035109(1–22), 2015.
- [13] V. Voskoboinick, N. Kornev, and J. Turnow, “Study of near wall coherent flow structures on dimpled surfaces using unsteady pressure measurements,” *Flow, Turbulence and Combustion*, vol. 90, no. 2, pp. 86–99, 2013.
- [14] V. A. Voskoboinick and A. V. Voskoboinick, “Coherent vortex structures in a transversely streamlined oval dimple,” *Science-Based Technologies*, vol. 23, no. 3, pp. 352–358, 2014.
- [15] V. A. Voskoboinick and A. V. Voskoboinick, “Vortex motion inside the hemispherical dimple on a flat surface,” *Industrial Heat Engineering*, vol. 34, no. 6, pp. 7–14, 2012.

- [16] V. A. Voskoboinick and A. V. Voskoboinick, “A structure of the flow and pressure fluctuations inside the oval dimple,” *Science-Based Technologies*, vol. 13, no. 1, pp. 12–18, 2012.
- [17] T. M. Faure, P. Adrianos, F. Lusseyran, and L. Pastur, “Visualizations of the flow inside an open cavity at medium range Reynolds number,” *Experiments in Fluids*, vol. 42, no. 2, pp. 169–184, 2007.
- [18] V. A. Voskoboinick, A. A. Voskoboinick, and A. V. Voskoboinick, “Visualization of the vortex flow inside and near a transversely streamlined oval dimple on a flat surface,” *Industrial Heat Engineering*, vol. 36, no. 3, pp. 13–21, 2014.
- [19] V. A. Voskoboinick, “Vortex formation inside cross-streamlined oval dimple,” *Applied Hydromechanics*, vol. 14(86), no. 4, pp. 37–46, 2012.
- [20] J. Turnow, N. Kornev, S. Isaev, and E. Hassel, “Vortex mechanism of heat transfer enhancement in a channel with spherical and oval dimples,” *Heat and Mass Transfer*, vol. 47, no. 3, pp. 301–313, 2011.
- [21] N. Kornev, J. Turnow, E. Hassel, S. Isaev, and F.-H. Wurm, “Fluid mechanics and heat transfer in a channel with spherical and oval dimples,” in *Turbulence and Interactions*, vol. NNFM 110 of *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, pp. 231–237, Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.
- [22] V. A. Voskoboinick, *The spatial-time characteristics of coherent structures, velocity and pressure fields in dimple vortex generators: Abstract of Dissertation ... Doctor of Technical Sciences*. Kyiv: Institute of Hydromechanics of NAS of Ukraine, 2013.
- [23] G. A. Voropaev, A. V. Voskoboinick, V. A. Voskoboinick, and S. A. Isaev, “Laminar flow visualization over oval dimple,” *Applied Hydromechanics*, vol. 11(83), no. 4, pp. 31–46, 2009.
- [24] J. Turnow, N. Kornev, V. Zhdanov, and E. Hassel, “Flow structures and heat transfer on dimples in a staggered arrangement,” *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 35, pp. 168–175, 2012.
- [25] V. T. Grinchenko, G. A. Voropayev, S. A. Isaev, and V. A. Voskoboinick, “Control of the boundary layer by a dimple relief on a streamlined surface,” in *Proceedings of X International Workshop “Models and Methods in Aerodynamics”*, (Moscow), pp. 51–52, MCNMO, 2010.
- [26] V. A. Voskoboinick, A. A. Voskoboinick, and A. V. Voskoboinick, “Formation of vortex structures in the system of oval dimples and generation of pressure fluctuations,” in *Proceedings of V International Conference “Applied Problems of Aerohydromechanics and Heat-Mass Transfer”*, (Dnipropetrovsk), pp. 65–69, Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, 2014.

- [27] V. Voskoboinick, A. Voskoboinick, and V. Stepanovitch, “Generation of vortex structures by pair oval dimples on flat plate,” in *Proceedings of the European Drag Reduction and Flow Control Meeting “EDRFCM 2015”*, (Cambridge, UK), pp. 43–44, 2015.
- [28] V. Voskoboinick, A. Artemiev, A. Voskoboinick, V. Smoljar, and V. Stepanovitch, “Generation features of the coherent vortex structures by cavities and bumps on a streamlined surface,” in *Proceedings of 3rd EUMLS Conference “Mathematics for Life Sciences”*, (Rivne, Ukraine), p. 50, 2015.

**В. А. Воскобойник, А. В. Воскобойник, А. А. Воскобойник,
В. М. Степанович, И. А. Хижа**

Вихревое движение внутри лунки сложной геометрии

В работе представлены данные визуального исследования особенностей генерации и эволюции вихревого течения воды внутри углублений на плоской поверхности в виде одиночных V- и Λ-образных лунок при обтекании их под разными углами. Лунки указанной геометрии были сформированы в результате сопряжения двух овальных фрагментов с удлинением 2. Скорости основного потока варьировались в пределах $U = (0.1 \dots 0.5)$ м/с, что соответствовало диапазону чисел Рейнольдса $Re_d = Ud/\nu = (0.4 \dots 2) \cdot 10^4$, рассчитанных по диаметру закругления лунки. Визуализация проводилась с помощью специально подобранных водорастворимых покрытий и контрастных красок с нулевой плавучестью, которые вводились в пристеночный слой потока. В условиях ламинарного течения внутри углублений сложной геометрии генерации вихревых структур не наблюдалось. Для переходного и турбулентного режимов течения внутри V-образной лунки формировались подковообразные вихревые структуры, которые при увеличении скорости уменьшались в размерах и прижимались к отрывной стенке лунки. Одновременно 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 продольных вихрей со взаимно противоположными направлениями вращения. При изменении угла наклона V- и Λ-образных лунок в плоскости пластины было отмечено изменение характера формирования и выброса вихревых структур. Для ламинарного течения число Струхалы выбросов потенциальной жидкости находилось в пределах от 0.05 до 0.14. В условиях переходного и турбулентного течений значения числа Струхалы выбросов вихревых разномасштабных структур и вихревой пелены возрастало с 0.15 до 0.5.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: углубление, визуализация течения, когерентная вихревая структура, вихревая пелена, выброс, число Рейнольдса, число Струхалы

**V. A. Voskoboinick, A. A. Voskoboinick, A. V. Voskoboinick,
V. M. Stepanovich, I. A. Hyzha**

Vortex motion inside the hole of a complex geometry

The paper presents the results of visual study of generation and evolution of the vortex flow inside the holes in the form of single V- and Λ-shaped grooves on a flat surface streamlined with a flow at different angles. The mentioned holes were obtained as a result of mating two oval fragments with an elongation of 2. The primary flow velocities

varied within $U = (0.1 \dots 0.5)$ m/s that corresponds to the interval $Re_d = Ud/\nu = (0.4 \dots 2) \cdot 10^4$ for the Reynolds numbers calculated by the diameter of the groove. The visualization was performed using the specially developed water-soluble coatings and contrasting colors with zero buoyancy that were injected to the wall flow layer. The generation of the vortex structures was not observed in the presence of a laminar flow inside the cavities of complex geometry. For a transitional or turbulent flow inside the V-shaped hole, the horseshoe vortex structures were formed that decreased in size and pressed against the separation wall of the groove with the increase of velocity. Simultaneously, the periodic ejections of the small-scale vortex sheet were observed in mid cross-section of the groove. The spiral vortex structures generated inside the Λ -shaped hole were periodically ejected and propagated in the wake of the hole forming the pairs of counter-rotating vortices. Changes in the process of formation and ejection of vortex structures were noticed when varying the inclination angle of the V- and Λ -shaped holes in the plate's plane. For the laminar flow, the Strouhal number of the potential fluid ejection was ranged within 0.05 to 0.14. In the conditions of transition and turbulent flows, the Strouhal number of ejection of the vortex structures and vortex sheets increased from 0.15 to 0.5.

KEY WORDS: cavity, visualization, coherent vortex structure, vortex sheet, ejection, the Reynolds number, the Strouhal number