

УДК 532.517

ГЕНЕРАЦІЇ ВИХОРІВ ПАРОЮ ОВАЛЬНИХ ЛУНОК НА ОБТІЧНІЙ ПЛОСКІЙ ПОВЕРХНІ

В. А. ВОСКОВІЙНИК, А. В. ВОСКОВІЙНИК, О. А. ВОСКОВОЙНИК

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

Одержано 23.04.2015

В роботі проведено візуальні дослідження характерних особливостей обтікання пари овальних заглиблень на гідравлічно гладкій плоскій пластині. Установлено, що в залежності від режиму течії усередині овальних лунок формуються потенційні та вихрові течії з викидом вихрових структур назовні з лунок у прилежний шар. В умовах ламінарного обтікання вихровий рух усередині лунок не спостерігається, а має місце неінтенсивне коливання рідини, яка заповнює лунки. Зі збільшенням швидкості потоку в лунках з'являється відлив прилежого шару, а усередині овальних лунок формуються зсувний шар, потенційна та циркуляційна течії. Потенційна течія має місце поблизу передніх за потоком стінок лунок, а циркуляційна течія генерує великомасштабний спіралеподібний вихор, який має джерело на передніх сферичних частинах лунок. В умовах турбулентного режиму течії потенційний рух зникає, а формується інтенсивний вихровий рух. В передніх сферичних частинах лунок генеруються великомасштабні веретеноподібні вихори, які викидаються назовні з лунок у прилежний шар. Викид великомасштабних вихрових систем відбувається з частотами, яким відповідає число Струхала 0.05. Взаємодії вихрових структур, що викидаються з кожної лунки, у серединному перерізі між овальними лунками та в їх близькому сліді не спостерігається.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: пара овальних лунок, потенційна та циркуляційна течія, вихрова структура, спіралеподібний вихор, веретеноподібний вихор, викид великомасштабного вихору

В работе проведены визуальные исследования характерных особенностей обтекания пары овальных углублений на гидравлически гладкой плоской пластине. Установлено, что в зависимости от режима течения внутри овальных лунок формируются потенциальные и вихревые течения с выбросом вихревых структур наружу из лунок в пограничный слой. В условиях ламинарного обтекания вихревое движение внутри лунок не наблюдается, а имеет место неинтенсивное колебание жидкости, заполняющей лунки. С увеличением скорости потока в лунках появляется отрыв пограничного слоя, а внутри овальных лунок формируются сдвиговый слой, потенциальное и циркуляционное течения. Потенциальное течение имеет место вблизи передних по потоку стенок лунок, а циркуляционное течение генерирует крупномасштабный спиралеобразный вихрь, который имеет источник на передних сферических частях лунок. В условиях турбулентного режима течения потенциальное движение исчезает, а формируется интенсивное вихревое движение. В передних сферических частях лунок генерируются крупномасштабные веретеноподобные вихри, которые выбрасываются наружу из лунок в пограничный слой. Выброс крупномасштабных вихревых систем происходит с частотами, которым отвечают число Струхала 0.05. Взаимодействия вихревых структур, которые выбрасываются из каждой лунки, в срединном сечении между овальными лунками и в их ближнем следе не наблюдается.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пара овальных лунок, потенциальное и циркуляционное течение, вихревая структура, спиралеобразный вихрь, веретенообразный вихрь, выброс крупномасштабного вихря

In study visual researches of characteristic features of a flow around of pair of the oval dimples on hydraulically smooth flat plate are conducted. It is established that depending on the flow regime inside the oval dimples are formed potential and vortex currents with ejection of vortex structures outside of dimples in the boundary layer. In the conditions of a laminar flow a vortex motion inside dimples isn't observed, and not intensive oscillation of the liquid filling holes takes place. With increase of flow velocity in dimples there is a boundary layer separation, and inside the oval dimples the shear layer, potential and circulating flows are formed. The potential flow takes place near forward dimple walls, and the circulating flow generates a large-scale spiral vortex which has a source on forward spherical parts of the dimples. In the conditions of the turbulent regime of a flow the potential motion disappears, and intensive vortex motion is formed. In forward spherical parts of dimples large-scale fusiform vortices are generated which are ejected outside of the dimples in a boundary layer. Ejection of large-scale vortex systems happens to frequencies which are answered Strouhal number 0.05. Interaction of vortex structures which are ejected of each dimple, in median section between the oval dimples and in their near wake it isn't observed.

KEY WORDS: pair of oval dimples, potential and circulating flow, vortex structure, spiral vortex, fusiform vortex, large-scale vortex ejection

ВСТУП

Під час обтікання поверхонь з системою локальних неоднорідностей у вигляді лунок або виступів формуються вихрові структури, які мають різну форму та масштаби в залежності від режимів течії та форми неоднорідностей [1–3]. Експериментальні та чисельні результати аеродинамічних і

теплофізичних досліджень показали досить високу ефективність рельєфів заглиблень, які дозволили збільшити тепло- і масопереніс за незначного зростання рівня гідродинамічних втрат. Явище самоорганізації вторинних вихрових структур супроводжує обтікання суцільним середовищем поверхонь з рельєфом у вигляді криволінійних заглиблень подвійної кривизни (опуклої та увігну-

тої), що чергуються з ділянками плоскої поверхні. Утворення криволінійних ділянок на обтічній поверхні обумовлює дію доцентрових і відцентрових сил на потік, який набігає. Згідно з результатами робіт [4–6] наявність, наприклад, полів відцентрових сил, відсутніх під час обтікання плоскої поверхні, може перетворювати зсувний примежовий шар на гладкій поверхні у тривимірний примежовий шар. Такий примежовий шар у заглибленнях, за відповідних умов, складається з поверхневих вихорів типу вихорів Гьортлера або їх груп.

Відрив примежового шару з переднього краю заглиблення і нестійкість течії у зсувному шарі, який утворюється при цьому, генерують усередині заглиблень вихрові структури. Із зростанням швидкості обтікання один з кінців вихрових структур, циркулюючих у заглибленнях, відривається від обтічної поверхні заглиблення і витягується услід за потоком. Ці нахилені структури мають поздовжній розмір, що істотно перевищує їх поперечний масштаб. Вони інтенсивно ініціюють обмін маси суцільного середовища з лунки і з поверхні, що її оточує [7, 8]. Пульсуючі якості вихору усередині отвору заглиблення призвели до ідеї створення механізму пульсуючого плівкового охолодження [9], коли охолоджувач подається у зону фокусу вихору у заглибленні, після викиду якого він накриває більшу область поверхні позаду заглиблення. Такі умови забезпечують більше покриття поверхні охолоджувачем та кращу ефективність плівкового охолодження.

Досвід, який досягнуто науковцями та інженерами під час використання лункових поверхонь, засвідчує, що створення стійких у часі та просторі вихрових систем, які генеруються усередині заглиблень, має перспективне значення для керування примежовими шарами та відривними течіями. Утворення великомасштабних когерентних вихрових структур з наперед заданими якостями дозволяє змінити структуру примежового шару або відривної течії. Це поліпшує тепло і масопереніс, зменшує опір обтічних конструкцій або змінює спектральний склад аерогідродинамічного шуму з метою його зменшення. Надання лункам особливих геометричних параметрів, з урахуванням режимів обтікання лункових поверхонь, дає можливість реалізувати ідею генерації штучних вихрових структур, які мають оптимальні характеристики для забезпечення максимальної ефективності їх використання у технологічному устаткуванні. Вивчення та вдосконалення таких генераторів вихорів є перспективною задачею науково-дослідних робіт у галузі гідро- і аеродинаміки, теплоенергетики, масообмінних процесів, гідроаку-

стики та інших.

Так, у роботах [1, 10, 11] відзначалось, що сферичні заглиблення за теплогідрравлічною ефективністю не є найкращими для турбулентного режиму обтікання теплоносія, а у ламінарному режимі їх використання практично не виправдане. Розрахунки показують, 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 працездатність для ламінарного режиму обтікання. Наявність перемикаючого механізму генерації та викиду вихрових структур усередині сферичних заглиблень на обтічній поверхні [2, 12, 13] не дозволяє сформувати стійкі у просторі та часі поздовжні вихрові структури, які потрібні для керування примежовим шаром. Цей недолік відсутній у овальних заглибленнях, які знаходяться під кутом відносно напрямку течії. Як показали результати чисельних та експериментальних досліджень [14–16], нахилені за напрямком потоку овальні лунки генерують стійкі вихрові структури, які в залежності від режимів течії періодично викидаються з фіксованих областей над кормовою стінкою лунки.

Враховуючи важливість практичного використання лункових рельєфів на обтічній поверхні з метою керування примежовим шаром для реалізації енергозберігаючих технологій у багатьох галузях науки і техніки, необхідно вивчити механізми вихроутворення усередині системи обтічних заглиблень та виявити їхні гідродинамічні особливості. Створення генераторів вихорів, які мали б мінімальний гідродинамічний опір та генерували б штучні вихрові системи із заданими кінематичними та динамічними параметрами, можливо, як показують останні наукові дослідження [17–19], під час використання овальних заглиблень помірної глибини.

У зв'язку з цим була поставлена мета експериментально вивчити гідродинамічні особливості формування та еволюції вихрових структур у парі нахилених відносно напрямку потоку овальних заглиблень і визначити їхню ступінь взаємодії між собою та дії на примежовий шар, що генерується поблизу цих неоднорідностей обтічної поверхні.

1. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Досліди проведено в гідродинамічному лотку з відкритою поверхнею води довжиною 16 м, шириною 1 м та глибиною 0.4 м. Схему експе-

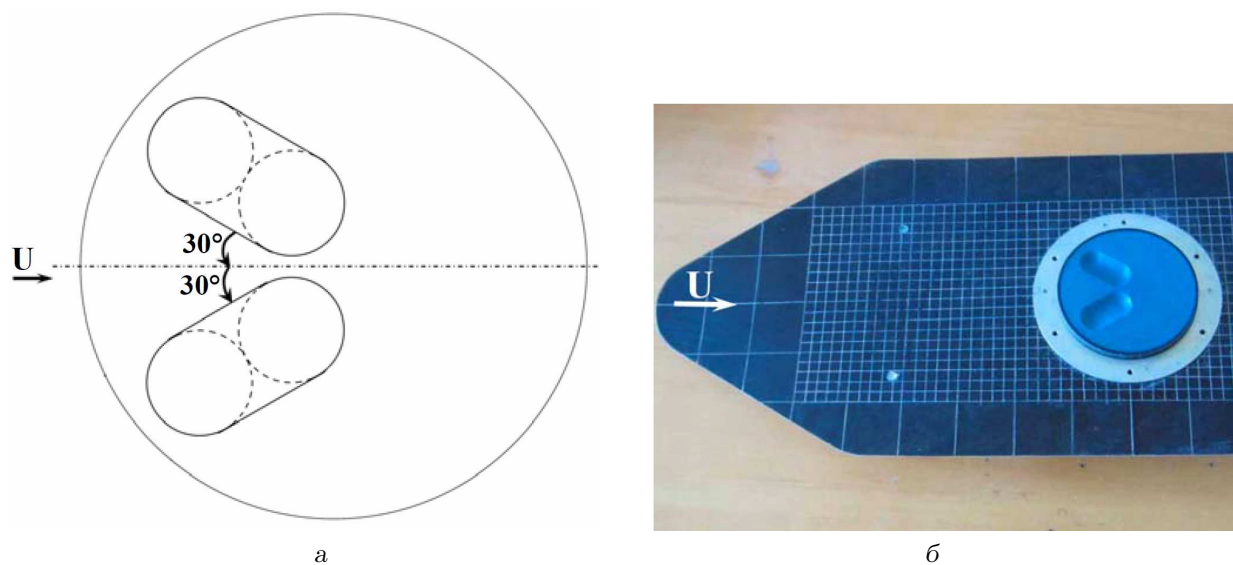


Рис. 1. Схема (а) та вигляд (б) розташування пари овальних лунок на плоскій поверхні

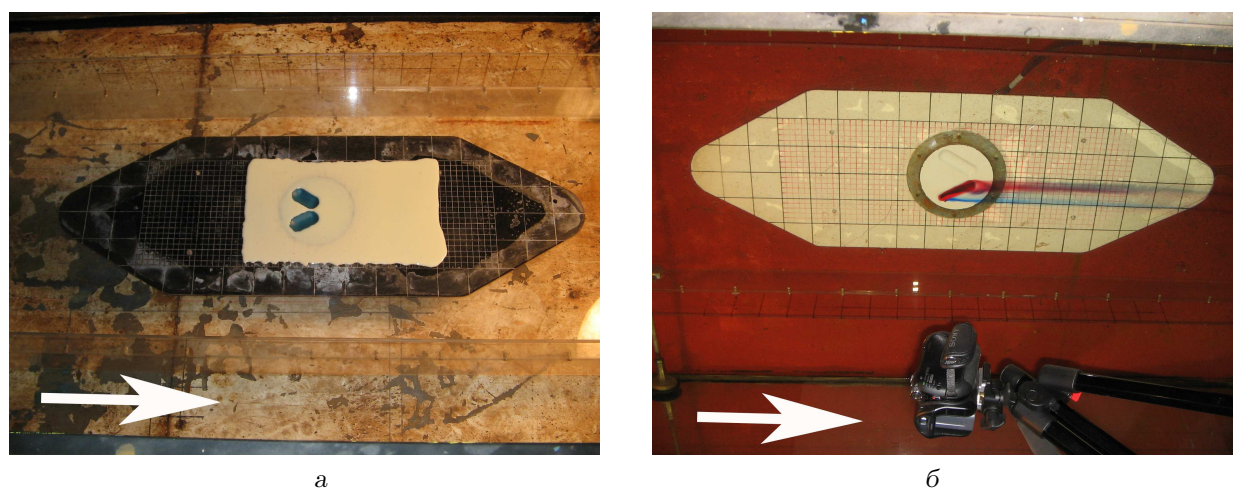


Рис. 2. Вимірювальна пластина з нанесеним на її поверхню водорозчинним покриттям (а) та подача кольорового фарбника усередині овальної лунки (б)

риментальної установки та місце розташування вимірювальної пластини з заглибленням наведено у роботах [16, 20, 21]. На відстані близько 8 м від вхідної частини лотку розташовувалася вимірювальна ділянка, обладнана контрольно-вимірювальною апаратурою і засобами візуальної 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 різнома-

нітних добре обтічних координатних елементів і ножів дала можливість точно, відповідно до розрахункових значень, встановлювати досліджувані моделі, вимірювальні прилади, інструменти та датчики. Прозорі стінки гідродинамічного лотку, виготовлені з товстого протиударного скла, забезпечили проведення якісних візуальних досліджень. Використання відповідної відео- та фотоапаратури дозволило реєструвати картини течії, які в подальшому оброблялись та аналізувались за допомогою персональних комп'ютерів з використанням штатного і спеціально розробленого програмного забезпечення [16, 21, 22].

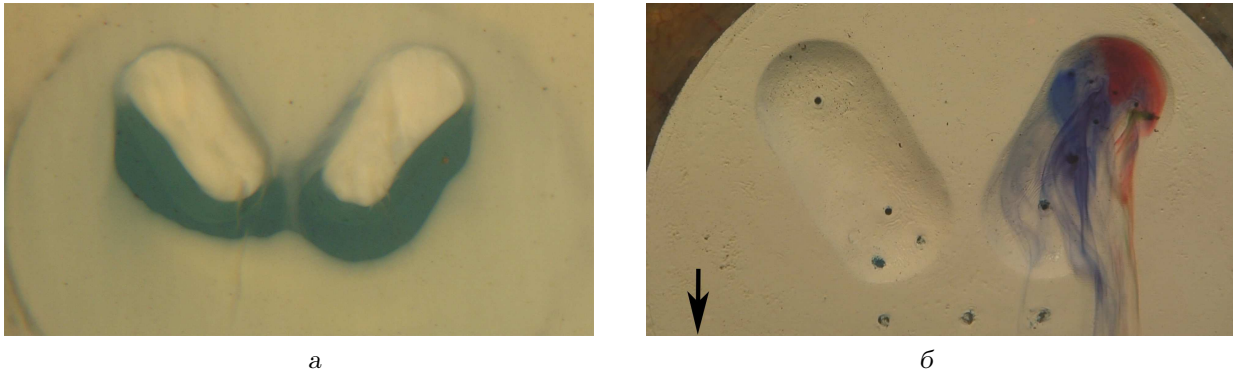


Рис. 3. Розмив водорозчинного покриття (а) та візуалізація течії кольоровими фарбниками (б) для швидкостей потоку (0.03...0.06) м/с

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 переднього краю пластини знаходився отвір, де встановлювалася система з двох овальних лунок, розташованих під кутом 30 градусів до напрямку потоку (рис. 1). Діаметр лунки $d=0.025$ м, ширина і довжина циліндричної вставки були по 0.025 м. Таким чином, овальні лунки, що розташовані на віддаленні 0.005 м одна від одної, мали ширину 0.025 м, довжину 0.05 м і відношення глибини до ширини $h/d=0.22$.

Особливості формування та еволюції вихрових структур і циркуляційної течії усередині системи заглиблень у залежності від швидкості набігаючого потоку візуально досліджувалось за допомогою нанесення контрастних покриттів на обтічну поверхню та фарбників, які вводили у потік (рис. 2). В якості контрастного покриття, що змивалося, використовували згущене молоко (щільність якого в 1.3 вища, ніж щільність води), яке наносилося на поверхню пластини. Це дало можливість визначити зони підвищених дотичних напруг, області дії вихрових систем, що викидаються із лунки, оцінити частоти їх викидів та напрям обертання [16, 22, 23]. Візуалізація течії була проведена для швидкості потоку $U=(0.03...0.5)$ м/с. Фарбники та мічені частинки через трубку малого діаметру вводилися у примежовий шар перед заглибленням та/або всередину заглиблення. Фарбники та мічені частинки мали щільність близьку до щільності води і їх рух у просторі відображав особливості вихрової течії усередині овальних заглиблень та поблизу них.

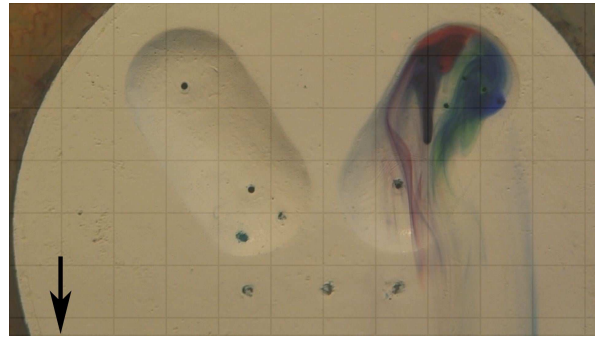
2. РЕЗУЛЬТАТИ ВІЗУАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ СТРУКТУРИ ВИХРОВОГО РУХУ

Для ламінарного режиму обтікання пластини з парою овальних лунок ($U=(0.03...0.06)$ м/с; $Re_X = UX/\nu = (2.4...4.8) \cdot 10^4$; $Re_d = UD/\nu=(750...1500)$, де ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості води) вихрового руху усередині лунок не спостерігалось (рис. 3). Контрастний барвник переносився усередину лунки вздовж її передніх сферичної та циліндричної частин і поступово заповнював весь об'єм овальних лунок (рис. 3, а). Відривної течії усередині лунок не спостерігалось, а кольорові барвники, переміщуючись від передньої частини лунки до її кормової частини, робили неінтенсивний коливальний рух (рис. 3, б). Викид рідини назовні з лунки відбувався над її кормовою сферичною стінкою та в області її спряження з циліндричною частиною лунки.

Коли швидкість течії збільшилась до (0.08...0.12) м/с, то за передньою частиною овальних лунок з'явилася зона відриву примежового шару та над отвором лунок почав формуватися зсувний шар, генеруючи циркуляційну течію усередині лунок з формуванням повільного вихрового руху (рис. 4). Цей рух рідини мав вигляд поздовжніх джгутів, які скручувалися, і був повільний та майже симетричний у кожній з лунок (рис. 4, а). Рідина, яка заповнювала лунки, коливалася у трьох взаємно перпендикулярних площинах. Частоти коливань у кожній із лунок були практично рівні, але руйнування вихрової поверхні відбувалося не одночасно. Контрастна речовина потрапляла усередину лунок уздовж їх передніх за потоком півкіл і циліндричних частин (рис. 4, а). Відривна та циркуляційна області за переднім краєм заглиблення для такої швидкості



а



б

Рис. 4. Те саме, що і на рис. 3, але для швидкостей потоку (0.08...0.12) м/с

займали майже половину об'єму лунки. Спостерігалось дуже повільне обертання рідини усередині лунок, напрямком якого співпадав з напрямком потоку, а також коливання її уздовж поздовжньої та поперечної осей заглиблень. Довжина хвилі коливального руху усередині овальних заглиблень приблизно дорівнювала діаметру лунки ($d=0.025$ м). Зі зростанням амплітуди поздовжньої хвилі частина рідини у заглибленнях (на рівні площини пластини) руйнувалася зсувним потоком і розповсюджувалася у вигляді пакету збурень (в середньому 3-4 збурення). Пакет збурень переносився у напрямку потоку зі швидкістю приблизно $(0.4...0.5)U$. При цьому контрастна речовина викидалася у примежовий шар пластини над областю сполучення кормової циліндричної та сферичної частин лунки (рис. 4). Слід контрастної речовини у примежовому шарі поза лунками простежувався на відстані близько $(8...10)$ діаметрів лунки.

Як показали досліди з візуалізації цього режиму течії ($Re_x = (6.4...9.6) \cdot 10^4$ та $Re_d = (2000...3000)$) за допомогою контрастних барвників, що подавалися через отвори у передній частині однієї з лунок, усередині лунки формувалися дві зони переміщення барвника (рис. 4, б). Перша з них утворювалася поблизу відривної стінки овальної лунки. Рідина з середини придонної області лунки, не роблячи обертального руху, переносилася до передньої сферичної частини лунки в її відривну область. Поблизу відривного краю лунки ця рідина розділялася на дві частини. Перша з них розверталася вздовж відривної стінки і прямувала до кормової частини овальної лунки. Друга невелика частина цієї рідини переносилася до передньої сферичної області лунки, в якій формувалася циркуляційна зона переміщення барвника. Ця циркуляційна зона у вигляді великомасштабної вихрової структу-

ри займала половину передньої сферичної частини овальної лунки, джерело якої знаходилося на бічній сферичній частині лунки ближче до її кормової стінки. Вісь обертання цієї вихрової структури була спрямована по нормалі до обтічної поверхні лунки, а згодом вона вигиналася за напрямком течії. Витік великомасштабного вихору коливався з низькою частотою і виносився за межі лунки над областю спряження передньої сферичної та циліндричної частин лунки або переносився усередину лунки та згортався у спіралеподібний вихор і викидався з овальної лунки над її кормовою сферичною частиною. Таким чином, у передній сферичній частині лунки спостерігалось розділення течії на циркуляційну, яка знаходилася поблизу кормової стінки, і потенційну. Розділення цих течій виявлялося вздовж поздовжньої вісі лунки, яка проходила через передню сферичну частину лунки, як показано на рис. 4, б. Поблизу серединної частини лунки потенційна течія починала згортатися у спіралеподібний вихор і об'єднувалася з спіралеподібним вихором, який трансформувалася з великомасштабної вихрової структури, що генерувалася у передній сферичній частині лунки ближче до її кормової стінки. Викид великомасштабного вихору або спіралеподібного вихору назовні з овальної лунки спостерігався з частотою близькою до $f=(0.16...0.2)$ Гц, якій відповідало число Струхалія $St = fd/U = (0.04...0.05)$.

Зі збільшенням швидкості обтікання системи лунок до $(0.2...0.3)$ м/с ($Re_x = (1.6...2.4) \cdot 10^5$ та $Re_d = (5000...7500)$) вихровий рух став більше інтенсивним. Зона потенційної течії поблизу відривної стінки овальної лунки майже зникла (рис. 5). Уся рідина, що заповнювала передню сферичну частину лунки, згорталася у циркуляційну течію та утворювала когерентний великомасштабний веретеноподібний вихор. Цей вихор мав джерело по-

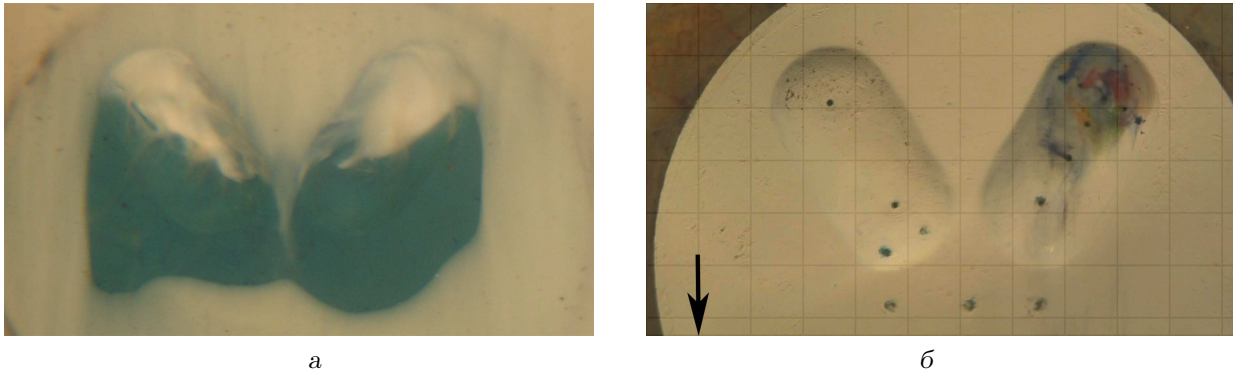


Рис. 5. Те саме, що і на рис. 3, але для швидкостей потоку (0.2...0.3) м/с

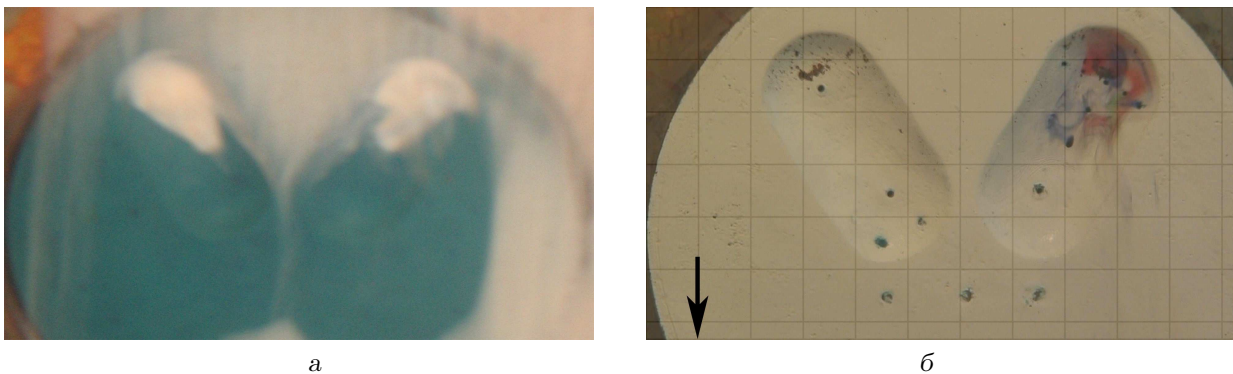


Рис. 6. Те саме, що і на рис. 3, але для швидкостей потоку (0.4...0.5) м/с

близу центра сферичної частини лунки та інтенсивно коливався. Під час викиду веретеноподібні вихрові структури починали підійматися над передніми півколами овальних заглиблень та, витягуючись уздовж осі лунок, викидалися у кормових їх частинах (рис. 5). Оберталися ці великомасштабні вихрові структури у площині XOZ у кожній з лунок у протилежних напрямках. Наприклад, у лівій лунці на рис. 5, *a* вихор обертався проти годинникової стрілки, а у правій – за годинниковою стрілкою. Викид вихрових структур назовні із лунок іноді спостерігався одночасно, але у більшості випадків викиди відбувалися у різні часові проміжки. При цьому не спостерігалось взаємодії цих вихрових структур у ближньому сліді лунок. Частота викидів великомасштабних вихрових структур назовні з кожної із лунок оцінювалась як (0.4...0.6) Гц або $St=(0.04...0.06)$. Окрім того, спостерігалися викиди дрібномасштабних вихрових структур, які зривалися з верхньої частини великомасштабного веретеноподібного вихору під час його формування, коли його поперечний масштаб перевищував глибину лунки. Ці дрібно-

масштабні вихрові структури, утворюючи зсувний шар, мали поперечний масштаб близький до $1/3d$ і переносилися над отвором лунок у напрямку потоку зі швидкістю близькою до $0.5U$. По осі пластини, у проміжку $0.2d$ контрастний фарбник залишався не розмитим, що видно на рис. 5, *a*. За заглибленням спостерігався підйом контрастного фарбника іноді більш ніж на діаметр лунки. Ці вихрові структури зберігали свою ідентичність на відстані (7...9) діаметрів лунки.

Для розвиненої турбулентної течії та швидкості обтікання (0.4...0.5) м/с ($Re_x = (3.2...4.0) \cdot 10^5$ та $Re_d=(10000...12500)$) контрастний водорозчинний фарбник усередині лунок сконцентровувався у передніх за потоком сферичних частинах заглиблень, що показало застійні області у них (рис. 6, *a*). Тут генерувалися веретеноподібні вихрові структури, які викидалися назовні із лунок з частотою близькою до 1 Гц ($St \approx 0.05$). Кольорові барвники, закручуючись у веретеноподібний вихор, інтенсивно коливалися у трьох взаємно перпендикулярних площинах (рис. 6, *b*). Коли поперечний масштаб веретеноподібного вихору переви-

щував глибину лунки, то з його верхньої частини спостерігався інтенсивний змив дрібномасштабних структур, які зносилися потоком над областю спряження передньої сферичної частини лунки та її кормової циліндричної частини. Частоту викидів дрібномасштабних вихорів було оцінено як $(4...5)$ Гц або $St=(0.2...0.25)$. Як показала візуалізація водорозчинним фарбником (див. рис. 6, а), у проміжку між заглибленнями потік не зазнавав суттєвих збурень, що видно по фарбнику на осі пластини, який не розмито.

Результати візуальних досліджень за допомогою водорозчинних барвників і кольорових фарбників показали, що незалежно від режимів обтікання пари овальних лунок, які рознесено одна від одної і нахилених на кут 30 градусів відносно напрямку потоку, взаємодії вихрових структур, що викидаються з кожної із лунок у серединному перерізі їх ближнього сліду не відбувається.

ВИСНОВКИ

На підставі отриманих експериментальних результатів з вивчення гідродинамічних особливостей формування та еволюції вихрових структур у парі нахилених відносно напрямку потоку овальних лунок і визначення їх взаємодії між собою та з примежовим шаром, що генерується поблизу цих неоднорідностей обтічної поверхні, можна зробити наступні висновки:

1. Установлено, що в залежності від режиму течії усередині овальних лунок формуються потенційні та вихрові течії з викидом вихрових структур назовні з лунок у примежовий шар.

2. Показано, що в умовах ламінарного обтікання гладкої пластини з парою овальних лунок ($Re_x = (2.4...4.8) \cdot 10^4$ та $Re_d=(750...1500)$) вихрового руху усередині лунок не спостерігалось, а мало місце неінтенсивне коливання рідини, яка заповнювала лунки. Викид рідини назовні з лунки відбувався над її кормовою сферичною стінкою та в області її спряження з циліндричною частиною лунки.

3. Визначено, що зі збільшенням швидкості течії до $(0.08...0.12)$ м/с і чисел Рейнольдса $Re_x = (6.4...9.6) \cdot 10^4$ та $Re_d=(2000...3000)$, з переднього краю лунок почав відриватися примежовий шар і усередині лунки з'явилася потенційна (за переднім краєм лунки) та циркуляційна течії. Циркуляційна течія формувала великомасштабну вихрову структуру у вигляді поздовжнього вихрового джгута, який повільно скручувався та коливався поблизу кормової стінки лунки. Джерело цього спіралеподібного вихору знаходилося на передній сферичній частині лунки поблизу її кормової стінки, а ви-

тік розташовувався на кормовій стінці біля місця спряження циліндричної частини лунки з її кормовою сферичною частиною. Періодично, коливаючись усередині лунки, витік вихору викидався назовні з овальної лунки над її кормовою стінкою. Викид великомасштабного спіралеподібного вихору назовні з овальної лунки спостерігався з частотою близькою до $f=(0.16...0.2)$ Гц, якій відповідає число Струхалія $St=(0.04...0.05)$.

4. Установлено, що для турбулентного режиму течії над пластиною з парою овальних лунок ($Re_x = (1.6...2.4) \cdot 10^5$ та $Re_d=(5000...7500)$) вихровий рух усередині лунок став інтенсивний, а зона потенційної течії поблизу відривних стінок лунок зникла. Уся рідина, що заповнювала передню сферичну частину лунки, згорталася у циркуляційну течію та утворювала когерентний великомасштабний веретеноподібний вихор. Цей вихор мав джерело поблизу центра сферичної частини лунки та інтенсивно коливався. Під час викиду веретеноподібні вихрові структури починали підійматися над передніми сферичними частинами овальних заглиблень та, витягуючись уздовж осі лунок, викидалися у кормових їх частинах. Частота викидів великомасштабних вихрових структур назовні з кожної із лунок оцінювалася як $(0.4...0.6)$ Гц або $St=(0.04...0.06)$. Вихрові структури, що викидалися з лунок, зберігали свою ідентичність на відстані $(7...9)$ діаметрів лунки.

5. Визначено, що в умовах розвиненої турбулентної течії ($Re_x = (3.2...4.0) \cdot 10^5$ та $Re_d = (10000...12500)$) великомасштабні веретеноподібні вихрові структури концентрувалися тільки у передніх за потоком сферичних частинах лунок і викидалися назовні з овальних лунок з частотою близькою до 1 Гц ($St \approx 0.05$). З верхньої частини веретеноподібного вихору відривалися дрібномасштабні вихори, які зносилися потоком у примежовий шар над областю спряження передньої сферичної та кормової циліндричної частин лунок. Встановлено, що викид дрібномасштабних вихорів відбувається з частотою $(4...5)$ Гц або $St=(0.2...0.25)$.

6. Установлено, що незалежно від режимів обтікання пари овальних лунок, які рознесено одна від одної і нахилених на кут 30 градусів відносно напрямку потоку, взаємодії вихрових структур, що викидаються з кожної із лунок у серединному перерізі їх ближнього сліду, не відбувається.

1. Гортышов Ю. Ф., Попов И. А., Олишнев В. В., Щелчков А. В., Каськов С. И. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообмен-

- ного обладнання.– Казань: Центр інноваційних технологій, 2009.– 531 с.
2. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок).– К.: ИТТФ НАНУ, 2005.– 140 с.
 3. 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 с.
 4. Saric W. S. Gortler vortices // Annu. Rev. Fluid Mech.– 1994.– **26**.– P. 379–409.
 5. Larcheveque L., Sagaut P., Labbe O. Large-eddy simulation of a subsonic cavity flow including asymmetric three-dimensional effects // J. Fluid Mech.– 2007.– **26**.– P. 105–126.
 6. Бабенко В. В., Воскобийник А. В., Воскобийник В. А., Турик В. М. Вихори Гьортлера над увігнутою поверхнею вхідної частини вихрової камери // Прикладна гідромеханіка.– 2007.– **9**, № 2-3.– С. 25–36.
 7. Kiknadze G. I., Gachechiladze I. A., Oleinikov V. G., Alekseev V. V. Mechanisms of the self-organization of tornado-like jets flowing past three-dimensional concave reliefs // Heat Trans. Res.– 2006.– **37**, № 6.– P. 467–494.
 8. 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.
 9. Халатов А. А., Борисов И. И., Коваленко А. С., Дашевский Ю. Я., Северин С. Д., Шевцов С. В., Безлюдная М. В. Пленочное охлаждение плоской поверхности двухрядной системой отверстий в сферических углублениях // Восточно-Европейский журнал передовых технологий.– 2012.– **10**, № 3.– С. 4–8.
 10. Быстров Ю. А., Исаев С. А., Кудрявцев Н. А., Леонтьев А. И. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб.– СПб.: Судостроение, 2005.– 392 с.
 11. 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.
 12. Воскобойник А. В., Воскобойник В. А., Исаев С. А., Жданов В. Л., Корнев Н. В., Турноу Й. Бифуркация вихревого течения внутри сферической лунки в узком канале // Прикладна гідромеханіка.– 2011.– **13**, № 4.– С. 3–21.
 13. 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 міжнародна школа-семинар : матеріали семінара.– М.: МЦНМО.– 2010.– С. 51–52.
 14. 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.
 15. 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.
 16. Воскобийник В. А., Воскобийник А. В. Когерентні вихрові структури в поперечно обтічній овальній лунці // Наукоємні технології.– 2014.– **23**, № 3.– С. 352–358.
 17. 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.
 18. 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.
 19. 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.
 20. Воскобийник В. А., Воскобийник А. В., Воскобойник О. А., Турик В. М. Поле швидкості у середньому перерізі напівсферичної лунки // Прикладна гідромеханіка.– 2014.– **16**, № 4.– С. 17–27.
 21. Воскобойник В. А., Воскобойник А. А., Воскобойник А. В. Визуалізація вихревого течения внутри и вблизи поперечно обтекаемой овальной лунки на плоской поверхности // Промышленная теплотехника.– 2014.– **36**, № 3.– С. 13–21.
 22. Воскобийник 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. 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.
 24. Воскобийник В. А., Воскобийник А. В. Структура течії та пульсації тиску усередині овальної лунки // Наукоємні технології.– 2012.– **13**, № 1.– С. 12–18.