

УДК 532.5.517

## КОГЕРЕНТНІ ВИХРОВІ СТРУКТУРИ В ПОПЕРЕЧНО ОБТІЧНІЙ ОВАЛЬНІЙ ЛУНЦІ

**В. А. Воскобійник**, д-р техн. наук, пров. наук. співроб.;

**А. В. Воскобійник**, канд. техн. наук, ст. наук. співроб.

Інститут гідромеханіки НАН України

vlad.vsk@gmail.com

*Наведено результати експериментальних досліджень структури вихрового руху усередині поперечно обтічної овальної лунки на гідравлічно гладкій плоскій поверхні. За допомогою візуалізації течії контрастними барвниками та водорозчинними покриттями визначено особливості формування й еволюції когерентних великомасштабних і дрібномасштабних вихрових структур усередині лунки. Для малих чисел Рейнольдса, які відповідають ламінарній течії, усередині овальної лунки когерентні вихори не генеруються. Для чисел Рейнольдса порядку 10 000 усередині лунки формуються комірчасті квазістійкі великомасштабні вихрові структури, які викидаються над кормовою стінкою лунки. Для розвинутої турбулентної течії в лунці генерується веретеноподібна вихрова структура, яка притискається до передньої придонної частини лунки.*

**Ключові слова:** вихровий рух, овальна лунка, візуалізація течії, когерентна вихрова структура.

*Results of experimental researches of the vortex structure inside the cross-streamlined oval dimple on a hydraulically smooth flat surface are presented. By means of flow visualization by the contrasting dyes and water soluble coatings the features of forming and evolution of coherent large-scale and small-scale vortex structures are determined inside the dimple. For small Reynolds numbers responding by laminar flow coherent vortices are not generated inside the oval dimple. For the Reynolds numbers about 10000 the cellular quasistable large-scale vortex structures are formed inside the dimple, which are ejected above an aft dimple wall. For the developed turbulent flow a spindle vortex structure is generated in the dimple which is pressed to the front bottom part of the dimple.*

**Keywords:** vortex motion; oval dimple; flow visualization; coherent vortex structure.

### Постановка проблеми

Широке використання обтічних лункових поверхонь у енергозберігаючих технологіях зумовлює проведення чисельних та експериментальних досліджень із визначення оптимальної форми та геометричних параметрів лунок для отримання найбільшої ефективності їх експлуатації. Основний фізичний механізм дії заглиблень на потік, що їх обтікає — це генерація вихрових структур усередині лунок і викид їх у зовнішню течію. Когерентні вихрові структури суттєво впливають на розвиток примежового шару, відривних течій, процесів змішування та тепло- і масоперенесення.

Формування вихорів, особливості їх взаємодії між собою та з навколишнім середовищем у вільних і обмежених потоках досліджується під час вирішення науково-прикладних проблем гідроаеродинаміки, акустики, теплофізики і низки інших галузей науки та техніки.

Вихрові структури, їх кінематичні та динамічні характеристики вивчаються експеримен-

тально і, зокрема, за допомогою візуалізації течії, а також шляхом чисельного моделювання. Вирішення проблеми визначення просторово-часових характеристик вихрової течії відкриває нові можливості у вивченні явища утворення вихорів у примежових шарах і відривних течіях над обтічними поверхнями з локальними неоднорідностями, чим забезпечує обґрунтований підхід до контролювання процесів генерації когерентних вихрових структур та здійснення ефективного керування ними.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Можливість активного або пасивного керування полем течії з метою надання йому певних властивостей широко використовується в сучасних технологіях і привертає увагу великої кількості вчених та інженерів, які проводять дослідження в галузі механіки рідини та газу [1–4]. З-поміж пасивних засобів керування течією використовуються, зокрема, генератори вихорів. Ці пристрої, що виступають над обтічною поверхнею або утоплені в неї, генерують вихрові струк-

тури, які під час взаємодії з течією змінюють її структуру та гідродинамічні характеристики.

Експериментальні та теоретичні дослідження показали, що когерентні вихрові структури мають визначальну роль у процесі генерації пульсацій швидкості та пристінного тиску, а інтенсивні високочастотні пульсації, хоча і діють не тривалий час, істотно впливають на інтегральні характеристики. На основі експериментальних досліджень і чисельного моделювання загально-визнано, що турбулентний примежовий шар насичений вихровими структурами різних масштабів, діапазон яких розширюється зі збільшенням числа Рейнольдса.

Згідно з працею [3], когерентний рух визначається як тривимірна область течії, усередині якої, принаймні, хоча б один з фундаментальних параметрів потоку (будь-яка компонента швидкості, густина, температура, тиск тощо) має значну кореляцію. Кореляція спостерігається між однойменними змінними або з іншою змінною довкола великого простору і/або часу, які є доволі великими порівняно з найменшими локальними масштабами цієї течії. Найбільший просторовий розмір, на якому існує когерентна завихреність, є розміром когерентної структури. Таким чином, турбулентність складається з когерентних і випадкових рухів, останні накладаються на перші та зазвичай простягаються далеко за межі когерентної структури. Когерентні структури в просторовому відношенні взаємно виключають одна одну, тобто не можуть перекриватися в просторі, кожна структура має свою незалежну область і межі. Всі взаємодії когерентних структур є істотно нелінійними, включаючи розпад або спаровування, що суттєво ускладнює загальну картину течії та призводить до появи нової структури.

Течія в заглибленнях, як показують дослідження [5–8], характеризується складними гідродинамічними й акустичними процесами зі зворотним зв'язком. Конвективні нестійкості, зароджуючись під час відриву примежового шару на передній стінці заглиблення, зростають, насичуючи зсувний шар вихровими структурами, які, при своєму русі взаємодіють із кормовою стінкою та генерують інтенсивні збурення і пульсації швидкості та тиску. Петля зворотного зв'язку замикається відповідно до процесу сприйнятливості, внаслідок чого енергія збурень трансформується у хвилю нестійкості за передньою відривною кромкою лунки. Таким чином, у спектрах пульсацій швидкості або тиску генеруються потужні частотні тони усередині та поблизу лунки. Закономірності поведінки тривимірної течії у заглибленнях суттєво відрізняються від добре вивчених залежностей для їх двовимірних анало-

гів. Зокрема, це пов'язано з утратою стійкості плоско паралельного руху рідини.

Аналіз наукової літератури показує, що головною проблемою під час вивчення та визначення просторово-часових характеристик когерентних вихрових структур, що формуються усередині поверхневих лункових генераторів вихорів, і полів швидкості та тиску, які вони породжують, є їх складність, неоднорідність у просторі та нестаціонарність у часі, що обумовлені багатьма важливими факторами. Це значно ускладнює проведення чисельних та експериментальних досліджень і потребує використання сучасного обладнання та програмного забезпечення. Разом зі значною кількістю чисельних і експериментальних результатів з визначення інтегральних теплофізичних та гідродинамічних характеристик, на жаль, у науковій літературі мало уваги приділено вивченню просторово-часових кореляційних і частотно-хвильових спектральних залежностей вихрової течії та її гідродинамічних параметрів.

**Мета досліджень** — розробка наукових положень, засобів і методик визначення просторово-часових характеристик когерентних структур у локальних лункових генераторах вихорів у вигляді поперечно обтічної овальної лунки, розташованої на плоскій жорсткій поверхні, і фізичне моделювання вихрової течії усередині та поблизу них.

#### **Експериментальна установка та методика проведення досліджень**

Експериментальні дослідження вихрової течії усередині та поблизу поперечно обтічної овальної лунки, розташованої на плоскій пластині, проводилися в гідродинамічному лотку (рис. 1) завдовжки 16 м, завширшки 1 м і завглибшки 0,8 м.

Для проведення візуальних досліджень бокові стінки гідродинамічного лотка зроблені скляними. Вода у лоток подавалася через заспокійливу камеру насосами. Із заспокійливої камери потік води проходив конфузорний відсік і через хонейкомби та турбулізуючі сітки надходив на вхід гідродинамічного лотка. Вимірвальна ділянка, обладнана апаратурою і засобами реєстрації характеристик набігаючого потоку, координатними пристроями, розташовувалась на відстані 8 м від вхідної частини лотка.

За обтічну поверхню, у якій знаходилася локальна неоднорідність, використовувалася гідравлічно гладка пластина із полірованого органічного скла завтовшки 0,01 м, завширшки 0,5 м і завдовжки 2,2 м, яка була загострена з фронтального і кормового боків для її безвідривного обтікання.

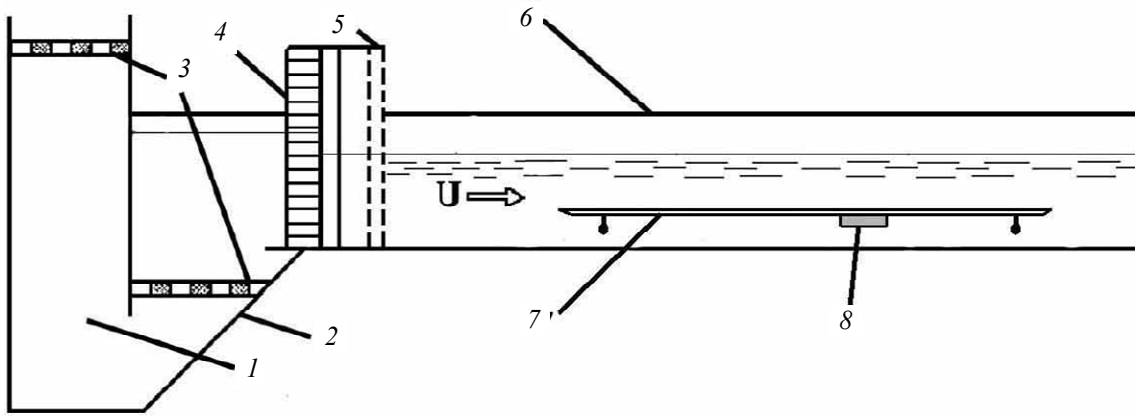


Рис. 1. Схема експериментальної установки:

1 — заспокійлива камера; 2 — конфузори; 3 — решітки; 4 — хонейкомб; 5 — турбулізуючі сітки; 6 — гідродинамічний лоток; 7 — пластина; 8 — заглиблення

На бокових сторонах пластини розташовувалися кінцеві шайби (органічне скло завтовшки 0,005 м і завширшки 0,2 м). На відстані  $x = 0,8$  м від носка пластини була зроблена овальна лунка, яка являла собою два сферичних сегменти діаметром  $d = 0,04$  м, об'єднаних циліндричною вставкою того ж діаметру, завдовжки  $l_c = 0,04$  м і завглибшки  $h = 0,009$  м (заглиблення лунки  $h/d = 0,22$ ). Розташування овальної лунки у вигляді поперечно обтічної канавки на плоскій поверхні показано на рис. 2. До нижньої частини пластини, навколо місця розташування лунки, кріпився лист з масштабною сіткою і пінопластовий обтічник. Металеві стержні з різьбовими з'єднаннями на кінцях слугували кріпленням пластини усередині гідралічного лотка між його стінками.

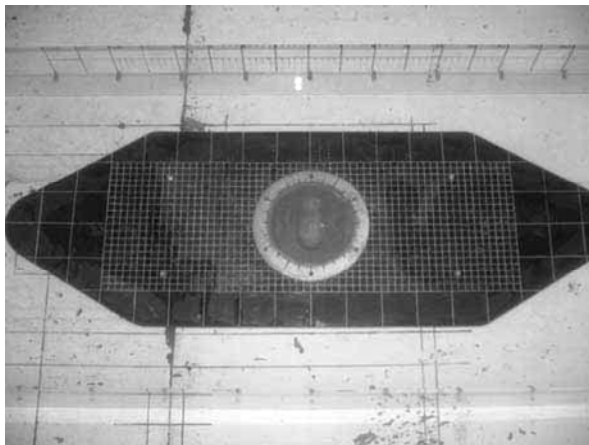


Рис. 2. Поперечно обтічна овальна лунка на поверхні гідралічного лотка

Пластина з овальною лункою була встановлена у вимірювальну ділянку гідродинамічного лотка на висоті 0,1 м від дна лотка, паралельно його поверхні (рис. 3). Глибина потоку і його швидкість регулювалися за допомогою спеціального обладнання, що дозволяло плавно змінюва-

ти ці параметри. Під час проведення досліджень глибина потоку становила 0,4 м, а швидкість течії  $U$  змінювалася від 0,02 до 0,5 м/с, що відповідало числу Рейнольдса  $Re_x = Ux/\nu = (2 \dots 40) \cdot 10^4$  і  $Re_d = Ud/\nu = (1 \dots 20) \cdot 10^3$ , де  $\nu$  — кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини.



Рис. 3. Вимірювальна ділянка гідродинамічного лотка та розташування в ній пластини з лункою

Під час проведення візуалізації як контрастна речовина використовувалися кольорові чорнила та барвники, а також контрастні змивні покриття та зважені частинки діаметром близько 1 мм нейтральної або близької до нейтральної плавучості. Кольорові чорнила або барвники подавалися у потік за допомогою мініатюрних трубок, які закріплювалися у державках координатних пристроїв. Залежно від швидкості набігаючого потоку витрати барвників регулювалися, а координатні пристрої давали можливість розташувати цівку барвника у те місце, де треба було візуалізувати течію. Поряд з цим, у пластині було зроблено отвори, куди через систему трубок подавалися барвники. Використання різнокольорових барвників дало змогу визначити ха-

рактерні місця формування і розвитку вихрових систем, які виникали під час обтікання пластини як із заглибленням, так і без нього.

У дослідженнях як розчинника у воді контрастна речовина використовувалося згущене молоко, яке тонким рівномірним шаром наносилося на обтічну поверхню. При цьому у згущене молоко додавалася біла або чорна сажа для того, щоб надати водорозчинному покриттю плавучості, близької до нейтральної, та кращої контрастності, щоб спостерігати траєкторії руху частинок сажі у вихровому потоці. За рухом частинок визначалася швидкість вихрової течії в досліджуваних областях потоку, її напрямку руху та оцінювався масштаб вихрових структур. На досліджувану поверхню згущене молоко наносилося рівномірним шаром. Згодом воно підсихало деякий час, визначений експериментальним шляхом залежно від температури і вологості повітря у лабораторії. Модель з готовим покриттям встановлювалася у потік і проводилися візуальні дослідження з використанням відео- і фотоапаратури. Змив контрастного покриття в тих чи інших місцях на обтічній поверхні дозволив судити про інтенсивність дотичних напруг примежового шару і вихрової течії. Таким чином, змивні покриття, які розчиняються у воді, дають можливість реєструвати об'ємні картини вихрової течії поблизу заглиблення або локальних неоднорідностей обтічної поверхні, а також виявити особливості викидів вихрових систем, які формуються усередині лунки, назовні із заглиблення. Спільне використання водорозчинних контрастних покриттів на обтічній поверхні та подача барвника у примежовий шар дозволили оцінити взаємодію когерентних вихрових структур, що генеруються усередині заглиблення, і вихрових систем, які формуються у примежовому шарі.

Реєстрація картин візуалізації була проведена відео- та фотоапаратурою з наступною роздрукуванням знімків і аналізом отриманих відеоматеріалів. Найбільш інформативні кадри оцифровувались і вводились у персональний комп'ютер для подальшої обробки та аналізу за допомогою спеціальних програм і методик.

### Результати досліджень та аналіз даних

Під час ламінарного обтікання овальної лунки потоком зі швидкістю 0,1 м/с, якій відповідають числа Рейнольдса  $Re_x = 80\,000$  і  $Re_d = 4000$ , надходження водорозчинної речовини, що має від'ємну плавучість, відбувалося вздовж всієї передньої за потоком половини овальної лунки. Контрастна речовина під час заходу усередину лунки не здійснювала обертального руху, іноді робила низькочастотні неінтенсивні коливання у

двох взаємно перпендикулярних площинах, але переважно у поперечному напрямку відносно поздовжньої осі лунки (за напрямком течії).

Верхня частина рідини, яка заповнювала об'єм овальної лунки, під час взаємодії із зовнішнім потоком періодично зносилася за межі лунки у вигляді хвилеподібних викидів, які часто відбувалися над серединною частиною лунки або синхронно над її сферичними частинами [10]. Такі викиди не мали інтенсивного характеру і відбувалися з частотою (0,06...0,08) Гц. У результаті для досліджуваного режиму обтікання овальної лунки, яку розташовано поперек потоку, по суті, не спостерігалось взаємодії між рідиною, що знаходилася усередині лунки, і зовнішнім потоком або ця взаємодія слабка, що проілюстровано на рис. 4, де підфарбована рідина, яка конвектує на мінімальній відстані від обтічної поверхні пластини, не надходила усередину лунки.

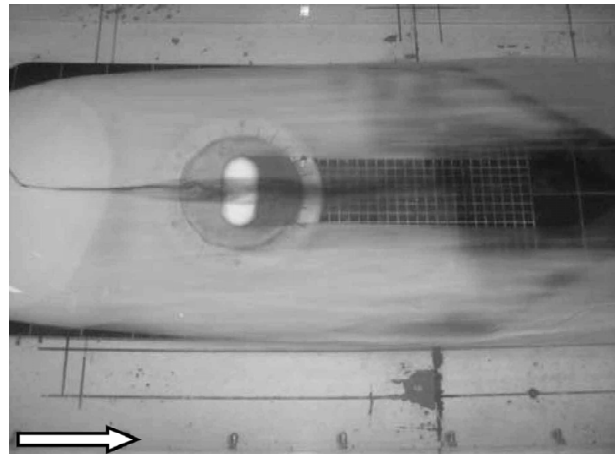


Рис. 4. Ламінарний режим обтікання овальної лунки на пласкій поверхні

Збільшення швидкості потоку до 0,25 м/с, якій відповідали числа Рейнольдса  $Re_x = 200\,000$  і  $Re_d = 10\,000$ , призвело до формування усередині овальної лунки когерентних великомасштабних вихрових систем. Затікання контрастної водорозчинної речовини усередину лунки відбувалося вздовж передньої за потоком половини лунки, подібно ламінарному обтіканню останньої. У придонній області овальної лунки рідина згорталася у сферичних частинах у великомасштабні вихрові структури, центри яких або джерела розташовувалися поблизу центрів сферичних частин лунки, але трохи ближче до передньої стінки лунки. У придонній області циліндричної частини лунки генерувалася ще одна пара великомасштабних протилежно обертових вихорів, яку розділяв серединний перетин овальної лунки. Таким чином, усередині овальної лунки, яка обтікалася поперечним потоком, для досліджуваного режиму її обтікання формувалися комірчасті

вихрові системи у вигляді двох пар великомасштабних протилежно обертових вихорів, які орієнтувалися здебільшого вертикально до дна заглиблення. Масштаб цих вихорів у придонній області лунки складав близько третьої частини діаметра лунки, і розташовувалися вони майже симетрично поперечної осі лунки. Комірчасті вихрові структури робили коливальний рух у просторі лунки і під час досягнення стоками верхньої межі лунки (зона зсувного шару) вертикальні вихори викривлювалися і виносилися назовні з овального заглиблення у вигляді викидів. Часто протилежно обертові вихрові структури спарювалися своїми верхніми частинами, формуючи пару аркоподібних вихрових систем. Ці вихрові системи розташовувалися по краях циліндричної вставки лунки і були розділені поздовжньою відносно напрямку потоку площиною симетрії поперечно обтічної овальної лунки. Коли головки аркоподібних вертикальних вихрових систем досягали зсувного шару, то вони змивалися потоком, утворюючи шпилькоподібний вихор, який є характерним для примежових шарів. Ніжки шпилькоподібного вихору розташовувалися усередині лунки. Під час витягування головки шпилькоподібного вихору виносилися униз за потоком за межі лунки, а його ніжки розривалися у більшості випадків несиметрично. У результаті відбувався викид вихрових структур поблизу перетинів, які проходили через місця спряження циліндричної та сферичної поверхонь лунки, як показано на рис. 5.

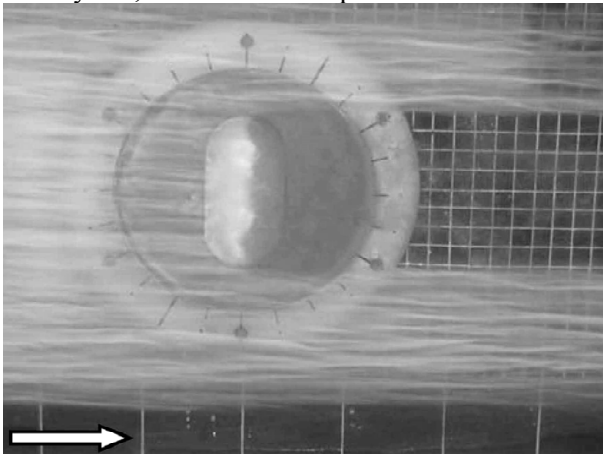


Рис. 5. Формування комірчастих вихрових структур усередині поперечно обтічної овальної лунки

Під час руйнування аркоподібних вихрових систем, які генерувалися потоком усередині овального заглиблення, асиметричні ніжки, що залишилися і розташовувалися поблизу середнього перетину, іноді спарювалися одна з одною, формуючи новий аркоподібний вихор. Цей вихор з'єднував центральну пару протилежно обертових вихорів і при своєму збільшенні, витя-

гуванні у вертикальному напрямку та вигині, під час взаємодії зі зсувним шаром, викидався із центральної частини лунки. У цей час у сферичних частинах лунки збільшувалися та набували вертикального положення кінцеві вихрові системи, які під час розпаду центрального аркоподібного вихору спарювалися із сусідніми протилежно обертовими вихорами, які раніше були ніжками цього центрального аркоподібного вихору. Таким чином, усередині знову утворювалися дві пари аркоподібних вихорів, які повторювали еволюцію, описану раніше. Іноді спостерігалися викиди вихрових систем одночасно у трьох місцях по довжині поперечно обтічного овального заглиблення. Більше всього таке явище обумовлено викидом окремо вертикальних вихорів зі сферичних частин лунки та аркоподібного вихору, який генерувався у серединній частині лунки. Викид вихрових систем спостерігався з частотами  $f = (0,1...0,4)$  Гц, яким відповідали числа Струхаля  $St = fd / U = (0,02...0,06)$ .

Під час формування когерентних великомасштабних вихрових структур усередині лунки і в процесі їх викиду назовні із заглиблення усередині лунки спостерігалися інтенсивні низькочастотні осциляції потоку, а також генерація дрібномасштабних вихорів і їх хаотичний викид назовні із заглиблення. Крім того, з частотою  $(2...3)$  Гц, якій відповідало число Струхаля  $St = (0,3...0,5)$ , спостерігався викид вихрових структур зсувного шару. Викиди вихрових систем позаду овальної лунки на віддаленні порядку трьох її діаметрів досягали майже двох товщин примежового шару і відстань між двома викинутими вихровими системами становила близько двох діаметрів лунки [10]. Швидкість переносу великомасштабних вихрових систем, що викидалися і конвектували униз за потоком позаду овальної лунки, дорівнювала  $0,8 U$ .

Для розвинутого турбулентного режиму течії ( $U = 0,5$  м/с,  $Re_x = 4 \cdot 10^5$  і  $Re_d = 2 \cdot 10^4$ ) усередині лунки спостерігалося формування стійкого веретеноподібного вихору (рис. 6), який було притиснуто до передньої відривної стінки заглиблення.

Рідина, що заповнювала відривну область над передньою стінкою, підіймалася до відривного краю циліндричної вставки лунки і, зустрівшись із зовнішнім потоком, формувала зсувний шар. Вихрові структури зсувного шару, прямуючи до кормової стінки, переносилися у придонну зону лунки і формували веретеноподібний вихор. Викидів великомасштабних вихрових структур із якої-небудь окремої області овального заглиблення не спостерігалося.

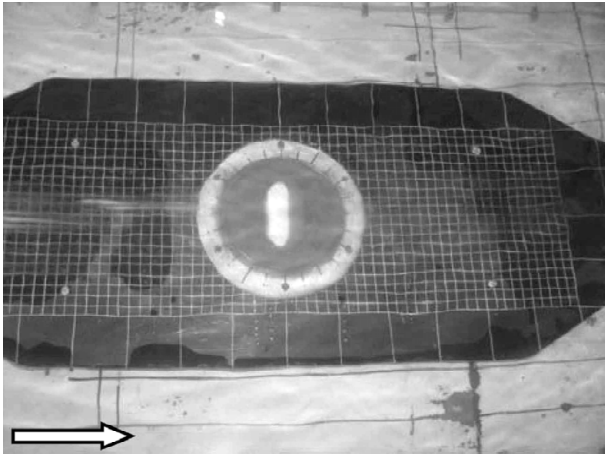


Рис. 6. Генерація веретеноподібного вихору усередині поперечно обтічної овальної лунки

Уздовж циліндричної частини лунки відбувалося хаотичне викидання дрібномасштабних вихрових структур за межі лунки у вигляді вихрової пелени, яка здійснювала високочастотні коливання у трьох взаємно перпендикулярних напрямках (тривимірні осциляції вихрової пелени). Знайдено, що частота викидів вихрових систем назовні з лунки (переважно позаду її циліндричної частини кормової стінки) становила (5...6) Гц, якій відповідало число Струхаля  $St = (0,4...0,5)$ .

### Висновки

На підставі отриманих експериментальних результатів з вивчення особливостей формування вихрових структур усередині поперечно обтічної овальної лунки можна зробити такі висновки:

1. Встановлено, що для малої швидкості обтікання поперечної лунки, якій відповідають числа Рейнольдса  $Re_x = 80\,000$  і  $Re_d = 4000$ , усередині лунки візуально не спостерігається циркуляційної течії. Відбувається низькочастотне коливання зсувного шару у напрямку потоку і поперек потоку вздовж поздовжньої осі овальної лунки. Хвилеподібний рух верхньої частини рідини, яка заповнює лунку, призводить до викиду гребенів хвиль у ближній слід лунки з частотою, для якої число Струхаля  $St \approx 0,03$ .

2. Знайдено, що зі зростанням швидкості потоку, коли  $Re_x = 200\,000$  і  $Re_d = 10\,000$ , усередині поперечно обтічної овальної лунки під час відриву примежового шару з передньої стінки лунки утворюється комірчаста циркуляційна течія з формуванням двох пар великомасштабних протилежно обертових вихорів. Джерела цих вихорів розташовуються у сферичних частинах овальної лунки і у придонній частині циліндричної вставки, розділених серединним перетином лунки, а стоки іноді об'єднуються поблизу зсувного

шару, утворюючи пару аркоподібних когерентних вихрових систем. Під час змиву голівок аркоподібних систем у ближньому сліді формуються шпилькоподібні вихори, котрі є характерними для примежових шарів, ніжки яких знаходяться усередині лунки. У процесі витягування шпилькоподібних вихорів їх ніжки розриваються, більшою частиною асиметрично, утворюючи викиди позаду лунки, а частинки ніжок, що залишилися усередині лунки, формуються у нові аркоподібні вихори. Викид великомасштабних вихрових систем назовні з лунки спостерігається періодично, а точніше квазіперіодично з частотою  $St \approx 0,05$ , а вихрових структур зсувного шару — з частотою  $St \approx 0,4$ . Під час формування когерентних великомасштабних вихрових структур усередині лунки і в процесі їх викиду назовні з заглиблення, усередині лунки спостерігаються інтенсивні низькочастотні осциляції потоку, а також генерація дрібномасштабних вихорів і їх хаотичний викид назовні з заглиблення. Викиди вихрових систем позаду овальної лунки на віддаленні порядку трьох її діаметрів досягають майже двох товщин примежового шару і відстань між двома викинутими вихровими системами становить близько двох діаметрів лунки.

3. Встановлено, що для розвинутої турбулентної течії, коли  $Re_x = 400\,000$  і  $Re_d = 20\,000$ , усередині поперечно обтічної овальної лунки спостерігається формування веретеноподібного вихору, який заповнює придонну частину лунки і притискається до передньої відривної стінки заглиблення. Інтенсивних викидів великомасштабних вихрових структур з якої-небудь окремої зони овального заглиблення не спостерігається. Уздовж циліндричної частини лунки відбувається хаотичне викидання дрібномасштабних вихрових структур за межі лунки у вигляді вихрової пелени, яка здійснює відносно високочастотні коливання з частотою  $St = (0,4...0,5)$ .

### ЛІТЕРАТУРА

1. *Gad-el-Hak M.* Flow control. Passive, active, and reactive flow management / M. Gad-el-Hak. — Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000. — 421 p.
2. *Cantwell B. J.* Organized motion in turbulent flow / B. J. Cantwell // Annu. Rev. Fluid Mech. — 1981. — Vol. 13. — P. 457–515.
3. *Robinson S. K.* Coherent motions in the turbulent boundary layer / S. K. Robinson // Annu. Rev. Fluid Mech. — 1991. — Vol. 23. — P. 601–639.
4. *Воскобойник В. А.* Когерентные вихревые структуры турбулентного пограничного слоя на продольно обтекаемом цилиндре / В. А. Воскобойник // Прикладна гідромеханіка. — 2012. — Т. 14, № 1. — С. 49–62.

5. *Халатов А. А.* Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок) / А. А. Халатов. — К. : ИТТФ НАНУ, 2005. — 76 с.

6. *Isaev S. A.* Influence of the Reynolds number and the spherical dimple depth on turbulent heat transfer and hydraulic loss in a narrow channel / S. A. Isaev, N. V. Kornev, A.I. Leontiev, E. Hassel // *Int. J. Heat Mass Transfer.* — 2010. — Vol. 53. — P. 178–197.

7. *Ligrani P. M.* Flow structure due to dimple depressions on a channel surface / P. M. Ligrani, J. L. Harrison, G. I. Mahmood, M. L. Hill // *Phys. Fluids.* — 2001. — Vol. 13, № 11. — P. 3442–3451.

8. *Voskoboinick V.* Study of near wall coherent flow structures on dimpled surfaces using unsteady pressure measurements / V. Voskoboinick, N. Kornev, J. Turnow // *Flow Turbulence Combust.* — 2013. — Vol. 90, № 2. — P. 86–99.

9. *Воскобійник В. А.* Вихрова течія усередині глибокої сферичної лунки / В. А. Воскобійник // *Вісник НАУ.* — 2012. — Т. 50, № 1. — С. 144–150.

10. *Воскобійник В. А.* Вихроутворення усередині поперечно обтічної овальної лунки / В. А. Воскобійник // *Прикладна гідромеханіка.* — 2012. — Т. 14, № 4. — С. 37–46.

Стаття надійшла до редакції 22.05.2014.