

УДК 532.517

ВИХРОУТВОРЕННЯ УСЕРЕДИНИ ПОПЕРЕЧНО ОБТІЧНОЇ ОВАЛЬНОЇ ЛУНКИ

В. А. ВОСКОБІЙНИК,

Інститут гідромеханіки НАН України, Київ

Отримано 15.04.2012

У роботі наведені результати експериментальних досліджень структури вихрового руху усередині поперечно обтічної ованої лунки на гідравлічно гладкій плоскій поверхні. За допомогою візуалізації течії контрастними барвниками та водорозчинними покриттями визначені особливості формування і еволюції когерентних великомасштабних і дрібномасштабних вихрових структур усередині лунки. Для чисел Рейнольдсу, розрахованих по діаметру лунки і швидкості течії, менших, ніж 4000, усередині ованої лунки не генеруються великомасштабні вихори, а спостерігається неінтенсивне низькочастотне коливання рідини, що заповнює лунку. Для чисел Рейнольдсу порядку 10000 усередині лунки формуються комірчасті квазістійкі великомасштабні вихрові структури, які викидаються над кормовою стінкою лунки у її сферичних частинах і в серединному перетині. Для розвинутої турбулентної течії (число Рейнольдсу більше 20000) у лунці генерується веретеноподібна вихрова структура, яка притискається до передньої придонної частини лунки. Над кормовою стінкою лунки спостерігається хаотичний викид дрібномасштабних вихорів, які утворюються при відриві верхніх частин веретеноподібного вихору (поблизу зсувного шару) у вигляді вихрової пелени.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований структуры вихревого движения внутри поперечно обтекаемой овалной лунки на гидравлически гладкой плоской поверхности. С помощью визуализации течения контрастными красителями и водорастворимыми покрытиями определены особенности формирования и эволюции когерентных крупномасштабных и мелкомасштабных вихревых структур внутри лунки. Для чисел Рейнольдса, рассчитанных по диаметру лунки и скорости течения, меньших, чем 4000, внутри овалной лунки не генерируются крупномасштабные вихри, а наблюдается неинтенсивное низкочастотное колебание жидкости, заполняющей лунку. Для чисел Рейнольдса порядка 10000 внутри лунки формируются ячеистые квазиустойчивые крупномасштабные вихревые структуры, выбрасывающиеся над кормовой стенкой лунки в ее сферических частях и в срединном сечении. Для развитого турбулентного течения (число Рейнольдса больше 20000) в лунке генерируется веретенообразная вихревая структура, которая прижимается к передней придонной части лунки. Над кормовой стенкой лунки наблюдается хаотический выброс мелкомасштабных вихрей, образующихся при отрыве верхних частей веретенообразного вихря (вблизи сдвигового слоя) в виде вихревой пелены.

In the paper the 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 vortical structures are certain inside the dimple. For the Reynolds numbers, expected on the diameter of the dimple and flow velocity, less, than 4000, the large-scale vortices are not generated inside the oval dimple, and there is nonintensive low-frequency oscillation of liquid, filling the dimple. For the Reynolds numbers about 10000 the cellular quasistable large-scale vortical structures are formed inside the dimple, which are ejected above an aft dimple wall in its spherical parts and in a middle section. For the developed turbulent flow (Reynolds number more than 20000) a spindleform vortical structure is generated in the dimple which is pressed to the front bottom part of the dimple. Above an aft dimple wall there is the chaotic ejection of small-scale vortices, appearing at separation of top parts of the spindleform vortex (near-by a shear layer) as a vortex sheet.

ВСТУП

У гідродинаміці та теплоенергетиці широке застосування лункових поверхонь обумовлює необхідність вивчення особливостей вихроутворення усередині заглиблень на обтічній поверхні. Відомо [1–3], що в залежності від режимів течії обтікання (ламінарний, перехідний чи турбулентний) і геометричних параметрів заглиблень усередині них формуються різні за формою та інтенсивністю вихрові структури. Генерація квазістійких когерентних вихрових структур канавками і лунками дає можливість керувати примежовим шаром, що використовується при створенні засобів, які зменшують гідродинамічний опір, шум обтікання та вібрації обтічної поверхні [4–6]. Хаотичне або нестійке вихроутворення усередині заглиблень, а також

їх викид у зовнішню течію з успіхом використовуються у енергозберігаючих технологіях, де за допомогою так званої "гри вихорів" [7–10] вдається значно збільшити теплопереніс і процеси змішування рідин.

Нааявність зсувного шару або шару змішування є визначальною особливістю течії у заглибленні. Зсувний шар формується тоді, коли потік відривається від переднього краю заглиблення через геометричний розрив поверхні обтікання. Нестійкість зсувного шару є центральною у вихровій течії усередині заглиблення та інтегральною у розвитку осциляцій. Через точку перегину у профілі швидкості зсувний шар стає нестійким до малих збурень завдяки механізму нестійкості Кельвіна-Гельмгольца. По мірі віддалення зсувного шару униз за потоком від переднього краю заглиблення

процес селективного підсилення породжує хвилі нестійкості. Вони спочатку ростуть експоненційно зі збільшенням відстані униз за потоком у той час, як їхні амплітуди стають такими, що нелінійні ефекти є важливими [11]. Після цієї початкової стадії нелінійні ефекти переважають і зсувний шар, як часто спостерігається, згортається, формуючи когерентні великомасштабні поперечно орієнтовані вихори (наприклад, для прямокутних заглиблень). Хоча утворення таких структур не суттєве для розвитку осциляцій, вони звичайно дають необхідне дискретне збудження, яке стає достатнім для породження та зберігання осциляцій, і є, отже, найбільше важливим при вивченні течій у заглибленні.

Осциляції течії розвиваються внаслідок ефектів взаємодії вихрових структур зсувного шару з кормовою стінкою заглиблення. У результаті поле течії, що представляє собою складну вихрову систему, залежить від умов і режиму потоку, що набігає, властивостей рідини, які формують зсувний шар, і внутрішніх полів течії у заглибленні. Поля течій для автоколивальних режимів обтікання заглиблень діляться на три класи, у відповідності з особливостями течій, що спостерігаються [12]:

1. Осциляції об'єднані, як гідродинамічні, що виникають від комбінованого ефекту підсилення нестійкості зсувного шару та збурень, що розповсюджуються униз за потоком, внаслідок механізму оборотного зв'язку.

2. Осциляції, які обумовлені резонансними явищами, коли коливання потоку взаємопов'язані зі стоячими хвилями тиску усередині заглиблення та акустичними хвилями, які розповсюджуються у навколишнє середовище.

3. Осциляції, які зв'язано із ефектом гнучкості або еластичності поверхні, коли рухи твердої поверхні обумовлені осциляціями течії під дією нелінійної взаємодії конвектуючих вихорів (псевдозвукові пульсації) і акустичним хвильовим механізмом.

Течія над заглибленням призводить до широкого діапазону гідродинамічних явищ і створює ряд проблем і задач, що складно вирішувати в дослідженнях та розумінні їх, а також під час контролю і керування ними. У стисливому потоці осциляції у заглибленні виникають із механізму гідроакустичного резонансу, який включає у собі (1) підсилення збуджень зсувним шаром, (2) генерацію акустичних хвиль при взаємодії вихрових структур зсувного шару з кормовою стінкою заглиблення і (3) розповсюдження уверх за потоком і перетворення хвиль тиску у вихрові хвилі поблизу переднього краю заглиблення, найбільше чутливого до

збурень, породжуючи наступні нестійкості у зсувному шарі. Цей процес оборотного зв'язку призводить до резонансу та появи автоколиваний. Такий тип течії відповідає моді зсувного шару, у якому резонансні частоти автоколиваний визначаються за формулою Розіте. У нестисливих потоках механізм осциляцій усередині заглиблення традиційно описується, як резонансний [12]. Частота осциляцій у першу чергу визначається конвективною швидкістю вихорів у зсувному шарі. Остання, як відомо, повинна бути функцією параметрів прилежого шару, таких як його товщини та форми параметру [13], що може пояснити значний розкид результатів у нестисливих потоках [14].

У чисельних і експериментальних дослідженнях додатково до осциляцій у моді зсувного шару спостерігається інша мода заглиблення, яка відома як слідова мода. Значно менше досліджень виконано з вивчення цієї моди, хоча деяку увагу все ж приділяється (наприклад, роботи [15 - 17]). У цій моді процес осциляцій визначається відходом великомасштабного вихору з переднього краю, подібно тому, що спостерігається позаду погано обтічних тіл. У ході формування вихору зовнішня течія проникає усередину заглиблення періодично і досягає його дна. У деякій точці вихор відривається від переднього краю і потім викидається назовні із заглиблення. Це приводить до значного збільшення опору. Слідова мода, яка характеризується періодичним відривом великого вихору від передньої стінки, масштаб якого близький до розмірів заглиблення, детально описана у роботі [17]. Автори наголошують про перехід течії до слідової моди з видовженням заглиблення та збільшенням чисел Маха і Рейнольдса. При цьому амплітуда осциляцій збільшується, а частота зменшується.

Треба відмітити, що заглиблення у експериментальних роботах завжди мають кінцеву ширину. Отже, тривимірність, яка обумовлена кінцевою геометрією, або тривимірність, яка є особливістю турбулентної течії, також може бути причиною слідової моди, що рідко спостерігається у експериментах. Відомо [18], що поле течії усередині заглиблення має тривимірну структуру, навіть при двомірній геометрії заглиблення, хоча частоти коливань добре визначаються двомірними моделями. Результати [19] підтверджують, що існує значна взаємодія між зсувним шаром і тривимірними нестійкостями у реальних умовах. Тривимірне збудження діє на більшу частину зсувного шару, навіть позаду кормової стінки заглиблення. У відповідності з дослідженнями [19], слідова мода в прямокутних заглибленнях може бути подавлена тривимірними збурюваннями. Пряме чисельне мо-

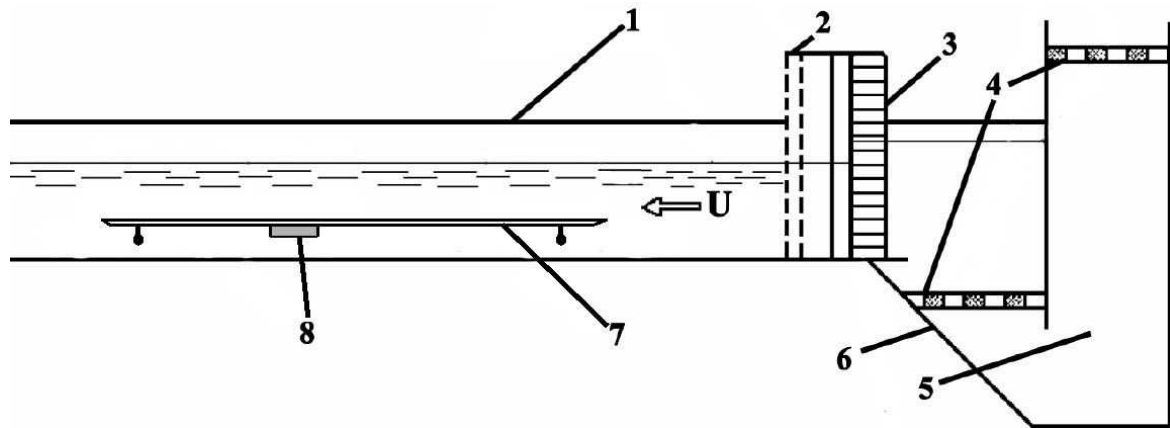


Рис. 1. Схема експериментальної установки:
 1 – гідродинамічний лоток, 2 – сітки, 3 – хонейкомб, 4 – решітки,
 5 – заспокійлива камера, 6 – конфузур, 7 – пластина, 8 – овальна лунка

делювання показує перехід від моди зсувного шару для коротких заглиблень і низьких чисел Маха до слідової моди для видовжених заглиблень і більших чисел Маха [17]. Показано, що тривимірність грає ключову роль у подавленні слідової моди. У роботі [20] відмічено, що двовірні заглиблення у слідовій моді повертаються до зсувної моди, коли тривимірні збурення мають місце у прилежовому шарі.

Для широких заглиблень експериментальний доказ тривимірності спостерігався у ряді досліджень. У гідродинамічному каналі у роботі [21] ідентифікували поперечну хвилову структуру, що виникає у зсувному шарі поблизу кормового краю заглиблення. В експериментах вони спостерігали автоколивання у поздовжньому напрямку (такі, що відповідають модам Розіте) разом із сильними, але відносно організованими поперечними осциляціями. Вони пов'язали цю тривимірну структуру з великомасштабним циркуляційним вихором між вільним зсувним шаром та стінками заглиблення. Передбачається, що тривимірні ефекти домінують поблизу стінок і кутів заглиблення, проте тривимірні структури спостерігаються і подалі від стінок заглиблення. Ці структури викликають тривимірність у зсувному шарі та генерують комірчасту структуру вихрової течії усередині заглиблення, яка розвивається подалі від меж заглиблення, де інші умови є двовірними [22]. Комірчаста течія усередині заглиблення з більшим відношенням ширини до довжини спостерігалася у роботі [23]. Комірчасті структури вивчалися за допомогою поверхневої масляної візуалізації потоку і розподілу статичного тиску для низько швидкісних потоків.

Розрахунки, виконані у роботі [24], показали, що поперечна асиметрія осередненої течії починається із біфуркації, яку обумовлено боковими стінками заглиблення. Крім того, знайдено, що напрямок біфуркації вибирається за допомогою незначної несиметричної течії у поперечному напрямку. Виявляється, що гідроакустичний зв'язок, відповідальний за осциляції течії, безпосередньо не включається у біфуркаційний процес. Ця ідея підтримується експериментальною візуалізацією [23] для нестисливої течії у заглибленнях, які мають різну ширину. У експериментальних дослідженнях, подібно чисельним розрахункам, спостерігали структуру вихрової течії у вигляді комірців. Біфуркація, швидше всього, з'являється із випадкового збудження шириною заглиблення натуральної довжини хвилі стійких тривимірних модуляцій. Комірчасті осцилюючі вихрові утворення формуються у циркуляційній зоні поблизу кормової стінки заглиблення.

У наших експериментальних дослідженнях визначаються особливості формування і розвитку когерентних вихрових структур усередині поперечно обтічної овальної лунки, яку зроблено на гідравлічно гладкій плоскій поверхні. Дослідження проводяться у гідравлічному лотку для різних режимів течії над обтічною поверхнею пластини з локальною неоднорідністю за допомогою візуалізації потоку. Для візуалізації використовуються контрастні барвники і чорнила, а також водорозчинні покриття.

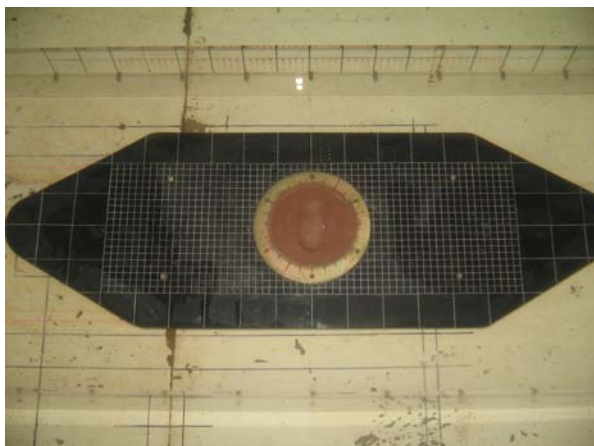


Рис. 2. Розташування овальної лунки у вигляді поперечно обтічної канавки на плоскій поверхні



Рис. 3. Розташування пластини з овальною лункою у вимірювальному участку гідродинамічного лотку

1. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Експериментальні дослідження обтікання нестисливою рідиною поперечно обтічної овальної лунки на плоскій пластині проводилися у гідравлічному лотку довжиною 16 м, шириною 1 м і глибиною 0.8 м. Для проведення візуальних досліджень бокові стінки гідродинамічного лотка зроблені скляними. Вода у лоток подавалася через заспокійливу камеру (рис. 1) насосами. Із заспокійливої камери потік води проходив конфузорний відсік і через хонейкомби та турбулізуючі сітки поступав на вхід гідродинамічного лотка. Більше докладний опис експериментального стенду, програми і методики досліджень наведено у роботах [25, 26].

Вимірювальна ділянка, обладнана апаратурою і засобами реєстрації характеристик набігаючого потоку, координатними пристроями, розташовувалась на відстані 8.0 м від вхідної частини лотка. Перед проведенням досліджень гідродинамічних характеристик течії були виконані віброакустичні вимірювання шумів і вібрацій лотка і виявлено вплив їх на параметри, що вимірюються. Для цього у потік води гідродинамічного лотка розташовували гідрофони типу 8103 фірми Брюль і К'єр, на державки датчиків і до стінок лотка кріпилися віброакселерометри типу 4393 фірми Брюль і К'єр. Вимірювання також проводилися за відсутністю швидкості течії, тобто коли лоток був тільки заповнений водою. Аналіз гідроакустичних і вібраційних перешкод за допомогою комплексу апаратури фірми Брюль і К'єр дозволив визначити джерела перешкод і провести заходи з їх усуну-

ння. Зокрема, були зменшені шуми зливу води, які створювали перешкоди акустичної і вібраційної природи. У результаті вдалося зменшити перешкоди на (20...30) дБ. Постійно проводився контроль температури повітря і води, атмосферного тиску.

За обтічну поверхню, в якій знаходилася локальна неоднорідність, використовувалася гідравлічно гладка пластинка із полірованого органічного скла товщиною 0.01 м, шириною 0.5 м і довжиною 2.2 м, яка була загострена з фронтальної і кормової сторін для її безвідривного обтікання. На бокових сторонах пластини розташовувалися кінцеві шайби (органічне скло товщиною 0.005 м і шириною 0.2 м). На відстані $x=0.8$ м від носка пластини була зроблена овальна лунка. Лунка представляла собою два сферичних сегменти діаметром $d=0.04$ м, об'єднані циліндричною вставкою того ж діаметру, довжиною $l_c=0.04$ м і глибиною $h=0.009$ 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, у місці розташування лунки, кріпився лист з масштабною сіткою і пінопластовий обтічник. Металеві стержні з різьбовими з'єднаннями на кінцях слугували кріпленням пластини усередині гідравлічного лотка між його стінками.

Пластинка з овальною лункою була встановлена в 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 дозволяє плавно змінювати ці параметри. При проведенні досліджень глибина потоку

складала 0.4 м, а швидкість течії (U) змінювалася від 0.02 м/с до 0.5 м/с, що відповідало числу Рейнольдса $Re_x = Ux/\nu$ від $2 \cdot 10^4$ до $4 \cdot 10^5$ і $Re_d = Ud/\nu$ від $1 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^4$, де U – швидкість потоку у лотку, x – відстань від носка пластини до місця розташування овальної лунки, d – діаметр лунки і ν – кінематична в'язкість рідини.

Під час проведення візуалізації у якості контрастної речовини 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. У залежності 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 трубочок подавалися барвники. Використання різнокольорових барвників дозволило визначити характерні місця формування і розвитку вихрових систем, які виникали при обтіканні пластини, як із заглибленням, так і без нього.

В дослідженнях у якості розчинної у воді контрастної речовини використовувалося згущене молоко, яке тонким рівномірним шаром наносилося на обтічну поверхню. При цьому у згущене молоко додавалася біла або чорна сажа для того, щоб придати водорозчинному покриттю плавучості, близької до нейтральної, та кращій контрастності, щоб спостерігати траєкторії руху частинок сажі у вихровому потоці. По руху 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, потім воно підсихало деякий час, визначений експериментальним шляхом у залежності від температури і вологості повітря у лабораторії. Модель з готовим покриттям встановлювалася у потік і проводилися візуальні дослідження за допомогою відео- і фотоапаратури. Змив контрастного покриття у тих чи інших місцях на обтічній поверхні дозволив судити про інтенсивність дотичних напруг прилеглої 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 прилеглої шар дозволили оцінити взаємодію когерентних вихрових структур, що генеруються усередині заглиблення, і вихрових систем, які формуються у прилеглому шарі.

Під час візуалізації поля вихрового руху використовувалося підсвічування досліджуваних областей лазерними променями та світлодіодними ножами, що дозволяло досліджувати вихрову течію у заданих площинах. Освітлення за допомогою потужних прожекторів і галогенних ламп дало можливість прослідкувати за об'ємною картиною течії контрастних покриттів і барвників. Застосування високооборотних синхронізуючих імпульсів світла, електричних розрядів і акустичного імпульсного випромінювання дозволило синхронізувати візуальні та інструментальні вимірювання характеристик вихрового руху.

Реєстрація візуалізації була проведена відео- та фотоапаратурою з наступною роздруковкою знімків і аналізом отриманих відеоматеріалів. Найбільше інформативні кадри і картини оцифровувалися і вводилися у персональний комп'ютер для подальшої обробки та аналізу за допомогою спеціальних програм і методик [27, 28].

Результати візуальних досліджень оброблялися на спеціально створених графічних станціях, де можна було провести прискорене або сповільнене відтворення відеозаписів або покадровий аналіз даних. Графічні станції на базі дво- або чотиріпроцесорних комп'ютерів, які мають підвищені пам'ять і швидкодію, дали можливість спостерігати поведінку барвників і позначених частинок у складній вихровій течії. Роздільна здатність на рівні одиниць пікселів дозволила точно визначити траєкторії руху позначених частинок і вектори швидкостей їх переносу у вихровому потоці.

2. РЕЗУЛЬТАТИ ВІЗУАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Візуалізація формування і розвитку вихрової течії усередині і поблизу поперечно обтічного овального заглиблення, розташованого на обтічній пласкій пластині, проводилася для декількох швидкісних режимів гідродинамічного лотка [25, 29]. Найменша швидкість візуальних досліджень складала $U=0.1$ м/с. Для цього ламінарного режиму течії, як показали вимірювання профілів швидкості плівковими термоанемометрами, вимі-

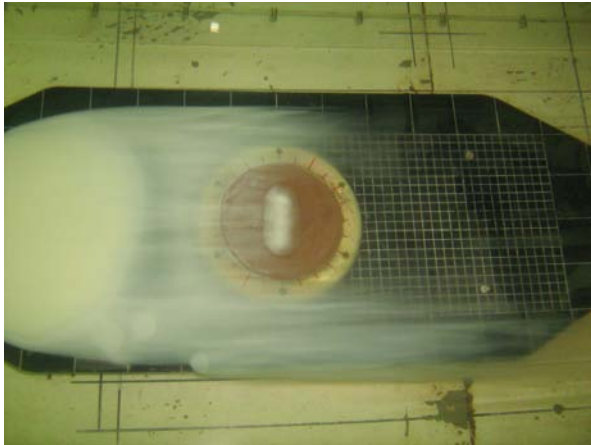


Рис. 4. Заповнення контрастною речовиною овальної лунки при швидкості потоку 0.1 м/с (напрямок течії зліва направо)

ряними і розрахованими параметрами є: відстань від носка пластини до переднього краю заглиблення $x=0.8$ м, довжина овальної лунки $l=0.08$ м, діаметр овальної лунки $d=0.04$ м, глибина лунки $h=0.009$ м, число Рейнольдса, розраховане по довжині пластини (x), складає $Re_x = 8 \cdot 10^4$, число Рейнольдса, розраховане по діаметру лунки (d), складає $Re_d = 4 \cdot 10^3$, заглиблення лунки $h/d=0.22$, товщина примежового шару перед передньою стінкою лунки $\delta=0.014$ м, товщина витіснення і товщина втрати імпульсу перед лункою $\delta^*=0.005$ м і $\theta=0.002$ м відповідно, а також відношення $d/\theta=20$. При обтіканні такого заглиблення надходження водорозчинної речовини, яка має від'ємну плавучість, відбувалося вздовж всієї передньої за потоком половини овальної лунки, що проілюстровано на рис. 4. Контрастна речовина при заході усередину лунки не здійснювала обертового руху, а іноді робила низькочастотні неінтенсивні коливання у двох взаємно перпендикулярних площинах, але, головним чином, у поперечному напрямку відносно поздовжньої вісі лунки (за напрямком течії) [25, 29-31]. Верхня частина рідини, яка заповнювала об'єм овальної лунки, при 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 [25, 26]. 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 спостерігається взаємодії між рідиною, що знаходиться усередині лунки, і зовнішнім потоком або

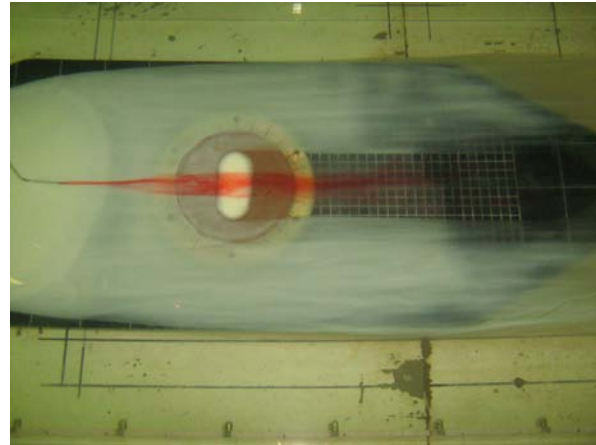


Рис. 5. Взаємодія набігаючого потоку з рідиною усередині овальної лунки при швидкості течії 0.1 м/с

ця взаємодія слабка, що проілюстровано на рис. 5, де підфарбована рідина, яка конвектує на мінімальній відстані від обтічної поверхні пластини, не поступає усередину лунки.

Для більшої швидкості потоку $U=0.25$ м/с параметри турбулентного поперечного обтікання овального заглиблення наступні: $x=0.8$ м, $l=0.08$ м, $d=0.04$ м, $h=0.009$ м, $Re_x = 2 \cdot 10^5$, $Re_d = 1 \cdot 10^4$, $h/d=0.22$, $\delta=0.009$ м, $\delta^*=0.003$ м, $\theta=0.001$ м і $d/\theta=40$. Збільшення швидкості потоку призводить до формування усередині овальної лунки когерентних великомасштабних вихрових систем. Затікання контрастної водорозчинної речовини усередину лунки відбувається вздовж передньої за потоком половини лунки, подібно ламінарному обтіканню останньої. У придонній області овальної лунки рідина згортається у сферичних частинах у великомасштабні вихрові структури, центри яких або джерела розташовуються поблизу центрів сферичних частин лунки, але трохи ближче до передньої стінки лунки. У придонній області циліндричної частини лунки генерується ще одна пара великомасштабних протилежно обертових вихорів, яку розділено серединним перетином овальної лунки. Таким чином, усередині овальної лунки, яка обтікається поперечним потоком, для досліджуваного режиму її обтікання формуються комірчасті вихрові системи у вигляді двох пар великомасштабних протилежно обертових вихорів, які орієнтовано головним чином вертикально до dna заглиблення. Масштаб цих вихорів у придонній області лунки складає близько третьої частини діаметру лунки і розташовуються вони майже симетрично поперечної вісі лунки. Комірчасті вихрові структури роблять коливальний рух у про-

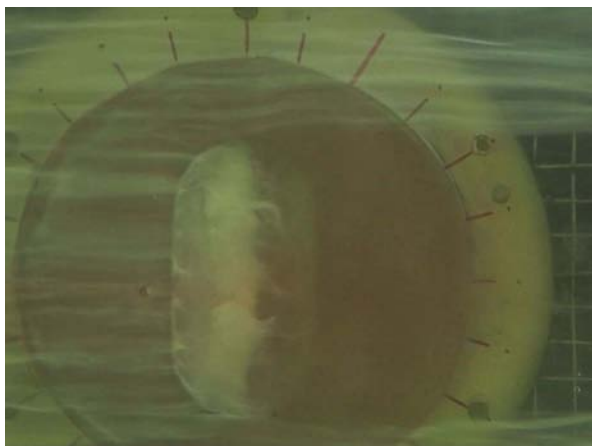


Рис. 6. Викид вихрових структур назовні із сферичних частей овальної лунки при швидкості потоку 0.25 м/с

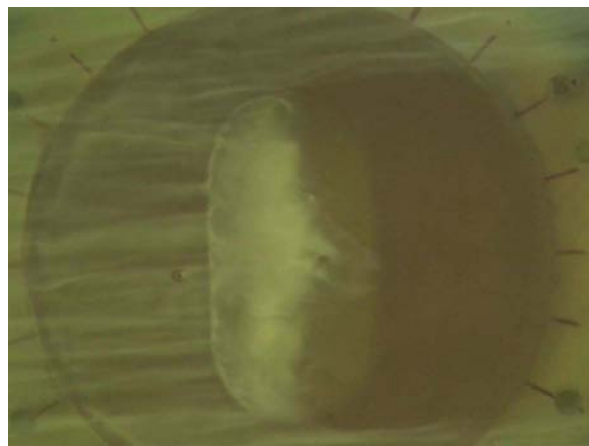


Рис. 7. Викид вихрових структур назовні із овальної лунки над її серединним перетином при швидкості потоку 0.25 м/с

сторі лунки і при досягненні стоками верхньої межі лунки (зона зсувного шару) вертикальні вихори викривлюються і виносяться назовні з овального заглиблення у вигляді викидів. Нерідко протилежно обертові вихрові структури спарюються своїми верхніми частинами, формуючи пару аркоподібних вихрових систем. Ці вихрові системи розташовуються по краям циліндричної вставки лунки, які розділено поздовжньою відносно напрямку потоку площиною симетрії поперечно обтічної овальної лунки. Коли головки аркоподібних вертикальних вихрових систем досягають зсувного шару, то вони змиваються потоком, створюючи шпилькоподібний вихор, який є характерним для примежових шарів. Ніжки шпилькоподібного вихору розташовуються усередині лунки. Під час витягування голівки шпилькоподібного вихору униз за потоком за межі лунки його ніжки розриваються у більшості випадків несиметрично [26]. У результаті відбувається викид вихрових структур поблизу перетинів, які проходять через місця спряження циліндричної та сферичної поверхонь лунки, як показано на рис. 6.

Під час руйнування аркоподібних вихрових систем, які генеруються потоком усередині овального заглиблення, асиметричні ніжки, що залишилися і розташовуються поблизу серединного перетину, іноді спарюються одна із іншою, формуючи новий аркоподібний вихор. Цей вихор з'єднує центральну пару протилежно обертових вихорів і при своєму збільшенні, витягуванні у вертикальному напрямку та вигині, при взаємодії зі зсувним шаром, викидається із центральної частини лунки, що проілюстровано на рис. 7. В цей час у сфе-

ричних частинах лунки ростуть і приймають вертикальне положення кінцеві вихрові системи, які під час розпаду центрального аркоподібного вихору спарюються із сусідніми протилежно обертовими вихорами, які раніше були ніжками цього центрального аркоподібного вихору. Таким чином, усередині знову утворюються дві пари аркоподібних вихорів, які повторюють еволюцію, що описано раніше. Іноді спостерігаються викиди вихрових систем одночасно у трьох місцях по довжині поперечно обтічного овального заглиблення, що показано на рис. 8. Більше всього таке явище обумовлено викидом окремо вертикальних вихорів із сферичних частин лунки та аркоподібного вихору, який генерується у серединній частині лунки. Викид вихрових систем спостерігається з частотами (0.1...0.4) Гц, яким відповідають числа Струхаля $St = fd/U = (0.02...0.06)$, де f – частота.

Під час формування когерентних великомасштабних вихрових структур усередині лунки і в процесі їх викиду назовні із заглиблення усередині лунки спостерігаються інтенсивні низькочастотні осциляції потоку, а також генерація дрібномасштабних вихорів і їх хаотичний викид назовні із заглиблення. Крім того, з частотою (2...3) Гц, якій відповідає число Струхаля $St = (0.3...0.5)$, спостерігається викид вихрових структур зсувного шару. Викиди вихрових систем позаду овальної лунки на віддаленні порядку трьох її діаметрів досягає майже двох товщин примежового шару і відстань між двома викинутими вихровими системами складає близько двох діаметрів лунки [31, 32]. Швидкість переносу великомасштабних вихрових систем, що викидаються і конвектують униз за потоком поза-



Рис. 8. Синхронний викид когерентних великомасштабних вихорів із трьох областей овальної лунки при швидкості течії 0.25 м/с



Рис. 9. Формування веретеноподібного вихору усередині поперечно обтічної овальної лунки при швидкості течії 0.5 м/с

ду овальної лунки, дорівнює $0.8U$.

Для найбільшої швидкості візуальних досліджень вихрової течії у гідродинамічному лотку параметри розвинутого турбулентного режиму поперечного обтікання овального заглиблення наступні: $U=0.5$ м/с, $x=0.8$ м, $l=0.08$ м, $d=0.04$ м, $h=0.009$ м, $Re_x = 4 \cdot 10^5$, $Re_d = 2 \cdot 10^4$, $h/d=0.22$, $\delta=0.022$ м, $\delta^*=0.003$ м, $\theta=0.002$ м і $d/\theta=20$. Для цього режиму течії усередині лунки спостерігається формування стійкого веретеноподібного вихору, який прижатий до передньої відривної стінки заглиблення (див. рис. 9). Рідина, що заповнює відривну область над передньою стінкою, підіймається до відривного краю циліндричної вставки лунки і, зустрівшись із зовнішнім потоком, формує зсувний шар. Вихрові структури зсувного шару, прямуючи до кормової стінки, переносяться у придонну область лунки і формують веретеноподібний вихор. Викидів великомасштабних вихрових структур із якої-небудь окремої області овального заглиблення не спостерігалось. Вздовж циліндричної частини лунки має місце хаотичне викидання дрібномасштабних вихрових структур за межі лунки у вигляді вихрової пелени, яка здійснює високочастотні коливання у трьох взаємно перпендикулярних напрямках (тривимірні осциляції вихрової пелени). Знайдено, що частота викидів вихрових систем назовні із лунки (головним чином позаду її циліндричної частини кормової стінки) складає (5..6) Гц, якій відповідає число Струхала $St=(0.4...0.5)$.

Робота виконана за фінансової підтримки по грантам конкурсу Спільних проєктів фундаментальних досліджень "ДФФД – РФФИ–

2011-2012" (проєкт № Ф40.7/020, Держ. реєстр. № 0111U003264; № 0112U004301 і проєкт № 08–11–90400) та додаткової відомчої теми для молодих вчених НАН України (№ 240/ВТ12-05/03 від 12.01.12, Держ. реєстр. № 0112U003202).

ВИСНОВКИ

Результати експериментальних досліджень особливостей формування вихрових структур усередині поперечно обтічної овальної лунки дозволили відмітити наступне:

1. Встановлено, що при малій швидкості обтікання поперечної лунки, якій відповідають числа Рейнольдса $Re_x = 8 \cdot 10^4$ і $Re_d = 4 \cdot 10^3$, усередині лунки візуально не спостерігається циркуляційної течії. Можливо воно не інтенсивне, а відбувається низькочастотне коливання зсувного шару у напрямку потоку і поперек потоку вздовж поздовжньої вісі овальної лунки. Хвилеподібний рух верхньої частини рідини, яка заповнює лунку, приводить до викиду гребенів хвиль у ближній слід лунки з частотою, для якої число Струхала $St \approx 0.03$.
2. Знайдено, що із зростанням швидкості потоку, коли $Re_x = 2 \cdot 10^5$ і $Re_d = 1 \cdot 10^4$, усередині поперечно обтічної овальної лунки під час відриву примезового 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, які є характерними для примезових шарів, ніжки яких знаходяться усередині лунки. Під час витягування шпилькоподібних вихорів їхні ніжки розриваються, більшою частиною асиметрично, створюючи викиди позаду лунки, а частинки ніжок, що залишилися усередині лунки, формуються у нові аркоподібні вихори. Викид великомасштабних вихрових систем назовні із 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 із заглиблення, усередині лунки спостерігаються інтенсивні низькочастотні осциляції потоку, а також генерація дрібномасштабних вихорів і їх хаотичний викид назовні із заглиблення. Викиди вихрових систем позаду овальної лунки на віддаленні порядку трьох її діаметрів досягають майже двох товщин примезового шару і відстань між двома викинутими вихровими системами складає близько двох діаметрів лунки.

3. Встановлено, що для розвинутої турбулентної течії, коли $Re_x = 4 \cdot 10^5$ і $Re_d = 2 \cdot 10^4$, 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 із якої-небудь окремої області овального заглиблення не спостерігається. Вздовж циліндричної частини лунки має місце хаотичне викидання дрібномасштабних вихрових структур за межі лунки у вигляді вихрової пелени, яка здійснює відносно високочастотні коливання з частотою $St = (0.4 \dots 0.5)$.
1. Гортышов Ю. Ф., Попов И. А., Олимпиев В. В., Щелчков А. В., Каськов С. И. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. – Казань: Центр инновационных технологий, 2009. – 532 с.
2. 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. – Минск, Беларусь. – 2008. – С. 1–9.

3. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок). – Киев: ИТТФ НАНУ, 2005. – 76 с.
4. 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.
5. Исаев С. А., Леонтьев А. И., Кикнадзе Г. И. Сравнительный анализ вихревого теплообмена при турбулентном обтекании сферической лунки и дугерной траншеи на плоской стенке // ИФЖ. – 2005. – 78, № 4. – С. 117–128.
6. 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.
7. Isaev S. A., Kornev N. V., Leontiev A. I., Hassel E. Influence of the Reynolds number and the spherical dimple depth on turbulent heat transfer and hydraulic loss in a narrow channel // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2010. – 53. – P. 178–197.
8. Халатов А. А., Коваленко Г. В., Терехов В. И. Режимы течения в единичном углублении, имеющем форму сферического сегмента // VI минский межд. форум по теплообмену, ММФ 2008. – Минск, Беларусь. – 2008. – С. 1–10.
9. Кикнадзе Г. И., Гачечиладзе И. А., Олейников В. Г., Городков А. Ю. Самоорганизация смерчеобразных струй в потоках сплошной среды и технологии, сопровождающие это явление // Тепло-массообмен и гидродинамика в закрученных потоках: Третья межд. конф. – Москва, Россия. – 2008. – С. 1–3.
10. Voropaev G. A., Voskoboinick V. A., Rozumnyuk N. V., Voskoboinick A. V. Vortical flow features in a hemispherical cavity on a flat plate // Turbulence and Shear Flow Phenomena, TSFP - 6: VI-th Intern. Sympos., June 22-24, 2009: Papers. – Seoul, Korea. – 2009. – P. 563–568.
11. Sarohia V. Experimental investigations of oscillations in flows over shallow cavities // AIAA J. – 1977. – 15. – P. 984–991.
12. Rockwell D., Naudascher E. Review - self-sustaining oscillations of flow past cavities // J. Fluids Engineering. – 1978. – 100, № 2. – P. 152–165.
13. Dix R. E., Bauer R. C. Experimental and predicted acoustic amplitudes in a rectangular cavity // AIAA Pap. – 2000. – № 472. – P. 1–18.
14. Suponitsky V., Avital E., Gaster M. On three-dimensionality and control of incompressible cavity flow // Phys. Fluids. – 2005. – 17, № 10. – P. 104103–1–19.
15. Colonius T. An overview of simulations, modelling, and active control of flow/acoustic resonance in open cavities // AIAA Pap. – 2001. – № 76. – P. 1–12.
16. Gharib M., Roshko A. The effect of flow oscillations on cavity drag // J. Fluid Mech. – 1987. – 177. – P. 501–530.

17. Rowley C. W., Colonius T., Basu A. J. On self-sustained oscillations in two-dimensional compressible flow over rectangular cavities // *J. Fluid Mech.*– 2002.– **455**.– P. 315–346.
18. Rizzetta D. P., Visbal M. R. Large-eddy simulation of supersonic cavity flows including flow control // *AIAA J.*– 2003.– **41**, № 8.– P. 1452–1462.
19. Bres G. A., Colonius T. Direct numerical simulations of three-dimensional cavity flows // *AIAA Pap.*– 2007.– № 3405.– P. 1–16.
20. Shieh C. M., Morris P. J. Parallel computational aeroacoustic simulation of turbulent subsonic cavity flow // *AIAA Pap.*– 2000.– № 1914.– P. 1–12.
21. Rockwell D., Knisely C. Observations of the three-dimensional nature of unstable flow past a cavity // *Phys. Fluids.*– 1980.– **23**, № 3.– P. 425–431.
22. Samimy M., Debiasi M., Caraballo E., Serrani A., Yuan X., Little J., Myatt J. H. Reduced-order model-based feedback control of subsonic cavity flows - An experimental approach // *Active Flow Control, NNFM.*– 2007.– **95**.– P. 211–229.
23. Maull D. J., East L. F. Three-dimensional flow in cavities // *J. Fluid Mech.*– 1963.– **16**.– P. 620–632.
24. Larcheveque L., Sagaut P., Labbe O. Large-eddy simulation of a subsonic cavity flow including asymmetric three-dimensional effects // *J. Fluid Mech.*– 2007.– **577**.– P. 105–126.
25. Воропаев Г. А., Воскобойник А. В., Воскобойник В. А., Исаев С. А. Визуализация ламинарного обтекания овального углубления // *Прикладна гідромеханіка.*– 2009.– **11**, № 4.– С. 31–46.
26. Воскобойник В. А., Воскобойник А. В. Структура течії та пульсації тиску усередині овальної лунки // *Наукоємні технології.*– 2012.– **13**, № 1.– С. 12–18.
27. Faure T. M., Adrianos P., Lusseyran F., Pastur L. Visualizations of the flow inside an open cavity at medium range Reynolds numbers // *Exp. Fluids.*– 2007.– **42**.– P. 169–184.
28. He L., Yi S. H., Zhao Y. X. Visualization of coherent structures in a supersonic flat-plate boundary layer // *Chinese Sci. Bull.*– 2011.– **56**, № 6.– P. 489–494.
29. Воропаев Г. А., Воскобойник В. А., Воскобойник А. В. Генерация псевдозвуковых пульсаций при ламинарном обтекании овальной лунки // *Консонанс 2009 : акустичний симпозиум : збірник праць.*– Київ: ІГМ НАНУ.– 2009.– С. 337–342.
30. Воскобойник А. А., Воскобойник А. В., Воскобойник В. А. Характеристики пульсаций псевдозвукового давления в лунке при малых числах Рейнольдса // *Акустичний вісник.*– 2009.– **12**, № 4.– С. 10–22.
31. Воскобойник В. А. Пульсации пристеночного давления в низкоскоростном потоке вблизи овального углубления // *Акустичний вісник.*– 2009.– **12**, № 2.– С. 3–15.
32. Воскобойник А. В., Воскобойник В. А. Интегральные характеристики пограничного слоя над пластиной с полуцилиндрическим углублением // *Проблемы машиностроения.*– 2009.– **12**, № 3.– С. 39–46.