

## СТРУКТУРА ТЕЧІЇ ТА ПУЛЬСАЦІЇ ТИСКУ УСЕРЕДИНІ ОВАЛЬНОЇ ЛУНКИ

**В. А. Воскобойник**, канд. техн. наук, ст. наук. співроб.;

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

Інститут гідромеханіки НАН України ?

alexandr.vsk@gmail.com

*Наведено результати експериментальних досліджень формування та еволюції вихрової течії та інтенсивності поля пульсацій пристінного тиску усередині та навколо нахиленої під кутом  $60^\circ$  овальної лунки, яку розташовано на гладкій пластині. Досліди проведено для ламінарного режиму обтікання. Визначено особливості утворення вихорів усередині овальної лунки та їх викиду назовні у примежовий шар. Отримано розподілення середньоквадратичних значень пульсацій пристінного тиску на обтічній поверхні лунки та в її околі. Встановлено, що пульсації тиску у ближньому сліді лунки майже на порядок вищі, ніж на її дні.*

**Ключові слова:** ламінарна течія, пульсації пристінного тиску, когерентна вихрова структура, асиметрична овальна лунка.

*The results of experimental researches of forming and evolution of vortex flow and intensity of the field of wall-pressure fluctuations are presented inside and round the oval dimple which is located on a smooth plate inclined under the corner of 60 degrees. Experiments are conducted for the laminar regime of flow. The features of the vortex generation are certain inside the oval dimple and their break up outside in boundary layer. The distributions of root-mean-squares of the wall-pressure fluctuations is got on the streamlined surface of dimple and in its environment. It is set that pressure fluctuations in lower wake of dimple almost on an order higher, than on its bottom.*

**Keywords:** laminar flow, wall-pressure fluctuations, coherent vortex structure, asymmetric oval dimple.

### Постановка проблеми

Одним з важливих чинників, що визначає ефективність руху тіл при заданій швидкості є мінімум енергетичних втрат, що пов'язане з мінімізацією опору тертя та форми.

В багатьох гідротехнічних спорудах та конструкціях наявні різноманітні неоднорідності обтічної поверхні у вигляді заглиблень.

За відповідних умов обтікання заглиблень усередині них утворюються великомасштабні когерентні вихрові системи, які генерують інтенсивні пульсації швидкості, тиску, температури, завихреності та інших параметрів турбулентності, що використовуються у засобах керування примежовим шаром.

Залежно від режиму обтікання, геометричних параметрів і форми заглиблення усередині останніх генеруються вихрові структури різних масштабів, напрямків руху, частот обертання та осциляцій як у просторі, так і в часі. Ці вихрові структури, взаємодіючи між собою та обтічною поверхнею, при певних умовах, викидаються назовні із заглиблення, змінюючи структуру примежового шару та інтегральні характеристики тіл обтікання, процесів теплообміну та змішування, якість аеродинамічних профілів та ін. [1–3].

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Вихрові структури, що формуються під час обтікання заглиблень на площині, системно по-

чали вивчати у другій половині минулого сторіччя [2; 4; 5].

Експериментальні результати аеродинамічних і теплофізичних досліджень показали досить високу ефективність деяких рельєфів заглиблень зі збільшенням тепло- і масоперенесення при незначному зростанні рівня гідродинамічних втрат у таких течіях. У працях [5; 6] зазначено, що сферичні заглиблення за теплогідрравлічною ефективністю не є найкращими для турбулентного режиму обтікання теплоносія, а в 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 їм конкурентоспроможність при ламінарному режимі обтікання.

У працях [7; 8] досліджувалися асиметричні лунки каплеподібної форми з сильним закругленням кромки нижче за потоком з погляду зниження гідродинамічних втрат. Відомо, що течія в симетричних струменево-вихрових структурах є слабкою і нестійкою, щоб її інтенсифікувати, слід зробити обтікання несиметричним. Тому, для досягнення цього необхідно створити асиметричну форму лунки. У праці [8] продемонстровано, що одностороння поперечна деформація глибокої лунки істотно видозмінює вихрову картину всередині неї і викликає інтенсифікацію

руху в лунці уперек до набігаючого потоку. Виявлено, що при ламінарному режимі обтікання зберігається вихрова структура течії з двома великомасштабними вихровими осередками, які виявлені для сферичних лунок.

Інша логіка побудови асиметричних лунок обумовлена принципами навмисної організації вихрової структури в межах лунки. Асиметрія форми лунки за рахунок її бічної деформації дозволяє трансформувати вихрову структуру і підсилити поперечне перетікання рідини в її межах. Певний прогрес у формоутворенні лунок, що призводять до їх асиметричного обтікання, пов'язаний з розділенням сферичної лунки на дві половини і рознесенням їх на деяку відстань одна від одної за допомогою циліндричної вставки [6; 8].

Довжина циліндричної вставки і кут нахилу поздовжньої осі симетрії лунки (до зовнішнього потоку) є їх додатковими геометричними характеристиками, крім відносної глибини і радіусу закруглення, що більшою мірою дає можливість керувати процесом обтікання таких лунок.

Надання неглибокій лунці асиметричної форми призводить до перебудови її обтікання. Двокомірчаста вихрова структура в лунці міняється на моновихрову нахилена.

Перебудова супроводжується перерозподілом теплових навантажень у межах лунки і за нею. Аналіз поля вторинної течії показує, що за асиметричною лункою також формується моновихрова спіралеподібна структура течії, на відміну від симетричної двовихрової структури за сферичною лункою.

Як результат, для асиметричної лунки, що поєднує неглибоку сферичну лунку з циліндричною вставкою, має місце істотне (близько 10 %) збільшення тепловіддачі від стінки. Слід зазначити високу стійкість нахиленої структури, що генерується, яка забезпечує стабільність ефекту вихрової інтенсифікації теплообміну.

Як показано в праці [9], овальні лунки, розташовані на стінці вузького мікроканалу, на відміну від сферичних заглиблень, здатні інтенсифікувати теплообмін, збільшуючи тепловіддачу приблизно на 10 %. За рахунок зниження гідравлічних втрат теплогідравлічна ефективність поверхні лунки зростає ще вище — до 13 %.

**Мета досліджень** — експериментально дослідити характерні особливості обтікання овального заглиблення на плоскій пластині та ламінарної течії у примежовому шарі поблизу цієї неоднорідності; вивчити механізм формування когерентних вихрових структур усередині локального заглиблення, їх еволюцію та взаємодію з обтічною поверхнею і примежовим шаром та визна-

чити поле пульсацій пристінного тиску усередині нахиленої овальної лунки та в її околі.

### Експериментальна установка та методика проведення досліджень

Фізичне моделювання вихрових процесів, які генеруються в локальному заглибленні овальної форми на плоскій поверхні, здійснювалося у гідродинамічному лотку з вільною поверхнею води, над дном якого було розташовано гідравлічно гладку пластину довжиною близько 2 м та шириною 0,5 м (рис. 1).

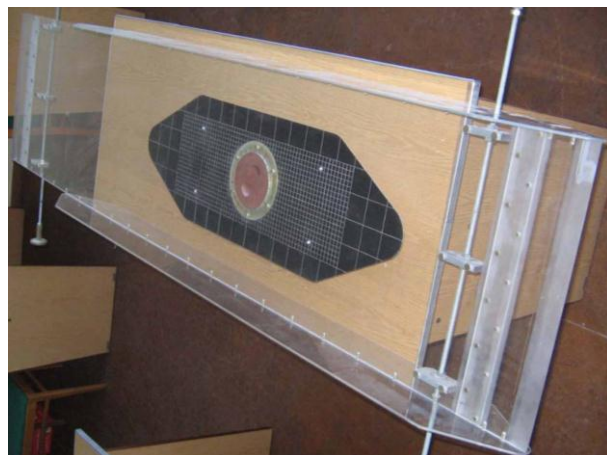


Рис. 1. Вимірювальна пластинка з овальною лункою

У центрі пластинки знаходився сталевий стакан, заповнений пластиліном, в якому було зроблено овальне заглиблення у вигляді двох сферичних лунок, об'єднаних циліндричною вставкою. У досліді овальне заглиблення розташовувалося під кутом  $60^\circ$  до напрямку потоку. Діаметр лунки  $d = 0,04$  м, ширина і довжина циліндричної вставки  $0,04$  м.

Таким чином, овальна лунка має ширину  $0,04$  м, довжину  $0,08$  м, а глибину  $0,009$  м і відношення глибини до ширини  $h/d = 0,22$  (рис. 2).

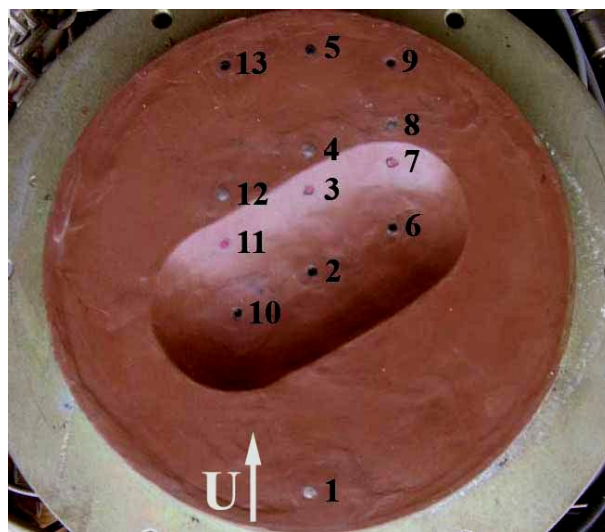


Рис. 2. Розташування датчиків пульсації пристінного тиску на обтічній поверхні овальної лунки та поблизу неї

Детальний опис експериментальної установки, програми та методики проведення досліджень наведено в працях [6; 10].

Досліди проводились за швидкістю потоку від 0,03 м/с до 0,1 м/с, що відповідають ламінарному режиму течії, та глибині води над поверхнею пластини 0,4 м. Спочатку проводилася візуалізація потоку за допомогою контрастних речовин та водорозчинних покриттів.

Контрастні речовини (барвники та чорнила) подавалися крізь отвори на обтічній поверхні, а водорозчинне покриття було зроблено з шару згущеного молока, який наносився на обтічну поверхню і підсихав за спеціальною технологією. При розчині покриття в потік переносилася хмара молока, яка давала можливість провести об'ємну візуалізацію пристінного шару над обтічними поверхнями.

Це дало змогу визначити зони формування та розвитку великомасштабних когерентних вихрових структур у лунці, оцінити їх розміри і форму, напрямки руху та обертання, місця викиду назовні з лунки. Результати візуалізації було використано при плануванні, підготовці та проведенні подальших інструментальних досліджень.

Поле пульсацій пристінного тиску досліджувалося датчиками, встановленими поблизу характерних місць формування та розвитку вихрових систем усередині заглиблення і навколо нього. Урівень з обтічною поверхнею овальної лунки та на пластині поблизу заглиблення було встановлено 13 мініатюрних датчиків пульсацій пристінного тиску, з діаметром чутливої поверхні  $1.6 \cdot 10^{-3}$  м (рис. 2).

Електричні сигнали датчиків пульсацій пристінного тиску підсилювались, фільтрувались, вимірювались і реєструвались відповідною апаратурою. Аналогові сигнали подавались на багатоканальні аналогово-цифрові перетворювачі, вбудовані в персональний комп'ютер, де реєструвались, а згодом оброблялись за стандартними та спеціально розробленими програмами і методиками.

Усі засоби інструментальних вимірювань калібрувались та тестувались за відповідними рекомендаціями та програмами з використанням абсолютних та відносних методів. Під час проведення експериментальних робіт датчики періодично перевірялись та проводився постійний контроль оточуючого середовища (вимірювання температури, тиску, електромагнітних, вібрацій-

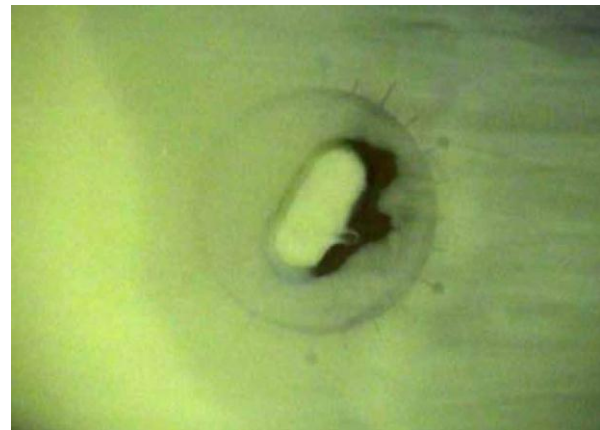
них та акустичних перешкод відповідними вимірювачами та датчиками).

Будувалися калібрувальні криві, визначалась чутливість датчиків та проводилось зіставлення даних з паспортними характеристиками. У разі потреби застосовувались компенсаційні розрахунки і вносились корективи у виміряні параметри. Похибка вимірювань усереднених та інтегральних характеристик поля пульсацій тиску не перевищувала 8 % при надійності 0,95 або  $2\sigma$ .

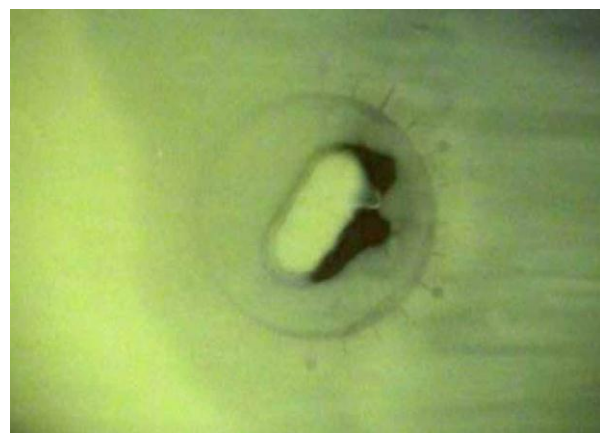
### Результати досліджень та аналіз даних

Візуальні дослідження особливостей формування і розвитку вихрової течії усередині овального заглиблення, розташованого під кутом  $60^\circ$  до напрямку потоку (рис. 2), і взаємодії його з примежовим шаром над плоскою пластинною для ламінарного режиму обтікання, показали ряд особливостей еволюції течії в лунці. При швидкості потоку 0,1 м/с або для числа Рейнольдса  $Re_d = Ud/v = 4000$  контрастна речовина (розчинена у воді згущене молоко), через свою підвищену щільність, рівномірно розташовується у заглибленні майже до його половини глибини. Вона заходить у заглиблення у вигляді сповзаючої течії, уздовж усієї передньої кромки, а також уздовж ближньої за потоком передньої бічної сферичної стінки (рис. 3).

Верхня частина шару розчину згущеного молока, що знаходиться усередині заглиблення, здійснює коливальні рухи упоперек заглиблення (паралельно його поздовжній осі).



a





б

Рис. 3. Викид шпилькоподібного вихору з:  
*a* — середньої частини заглиблення;  
*б* — кормової за потоком частини заглиблення  
 для швидкості потоку 0,1 м/с

Поблизу кормової стінки з'являються поздовжні коливання (по довжині заглиблення). При цьому рідина, здійснюючи коливальні рухи, переміщується уздовж кормової стінки від його передньої за потоком частини до кормової частини. При взаємодії коливальних рухів рідини усередині заглиблення в його верхній частині формуються пучності в передній за потоком сферичній частині заглиблення, в його середині і кормовій сферичній частині заглиблення. Формування поперечного коливання, яке рухається паралельно поздовжній осі заглиблення, зумовлене генерацією вихрових структур у шарі змішування. Водночас формування поздовжніх коливань, що переміщуються уздовж кормової стінки заглиблення від його передньої частини до кормової, зумовлене особливостями установки заглиблення до набігаючого потоку ( $\alpha = 60^\circ$ ), кінцевими ефектами бічних стінок заглиблення і їх формою (сферичною). Взаємодія двох ортогональних коливальних процесів усередині заглиблення генерує автоколивальний рух рідини в заглибленні з майже синхронним формуванням пучностей у передній, середній і кормовій за потоком частинах заглиблення.

Візуалізація потоку дає підставу припустити, що частота поздовжнього коливального руху майже у три рази менша, ніж частота поперечних коливань або частота формування вихрових структур у зсувному шарі.

У придонній частині заглиблення формується великомасштабна вихрова структура, що поволі обертається, у вигляді веретеноподібного вихору, ось якого згинається і спрямована уздовж поздовжньої осі овального заглиблення.

Джерело цього вихору розташовується на дні передньої за потоком сферичної частини лунки, а стік, здійснюючи коливальний рух, то приєднується до дна кормової сферичної частини лунки, то викидається з неї. При цьому відбувається викидання рідини з лунки у вигляді асиметричної нахиленої вихрової системи. Рідина у веретеноподібний вихор потрапляє по спіралі, рухаючись, здебільшого, від передньої частини лунки до її кормової частини уздовж дна заглиблення.

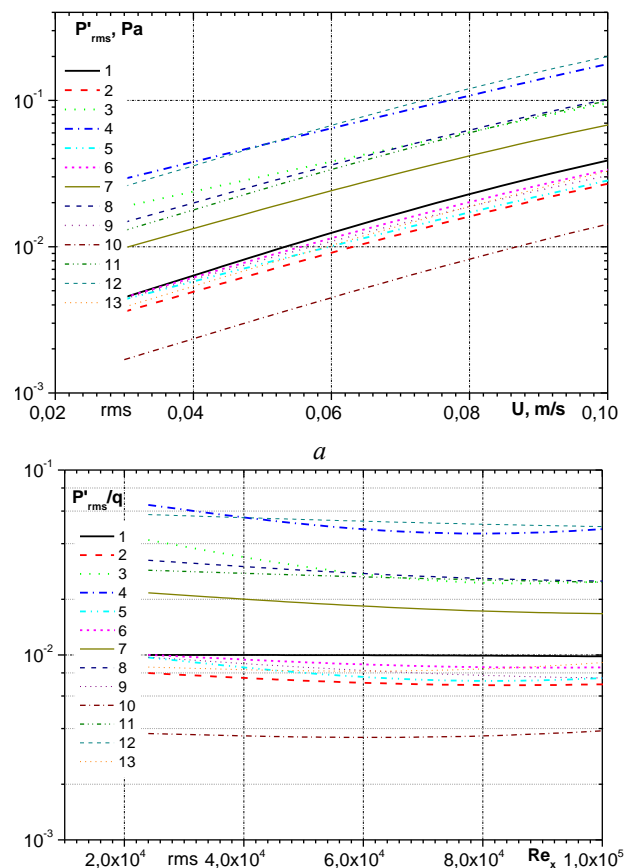
Наявність пучностей у верхній частині заглиблення (в площині пластини) призводить до утво-

рення викидів рідини із заглиблення у вигляді петельок або шпилькоподібних вихорів (рис. 3) при достатній інтенсивності автоколивального руху в середній частині заглиблення.

Встановлено, що викиди великомасштабних вихрових структур з середньої частини заглиблення відбуваються з частотою 0,09 Гц або  $St = fd/U = 0,04$ , рис. 3, *a*) і з кормової його частини — 0,08...0,1 Гц або  $St = 0,03...0,04$ , рис. 3, *б*). У передній частині заглиблення викидів, майже, не спостерігалось через незначні інтенсивності коливального руху в цій області заглиблення.

Результати досліджень показали, що найбільш інтенсивний викид вихрових систем із заглиблення спостерігається в його середній частині. Це призводить до більшого змиву водорозчинного покриття позаду заглиблення в цій області (рис. 3). Встановлено, що площа змитого покриття в середній частині заглиблення в півтора рази більша, ніж у його кормової частини і у три рази більша, ніж у передній за потоком частині заглиблення. Виходячи з цього, можна стверджувати, що для даного режиму обтікання дотичні напруги (пропорційні площі змитого покриття) в ближньому сліді заглиблення мають найбільші значення в його середній частині.

Зміна середньоквадратичних значень пульсацій пристінного тиску, виміряних на обтічній поверхні овального заглиблення і в його околі, в розмірному і нормованому динамічному тиском вигляді показано залежно від швидкості обтікання на рис. 4, *a* і залежно від числа Рейнольдса, обчисленого за довжиною пластини до місця розташування лунки, на рис. 4, *б*.



б

Рис. 4. Середньоквадратичні значення (а)  
та аеродинамічний коефіцієнт (б)  
пульсацій пристінного тиску

На рис. 4, а, б нумерація кривих збігається з номерами датчиків пульсацій тиску, які встановлені урівень з обтічною поверхнею відповідно до рис. 2. Таким чином, крива 1 заміряна на поверхні пластини перед овальним заглибленням у вимірjuвальній точці з координатами  $x/d = -1,3$ ;  $y/d = 0$ ;  $z/d = 0$ .

Крива 2 —  $x/d = 0$ ;  $y/d = -0,225$ ;  $z/d = 0$ ;  
крива 3 —  $x/d = 0,4$ ;  $y/d = -0,1$ ;  $z/d = 0$ ;  
крива 4 —  $x/d = 0,7$ ;  $y/d = 0$ ;  $z/d = 0$ ;  
крива 5 —  $x/d = 1,3$ ;  $y/d = 0$ ;  $z/d = 0$ ;  
крива 6 —  $x/d = 0,3$ ;  $y/d = -0,225$ ;  $z/d = 0,5$ ;  
крива 7 —  $x/d = 0,7$ ;  $y/d = -0,1$ ;  $z/d = 0,5$ ;  
крива 8 —  $x/d = 0,9$ ;  $y/d = 0$ ;  $z/d = 0,5$ ;  
крива 9 —  $x/d = 1,3$ ;  $y/d = 0$ ;  $z/d = 0,5$ ;  
крива 10 —  $x/d = -0,3$ ;  $y/d = -0,225$ ;  $z/d = -0,5$ ;  
крива 11 —  $x/d = 0,1$ ;  $y/d = -0,1$ ;  $z/d = -0,5$ ;  
крива 12 —  $x/d = 0,4$ ;  $y/d = 0$ ;  $z/d = -0,5$  та  
крива 13 —  $x/d = 1,2$ ;  $y/d = 0$ ;  $z/d = -0,5$ .

Згідно з рис. 4, а середньоквадратичні значення пульсацій пристінного тиску усередині овального заглиблення і поблизу нього монотонно збільшуються зі зростанням швидкості течії. При цьому максимальні рівні пульсацій тиску спостерігаються в місці ударної взаємодії вихрових структур зсувного шару з кормовою стінкою лунки і в її ближньому сліді.

Найменш інтенсивні пульсації пристінного тиску мають місце в придонній області овального заглиблення, які майже на порядок нижчі, ніж на кормовій стінці лунки. При цьому усередині лунки пульсації пристінного тиску істотно нижчі, ніж у непорушеному примежовому шарі, особливо при малих швидкостях її обтікання. В області ударної взаємодії вихрових структур зсувного шару, що сформувався над отвором овального заглиблення, рівні пульсацій пристінного тиску збільшуються і в 4...5 разів перевищують пульсації пристінного тиску над гладкою пластинною. Найбільші значення вони мають у середній (циліндричній) частині кормової стінки овального заглиблення. В області ближнього сліду заглиблення інтенсивність пульсацій пристінного

тиску ще більш наростає і набуває максимальних значень позаду передньої сферичної частини заглиблення і його циліндричної частини (місця розташування датчиків № 12 і 4). З віддаленням від овальної лунки середньоквадратичні пульсації пристінного тиску поступово зменшуються і наближаються до рівнів непорушеного примежового шару.

Для ламінарного режиму течії пульсації пристінного тиску підпорядковуються квадратичній залежності за швидкістю потоку, особливо на плоскій поверхні перед лункою, що наочно проілюстровано на рис. 4, б. Слід зазначити, що нормовані пульсації пристінного тиску в непорушеному примежовому шарі перед овальним заглибленням приблизно дорівнюють 0,01, практично, у всьому діапазоні досліджуваних чисел Рейнольдса. Це значення, як відомо, відповідає інтенсивності пульсацій пристінного тиску, виміряній точковими датчиками, діаметр чутливої поверхні яких не перевищує 19 довжин внутрішніх змінних примежового шару ( $v_\tau$  — динамічна швидкість та  $v$  — кінематична в'язкість).

Нагадаємо, що в дослідженнях діаметр чутливої поверхні датчиків пульсацій пристінного тиску не перевищував 16 довжин внутрішніх змінних і їх можна вважати точковими, що видно з рис. 4, б.

Отже, для ламінарного режиму обтікання пластини з локальним заглибленням найменші рівні пульсацій пристінного тиску спостерігаються на дні овального заглиблення, в його передній частині, особливо для малих швидкостей потоку і чисел Рейнольдса.

Найбільша інтенсивність пульсацій пристінного тиску має місце в ближньому сліді заглиблення в його серединному перетині.

Усередині овального заглиблення, розташованого під кутом  $60^\circ$  до напрямку потоку, рівні пульсацій пристінного тиску мають найбільші значення в кормовій сферичній частині заглиблення, (рис. 4, б, криві 2, 6 і 10).

Так, акустико-гідродинамічний коефіцієнт або коефіцієнт трансформації кінетичної енергії потоку в енергію турбулентних пульсацій тиску, який виражається відношенням  $p'_{rms}/q = p'_{rms}/(\rho U^2/2)$ , на дні кормової сферичної частини лунки майже в три рази вищий, ніж у передній її сферичній частині.

На кормовій стінці лунки і в її ближньому сліді спостерігається істотна трансформація кінетичної енергії потоку в енергію пульсацій пристінного тиску, а з віддаленням від лунки інтенсивність пульсацій тиску падає і наближається до значень у непорушеному примежовому шарі.

У серединному перетині заглиблення акустико-гідродинамічний коефіцієнт, вимірний позаду лунки, майже в п'ять разів вищий, ніж на дні заглиблення.

У перетині, що проходить через передню сферичну частину лунки, при ламінарному режимі течії пульсації тиску, виміряні датчиком № 12 майже на порядок вищі, ніж на дні лунки.

Нарешті, в перетині, що проходить через кормову сферичну частину лунки, інтенсивність пульсацій пристінного тиску позаду лунки тільки у три рази перевищує значення, виміряні на дні лунки.

### Висновки

На підставі отриманих експериментальних результатів з вивчення особливостей формування вихрової течії усередині овальної лунки, розташованої на плоскій поверхні під кутом  $60^\circ$  відносно напрямку потоку, та в її ближньому сліді, можна зробити такі висновки:

1. Установлено, що найбільш інтенсивний викид вихрових систем із заглибленням спостерігається в його середній частині. Виявлено, що дотичні напруги в ближньому сліді заглиблення для даного режиму обтікання мають найбільші значення також в його середній частині.

2. Визначено, що викидання великомасштабних вихрових структур з середньої частини нахиленої овальної лунки відбуваються з частотою, якій відповідає число Струхаля  $St = 0,04$ , а з кормової його частини —  $St = (0,03...0,04)$ . У передній сферичній частині заглиблення викидів, практично, не спостерігалось через незначні інтенсивності коливального руху в цій області заглиблення.

3. Показано, що в області ударної взаємодії вихрових структур зсувного шару, що сформувався над отвором овального заглиблення, рівні пульсацій пристінного тиску збільшуються і в 4...5 разів перевищують пульсації пристінного тиску над гладкою пластиною.

Найбільші значення вони мають у середній (циліндричній) частині кормової стінки овального заглиблення.

В області ближнього сліду заглиблення інтенсивність пульсацій пристінного тиску ще більш зростає і набуває максимальних значень позаду передньої сферичної частини заглиблення і його циліндричної частини.

З віддаленням від овальної лунки середньоквадратичні пульсації пристінного тиску поступово зменшуються і наближаються до рівнів не порушеного примежового шару.

4. Зафіксовано, що для ламінарного режиму обтікання пластини з локальним заглибленням найменші рівні пульсацій пристінного тиску спо-

стерігаються на дні овального заглиблення, в його передній частині, особливо для малих швидкостей потоку і чисел Рейнольдса.

### Вдячність

Робота виконана за фінансової підтримки за грантом Спільного конкурсу ДФФД-РФФД 2011 р. (проект № Ф40/26-2011, Д.р. № 0111U004827).

### ЛІТЕРАТУРА

1. *Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки (численное и физическое моделирование)* / под ред. А. В. Ермишина и С. А. Исаева. — М. : СПб., 2001. — 360 с.

2. *Халатов А. А.* Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок) / А. А. Халатов. — К. : ИТТФ НАНУ, 2005. — 140 с.

3. *Воропаев Г. А.* Источники псевдозвуковых пульсаций давления при обтекании сферической лунки / Г. А. Воропаев, А. В. Воскобойник, В. А. Воскобойник [и др.] // Акустичний вісник. — 2008. — 11, № 3. — С. 27–49.

4. *Самоорганизация вихревых структур при обтекании водой полусферической лунки* / Г. И. Кикнадзе, Ю. К. Краснов, Н. Ф. Подымако, В. Б. Хабенский // Докл. АН СССР. — 1986. — 291, № 6. — С. 1315–1318.

5. *Исаев С. А.* Численное моделирование смерчевого теплообмена при обтекании поверхностей с лунками (состояние и перспективы) / С. А. Исаев, А. И. Леонтьев, Н. В. Корнев // VI Минский Межд. форум по теплообмену, ММФ 2008. — Минск (Беларусь). — 2008. — С. 1–11.

6. *Гринченко В. Т.* Управление ламинарным пограничным слоем вихрями, генерируемыми овальной лункой / В. Т. Гринченко, Г. А. Воропаев, С. А. Исаев [и др.] // Вісник Донецького університету, сер. А: Природничі науки. — 2009. — Вип. 1. — С. 191–198.

7. *Chyu M. K.* Concavity Enhancement Heat Transfer in an Internal Cooling Passage / M. K. Chyu, Y. Yu, H. Ding et al. // ASME Paper 97-GT-437. — 1997. — 437. — 11 p.

8. *Идентификация самоорганизующихся струйно-вихревых структур при численном моделировании ламинарного течения и теплообмена в окрестности несимметричной уединенной лунки* / С. А. Исаев, А. И. Леонтьев, А. Е. Усачов, Д. П. Фролов // Изв. РАН: Энергетика. — 1999. — № 2. — С. 126–136.

9. *Исаев С. А.* Вихревая интенсификация теплообмена в микроканалах с овальными лунками / С. А. Исаев, Э. Леонарди, В. Тимченко, А. Е. Усачов // Третья международная конференция «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках». 21–23 октября 2008. — М., 2008. — С. 1–10.

10. *Воскобойник В. А.* Пульсации пристеночного давления в низкоскоростном потоке вблизи овального углубления / *В. А. Воскобойник* // *Акустичний вісник*. — 2009. — 12, № 2. — С. 3–15.

Стаття надійшла до редакції 24.11.2011.