

УДК 532.5.517:532.574

ЦИРКУЛЯЦІЙНА ТЕЧІЯ У ПОПЕРЕЧНО ОБТІЧНІЙ НАПІВЦИЛІНДРИЧНІЙ ТРАНШЕЇ

В. А. Воскобійник, А. В. Воскобійник
 Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ

Експериментально досліджені поля швидкості дали змогу зафіксувати у напівциліндричній траншеї великомасштабний вихор та серію дрібномасштабних вихорів. Встановлено, що при збільшенні швидкості обтікання число дрібномасштабних вихрових структур збільшується, а розмір великомасштабного вихору зменшується та він притискається потоком ближче до придонної частини каверни.

Ключові слова: напівциліндрична траншея, поле швидкості, ізотахи, когерентні вихрові структури

Вступ. В прикладній гідромеханіці на багатьох тілах, які обтікаються потоком рідини, зустрічаються локальні заглиблення різних форм та розмірів. Ці заглиблення можуть бути конструктивного характеру, наприклад вихлопні труби, дверні ручки, люки або відкриті вікна в автомобілях, вантажні люки та колодязі шасі на літаках, торпедні люки у підводних човнах та западини на корпусах кораблів. Заглиблення, можуть бути також випадкового походження – на поверхні космічних апаратів, що входять в атмосферу піддаються дії метеоритів, на корпусах надводних та підводних суден у разі удару з дном або з іншим плаваючим засобом. При обтіканні заглиблень, з їх передньої кромки, за відповідних умов (число Рейнольда, глибина і форма западини) заглиблення, відбувається відрив примежового шару, утвореного на поверхні тіла перед заглибленням. За точкою відриву формується шар змішування між рухомою рідиною над заглибленням та нерухомою у ньому (у початковий момент часу). Складаючись із вихрових систем, він взаємодіє з кормовою частиною заглиблення і частково виноситься потоком за його межі. Інша частина шару змішування, іноді відносно велика, пересувається углиб заглиблення, утворюючи циркуляційну зону, що складається з одного або декількох великомасштабних вихорів, залежно від співвідношення висоти заглиблення до його ширини та режиму обтікання [1 – 3]. Потік рідини циркуляційної зони, при наближенні до передньої стінки заглиблення, частково пересувається у вигляді пристінного струменя до відривної області заглиблення, взаємодіючи з початковою ділянкою шару змішування. Решта частини циркуляційної рідини, обмінюючись енергією з нижньою поверхнею шару змішування, спрямовується до кормової стінки заглиблення, замикаючи, таким чином, циркуляційну зону у вигляді великомасштабної циркуляційної вихрової системи [4 – 6]. В області взаємодії шару змішування та вихрових систем, які утворюються у ньому, з кормовою стінкою заглиблення виникають значні рівні пульсацій швидкості та тиску, температури та завихореності, що мають як лінійний, так і нелінійний характер (у переважній більшості випадків) [7 – 9].

Один з актуальних напрямків у сучасній аерогідродинаміці пов'язаний з керуванням потоками за допомогою виступів або заглиблень різноманітної геометрії та масштабів [1, 4, 7, 10]. Геометрія задньої кромки формує відповідні умови приєднання потоку до поверхні та відповідальна за високу інтенсивність пульсуючої течії. Наявність неоднорідності поверхні, яка обтікається потоком рідини, у вигляді опуклості або увігнутості (заглиблення) призводить до змін характеристик набігаючого потоку, а також його дію на саму поверхню. Це призводить до зміни опору таких поверхонь, тепло- та масопереносу, аерогідродинамічних та акустичних шумів та вібрацій обтічних конструкцій, а також ряду інших характеристик літальних апаратів та плаваючих об'єктів [3, 10].

Не дивлячись на інтенсивний розвиток чисельних методів, ключову роль у дослідженні складних турбулентних вихрових течій грає експеримент. Найчастіше нові теоретичні положення та гіпотези будуються саме на основі отриманої в експериментах інформації. У зв'язку з цим, у представленій роботі наводяться результати експериментальних досліджень впливу локальної напівциліндричної каверни, котра обтікається поперечним потоком відносно її поздовжньої вісі, на інтегральні характеристики примежового шару над плоскою пластиною для різних режимів обтікання.

Експериментальна установка та методи вимірювань. Експерименти із вивчення особливостей формування когерентних вихрових структур та можливості керування ними виконані в аеродинамічній трубі відкритого типу. На рис. 1 представлено аеродинамічний стенд та контрольно вимірювальна апаратура: 1 – робоча ділянка; 2 – лемніскатне сопло; 3 – пластина із канавкою; 4 – координатний пристрій з мікрометричною голівкою; 5 – державка з термоанемометричним

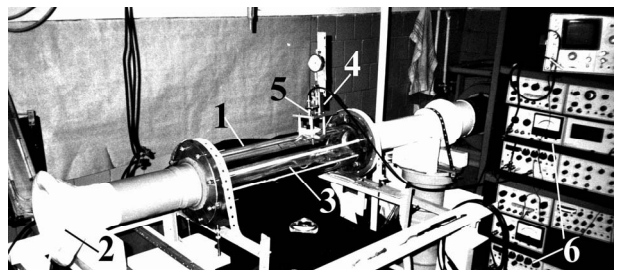


Рис. 1.

датчиком; 6 – контрольно вимірювальна апаратура [8, 11]. У ході дослідження проведені термоанемометричні вимірювання поля швидкості над обтічною плоскою пластинною з напівциліндричним заглибленням, яке розташоване поперек до напрямку потоку (рис. 2), а також усередині нього.

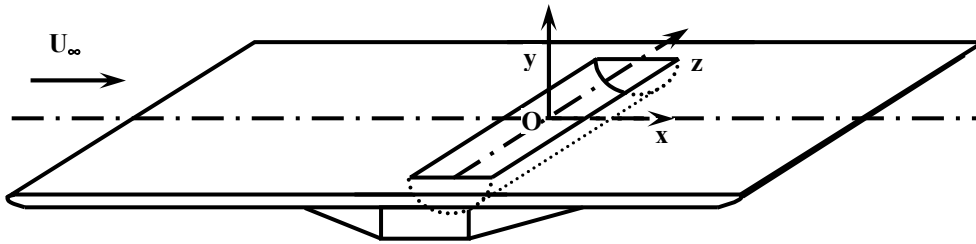


Рис. 2. Схема розташування напівциліндричного заглиблення на поверхні плоскої пластини та система координат, яка використовується

Робоча ділянка труби мала циліндричну форму з внутрішнім діаметром 0,102 м та була зроблена з прозорої труби для проведення візуальних дослідів. Повітря з лабораторного приміщення поступало до труби через конфузний вхід у вигляді лемніскати Бернуллі для зменшення збурення потоку та створення прийнятної ступеня турбулентності в аеродинамічній трубі (рис. 1). На виході з робочої ділянки труби стояв центробіжний насос, який всмоктував повітря через аеродинамічну трубу. Між робочою ділянкою і насосом знаходився проміжний гумовий циліндр для зменшення вібраційних перешкод від насоса. Під час монтажу аеродинамічного стенду усі вузли та системи встановлювалися на вібродемпфуючих та віброізолюючих кріпленнях, амортизаторах, прокладках, у тому числі і багат шарових. При цьому використовувалися як активні (динамічні), так і пасивні методи зменшення акустичних та вібраційних завад. Рівні звукового тиску та вібрацій в робочій ділянці труби контролювалися під час проведення дослідів. При створенні стенду віброакустичні шуми були виміряні й прийнята низка заходів по їх зменшенню та усуненню.

В осьовому перерізі вимірювальної ділянки аеродинамічної труби в її горизонтальній площині, уздовж поздовжньої осі монтувалася плоска гідравлічно гладка пластинна (висота шорсткості її поверхні не перевищувала товщини витіснення примежового шару). Пластинна була зроблена з листового органічного скла завтовшки $4 \cdot 10^{-3}$ м. Вона мала ширину рівну внутрішньому діаметру труби та довжину 0,635 м. Носова та кормова частини пластинни були загострені, для забезпечення їх безвідривного обтікання.

На поверхні пластинни, у спеціально зробленій ніші, встановлювався поліуретановий напівциліндр. Він закріплювався у втопленому положенні усередині прямокутного паралелепіпеда (короба), виготовленого з органічного скла. У свою чергу, короб приклеювався до нижньої (неробочої) сторони пластинни. Поздовжня вісь напівциліндричного заглиблення розташовувалася на відстані 0,5 м від переднього краю пластинни перпендикулярно швидкості набігаючого потоку U_{∞} . Радіус заглиблення складав $R = 9,25 \cdot 10^{-3}$ м, а глибина та довжина – $11,5 \cdot 10^{-3}$ м та $81 \cdot 10^{-3}$ м, відповідно. Торцеві стінки заглиблення були плоскими і перпендикулярними до поздовжньої осі заглиблення.

У верхній частині прозорої вимірювальної ділянки аеродинамічної труби (рис. 1) встановлювався координатний пристрій, в якому, за допомогою відповідних державок та вузлів кріплення, фіксувалися термоанемометричні дротяні датчики. Координатний пристрій, обладнаний мікрометричними головками, забезпечував лінійні переміщення термоанемометричних датчиків з похибкою $1 \cdot 10^{-5}$ м. Електричні сигнали від датчиків поступали на комплект термоанемометричної апаратури, а далі на контрольно-вимірювальну апаратуру (вольтметри, осцилографи, частотоміри) та реєструючу апаратуру (чотирьохканальний вимірювальний магнітофон). Зареєстровані електричні сигнали через аналогово цифрові перетворювачі подавалися на персональні комп'ютери де оброблялись та аналізувалися за розробленими програмами та методиками.

Дротяні термоанемометри калібрувалися та тестувалися перед проведенням дослідів, під час дослідів, а також після закінчення робіт. Це давало можливість отримувати калібрувальні залежності параметрів, які реєструються датчиками, що було використано під час обробки та аналізу експериментальних результатів. Похибка вимірювань осереднених та інтегральних значень кінематичних характеристик не перевищувала 10 % з надійністю 95 % або 2σ .

Дослідження починалися з проведення візуалізації потоку як у заглибленні, так і в його околі [8, 11]. Картини візуалізації та динаміка вихрового руху усередині каверни і поблизу неї реєструвалися швидкісними кінокамерами, цифровими фотоапаратами та відеокамерами з подальшою обробкою і аналізом фото- та відеоматеріалу на персональних комп'ютерах, оснащених спеціально розробленим програмним забезпеченням. Далі у характерних областях, де вихровий рух середовища простежується виразно, проводилися інструментальні вимірювання з визначенням кількісних параметрів вихрової течії.

Результати вимірювань. У ході експериментальних досліджень полів усереднених і пульсаційних швидкостей, як в поздовжньому, так і поперечному напрямку були отримані векторні поля середніх швидкостей. В результаті побудовані ізотахи або лінії рівних швидкостей, що визначають кінематичні характеристики поля течії над досліджуваною пластиною з заглибленням для різних швидкостей обтікання. На ізолініях, представлених на рис. 3 – 5, цифрами позначена середня швидкість відносно швидкості набігаю-

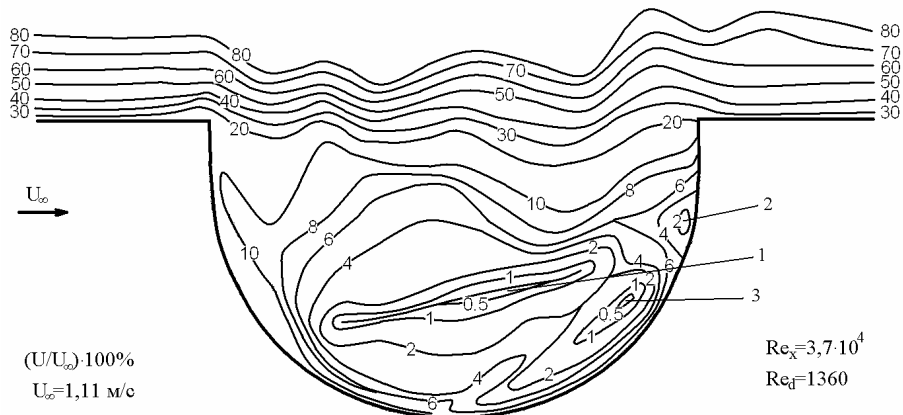


Рис. 3. Лінії рівних середніх швидкостей у напівциліндричній каверні, розташованій поперек набігаючого потоку, для швидкості потоку 1.11 м/с

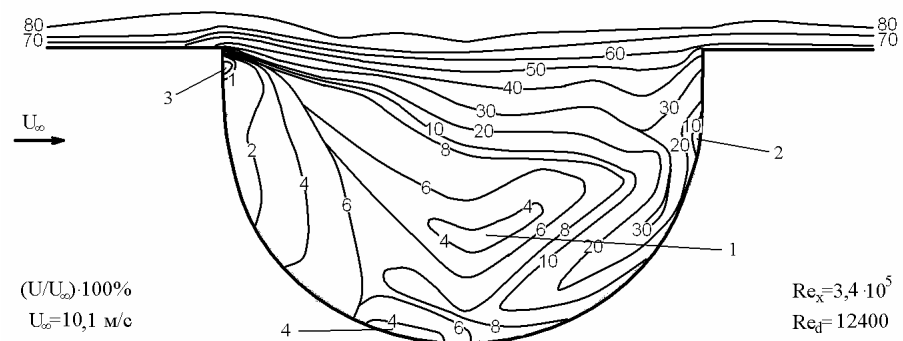


Рис. 4. Лінії рівних середніх швидкостей у напівциліндричній каверні, розташованій поперек набігаючого потоку, для швидкості потоку 10.1 м/с

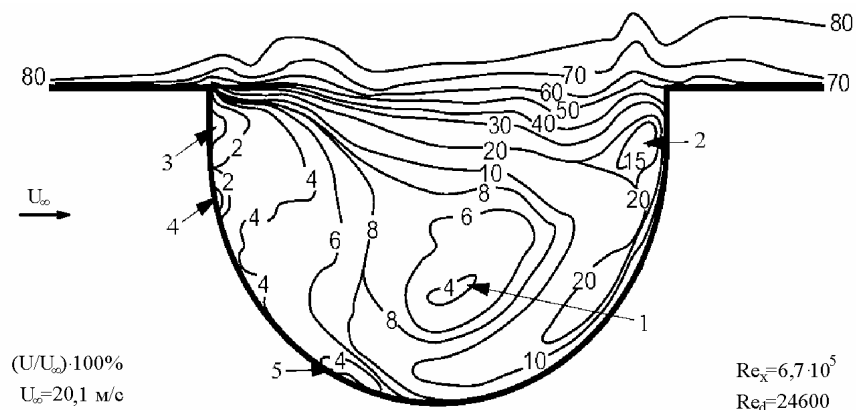


Рис. 5. Лінії рівних середніх швидкостей у напівциліндричній каверні, розташованій поперек набігаючого потоку, для швидкості потоку 20.1 м/с

чого потоку у відсотках, а цифри із стрілками вказують на характерні зони у заглибленні, які трактуються, як місця існування квазістійких вихрових систем. Окрім того, на цих рисунках приведені значення швидкості обтікання і чисел Рейнольдса, визначених за зовнішніми змінними (U_∞ та ν) для місцерозташування заглиблення по довжині пластины і по діаметру заглиблення, а саме як Re_x та Re_d .

Ізотахи для найменшої з досліджуваних швидкостей обтікання $U_\infty = 1,11$ м/с показані на рис. 3 для $Re_x = 3,7 \cdot 10^4$ та $Re_d = 1360$. Над обтічною пластиною і заглибленням виразно видно області га-

льмування та прискорення набігаючого потоку, які охоплюють не тільки примежовий шар над пластиною і шар змішування, а також циркуляційну область в самому заглибленні. Перш ніж примежовий шар відірветься від переднього краю заглиблення, він у пристінній області пригальмовується. Гальмування добре видно за підйомом, наприклад, ізолінії швидкості рівної $0,2U_{\infty}$ перед точкою відриву. При відриві примежового шару утворюється шар змішування, котрий розширюється в поперечному напрямку при просуванні вниз за потоком. Нижня межа шару змішування, також як і верхня його частина, мають хвилеподібну форму, яка майже за три періоди перекидає ширину канавки. Довжина хвилі нижньої межі шару змішування в два рази менша у передній частині заглиблення, ніж у кормовій, що корелює з даними для профілів поздовжньої середньої і пульсаційної швидкості, представлених у роботах [12, 13]. В області взаємодії шару змішування з кормовою стінкою заглиблення утворюються два напрямки руху потоку. Перша частина спрямовується вгору до краю заглиблення, а друга – уздовж стінки переноситься до дна заглиблення. Перша частина, зустрічаючись з потоком, розташованим вище відносно шару змішування ($y = 0$), призводить до гальмування і деякого підйому останнього, що видно на рис. 3 (переріз з координатою $x \approx 0,4d$). Друга частина шару змішування (нижня), яка спрямувалася до дна заглиблення, підіймається вгору уздовж передньої стінки заглиблення, доходячи до зони відриву примежового шару і, зустрівшись з примежовим шаром, що відірвався, об'єднується із знов сформованим шаром змішування та спрямовується до кормової стінки заглиблення. Ця частина шару змішування утворює циркуляційну зону, усередині якої формується первинний великомасштабний вихор, позначений на рис. 3 індексом 1. У ядрі цього вихору середні швидкості не перевищують значення $0,005U_{\infty}$. Первинний вихор займає майже половину об'єму заглиблення і розташовується декілька похило по відношенню до поздовжньої осі пластини або напряму швидкості обтікання.

На кормовій стінці заглиблення формується характерна зона, позначена цифрою 2. Поблизу цієї зони має місце сідлова точка або точка, де з'являється роздвоєння ізолінії, наприклад, крива $0,06U_{\infty}$ (рис. 3). З наближенням до зони 2 середня швидкість зменшується, вказуючи на місцерозташування дрібномасштабної вихрової структури, наймовірніше, пари вихорів, що протилежно обертаються. Цифрою 3 відмічена чергова замкнена область низькошвидкісної течії у заглибленні, що характеризує зону зародження вторинного вихору.

Таким чином, при малій швидкості обтікання $U_{\infty} = 1,11$ м/с у напівциліндричному заглибленні виявлені три відносно стійкі області низькошвидкісної циркуляційної течії, які сформовані, головним чином, у придонній та кормовій частинах заглиблення. Зареєстрована високошвидкісна циркуляційна течія, спрямована від кормової стінки заглиблення та вздовж придонної поверхні до точки відриву примежового шару. Замикається ця циркуляційна течія об'єднанням із знов сформованою нижньою межею шару змішування, який, здійснюючи хвилеподібний рух, взаємодіє, у свою чергу, з кормовою стінкою заглиблення.

При збільшенні швидкості обтікання пластини з поперечно розташованою напівциліндричною каверною характерні риси структури течії в цілому залишилися схожими з результатами для $U_{\infty} = 1,11$ м/с, але з'явилися і деякі відмінності. Так, швидкість потоку, що досягає верхнього краю кормової стінки, зросла з $0,2U_{\infty}$ до $0,6U_{\infty}$ (рис. 3 та рис. 4), тобто, кінетична енергія взаємодії набігаючого потоку з кормовим краєм заглиблення значно збільшилася, оскільки вона пропорційна u^2 . Циркуляційну область також починає формувати зворотній потік з вищою швидкістю. При низькошвидкісному обтіканні заглиблення в його кормовій частині найбільші швидкості були порядку 6 % від U_{∞} (рис. 3), а при $U_{\infty} = 10,1$ м/с місцеві середні швидкості в цій же кормовій частині склали більше 30 % від U_{∞} . Тобто, енергообмін між набігаючим потоком та циркуляційною течією в заглибленні в останньому випадку став, поза сумнівом, вищим. З наближенням до дна заглиблення відносна швидкість циркуляційної течії значно зменшилась і, не досягнувши самої нижньої точки напівциліндричного заглиблення, цей циркуляційний потік почав віддалятися від обтічної поверхні дна та спрямувався до нижньої межі шару змішування. Необхідно відзначити, що при $U_{\infty} = 1,11$ м/с циркуляційна течія досягла зони відриву примежового шару з переднього краю заглиблення (рис. 3), а при $U_{\infty} = 10,1$ м/с циркуляційна течія об'єдналася з шаром змішування значно нижче за напрямом потоку (у перерізі $x \approx -0,3d$). Поблизу цього місцерозташування по координаті x , в примежовому шарі спостерігається пригальмування потоку, а потім його прискорення (рис. 4), корелюючи з даними роботи [13]. Ядро низькошвидкісної області має форму підкови або букви V (рис. 4), утворюючи первинний вихор в заглибленні, позначений цифрою 1. Цей V-подібний квазістійкий великомасштабний вихор, що обмежує циркуляційну зону, займає майже третину об'єму заглиблення, розташовується трохи нижче за його центральну область і має форму вихору, який як би прогнаний майже посередині набігаючим потоком.

У кормовій частині заглиблення (рис. 4) декілька вище, ніж на рис. 3, формується так званий кормовий вихор, а можливо, як раніше було відмічено, і пара вихорів, що протилежно обертаються, які по-

значені цифрою 2. Ця вихрова область має швидкість більшу, ніж на рис. 3. При збільшенні швидкості обтікання найбільші зміни структура течії в заглибленні отримала у передній відривній частині канавки. На відміну від рис. 3 на рис. 4 за точкою відриву примежового шару виразно простежується область загальмованої течії з яскраво вираженою характерною циркуляційною зоною знижених середніх швидкостей. Відразу за точкою відриву спостерігається квазістійкий дрібномасштабний вихор (індекс 3, рис. 4). У нижній частині заглиблення, в його придонній області, формується ще одна циркуляційна або вихрова область знижених середніх швидкостей, створюючих її ядро. Ця область, позначена цифрою 4, зосереджена поблизу місцерозташування, де високошвидкісна циркуляційна течія відривається від придонної поверхні заглиблення і спрямовується на об'єднання з шаром змішування, про що раніше вже вказувалося.

При подальшому збільшенні швидкості обтікання до 20,1 м/с характер структури потоку як у заглибленні, так і над пластиною не зазнав кардинальних змін, але став складнішим. Це проілюстровано на рис. 5, але деякі відмінності від рис. 4, а тим більше від рис. 3 мають місце. По-перше, в кормовій частині заглиблення зареєстрована характерна вихрова область, позначена цифрою 2, розташована ще вище, ніж на рис. 4 та на рис. 3. По-друге, високошвидкісна циркуляційна течія відірвалася від дна заглиблення декілька нижче за потоком, майже прямо у нижньої точки заглиблення. Ця циркуляційна течія спрямувалася до шару змішування по крутішій траєкторії на відміну від даних рис. 4. По-третє, великомасштабний циркуляційний вихор став компактнішим і прийняв еліпсоподібну форму з нахилом, близьким до нахилу кормової частини V-подібного вихору на рис. 4. По-четверте, у відривній області заглиблення з'явилися вже дві дрібномасштабні вихрові системи (індекси 3 і 4, рис. 5) та вони стали енергоємнішими, тобто, кругова швидкість їх підвищилася. Також слід зазначити, що для $U_{\infty} = 20,1$ м/с підвищилася і відносна швидкість циркуляційної течії, що відокремлює первинний циркуляційний вихор (позначений цифрою 1) від загальмованої відривної області заглиблення. По-п'яте, область злиття циркуляційної течії з нижньою межею шару змішування перемістилася ближче до центру заглиблення. Тут, в примежовому шарі, що відірвався, з'явився високий позитивний градієнт середньої швидкості від загальмованої до прискореної течії. Примежовий шар реагує на ці зони взаємодії циркуляційної течії та шару змішування декілька вище за потоком, створюючи зони гальмування та прискорення течії (рис. 4 та рис. 5).

Висновки. Результати експериментальних досліджень полів середніх швидкостей, усередині напівциліндричної траншеї, яка обтікається поперечним потоком, для різних режимів обтікання, дозволяють зробити наступні висновки:

Встановлено, що зі збільшенням швидкості обтікання усередині канавки формується складна вихрова течія, яка призводить до зміни структури примежового шару над пластиною. Над обтічною поверхнею утворюються зони гальмування та прискорення течії, що особливо явно простежується у пристінній області примежового шару.

Виявлено, що усередині напівциліндричної каверни виникає циркуляційна течія, що генерується взаємодією зсувного шару, утвореного у результаті відриву примежового шару з переднього краю каверни, з кормовою стінкою каверни. Циркуляційна течія породжує квазістійку великомасштабну вихрову структуру. У пристінній області взаємодія зсувного шару та великомасштабного вихору з обтічною поверхнею генерує дрібномасштабні вихори.

Зафіксовано, що зі збільшенням швидкості набігаючого потоку число, масштаб та місцерозташування квазістійких вихрових структур змінюються. Так, їх число збільшується, а розмір великомасштабного когерентного вихору зменшується, відносна швидкість обертання його збільшується та він зміщується ближче до придонної частини заглиблення.

Отримані результати доповнюють базу даних крайових умов, що можуть використовуватися для моделювання обтікання поверхонь з напівциліндричними траншеями, для проектування таких поверхонь, а також для малозатратного керування течіями навколо таких поверхонь та процесами масо- і тепловипереносу.

РЕЗЮМЕ

Експериментально измеренные поля скорости дали возможность зафиксировать в полуцилиндрической траншее крупномасштабный вихрь и серию мелкомасштабных вихрей. Показано, что при увеличении скорости обтекания число мелкомасштабных вихревых структур увеличивается, а размер крупномасштабного вихря уменьшается и он приближается потоком ближе к придонной части каверны.

Ключевые слова: полуцилиндрическая траншея, поле скорости, изотакси, когерентные вихревые структуры.

SUMMARY

The experimental velocity fields are got enabled to fix a large-scale vortex and series of small-scale vortices in the half-cylindrical cavity. It is set that at the increase of flow velocity the number of small-scale vortical structures is increased, and the size of large-scale vortices decreased and it's presented to the near-bottom cavity part by stream.

Keywords: half-cylindrical cavity, velocity field, curve of equal velocities, coherent vortical structures.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ермишин А.В. Управление обтеканием тел с вихревыми ячейками в приложении к летательным аппаратам интегральной компоновки / Под ред. А.В. Ермишина, С.А. Исаева. – М.-СПб.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. – 360 с.
2. Смольяков А.В. Шум турбулентных потоков / А.В. Смольяков – С.-Пб.: ЦНИИ им. Акад. А.И.Крылова, 2005. – 312 с.
3. Blake W.K. Mechanics of flow-induced sound and vibration: in 2 vols / W.K. Blake. – New York: Academic Press, 1986. – 974 p.
4. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования / Ю.Ф. Гортышов, И.А. Попов, В.В. Олимпиев и др. – Казань: Центр инновационных технологий, 2009. – 531 с.
5. Кикнадзе Г.И. Явление самоорганизации смерчеобразных струй в потоках сплошной среды и технологий на его основе: труды XVI школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева [«Проблемы газодинамики в энергетических установках»], (Санкт-Петербург, 21-25 мая 2007 г.) / Г.И. Кикнадзе. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – Т. 2. – С. 341-345.
6. 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. – №1/25. – 11 с.
7. Халатов А.А. Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок) / А.А. Халатов – К.: ИТТФ НАН Украины, 2005. – 76 с.
8. Воскобойник В.А. Статистичні характеристики вихрових систем у напівциліндричному заглибленні на обтічній поверхні / В.А. Воскобойник, А.В. Воскобойник // Гідроакустичний журнал. – 2006. – № 3. – С. 57-65.
9. Халатов А.А. Режимы течения в единичном углублении, имеющем форму сферического сегмента / А.А. Халатов, Г.В. Коваленко, В.И. Терехов// VI Минский Межд. Форум по Теплообмену, ММФ 2008. – Минск, 2008. – № 1/30. – С. 16.
10. Воскобойник А.В. Поле пульсаций пристеночного давления внутри и вблизи овальной лунки при малой скорости обтекания / А.В. Воскобойник// Вісник Донецького Університету, Сер. А: Природничі науки. – 2010. – Вип. 1. – С. 42-51.
11. Воскобойник А.В. Кінематика вихорового руху на обтічній поверхні з напівциліндричною канавкою / А.В. Воскобойник, В.А. Воскобойник // Акустичний вісник. – 2007. – Т. 10, № 3. – С. 30-41.
12. Афанасьев В.Р. Гидродинамика и теплообмен при обтекании одиночных углублений на исходно гладкой поверхности / В.Р. Афанасьев, В.Ю. Веселкин, А.И. Леонтьев и др. – Препр. МГТУ им. Н.Э. Баумана № 2-91. Ч. I. – М.: Изд-во МГТУ, 1991. – 56 с.
13. Воскобойник А.А. Влияние поперечной канавки на поле скоростей над пластиной / А.А. Воскобойник, А.В. Воскобойник, В.А. Воскобойник // Вісник Донецького Університету, Сер. А: Природничі науки. – 2007. – Вип. 2. – С. 81-88.

Надійшла до редакції 07.06.2011 р.