

СЕКЦІЯ 1

«ТЕХНІЧНА ГІДРОМЕХАНІКА»

УДК 532.517

Турик¹ В.М. к.т.н. доц., Воскобійник² В.А. д.т.н., ст.н.с., Воскобойник² О.А. к.т.н.,
Воскобійник² А.В. к.т.н., ст.н.с.

1 - КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна;

2 - Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ, Україна

ПОЛЕ ШВИДКОСТІ ВИХРОВОЇ ТЕЧІЇ УСЕРЕДИНІ ПОПЕРЕЧНО ОБТІЧНОЇ НАПІВЦИЛІНДРИЧНОЇ КАНАВКИ

Представлені результати експериментальних досліджень в аеродинамічній трубі таких інтегральних кінематичних характеристик вихрового руху, як усереднені та пульсаційні швидкості усередині поперечно обтічної напівциліндричної канавки та в її ближньому сліді на гідравлічно гладкій плоскій поверхні. Приведені результати візуалізації течії усередині канавки і її околі для перехідного режиму течії в примежовому шарі на пластині, показані особливості генерації великомасштабних вихрових структур усередині канавки та викиду їх назовні з канавки. Термоанемометричні дослідження дозволили отримати поля швидкостей та функції щільності розподілу ймовірності пульсацій поздовжньої швидкості, їх коефіцієнти асиметрії та ексцесу у серединному перерізі канавки. Отримано профілі поздовжньої швидкості та лінії рівних усереднених і пульсаційних складових швидкості усередині канавки. Показано області генерації зворотної течії усередині канавки, поле швидкості у зсувному шарі і області його взаємодії з кормовою стінкою канавки. Встановлено, що в примежовому шарі над заглибленням закон розподілу ймовірності пульсацій поздовжньої швидкості близький до нормального, а в заглибленні – до максвеллівського.

Ключові слова: напівциліндрична канавка, аеродинамічна труба, візуалізація потоку, термоанемометр, вихрова структура

Вступ

У більшості «лункових» технологій, що використовуються в багатьох країнах світу для керування гідромеханічними та теплофізичними характеристиками обтікання елементів технічних пристроїв, літальних апаратів та суден, застосовуються сферичні або циліндричні заглиблення різних розташувань і відносних заглиблень. Механізми зародження складної вихрової течії усередині заглиблень, її викиди назовні та взаємодія з примежовим шаром і вихровими структурами його, є нелінійними і залежать від багатьох факторів. Складність цих механізмів, а також різноманіття дії вихорів на навколишній примежовий шар, потік в цілому та на обтічну поверхню стимулює проведення досліджень, результати яких є актуальними, оскільки істотно розширюють сфери застосування «лункових» технологій в багатьох галузях науки і техніки. Проте, з поглибленням наших знань виникає ще більша кількість питань, на які практика вимагає відповідей. Це обумовлено нестійкістю і неоднорідністю механізму генерації вихорів в заглибленнях, яким притаманна явна тривимірність, а також їх взаємодією з навколишнім середовищем, яке так чи інакше відбувається зі зворотним зв'язком. Вивчення особливостей формування вихрових структур, їх кінематичних і динамічних характеристик допомагає контролювати і керувати ними для створення ефективних технологій і пристроїв [1–3].

Мета експериментальних досліджень – визначення інтегральних, в тому числі статистичних, характеристик поля швидкості течії усередині поперечно обтічної напівциліндричної канавки та особливостей генерації вихрових структур.

Програма та методика досліджень

Експериментальні дослідження проводилися в аеродинамічній трубі відкритого типу. Повітря з лабораторного приміщення за допомогою усмоктувального вентилятора надходило в аеродинамічну трубу діаметром 0,1м. Для створення безвідривної течії вхід труби був

виготовлений у вигляді лемніскати. Усередині труби уздовж її осі розташовувалася гідравлічно гладка пластина довжиною 0,6м, шириною 0,1м. На відстані 0,5м від носка пластини була зроблена напівциліндрична канавка довжиною 0,08м і діаметром $d=0,01$ м, яку обтікав поперечний потік. Носова та кормова частини пластини були загострені і обмежений шар на ній розвивався природним чином. Сама труба і пластина були виготовлені з органічного скла для проведення візуальних досліджень. У верхній частині аеродинамічної труби над місцем розташування канавки було зроблено отвір, в якому було встановлено координатний пристрій. У цьому пристрої закріплювалися добре обтічні державки з дротяними датчиками термоанемометра фірми “DISA Electronik” (Данія).

Програма досліджень передбачала проведення візуальних та інструментальних досліджень вихрової течії усередині канавки та її аеродинамічних характеристик. Після проведення візуальних досліджень вихрової течії усередині канавки, обробки і аналізу фото- та відеоматеріалів були встановлені місця формування та особливості еволюції когерентних вихрових структур, які генерувалися усередині досліджуваного генератора вихорів при різних режимах його обтікання згідно з методикою [3]. У таких характерних місцях були сплановані інструментальні вимірювання, з використанням штатного обладнання, а також розроблені і виготовлені спеціальні засоби вимірювань [4], які дозволили визначити кінематичні характеристики вихрового руху.

Візуальні дослідження структури потоку над обтічною поверхнею пластини з напівциліндричним заглибленням проводилися за допомогою димових струминок і смужок. Генератором диму слугувала трансформаторна або турбінна олива, яка згоряла на ніхромовому дроті, через який пропускався електричний струм. Ніхромовий дріт діаметром 0,0001м і довжиною 0,015м розташовувався у фторопластовій вставці, яка монтувалася врівень з обтічною поверхнею пластини перед канавкою в її серединному перетині на відстані $2d$. Таким чином, димова струминка або смужка (при перпендикулярному напрямку дроту відносно напрямку течії), які зароджувалися перед канавкою, переносилися течією вздовж пластини у пристінному шарі. Згодом дим заходив усередину канавки або проносився над нею в залежності від режиму течії, структури течії усередині канавки і фази її розвитку, а далі переміщувався в область сліду заглиблення над пластиною. Реєстрацію результатів візуальних досліджень було здійснено за допомогою цифрових фотоапаратів і швидкісних відеокамер, а обробку та аналіз даних було проведено на спеціалізованій комп’ютерній графічній станції. Вимірювання кінематичних характеристик вихрової течії усередині поперечно обтічної канавки та в її околі було здійснено за допомогою дротяних датчиків типу 55R71 і 55R73 фірми “DISA Electronik” з чутливими елементами діаметром $5 \cdot 10^{-6}$ м і довжиною $1 \cdot 10^{-3}$ м та $1,1 \cdot 10^{-3}$ м. Розташування датчиків над обтічною поверхнею контролювалося за допомогою лазерного променя, який через систему дзеркал та розщеплювачів світлового променя направлявся за трьома взаємно перпендикулярними напрямками. Електричні сигнали датчиків потрапляли на комплект термоанемометричної апаратури, яка працювала у режимі постійної температури, а далі реєструвалися на вимірювальних магнітофонах фірми “Brüel & Kjaer” (Данія). Обробка та аналіз експериментальних результатів здійснювалися на спеціалізованих спектроаналізаторах тієї ж фірми і на персональних комп’ютерах за відповідними програмами та алгоритмами теорії ймовірності та математичної статистики.

Експериментальні дослідження в аеродинамічній трубі проводилися з швидкостями потоку (U_0) від 1,11 м/с до 20,1 м/с, яким відповідали числа Рейнольдса, що розраховані за довжиною пластини до переднього краю заглиблення $Re_x=U_0x/\nu$ від $3,2 \cdot 10^4$ до $6,4 \cdot 10^5$ та розраховані за діаметром заглиблення $Re_d=U_0d/\nu$ від 1200 до 24000, де ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості повітря. В досліджах товщина обмеженого шару перед заглибленням (δ) змінювалася від $2,6 \cdot 10^{-3}$ м до $11,3 \cdot 10^{-3}$ м, а товщина втрати імпульсу (θ) – від $0,25 \cdot 10^{-3}$ м до $1,5 \cdot 10^{-3}$ м.

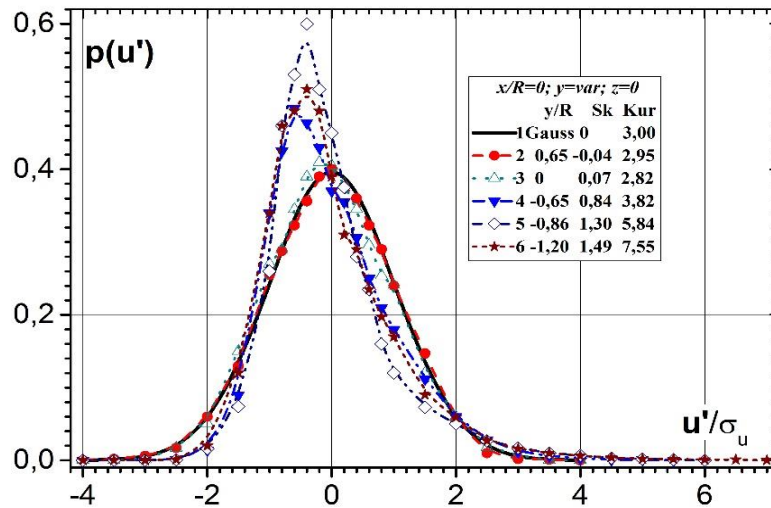


Рис. 1 - Функції щільності розподілу ймовірності пульсацій поздовжньої швидкості

Результати досліджень

Візуальні дослідження показали, що при зміні режимів поперечного обтікання напівциліндричної канавки (від ламінарного до перехідного і турбулентного) вихрова структура течії в каверні змінюється. Зі збільшенням швидкості обтікання канавки усередині неї формуються великомасштабні та дрібномасштабні вихрові структури, які взаємодіють між собою і обтічною поверхнею, коливаються у просторі та пересуваються вздовж і поперек канавки. При турбулентному режимі течії усередині лунки великомасштабна вихрова структура під час свого формування притискається до кормової стінки канавки, а потім періодично викидається назовні з неї, порушуючи структуру примежового шару над пластиною. Особливо цей процес чітко спостерігається над серединним перерізом канавки. Тому згідно отриманих результатів візуалізації основну увагу при вимірюваннях аеродинамічних характеристик вихрового руху було зосереджено саме на серединному перерізі поперечно обтічної напівциліндричної канавки. Поле пульсацій швидкості, тиску, температури та інших гідродинамічних параметрів в примежових шарах, утворених при обтіканні тіл різної конфігурації, як відомо, являє собою випадковий процес як в просторі, так і в часі, що передбачає застосування методів математичної статистики і теорії ймовірності. На рис. 1 наведено функції щільності розподілу ймовірності пульсацій поздовжньої швидкості поблизу та усередині півциліндричної канавки, яку обтікає потік зі швидкістю 10,1 м/с. Крива 1 відповідає гауссівському закону розподілу із значенням коефіцієнта асиметрії $Sk = \overline{(u')^3} / [\overline{(u')^2}]^{3/2} = 0$ і коефіцієнта ексцесу $Kur = \overline{(u')^4} / [\overline{(u')^2}]^2 = 3$; крива 2 – вимірюванню у зовнішній області примежового шару $y/R=0,65$ або $y/\delta=0,77$, де значення коефіцієнтів $Sk=-0,04$ і $Kur=2,95$; крива 3 – $y/R=0$; $Sk=0,07$; $Kur=2,82$. Вимірювання усередині заглиблення: крива 4 – $y/R=-0,65$; $Sk=0,84$; $Kur=3,82$; крива 5 – $y/R=-0,86$; $Sk=1,30$; $Kur=5,84$ і крива 6 – $y/R=-1,20$; $Sk=1,49$; $Kur=7,55$. Результати досліджень показали, що пульсації поздовжньої швидкості в непорушеному локальному перешкодою примежовому шарі на пластині мали закон розподілу ймовірності, близький до нормального. Великі відхилення коефіцієнтів асиметрії та ексцесу зареєстровані для поля пульсацій швидкості у внутрішній або пристінній області примежового шару, що узгоджується з даними роботи [4]. В самому заглибленні відзначаються значні відхилення закону розподілу від гауссівського до, наближено, максвеллівського: з'являються явно виражені зміни, характерні для взаємодії детермінованого сигналу з випадковим процесом (наявність максимуму функції щільності розподілу ймовірності при значеннях пульсацій швидкості, які не відповідають величині математичного очікування, аж до тенденції “двогорбості” в функції щільності розподілу ймовірності). З віддаленням вглиб напівциліндричної канавки коефіцієнти асиметрії і

експесу зростають. Визначено, що із заглибленням усередину каверни в її серединному перерізі набувають значного значення від'ємні пульсації поздовжньої швидкості невеликої амплітуди, які призвели до зміни форми функції щільності розподілу ймовірності та коефіцієнтів асиметрії і експесу. Ближче до дна заглиблення у вихровому потоці з'являються дуже високошвидкісні пульсації поля швидкості, що характеризують високі рівні переміжності циркуляційного руху в заглибленні через дію придонної течії. В доповіді наведено як профілі усередненої поздовжньої швидкості у серединному перерізі поперечно обтічної напівциліндричної канавки, так і ізолінії усереднених і пульсаційних $((\overline{u'})^2/U^2)$ складових швидкості для різних швидкостей течії. Для ламінарного режиму течії ($U_0=1,11\text{м/с}$) усередині канавки характерні малі рівні інтенсивності вихороутворення і усередненої швидкості. Профіль поздовжньої швидкості у примежовому шарі перед канавкою мав вигляд, притаманний ламінарній течії, і позаду канавки майже не змінився. При збільшенні швидкості течії до $10,1\text{м/с}$ настав перехідний режим течії, усередині лунки з'явилася неінтенсивна циркуляційна течія. Профіль швидкості поблизу кормової стінки канавки зазнав суттєвих змін. У придонній області заглиблення сформувалася інтенсивна течія, направлена назустріч напрямку основного потоку. Усередині канавки почала формуватися великомасштабна вихрова структура, яка періодично викидалася назовні з канавки, що спостерігалось під час візуальних досліджень. При турбулентному режимі течії ($U_0=20,1\text{м/с}$) профілі поздовжньої швидкості стали більше наповненими, а усередині канавки сформувалася інтенсивна циркуляційна течія. Великомасштабна вихрова структура заповнила майже весь об'єм серединної частини канавки, а поблизу кормової стінки значення поздовжньої швидкості є більшими, ніж поблизу передньої стінки канавки. При обробці експериментальних результатів вимірювання усереднених і пульсаційних складових швидкостей були побудовані лінії рівних значень швидкостей поля течії усередині поперечно обтічної напівциліндричної канавки в її серединному перерізі, а також над досліджуваною пластиною з заглибленням.

Висновки

Установлено, що над обтічною поверхнею утворюються зони гальмування та прискорення течії, що особливо явно простежується у пристінній області примежового шару. При турбулентному режимі течії усередині напівциліндричної канавки виникає циркуляційна течія, що генерується взаємодією зсувного шару, утвореного у результаті відриву примежового шару з переднього краю заглиблення, з її кормовою стінкою. Циркуляційна течія породжує квазістійку великомасштабну вихрову структуру. У пристінній області взаємодія вихрових структур зсувного шару та великомасштабного вихору з обтічною поверхнею генерує дрібномасштабні вихори, число яких збільшується із збільшенням швидкості течії. Профілі усередненої та пульсаційної складової швидкості показали наявність оберненої течії усередині канавки зі збільшенням швидкості її обтікання, появу циркуляційних рухів та області генерації великомасштабних вихрових структур і дрібномасштабних вихорів.

Отримані результати можуть використовуватися для моделювання обтікання поверхонь з напівциліндричними канавками, для пасивного керування течіями в енергозберігаючих технологіях, в елементах повітряного та водного транспорту, а також в засобах поліпшення екології навколишнього середовища.

Список використаних джерел

1. *Гортышов Ю.Ф.* 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.
2. *Tay C.M.* Development of flow structures over dimples / C.M. Tay, Y.T. Chew, B.C. Khoo, J.B. Zhao // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2014. – V. 52. – P. 278–287.
3. *Liu J.* Turbulent flow and heat transfer enhancement in rectangular channels with novel cylindrical grooves / J. Liu, G. Xie, T.W. Simon // *Int. J. Heat and Mass Transfer*. – 2015. – V. 81. – P. 563–577.

УДК 532.517

Турик В.М. к.т.н. доц.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

РОЗШИРЕННЯ ПОНЯТТЯ ТОРЦЕВОГО ЕФЕКТУ В ЗАКРУЧЕНИХ ОБМЕЖЕНИХ ПОТОКАХ

Представлені результати теоретичної оцінки первинного чиннику формування торцевого ефекту у вихрових камерах різноманітного призначення. Результати узгоджуються з даними експериментальних досліджень, згідно з якими в залежності від геометричних режимних та параметрів роботи вихрової камери, від 30 до 81% загальної витрати вхідного потоку спрямовується в бік глухого торця, принаймні в діапазоні відносних глибин його розташування $L/d_0 = 0 \div 4,5$ (d_0 – внутрішній діаметр камери). Виявлене явище не може бути пояснене взаємодією ядра потоку з примежовим шаром на диску глухого торця, як стверджувалося раніше. Отримані формули дають можливість кількісних оцінок розподілу тиску щодо кільцевої зони циркуляційної течії та зони квазітвердотільного вихрового ядра в центральному сопловому перерізі циліндричної частини вихрової камери. Показано, що із зростанням радіуса тиск збільшується від мінімальних величин на осі камери до певних максимальних величин, близьких до параметрів гальмування. Чим вище значення швидкості вхідного потоку газу через тангенціальне сопло, тим більша зміна тиску. Показано, що саме цей процес і складає фізичну першопричину явища «торцевого ефекту» в розширеному уявленні.

Ключові слова: вихрова камера, торцевий ефект, циркуляційна зона, квазітвердотільне вихрове ядро, параметри гальмування

Вступ

Проблеми раціональної організації аерогідродинамічними процесами в обмежених турбулентних потоках за умов дії відцентрових сил залишаються актуальними попри зусилля багатьох наукових шкіл світу. Причина тому — складність фізичної картини зсувних потоків, що супроводжується явищами в'язкої відцентрової нестійкості пристійнних течій та утворенням когерентних вихрових структур. На ці процеси накладається суцього внутрішній і спонтанний «ефект локалізації», який спричинений нерівноважністю й відкритістю нелінійної системи, утвореної нашаруванням первинних турбулентних потоків та зазначених вихрових структур. Особливість таких систем полягає в здатності до самоорганізації через наявність в них об'ємних джерел та/або стоків енергії, існуванням обміном речовиною і відповідних потоків енергії. При переважанні роботи стоків можуть утворюватися стаціонарні або квазістаціонарні структури. Якщо в певному режимі механізми розсіювання утворених самоорганізацією неоднорідностей нівелюють роботу джерел, то це гальмує і виникнення структур. В сукупності з аналітично некоректним на сьогодні описом турбулентності та недостатньою вивченістю зазначених фізичних процесів, задачі експериментальних досліджень в цьому напрямку, як і наближених інтегральних оцінок деяких важливих особливостей закручених потоків, потребують подальших розв'язань. Однією з таких особливостей є так званий «торцевий ефект» у вихрових камерах, перша згадка про який, певно, належить Уормлі [1], а подальші дослідження – Гольдштіку [2] та авторам роботи [3]. Ці дослідження обмежені умовами коротких вихрових камер, типовими для вихрових клапанів. Через це головна увага приділялась дослідженням взаємодії нестисливої вісесиметричної закрученої течії в ядрі потоку з в'язкими примежовими шарами на торцевих стінках (дисках) камер. Виявлено, що при збільшенні параметра закрутки зростаюча доля потоку зтягується з області ядра в середній зоні камери до примежових шарів на торцевих стінках. Через напруження тертя на них виникає дисбаланс між відцентровою силою в примежовому шарі та силою, яка зумовлена градієнтом тиску, спрямованим до середини торцевих стінок. В результаті основна доля витрати через камеру