

Поля швидкостей вихрової течії усередині поперечно обтічної напівциліндричної канавки

В. М. Турик¹ • В. А. Воскобійник² • О. А. Воскобійник² • А. В. Воскобійник²

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

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

Received: 08 July 2019 / Accepted: 10 September 2019

Проблематика. *Механізми генерації вихрових структур в геометричних неоднорідностях обтічних поверхонь як основа розвитку методів малозатратного керування гідромеханічними та теплофізичними характеристиками технічних пристроїв, літальних апаратів та засобів водного транспорту.*

Мета дослідження. *Вивчення особливостей формування і взаємодії вихрових утворень усередині та поблизу поперечно обтічної напівциліндричної канавки на плоскій поверхні, а також структури, кінематичних і динамічних характеристик примежового шару за допомогою статистичного аналізу.*

Методика реалізації. *Експериментальні дослідження в аеродинамічній трубі полів усереднених та пульсаційних складових швидкості в напівциліндричній канавці та її близькому сліді на гідравлічно гладкій плоскій поверхні шляхом термоанемометричних вимірювань в діапазоні чисел Рейнольдса, що розраховані за довжиною пластини до переднього краю заглиблення $Re_x = U_0 x / \nu$ від $3,8 \cdot 10^4$ до $6,9 \cdot 10^5$.*

Результати дослідження. *За даними вимірювань у серединному перерізі канавки полів актуальних швидкостей отримано функції щільності розподілу ймовірності пульсацій поздовжньої швидкості, їх коефіцієнти асиметрії та ексцесу. Побудовано профілі усередненої поздовжньої швидкості та ізотакси усереднених і пульсаційних складових швидкості усередині канавки. Виявлено області утворення зворотної течії в канавці, поле швидкості у зсувному шарі і особливості його взаємодії з кормовою стінкою канавки. При переході від ламінарного режиму обтікання канавки з малою інтенсивністю вихроутворення до турбулентного спочатку у придонній області заглиблення формується інтенсивна течія, спрямована назустріч напрямку основного потоку, що генерує великомасштабні вихрові структури, які періодично викидаються назовні з канавки. В результаті переходу значно збільшуються інтенсивності вихрового руху і циркуляційної течії в об'ємі канавки, а у близькому її сліді спостерігається відривна область з інтенсивними пульсаціями швидкості. Встановлено, що в примежовому шарі над заглибленням закон щільності розподілу ймовірності пульсацій поздовжньої швидкості близький до нормального, а в заглибленні – до максвеллівського. З віддаленням вглиб напівциліндричної канавки коефіцієнти асиметрії і ексцесу ростуть.*

Висновки. *Складна вихрова течія, що формується усередині напівциліндричного заглиблення, призводить до зміни структури примежового шару над пластинною. При перехідному і турбулентному режимах течії в примежовому шарі на пластині виявлено особливості та закономірності як генерації великомасштабних вихрових структур усередині канавки, так і викиду їх назовні з канавки до близького сліду. Таким чином, встановлено умови, за якими поперечно обтічна напівциліндрична канавка може слугувати ефективним генератором вихорів, що може бути використаним для керування гідроаеродинамічним опором і процесами тепломасообміну в елементах конструкцій транспортних засобів, енергетичних машин і апаратів.*

Ключові слова: *напівциліндрична канавка, аеродинамічна труба, примежовий шар, термоанемометр, вихрова структура*

Вступ

Як показує досвід, 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. Хоча існують певні відмінності вихроутворення в дрібних та глибоких заглибленнях, але механізми генерації та взаємодії вихорів, в цілому є спільними. А саме, з передньої кромки заглиблення відривається примежовий шар і формує зсувний шар, в якому зароджуються вихрові структури. Цей вихровий шар досягає кормової стінки і взаємодіє з нею. Під час цього частина зсувного шару рухається вздовж кормової стінки усередину заглиблення, а інша частина викидається над ним в примежовий шар. Рух рідини від кормової стінки вздовж dna заглиблення до його передньої стінки досягає кромки відриву примежового шару і

об'єднується з зсувними шаром, формуючи великомасштабну вихрову структуру усередині каверни. Ця вихрова структура з плином часу збільшується через наповнення рідиною з області взаємодії зсувного шару з кормовою стінкою. Коли масштаб вихрової структури починає перевищувати розмір заглиблення, вона частково або повністю викидається назовні з каверни. 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. Тому до вивчення цього механізму залучаються великі наукові колективи, які проводять фізичні і чисельні дослідження. Складність цих механізмів, а також різноманіття дії вихорів на навколишній примежовий шар, потік в цілому та на обтічну поверхню стимулює проведення досліджень, результати яких істотно розширюють сфери застосування «лункових» технологій в багатьох галузях науки і техніки. З кожним роком для виконання дослідницьких робіт застосовуються більш досконалі методи і засоби, але актуальність проблеми не зменшується. Навпаки, 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 часто 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, 2].

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 (рис. 1). Повітря з лабораторного приміщення за допомогою усмоктувального вентилятора надходило в аеродинамічну трубу діаметром 0,102 м. Для створення безвідливної течії вхід труби був виготовлений у вигляді лемніскасти.

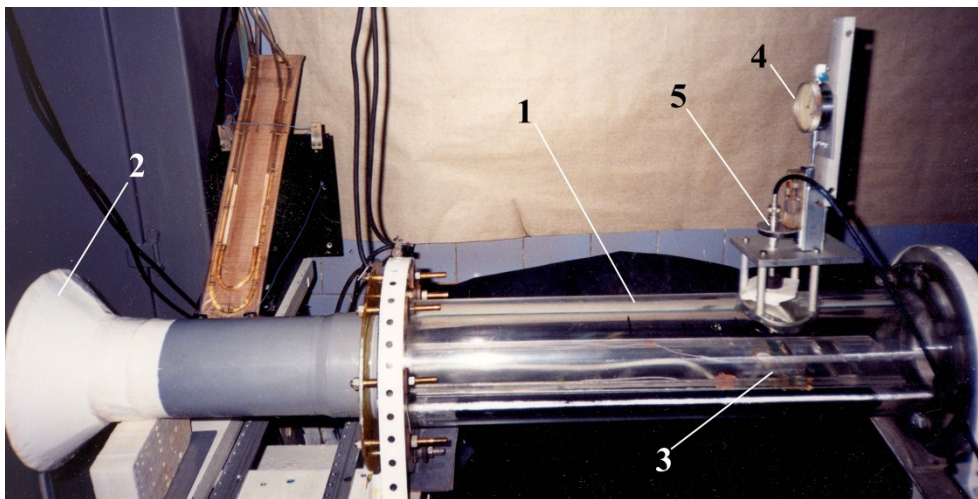


Рис. 1. Аеродинамічний стенд: 1 – вимірвальна ділянка; 2 – лемніскастне сопло; 3 – пластина з напівциліндричною канавкою; 4 – координатний пристрій; 5 – державка з термоанемометром

Усередині труби уздовж її осі розташовувалася гідравлічно гладка пластина довжиною 0,6 м, шириною 0,1 м. На відстані $x = -0,514$ м від носка пластини була зроблена напівциліндрична канавка довжиною 0,08 м і діаметром $d = 0,01$ м, яку обтікав поперечний потік. Носова та кормова частини пластини були загострені і примежовий 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 Elektronik” (Данія).

Програма досліджень передбачала проведення візуальних та інструментальних досліджень вихрової течії усередині канавки і 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 0,0001 м і довжиною 0,015 м 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 дротику 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, швидкості потоку, 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, з відношенням довжини датчика до його товщини >200 . У досліджах було використано дріт з двох матеріалів – воластонівський сплав (90% вольфраму та 10% платини) або тугоплавкий чисто вольфрамовий дріт, який приварювався за допомогою точкового зварювання до торців ніжок термоанемометра. Розташування датчиків над обтічною поверхнею контролювалося за допомогою лазерного променя, який через систему дзеркал та розщиплювачів 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 1,1 м/с до 20,1 м/с, яким відповідали числа Рейнольдса, що розраховані за довжиною пластини до переднього краю заглиблення $Re_x = U_0 x / \nu$ від $3,8 \cdot 10^4$ до $6,9 \cdot 10^5$ та розраховані за діаметром заглиблення $Re_d = U_0 d / \nu$ від 740 до 13400, де ν – кінематична т'язкість повітря. В досліджах товщина примежового шару перед заглибленням (δ) змінювалася від $4 \cdot 10^{-3}$ м до $13 \cdot 10^{-3}$ м, а товщина втрати імпульсу (θ) – від $0,6 \cdot 10^{-3}$ м до $1,75 \cdot 10^{-3}$ м.

Результати досліджень

Візуальні дослідження [3, 5] 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.

Поля пульсацій швидкості, тиску, температури та інших гідродинамічних параметрів в примежових шарах, утворених при обтіканні тіл різної конфігурації, як відомо [6–9], являють собою випадковий процес як в просторі, так і в часі. Отримання інформації про фізичні явища, які формують такі процеси, може бути здійснено завдяки застосуванню методів математичної статистики і теорії ймовірності [10, 11]. Для визначення основних властивостей випадкових процесів в загальному випадку використовується ряд статистичних функцій, серед яких треба виокремити середнє значення випадкового процесу або його математичне очікування, середнє значення квадрата випадкового процесу або його середньоквадратичне значення, щільність розподілу ймовірності випадкового процесу, коефіцієнти асиметрії та ексцесу. Ці статистичні функції та коефіцієнти є інтегральними характеристиками та дають елементарне уявлення про інтенсивність випадкового процесу [12, 13].

Так, щільність розподілу ймовірності пульсацій швидкості визначає ймовірність того, що значення пульсацій в довільний момент часу будуть знаходитися в певному інтервалі їх значень. Знання щільності розподілу ймовірності випадкової величини дає інформацію про амплітудні особливості досліджуваного процесу. Воно дозволяє оцінити коефіцієнти асиметрії і ексцесу (статистичні моменти третього і четвертого порядків), визначити види кривих щільності розподілу ймовірності цієї випадкової величини (дискретний,

гармонічний, гауссівський, Релея, Максвелла і т. п.) та встановити відповідні методи статистичного аналізу таких випадкових процесів.

На рис. 2 наведено функції щільності розподілу ймовірності пульсацій поздовжньої швидкості поблизу та усередині півциліндричної канавки, яку обтікає потік зі швидкістю $10,1 \text{ м/с}$. 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 відповідає 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 незбуреному локальною перешкодою примежовому шарі на пластині (при $x = -5d$) мали закон розподілу ймовірності, близький до нормального. Коефіцієнти асиметрії та ексцесу незначно відрізнялися, в межах точності вимірювань, від значень, властивих гауссівському закону розподілу ймовірності. Великі відхилення зареєстровані для поля пульсацій швидкості у внутрішній (пристінній) області примежового шару, що узгоджується з даними роботи [14]. У самому заглибленні відзначаються значні відхилення закону розподілу ймовірності від нормального. У функції щільності розподілу ймовірності пульсацій поздовжньої швидкості 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, або можлива поява “двогорбості” в функції щільності розподілу ймовірності). Таким чином, в примежовому шарі над заглибленням закон розподілу ймовірності пульсацій поздовжньої швидкості близький до нормального, а в заглибленні – до максвеллівського. З віддаленням вглиб напівциліндричної канавки коефіцієнти асиметрії і ексцесу ростуть. Визначено, що із заглибленням усередину канавки 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 ексцесу. Ближче до дна заглиблення у вихровому потоці з'являються дуже високошвидкісні пульсації поля, що характеризують високі рівні переміжності циркуляційного руху в заглибленні через дію придонної течії.

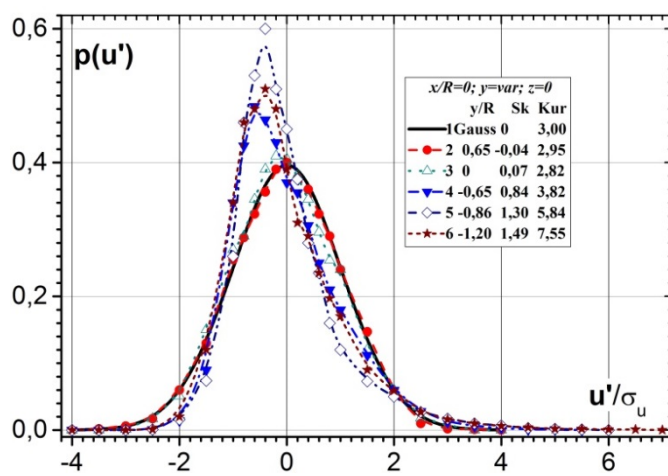


Рис. 2. Функції щільності розподілу ймовірності пульсацій поздовжньої швидкості

Профілі усередненої поздовжньої швидкості у серединному перерізі поперечно обтічної напівциліндричної канавки для різних швидкостей течії наведені на рис. 3. 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 $10,1 \text{ м/с}$ настає перехідний режим течії, усередині лунки з'явилася неінтенсивна циркуляційна течія. Профіль швидкості поблизу кормової стінки канавки зазнає суттєвих змін. У придонній області заглиблення сформувалася інтенсивна течія, яка спрямована назустріч напрямку основного потоку. Усередині канавки почала формуватися великомасштабна вихрова структура, яка періодично викидається назовні з канавки, що й спостерігається під час візуальних досліджень. При турбулентному режимі течії ($U_0 = 20,1 \text{ м/с}$) профілі поздовжньої швидкості стали більше наповненими (див. рис. 3в), а усередині канавки сформувалася інтенсивна циркуляційна течія. На цьому рисунку криві 1 позначають результати досліджень, які отримано у роботі [15], а криві 2 – наші вимірювання. Великомасштабна вихрова структура заповнила майже весь обсяг серединної частини канавки, але поблизу кормової стінки

значення поздовжньої швидкості більші, ніж поблизу передньої стінки канавки. Подібні зміни інтенсивності поздовжньої швидкості у серединному перерізі канавки та напрямку руху рідини спостерігалися у дослідях, результати яких наведено у роботі [15] (див. рис. 3в).

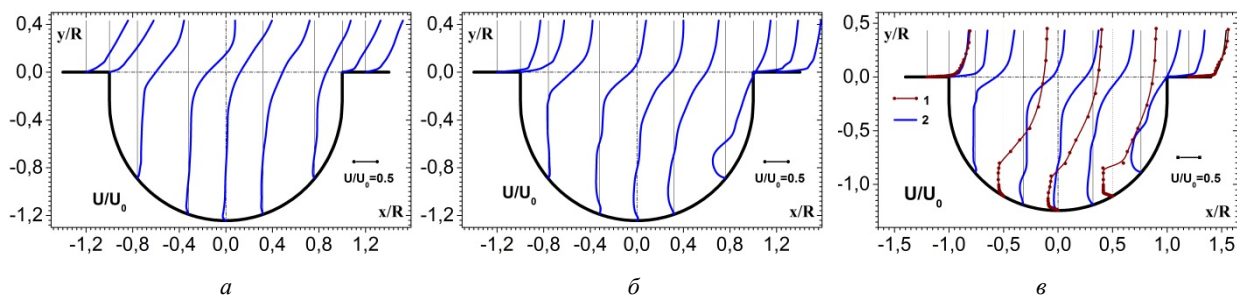


Рис. 3. Профілі усередненої поздовжньої швидкості у серединному перерізі канавки для швидкостей течії 1,11 м/с (а), 10,1 м/с (б) та 20,1 м/с (в)

При обробці експериментальних результатів вимірювання усереднених і пульсаційних складових швидкостей в поздовжньому напрямку були побудовані лінії рівних значень швидкостей поля течії усередині поперечно обтічної напівциліндричної канавки у її серединному перерізі, а також над досліджуваною пластинною із заглибленням. Так, на рис. 4 приведені ізолінії усереднених і пульсаційних складових швидкості при ламінарній течії. На ізолініях рис. 4а цифрами позначена усереднена швидкість відносно швидкості обтічного потоку у відсотках, а цифри зі стрілками вказують на характерні зони в заглибленні, які трактуються, як місця існування нестійких (в статистичному сенсі) та неінтенсивних вихрових структур. На цьому малюнку приведені значення швидкостей обтікання і чисел Рейнольдса. Лінії рівних пульсаційних складових швидкості у вигляді нормальних напружень Рейнольдса, нормованих швидкістю потоку, що набігає $\overline{u'^2}/U_0^2$, представлені на рис. 4б уздовж поздовжньої осі пластини з півциліндричним заглибленням. Тут, як і в подальших рисунках для більше високих швидкостей течії, цифрами відмічені значення $\overline{u'^2}/U_0^2$, які помножені на множник 10^4 .

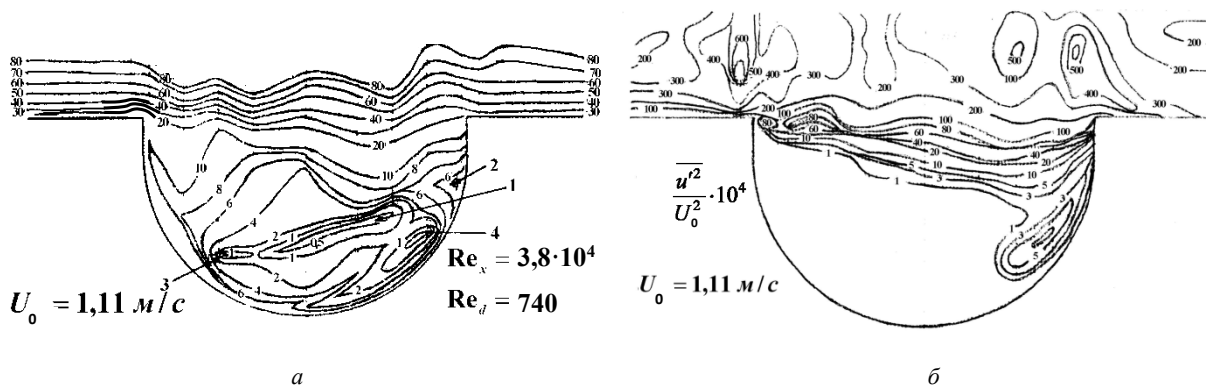


Рис. 4. Профілі рівних усереднених (а) і пульсаційних (б) складових швидкості усередині поперечно обтічної півциліндричної канавки, яку обтікає течія зі швидкістю 1,11 м/с

Лінії рівних швидкостей показали, що над обтічної пластинною і заглибленням чітко видно області гальмування та прискорення потоку, які охоплюють не тільки прилеглий шар над пластинною і зсувний шар, а також неінтенсивні дрібномасштабні циркуляційні області в самому заглибленні [4, 6]. Під час відриву прилеглий шару з передньої кромки канавки утворюється зсувний шар, який розширюється в поперечному напрямку з просуванням вниз за потоком. Нижня межа зсувного шару, також як і його верхня частина, має хвилеподібну форму, яка майже за три періоди перекидає ширину канавки (див. рис. 4а). Довжина хвилі нижньої межі зсувного шару в два рази менше в передній частині заглиблення, ніж в кормовій. В області взаємодії вихрових структур зсувного шару з кормовою стінкою канавки зсувний шар розділюється на дві частини. Перша частина перемістилася вгору у напрямку до краю заглиблення, а друга уздовж кормової стінки переносилася до дна заглиблення. Ця частина зсувного шару утворює циркуляційну зону, усередині якої сформувався неінтенсивний вихор, позначений на рис. 4а індексом 1, а поблизу нього утворилися невеликі нестійкі вихори, позначені цифрами 2, 3 та 4

У відповідності до рис. 4б найбільші рівні пульсаційної енергії при малій швидкості обтікання спостерігалися в області сліду заглиблення. Поряд з цим, мають місце локальні області підвищених рівнів пульсацій над критичними крайовими зонами (передня і кормова кромки канавки). В зсувному шарі, що охоплює верхню частину отвору канавки, можна відзначити хвилеподібну зміну ізоліній пульсацій швидкості. Довжина хвилі цього квазігармонічного процесу менша у відривній області заглиблення, ніж в кормовій, що корелює з результатами, представленими на рис. 4а. З просуванням углиб канавки рівні пульсацій швидкості різко зменшилися, особливо в її передній та придонній частині

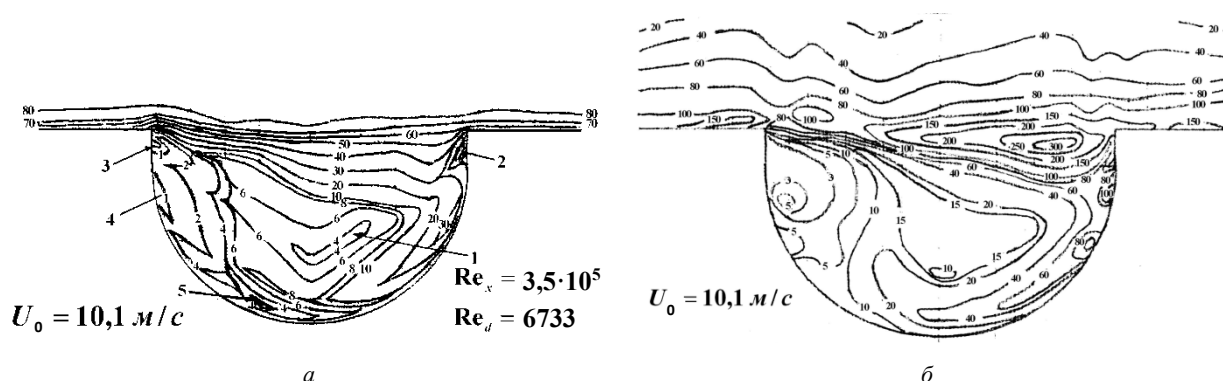


Рис. 5. Профілі рівнів усереднених (а) і пульсаційних (б) складових швидкості усередині поперечно обтічної півциліндричної канавки, яку обтікає течія зі швидкістю 10,1 м/с

Лінії рівнів значень усереднених і пульсаційних складових швидкості для перехідного режиму течії ($U_0 = 10,1$ м/с) представлені на рис. 5. Тут криві позначені подібно рис. 4. Так, усередині канавки з'явилися інтенсивні циркуляційні області, про що більш наглядно свідчить поведінка ізоліній пульсацій швидкості (рис. 5б). Майже в центральній частині канавки сформувався квазістійкий великомасштабний вихор, а у пристінній частині канавки генерувалися дрібномасштабні вихори. Максимальні значення пульсацій швидкості мають місце поблизу кормової стінки канавки в області взаємодії вихрових структур зсувного шару з останньою, що не спостерігалось при ламінарному режимі течії (див. рис. 4б). Усередині канавки рівні пульсацій швидкості також збільшилися зі зростанням швидкості течії, а мінімальні значення нормальних напружень Рейнольдса спостерігалися поблизу передньої стінки канавки нижче області відриву примежового шару.

При турбулентному обтіканні півциліндричної канавки лінії рівнів усереднених та пульсаційних складових швидкості у серединному перерізі заглиблення показані на рис. 6, де позначення кривих подібні тим, що наведені на рис. 4 та рис. 5. Відповідно до отриманих результатів, характер структури потоку як в заглибленні, так і над пластиною, не зазнав кардинальних змін відносно раніше розглянутого режиму течії. Але інтенсивність вихрового руху значно збільшилась, що особливо наглядно проілюстровано на рис. 6б. Великомасштабна вихрова структура при цьому режимі течії стала більш притиснутою до кормової стінки канавки, а у пристінній області заглиблення з'явилася більша кількість інтенсивних дрібномасштабних вихорів, які суттєво збільшили рівні рейнольдсівських напружень. У ближньому сліді канавки стала спостерігатися відривна область з інтенсивними пульсаціями швидкості. Таким чином, установлено, що при такому

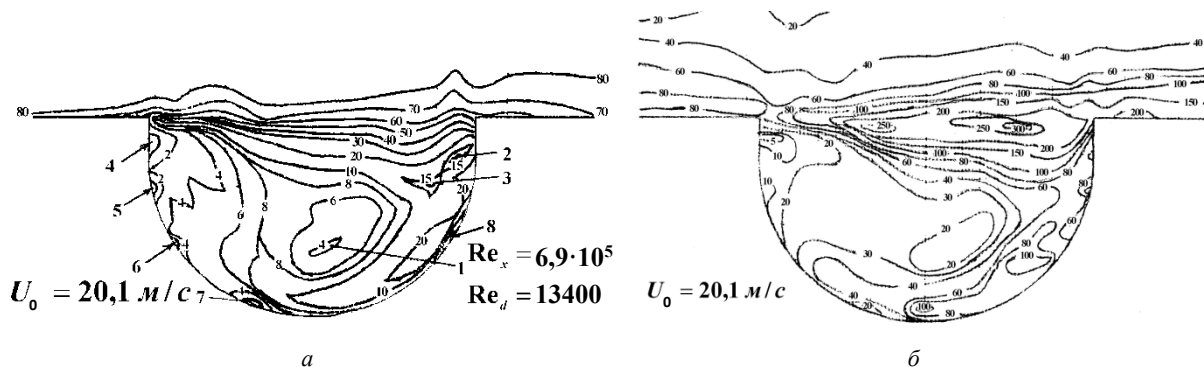


Рис. 6. Профілі рівнів усереднених (а) і пульсаційних (б) складових швидкості усередині поперечно обтічної півциліндричної канавки, яку обтікає течія зі швидкістю 20,1 м/с

турбулентному режимі течії поперечно обтічна напівциліндрична канавка є ефективним генератором вихорів, який може бути використаним для керування течією та, зокрема, примежовим шаром.

Висновки

Результати експериментальних досліджень полів усереднених і пульсаційних складових швидкості усередині напівциліндричної канавки, яку обтікав поперечний потік різних режимів течії, дозволили зробити наступні висновки.

Установлено, що зі збільшенням швидкості обтікання усередині заглиблення 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. 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.

Визначено, що щільність розподілу ймовірності пульсацій швидкості для турбулентної течії над поперечно обтічною напівциліндричною канавкою відповідає закону, близькому до гауссівського або нормального, який усередині лунки змінюється на максвеллівський. Коефіцієнт асиметрії набуває позитивних значень, а коефіцієнт ексцесу перевищує значення, які притаманні гауссівському випадковому процесу.

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. Інтенсивність пульсацій швидкості збільшилася зі зростанням швидкості течії. Максимальні значення пульсацій швидкості спостерігаються поблизу кормової стінки канавки в області взаємодії вихрових структур зсувного шару з останньою. При турбулентному режимі течії установлено, що у ближньому сліді канавки спостерігається відривна область з інтенсивними пульсаціями швидкості.

Отримані результати можуть використовуватися для моделювання обтікання поверхонь з напівциліндричними канавками при їх проектуванні, для пасивного керування течіями і примежовими шарами «лунковими» генераторами вихорів в енергозберігаючих технологіях, в елементах повітряного та водного транспорту, а також в засобах поліпшення екології навколишнього середовища.

References

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. 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. – vol. 81. – P. 563 – 577.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.10.021>
3. Воскобойник В.А. Когерентні вихрові структури в поперечно обтічній овальній лунці / В.А. Воскобойник, А.В. Воскобойник // *Наукоємні технології*. – 2014. – Том 23, № 3. – С. 352 – 358.
<https://doi.org/10.18372/2310-5461.23.7416>
4. Воскобойник В.А. Поле швидкості та вихровий рух усередині напівциліндричної траншеї / В.А. Воскобойник, А.В. Воскобойник // *Промышленная теплотехника*. – 2016. – Том 38, № 4. – С. 11 – 20.
5. Турик В.М. Вихровий рух всередині поперечно обтічної траншеї / В.М. Турик, В.А. Воскобойник, А.В. Воскобойник // *Mechanics and Advanced Technologies*. – 2018. – Том 83, № 2. – С. 64 – 71.
6. 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. – vol. 52. – P. 278 – 287.
7. Турик В.М. Вплив локальних поперечно обтічних перешкод на пульсації швидкості та пристінного тиску / В.М. Турик, В.А. Воскобойник, А.В. Воскобойник // *Наукові вісті НТУУ „КПІ”*. – 2017. – № 1. – С. 106 – 114.
8. Blake W.K. *Mechanics of flow-induced sound and vibration: in 2 vol.* / W.K. Blake – NY: Academic Press, 1986. – 817 p.
9. Voskoboinick V.A. Pseudo-sound behind an obstacle on a cylinder in axial flow / V.A. Voskoboinick, V.T. Grinchenko, A.P. Makarenkov // *Intern. J. Fluid Mech.* - 2005. – 32, № 4. – P. 488 – 510.
10. Вентцель Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Высш. шк., 2000. – 383 с.
11. Бендат Дж. Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1989. – 540 с.
12. Voskoboinick V. Study of near wall coherent flow structures on dimpled surfaces using unsteady pressure measurements / V. Voskoboinick, N. Kornev, J. Turnow // *Flow Turbulence Combust.* – 2013. – vol. 90, no. 4. – P. 709 – 722.
13. Voskoboinick V.A. Influence of the Deep Spherical Dimple on the Pressure Field under the Turbulent Boundary Layer / V.A. Voskoboinick, V.N. Turick, O.A. Voskoboinyck and dr. // In: Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He M. (ed.) *Advances in*

- Computer Science for Engineering and Education. ICCSEEA 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer, Cham. – 2019. vol. 754. – P. 23 – 32.
14. Kamruzzaman M. Scale-by-scale energy budget in a turbulent boundary layer over a rough wall / M. Kamruzzaman, L. Djenidi, R.A. Antonia, K.M. Talluru // Int. J. Heat and Fluid Flow. – 2015. – vol. 55. – P. 2 – 8.
 15. Терехов В.И. Экспериментальное исследование развития течения в канале с полусферической каверной / В.И. Терехов, С.В. Калинина, Ю.М. Мшвидобадзе // Сибир. физ.-техн. ж. – 1992. – Вып. 1. – С. 77 – 86.

Поля скоростей вихревого течения внутри поперечно обтекаемой полуцилиндрической канавки

В. Н. Турик, В. А. Воскобойник, А. А. Воскобойник, А. В. Воскобойник

Проблематика. Механизмы генерации вихревых структур в геометрических неоднородностях обтекаемых поверхностей как основа развития методов малозатратного управления гидромеханическими и теплофизическими характеристиками технических устройств, летательных аппаратов и средств водного транспорта.

Цель исследования. Изучение особенностей формирования и взаимодействия вихревых образований внутри и вблизи поперечно обтекаемой полуцилиндрической канавки на плоской поверхности, а также структуры, кинематических и динамических характеристик пограничного слоя с помощью статистического анализа.

Методика реализации. Экспериментальные исследования в аэродинамической трубе полей усредненных и пульсационных составляющих скорости в полуцилиндрической канавке и ее ближнем следе на гидравлически гладкой плоской поверхности путем термоанемометрических измерений в диапазоне чисел Рейнольдса, рассчитанных по длине пластины до переднего края углубления $Re_x = U_{\infty}x/\nu$ від $3,8 \cdot 10^4$ до $6,9 \cdot 10^5$.

Результаты исследования. По данным измерений в срединном сечении канавки полей актуальных скоростей получены функции плотности распределения вероятности пульсаций продольной скорости, их коэффициенты асимметрии и эксцесса. Построены профили усредненной продольной скорости и изотахи усредненных и пульсационных составляющих скорости внутри канавки. Обнаружены области образования обратного течения в канавке, поле скорости в сдвиговом слое и особенности его взаимодействия с кормовой стенкой канавки. При переходе от ламинарного режима обтекания канавки с малой интенсивностью вихреобразования к турбулентному вначале в придонной области углубления формируется интенсивная течение, направленное навстречу основному потоку, что генерирует крупномасштабные вихревые структуры, которые периодически выбрасываются наружу из канавки. В результате перехода значительно увеличиваются интенсивности вихревого движения и циркуляционного течения в объеме канавки, а в ближнем ее следе наблюдается отрывная область с интенсивными пульсациями скорости. Установлено, что в пограничном слое над углублением закон плотности распределения вероятности пульсаций продольной скорости близок к нормальному, а в углублении — к максвелловскому. С удалением вглубь полуцилиндрической канавки коэффициенты асимметрии и эксцесса растут.

Выводы. Сложное вихревое течение, формирующееся внутри полуцилиндрического углубления, приводит к изменению структуры пограничного слоя над пластиной. При переходном и турбулентном режимах течения в пограничном слое на пластине выявлены особенности и закономерности как генерации крупномасштабных вихревых структур внутри канавки, так и выброса их наружу из канавки в ближний след. Таким образом, установлены условия, при которых поперечно обтекаемая полуцилиндрической канавка может служить эффективным генератором вихрей, что может быть использовано для управления гидроаэродинамическим сопротивлением и процессами теплообмена в элементах конструкций транспортных средств, энергетических машин и аппаратов.

Ключевые слова: полуцилиндрическая канавка, аэродинамическая труба, пограничный слой, термоанемометр, вихревая структура

Velocity fields of vortex flow inside cross streamlined semi-cylindrical groove

V. N. Turik, V. A. Voskoboinick, O. A. Voskoboinyk, A. V. Voskoboinick

Background. Mechanisms of vortex structures generation in geometric inhomogeneities of streamlined surfaces as the basis for the development of low-cost control methods for hydromechanical and thermophysical characteristics of technical devices, aircraft and water vehicles.

Objective. Studying the features of the formation and interaction of vortex formations inside and near a cross streamlined semi-cylindrical groove on a flat surface, as well as the structure, kinematic and dynamic characteristics of the boundary layer using statistical analysis.

Methods. Experimental investigations in a wind tunnel of the fields of averaged and fluctuation velocity components in semi-cylindrical groove and its near wake on a hydraulically smooth flat surface by hot-wire measurements in the range of Reynolds numbers calculated along the plate length to the front edge of the recess $Re_x = U_{\infty}x/\nu$ from $3,8 \cdot 10^4$ up to $6,9 \cdot 10^5$.

Results. According to measurements in the mid-section of the groove of the fields of actual velocities, the probability density functions of the longitudinal velocity fluctuations, their coefficients of asymmetry and excess are obtained. The profiles of the averaged longitudinal velocity and the isotaches of the averaged and fluctuation velocity components inside the groove are constructed. The regions of formation of the reverse flow in the groove, the velocity field in the shear layer, and the features of its interaction with the stern wall of the groove were found. In the transition from the laminar flow regime of a groove with a low vortex

formation intensity to a turbulent one, at first an intense flow is formed in the near-bottom region of the cavity, directed towards the direction of the main flow. That is the reason of generation of the large-scale vortex structures that are periodically ejected out from the groove. As a result of the transition, the intensities of the vortex motion and the circulation flow in the groove volume are significantly increased, and in the near wake there is a separation region with intense velocity fluctuations. It has been established that in the boundary layer above the groove, the law of the probability density distribution of the longitudinal velocity fluctuations is close to normal one, but in the recess to the Maxwellian one. With the deep of semi-cylindrical groove the asymmetry and excess coefficients increase.

Conclusions. A complex vortex flow that forms inside a half-cylindrical cavity leads to a change in the structure of the boundary layer above the plate. In the transition and turbulent flow regimes in the boundary layer on the plate, the features and regularities of both the generation of large-scale vortex structures inside the groove and their ejection out from the groove into the near wake are revealed. Thus, the conditions are established under which the transversely streamlined semi-cylindrical groove can serve as an effective generator of vortices, which can be used to control hydroaerodynamic drag and heat and mass transfer processes in structural elements of vehicles, power machines and apparatuses.

Keywords: half-cylindrical groove, wind tunnel, boundary layer, hot-wire anemometer, vortex structure

References

- Gortyshov, Yu.F., Popov, I.A., Olimpiev, V.V. and dr. (2009), *Teplogidravlicheskaya effektivnost' perspektivnykh sposobov intensivifikatsii teplootdachi v kanalakh teploobmennogo oborudovaniya* [Heat-hydraulic efficiency of perspective methods of intensification of heat emission in the channels of heat-exchange equipment], Tsentr innovatsionnykh tekhnologii, Kazan', Russia.
- Liu J., Xie, G. and Simon, T.W. (2015), "Turbulent flow and heat transfer enhancement in rectangular channels with novel cylindrical grooves", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, vol. 81, pp. 563 – 577, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.10.021>
- Voskoboinick, V.A. and Voskoboinick, A.V. (2014), "Coherent vortex structures inside the cross-streamlined oval dimple", *Science-Based Technologies*, vol. 23, no. 3, pp. 352–358, <https://doi.org/10.18372/2310-5461.23.7416>
- Voskoboinick, V.A. and Voskoboinick, A.V. (2016), "Velocity field and vortex motion inside the semi-cylindrical trench", *Industrial heat engineering*, vol. 38, no. 4, pp. 11 – 20.
- Turick, V.N., Voskoboinick, V.A. and Voskoboinick, A.V. (2018), "Vortex motion inside cross streamlined trench", *Mechanics and Advanced Technologies*, vol. 83, no. 2, pp. 64 – 71.
- Tay, C.M., Chew, Y.T., Khoo, B.C. and Zhao, J.B. (2014), "Development of flow structures over dimples", *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 52, pp. 278 – 287.
- Turick, V.N., Voskoboinick, V.A. and Voskoboinick, A.V. (2017), "Influence of the local cross-streamlined obstacles on a velocity and pressure fluctuations", *Naukovi visti NTUU "KPI"*, no. 1, pp. 106 – 114.
- Blake, W.K. (1986), *Mechanics of flow-induced sound and vibration*: in 2 vol., Academic Press, NY, USA.
- Voskoboinick, V.A., Grinchenko, V.T. and Makarenkov, A.P. (2005), "Pseudo-sound behind an obstacle on a cylinder in axial flow", *Intern. J. Fluid Mech.*, vol. 32, no. 4, pp. 488 – 510.
- Vencel', E.S. and Ovcharov, L.A. (2000), *Teoriya sluchainykh processov i eje inzhenernye prilozhenija* [Theory of random processes and its engineering applications], Vyssh. shk., Moscow, Russia.
- Bendat, J. and Pirsol, A. (1989), *Prikladnoi analiz sluchainykh dannykh*, per. s angl. [Random Data], Mir, Moscow.
- Voskoboinick, V., Kornev, N. and Turnow, J. (2013), "Study of near wall coherent flow structures on dimpled surfaces using unsteady pressure measurements", *Flow Turbulence Combust.*, vol. 90, no. 4, pp. 709 – 722.
- Voskoboinick, V.A., Turick, V.N. and Voskoboinyk, O.A. and dr. (2019), "Influence of the Deep Spherical Dimple on the Pressure Field under the Turbulent Boundary Layer", in Hu, Z., Petoukhov, S., Dychka, I., He, M. (ed.), *Advances in Computer Science for Engineering and Education, ICCSEEA 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer, Cham.*, vol. 754. pp. 23 – 32.
- Kamruzzaman, M., Djenidi, L., Antonia, R.A. and Talluru, K.M. (2015), "Scale-by-scale energy budget in a turbulent boundary layer over a rough wall", *Int. J. Heat and Fluid Flow*, vol. 55, pp. 2 – 8.
- Terekhov, V.I., Kalinina, S.V. and Mschvidobadze, Yu.M. (1992), "Experimental research flow evolution inside channel with semispherical cavity", *Sib. Phys.-techn. J.*, no. 1, pp. 77 – 86.