

УДК 532.517

ВПЛИВ ОВАЛЬНОГО ЗАГЛИБЛЕННЯ НА ПОЛЕ ШВИДКОСТІ НАД ПЛАСТИНОЮ

В. М. СТЕПАНОВИЧ

Інститут гідромеханіки НАН України, Київ
вул. Желябова, 8/4, 03680, МСП, Київ-180, Україна
E-mail: stepanovitchvdim@yandex.ua

Одержано 31.03.2016

Проведено спектральний аналіз пульсацій поздовжньої швидкості в примежовому шарі над обтічною пластиною, що має овальне одиночне заглиблення, яке розташоване під кутом 60° відносно напрямку потоку рідини, за допомогою алгоритму швидкого перетворення Фур'є і вагової функції Ханнінга. Установлено, що вздовж всієї кормової частини овольного заглиблення в області його ближнього сліду спостерігається істотне зростання високочастотних складових спектра швидкості щодо пристінної та зовнішньої областей примежового шару, який сформований над гладкою плоскою пластиною.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: овальне заглиблення, плівковий термоанемометр, пульсації швидкості, вихрова структура

Проведен спектральний аналіз пульсацій продольной скорости в пограничном слое над обтекаемой пластиной, которая имеет овальное одиночное углубление, расположенное под углом 60° относительно направления потока жидкости, с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье и весовой функции Ханнинга. Установлено, что вдоль всей кормовой части овольного углубления в области его ближнего следа наблюдается существенный рост высокочастотных составляющих спектра скорости в пристеночной и внешней областях пограничного слоя, который сформирован над гладкой плоской пластиной.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: овальное углубление, пленочный термоанемометр, пульсации скорости, вихревая структура

Spectral analysis of longitudinal velocity fluctuations in the boundary layer over the streamlined plate, which has a single oval cavity positioned at an angle of 60° with respect to the fluid flow direction, using the fast Fourier transform algorithm and Hanning weighting function, was carried out. It is found that along the aft oval cavity in the region of its near wake is observed significant growth of high-frequency components of velocity fluctuation spectra in wall and external regions of the boundary layer which is formed on a smooth flat plate.

KEY WORDS: oval cavity, film anemometer, velocity fluctuations, vortex structure

ВСТУП

Течії за різного роду перешкодами (зокрема заглибленнями) випадкового походження зустрічаються на практиці, але найбільш часто поодинокі заглиблення та лункові поверхні, спеціально зроблені на обтічній поверхні, використовуються під час вирішення задач теплообміну, управління примежовим шаром та ін. Найявність на поверхні обтічного тіла перешкоди призводить до істотної зміни структури течії, яке характеризується тим, що за певних умов обтікання утворюються відривні області та формуються зони зворотньої течії з підвищеними рівнями пульсації швидкості і тиску [1-3]. Тому підвищений інтерес до заглиблень (лунок), який проявлений в останні роки, обумовлений їхніми своєрідними гідродинамічними властивостями, такими як низькі гідравлічні втрати, найкращі теплогідравлічні характеристики, нестационарні флуктуації всередині заглиблень і за ними, "гра вихорів" близько обтічної поверхні з численними заглибленнями [4-7]. Протягом останніх років досягнуто значного прогресу у вивченні тепло-

обміну та гідродинаміки в околі поверхневих заглиблень різної форми [8-10].

Заглиблення мають унікальні гідродинамічні властивості, такі як низький гідравлічний опір, відносно виступів еквівалентної обтічної площі, перевищення теплообміну над збільшенням гідравлічного опору (порушення аналогії Рейнольдса), що є недосяжним для всіх інших інтенсификаторів теплообміну, нестационарні флуктуації потоку за заглибленням [11-15]. Ці властивості широко використовуються як при вдосконаленні різних термогазодинамічних процесів, так і при розробці нових вихрових технологій термодинаміки. Через складність явища обтікання лункових поверхонь, на яке, окрім швидкості потоку, впливають такі фактори [16-19], як розмір заглиблення та його геометрія, закруглення кромки, характер і товщина примежового шару на вході у заглиблення, розмір каналу, результати багаточисельних досліджень часто бувають суперечливими та потребують кропітких і виснажливих науково-дослідних робіт.

Проблема визначення просторово-часових хара-



Рис. 1. Нахилена овальна лунка на обтічній поверхні пластини

ктеристик когерентних структур, полів швидкості та тиску в локальних лункових генераторах вихорів, ідентифікації вихрових структур, вивчення механізмів їх генерації та еволюції актуальні не тільки в фундаментальних дослідженнях, але й на практиці під час створення сучасних транспортних засобів та енергозберігаючих технологій [3, 5, 20, 21].

Метою дослідження є визначення впливу овального заглиблення, розташованого під кутом 60 градусів до напрямку течії, на поле швидкості та на вихрові структури примежового шару, що утворюється над пластиною з заглибленням.

1. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Експериментальні дослідження впливу овальних заглиблень на поле швидкості над пластиною проводилися в гідродинамічному лотку з вільною поверхнею води глибиною 0.04 м. Розміри лотка: довжина 16 м, ширина 1 м, глибина 1 м, а вимірювальна ділянка перебувала посередині лотка. Для проведення візуальних досліджень бокові стінки гідродинамічного лотка зроблені скляними. Вода у лоток подавалася через заспокійливу камеру насосами. Із заспокійливої камери потік води проходив конфузторний відсік і через хонейкомби та турбулізуючі сітки надходив на вхід гідродинамічного лотка. Вимірювальна ділянка обладнана апаратурою і засобами реєстрації характеристик набігаючого потоку, координатними пристроями, які були розташовані на відстані 8 м від вхідної частини лотка.

За обтічну поверхню, у якій знаходилася локальна неоднорідність, була використана гідравлі-

чно гладка пластина, виготовлена з полірованого органічного скла товщиною 0.01 м, шириною 0.5 м і довжиною 2 м, була загострена з однієї (фронтальної) і з іншої (кормової) сторони для забезпечення безвідривного її обтікання. До бічних сторін пластини кріпилися кінцеві шайби (органічне скло товщиною 0.005 м і шириною 0.2 м). На відстані 0.8 м від носка пластини було зроблено отвір, в якому було виготовлено овальне заглиблення у вигляді двох сферичних лунок, об'єднаних циліндричною вставкою. Діаметр лунки $d=0.04$ м, ширина і довжина циліндричної вставки по 0.04 м. Таким чином, овальна лунка мала ширину 0.04 м, довжину 0.08 м, глибину 0.009 м і відношення глибини до ширини $h/d=0.22$ (рис. 1). До нижньої частини пластини кріпився лист з масштабною сіткою і пінопластовий обтічник. Овальне заглиблення оберталося у горизонтальній площині (площина пластини) з довільним кроком. Кут розташування овального заглиблення (α) щодо напрямлення набігаючого потоку в проведених дослідженнях варіювався від 30° до 90° і швидкість потоку змінювалася від 0.1 м/с до 0.5 м/с.

Поле швидкостей всередині локального овального заглиблення і над обтічною поверхнею пластини вимірювалось за допомогою плівкових термоанемометрів типу 55R36 фірми Disa, які мали довжину чутливої поверхні 0.0015 м. Плівкові датчики термоанемометрів вводилися в область вимірювань за допомогою обтічних ножів і координатного пристрою, розташованого на бічних стінках гідродинамічного лотка. Координатний пристрій дозволяв переміщати датчики в трьох взаємно перпендикулярних площинах з точністю до $100 \cdot 10^{-6}$ м. В експериментальних дослідженнях одночасно використовувалася пара термоанемометрів: один – двокомпонентний, а другий – однокомпонентний, які були встановлені на незалежних системах кріплення для проведення кореляційних вимірювань. Приклад розташування двох датчиків термоанемометров над овальним заглибленням показаний на рис. 2. Всі датчики, незалежно від призначення і конструкції, калібрувалися та тестувалися абсолютними і відносними методами. Термоанемометри калібрувалися відповідно до рекомендованих методик фірм Disa, Dantec і TSI, які виробляли і виробляють термоанемометричні комплекси. Показники швидкостей, зареєстровані плівковими термоанемометрами, які знаходилися у потоці води відомої температури і гідростатичного тиску, зіставлялися з показниками швидкостей, реєстрованих трубками Піто або Піто-Прандтля, розташованих поблизу термоанемометричних датчиків. При визначенні чутливості термоанемометрів ви-

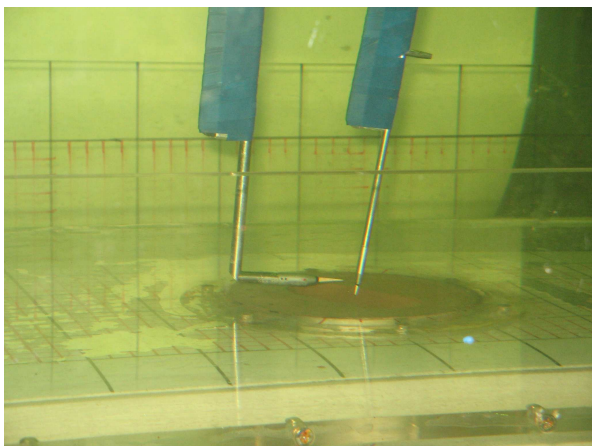


Рис. 2. Розташування пластини з лункою у гідродинамічному лотку та термоанемометрів над нею

користувалася відома залежність Кінга з показником ступеня 0.45. Тестування плівкових датчиків здійснювалася перед вимірами, в ході їх і після закінчення робіт. У ряді особливо відповідальних досліджень на державках використовуваних датчиків, на досліджуваній пластині і на стінках гідродинамічного лотка встановлювалися мініатюрні п'єзокерамічні датчики прискорень в трьох взаємно перпендикулярних площинах для визначення амплітудно-частотних характеристик вібрацій і джерел їх генерації. Ці дані використовувалися для проведення віброкомпенсації під час обробки та аналізу експериментальних даних, а також при проведенні робіт по зниженню рівнів вібрацій динамічними або пасивними методами при підготовці експериментального стенду. Поряд з цим було проведено ряд заходів щодо контролю та обмеження електромагнітних та акустичних перешкод і шумів на експериментальні дані.

У результаті похибка вимірювань інтегральних характеристик поля швидкостей не перевищувала 5% за достовірності 0.95 або 2σ . Похибка вимірювань кореляційних характеристик не перевищувала 10%, а спектральних характеристик – до 2 дБ в досліджуваному діапазоні частот за тим же довірчим інтервалом. При вимірюванні швидкості переміщення мічених частинок, водорозчинної контрастної речовини та кольорових барвників під час аналізу відеоматеріалу похибка вимірювань складала близько 10%, а частоти викиду вихрових систем з заглиблення, їх місце розташування і масштаб вихрових структур у візуальних дослідженнях оцінювалися з похибкою до 15% за достовірності 0.95.

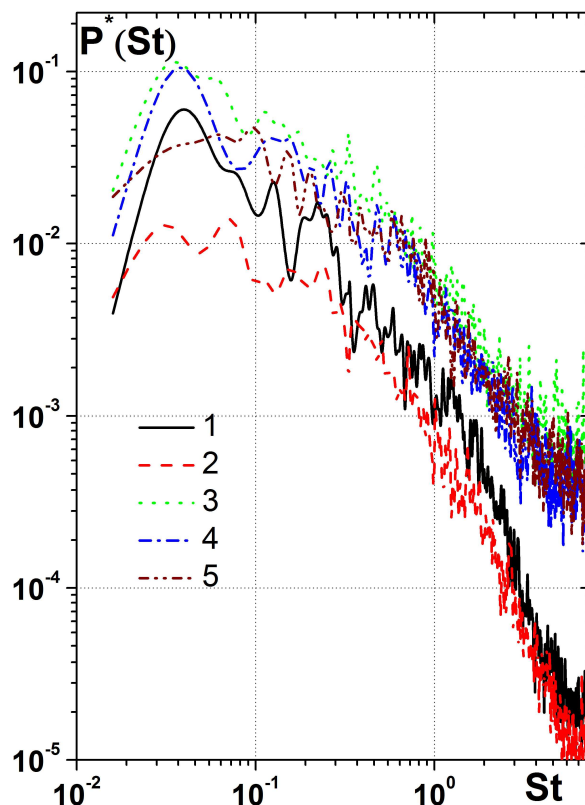


Рис. 3. Спектральні щільності потужності пульсацій поздовжньої швидкості над поверхнею пластини з овальною лункою

2. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

За допомогою алгоритму швидкого перетворення Фур'є і вагової функції Ханнінга було проведено спектральний аналіз пульсацій поздовжньої швидкості в примежовому шарі над обтічною пластинною, що має овальне одиночне заглиблення.

Особливості впливу локального заглиблення, розташованого на обтічній поверхні під кутом 60° відносно напрямку потоку, можна оцінити з аналізу спектральних щільностей потужностей пульсацій поздовжньої швидкості, виміряних на висоті $y/d=0.05$ і $y/d=0.35$ над площиною пластини для швидкості потоку 0.25 м/с, які представлені на рис. 3–6. На цих рисунках по вісі ординат відкладені спектральні компоненти пульсацій поздовжньої швидкості, нормовані зовнішніми змінними, у вигляді $P^*(St) = P^2(f)d/U^3$, а по вісі абсцис відкладені нормовані частоти у вигляді чисел Струхаля $St = fd/U$.

На рис. 3 крива 1 виміряна перед овальним заглибленням в його серединному поздовжньому перерізі в точці $x/d = -1.30$; $y/d = 0.05$ і $z/d = 0$;

крива 2 виміряна над центром лунки в точці $x/d = 0$; $y/d = 0.05$ і $z/d = 0$; крива 3 – у ближньому сліді лунки в її серединному перерізі $x/d = 0.70$; $y/d = 0.05$ і $z/d = 0$; крива 4 – у ближньому сліді передньої сферичної частини овальної лунки в точці $x/d = 0.40$; $y/d = 0.05$ і $z/d = -0.50$ і крива 5 – у ближньому сліді кормової сферичної частини лунки в точці $x/d = 0.90$; $y/d = 0.05$ і $z/d = 0.50$.

Результати досліджень поля пульсацій швидкості у зовнішній області примежового шару над поверхнею пластини з овальною лункою приведені на рис. 4. Тут крива 1 виміряна в точці $x/d = -1.30$; $y/d = 0.35$ і $z/d = 0$; крива 2 – $x/d = 0$; $y/d = 0.35$ і $z/d = 0$; крива 3 – $x/d = 0.70$; $y/d = 0.35$ і $z/d = 0$; крива 4 – $x/d = 0.40$; $y/d = 0.35$ і $z/d = -0.50$ і крива 5 – $x/d = 0.90$; $y/d = 0.35$ і $z/d = 0.50$.

Необхідно відзначити, що наявність заглиблення на обтічній поверхні призводить до зростання спектральних рівнів пульсацій швидкості позаду овальної лунки, практично, у всьому досліджуваному частотному діапазоні як в пристінній, так і в зовнішній частині примежового шару. Безпосередньо над самим заглибленням спектральні щільності потужності в цих областях примежового шару зменшуються щодо умов непорушеного примежового шару, що проілюстровано на рис. 3 і 4. При цьому інтенсивність пульсацій поздовжньої швидкості більшою мірою знижується в області низьких частот, особливо в пристінній або у внутрішній області примежового шару. Для турбулентного режиму течії, якому відповідають числа Рейнольдса $Re_x = 250000$ та $Re_d = 40000$, максимальне зниження спектральних рівнів майже в 5–6 разів спостерігається в частотному діапазоні $St \approx (0.03 - 0.06)$ на висоті $y/d = 0.05$ від площини пластини над центром овальної лунки.

У ближньому сліді заглиблення позаду його кормової частини на висоті $y/d = 0.05$ від поверхні пластини максимальна інтенсивність поля швидкості спостерігається, головним чином, в низькочастотній області спектра за передньою сферичною частиною овальної лунки у вимірювальній точці з координатами $x/d = 0.4$ і $z/d = -0.5$. У той же час, позаду кормової частини заглиблення (крива 4) спектр пульсацій швидкості має найбільші значення в високочастотній області. Це вказує на те, що в цій області ближнього сліду лунки переважають дрібномасштабні вихрові структури, генеруючи високочастотні пульсації швидкості і тиску, які формуються всередині овального заглиблення і викидаються назовні в пристінну область примежового шару. Більше того, необхідно відзначити, що вздовж всієї кормової частини овального заглиблення в області його ближнього

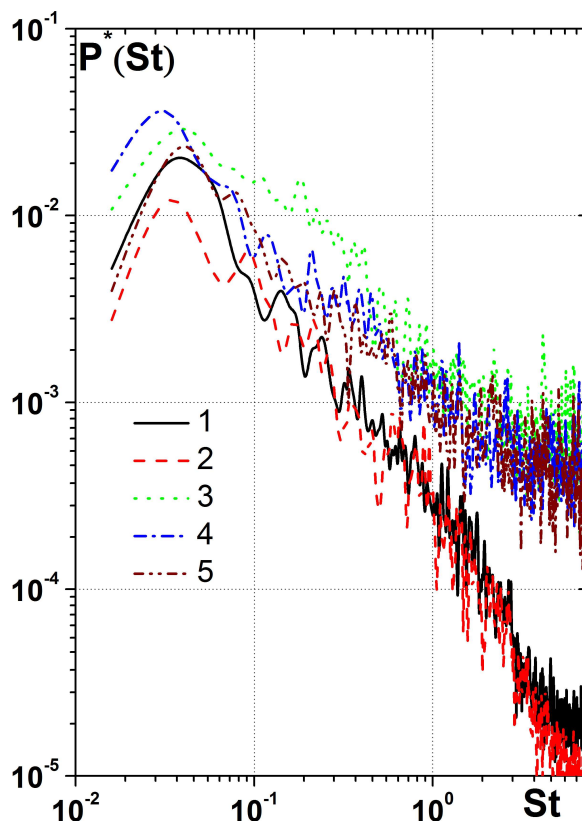


Рис. 4. Спектральні щільності потужності пульсацій поздовжньої швидкості у зовнішній області примежового шару над поверхнею пластини з овальною лункою

сліду спостерігається істотне зростання високочастотних складових спектра швидкості щодо пристінної області примежового шару, який сформований над гладкою плоскою пластинкою, що показано на рис. 3. Так, в області частот порядку $St \approx (3 - 6)$ інтенсивність пульсацій поздовжньої швидкості зростає майже на два порядки в порівнянні з непорушеним примежовим шаром. У той же час інтенсивність низькочастотних компонент, які генеруються великомасштабними вихровими структурами, що породжують пульсації швидкості, а отже і пульсації тиску у відповідності з рівнянням Пуассона, зростає тільки в 5–6 разів у ближньому сліді заглиблення (див. рис. 3). Крім того, в цьому місцезнаходженні приблизно в такій же мірі зростають і інтенсивності вихрових структур проміжних масштабів, які генерують пульсації поздовжньої швидкості в частотному діапазоні $0.2 < St < 2$.

У зовнішній частині примежового шару викид вихрових структур з овального заглиблення та їх взаємодія з обтічною поверхнею і когерентни-

ми вихровими структурами, властивими самому примежовому шару, призводить до істотної зміни спектральних залежностей пульсацій поздовжньої швидкості, що проілюстровано на рис. 4. Тут, як і в пристінній області примежового шару, в ближньому сліді локальної лунки спостерігається значне зростання спектральних рівнів пульсацій швидкості, особливо в високочастотній області, які сягають майже 80-кратного перевищення рівнів непорушеного примежового шару. Також необхідно сказати, що в зовнішній частині примежового шару в області частот $St \approx 0.2$ найбільші інтенсивності пульсацій швидкості спостерігаються в серединному перерізі овального заглиблення, що обумовлено викидом вихрових систем назовні з лунки.

Таким чином, у ближньому сліді овального заглиблення, через наявність викидів вихрових систем з заглиблення та особливостей його обтікання, в спектральних залежностях пульсацій поздовжньої швидкості спостерігається інтенсивне зростання спектральних рівнів, особливо в високочастотній області. При цьому більш істотно складові спектра на високих частотах зростають позаду кормової частини овального заглиблення за напрямком потоку, що обумовлено інтенсивним викидом дрібномасштабних вихрових структур з цієї частини лунки. В середній і особливо в передній сферичній частині овального заглиблення більшою мірою проявляють себе великомасштабні структури, генеруючи при цьому інтенсивні низькочастотні пульсації швидкості. В результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що викид вихрових систем різних масштабів, напрямків руху і швидкостей переносу назовні з овального заглиблення, а також взаємодія вихрових структур зсувного шару, що формуються вздовж отвору заглиблення, з кормовою стінкою приводить до істотного росту спектральних характеристик поля пульсацій швидкості як в пристінній, так і в зовнішній області примежового шару безпосередньо позаду заглиблення в його ближньому сліді.

З віддаленням від заглиблення примежовий шар поступово відновлюється, що проілюстровано на рис. 5 і 6, на яких показані зміни спектральних щільностей потужності пульсацій поздовжньої швидкості вздовж пластини позаду овального заглиблення в зовнішній частині примежового шару. Результати, представлені на рис. 5, виміряні позаду передньої сферичної частини заглиблення в зовнішній частині примежового шару для $y/d=0.35$ і чисел Рейнольдса $Re_x=250000$ та $Re_d=40000$. Крім того, для співставлення тут же

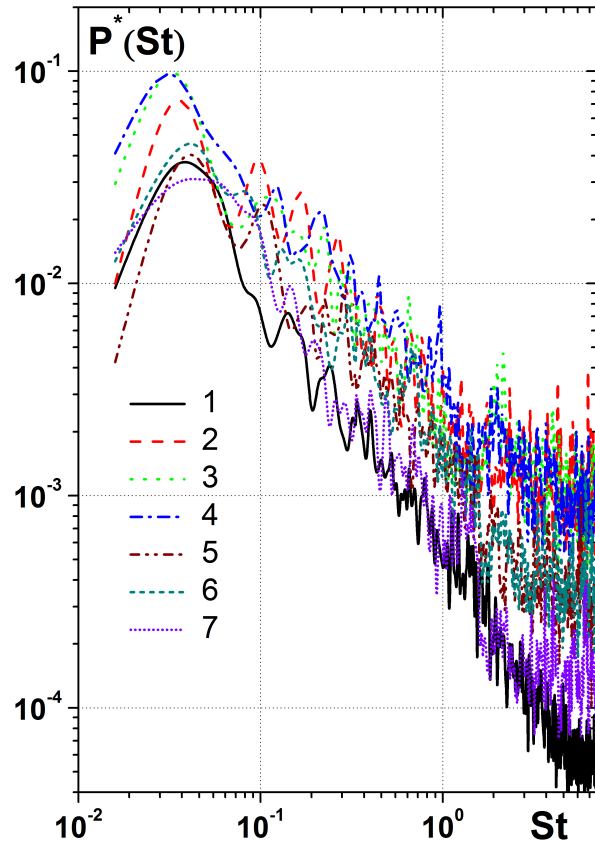


Рис. 5. Спектри пульсацій поздовжньої швидкості в зовнішній частині примежового шару позаду передньої сферичної частини овальної лунки

наведена спектральна залежність поля пульсацій поздовжньої швидкості, отримана в зовнішній частині примежового шару, який непорушений локальним заглибленням для тієї ж висоти над поверхнею обтічної пластини, а саме $y/d=0.35$. Отже, крива 1 виміряна перед овальним заглибленням у вимірювальній точці з координатами $x/d = -1.30$; $y/d=0.35$ і $z/d=0$; крива 2 виміряна позаду заглиблення вздовж бокового перетину з координатами $x/d=1.25$; $y/d=0.35$ і $z/d = -0.5$; крива 3 - $x/d=2.50$; $y/d=0.35$ і $z/d = -0.5$; крива 4 - $x/d=3.75$; $y/d=0.35$ і $z/d = -0.5$; крива 5 - $x/d=5.00$; $y/d=0.35$ і $z/d = -0.5$; крива 6 - $x/d=6.25$; $y/d=0.35$ і $z/d = -0.5$ і крива 7 - $x/d=7.50$; $y/d=0.35$ і $z/d = -0.5$. Аналізуючи отримані результати, можна сказати, що в даному перетині позаду овального заглиблення, так само як і в інших перетинах, спектральні щільності потужності пульсацій поздовжньої швидкості істотно перевищують аналогічні дані, отримані в зовнішній області непорушеного примежового шару, особливо в області високих частот. Зі збільшенням

відстані від заглиблення ця різниця зменшується, оскільки вихрові структури в ході своєї еволюції руйнуються і вироджуються, врешті-решт, настає автоколивальний режим, що задовольняє каскадному процесу трансформації когерентних вихорів, який притаманний вихроутворенню в прилежовому шарі, непорушеному локальними неоднорідностями обтічної поверхні. Так, на відстані близько трьох діаметрів заглиблення у зовнішній області прилежового шару реєструються найвищі рівні пульсацій швидкості на низьких частотах. Це обумовлено тим, що в даному місцезнаходженні великомасштабні вихрові структури, що викидаються з овального заглиблення з його передньої сферичної частини, досягають зовнішньої межі прилежового шару, інтенсифікуючи поле швидкостей на низьких частотах. З віддаленням від заглиблення інтенсивність цих вихрових структур, а також дрібномасштабних вихорів зменшується, а, отже, різниця спектральних рівнів пульсацій швидкості непорушеним прилежовим шаром зникає, що показано на рис. 5. На відстані, що перевищує 7–8 діаметрів овальної лунки заглибленням 0.22 і швидкості потоку 0.25 м/с прилежовий шар відновлюється і приймає характер свого розвитку, який притаманний непорушеному.

У симетричному перерізі овального заглиблення позаду його кормової сферичної частини зміни спектральних характеристик пульсацій поздовжньої швидкості у зовнішній області прилежового шару представлені на рис. 6 також для швидкості потоку 0.25 м/с. На цьому малюнку позначення кривих наступні: крива 1 виміряна перед заглибленням у вимірювальній точці з координатами $x/d = -1.30$; $y/d=0.35$ і $z/d=0.5$; крива 2 отримана для $x/d=1.25$; $y/d=0.35$ і $z/d=0.5$; крива 3 – $x/d=2.50$; $y/d=0.35$ і $z/d=0.5$; крива 4 – $x/d=5.00$; $y/d=0.35$ і $z/d=0.5$ і крива 5 – $x/d=7.50$; $y/d=0.35$ і $z/d=0.5$. Також, як позаду передньої сферичної частини заглиблення і в його ближньому сліді, в даному перетині можна відзначити значне зростання спектральних рівнів у всьому досліджуваному діапазоні частот, але особливо в високочастотній області спектрів пульсацій поздовжньої швидкості. Максимальний внесок у низькочастотну область спектра спостерігається на відстані порядку 2–3 діаметрів заглиблення, де великомасштабні вихрові структури, що викидаються з лунки, досягають зовнішньої межі прилежового шару. Також зі збільшенням відстані від заглиблення прилежовий шар відновлюється, особливо високими темпами в області високих частот. Але на відміну від раніше розглянутого бічного перетину овальної лунки, в даному випадку відновлення

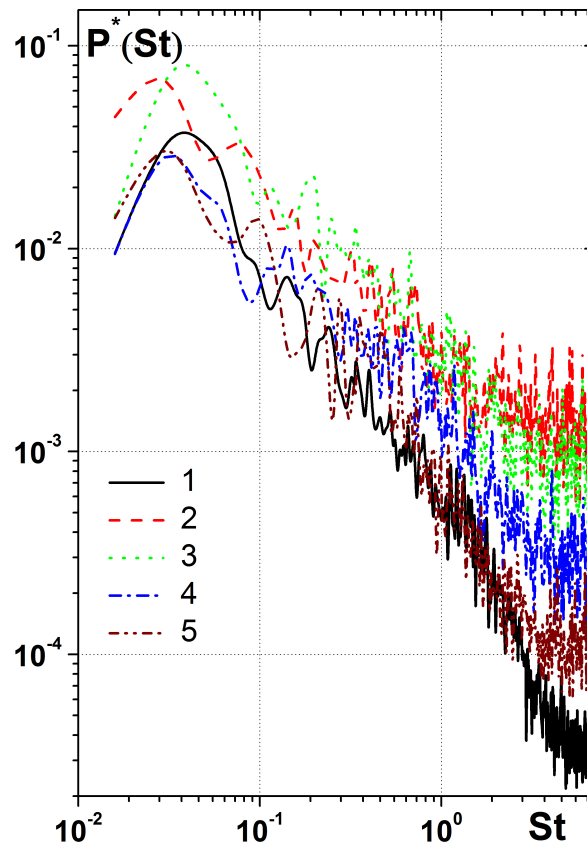


Рис. 6. Спектри пульсацій поздовжньої швидкості в зовнішній частині прилежового шару позаду кормової сферичної частини овальної лунки

зовнішньої області прилежового шару на відстані $x/d=7.50$ не настільки відчутно. Це обумовлено тим, що тут відстань між вимірювальною точкою і кормовим краєм овального заглиблення на $0.5 d$ менша, оскільки лунка знаходиться під кутом 60° до набігаючого потоку. Тому в області високих частот різниця між спектральними рівнями кривих 5 і 1 на рис. 6 більша, ніж між кривими 7 і 1 на рис. 5.

Узагальнюючи результати аналізу експериментальних даних, можна стверджувати, що зі збільшенням відстані від овального заглиблення досліджуваної геометрії, швидкості обтікання 0.25 м/с і чисел Рейнольдса $Re_x=250000$ та $Re_d=40000$ прилежовий шар, порушений присутністю заглиблення на обтічній плоскій поверхні, поступово відновлюється. При цьому, максимальне порушення зовнішньої області прилежового шару великомасштабними вихровими системами, які генерують низькочастотні пульсації швидкості, відбувається на відстані близько 2–3 діаметрів заглиблення, де великомасштабні вихори досягають зовні-

шньої області примежового шару. Слід зазначити, що темп відновлення високочастотної частини спектру пульсацій поздовжньої швидкості, безсумнівно, вище, ніж низькочастотної і примежовий шар повністю відновлюється на відстані більше 10 діаметрів овальної лунки для даного режиму обтікання.

ВИСНОВКИ

На підставі отриманих експериментальних результатів з дослідження впливу овального заглиблення на поле швидкості над пластиною можна зробити такі висновки:

1. Спостерігається інтенсивне зростання спектральних рівнів пульсацій поздовжньої швидкості, головним чином, в високочастотній області спектру через наявність викидів вихрових систем з заглиблення та особливостей його обтікання.

2. Зі збільшенням відстані від заглиблення примежовий шар відновлюється, особливо високими темпами в області високих частот.

3. Установлено, що вздовж всієї кормової частини овального заглиблення в області його ближнього сліду спостерігається істотне зростання високочастотних складових спектра швидкості щодо пристінної області примежового шару, який сформований над гладкою плоскою пластиною.

1. Быстров Ю. А., Исаев С. А., Кудрявцев Н. А., Леонтьев А. И. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб.– СПб: Судостроение, 2005.– 392 с.
2. Халатов А. А. Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок).– К.: ИТТФ НАНУ, 2005.– 140 с.
3. Гортышов Ю. Ф., Попов И. А., Олишнев В. В., Щелчков А. В., Каськов С. И. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования.– Казань: Центр инновационных технологий, 2009.– 536 с.
4. Терехов В. И., Калинина С. В. Структура течения и теплообмен при обтекании единичной сферической каверны. Состояние вопроса и проблемы (Обзор) // Теплофизика и аэромеханика.– 2002.– 9, № 4.– С. 497–521.
5. Кикнадзе Г. И., Гачечиладзе И. А., Алексеев В. А. Самоорганизация смерчеобразных струй в потоках вязких сплошных сред и интенсификация теплообмена, сопровождающая это явление.– М.: Бассет, 2005.– 82 с.
6. Исаев С. А., Леонтьев А. И., Корнев Н. В. Численное моделирование смерчевого теплообмена при обтекании поверхностей с лунками (состояние и перспективы) // VI Минский Межд. Форум по Теплообмену, ММФ 2008 : сб. докл.– Минск (Беларусь).– 2008.– С. 1–9.
7. Ligrani P. M., Harrison J. L., Mahmood G. I., Hill M. L. Flow structure due to dimple depressions on

a channel surface // Phys. Fluids.– 2001.– 13, № 11.– P. 3442–3451.

8. Wang C.-C., Chen K.-Y., Liaw J.-S., Tseng C.-Y. An experimental study of the air-side performance of fin-and-tube heat exchangers having plain, louver, and semi-dimple vortex generator configuration // Int. J. Heat and Mass Transfer.– 2015.– 80.– P. 281–287.
9. Isaev S., Voropaiev G., Grinchenko V., Sudakov A., Voskoboinick V., Rozumnyuk N. Drag reduction of lifting surfaces at the use of oval dimples as vortex generators // Abstract of the European Drag Reduction and Flow Control Meeting "EDRFCM 2010" 2-4 September, 2010.– Kyiv, Ukraine.– 2010.– P. 7–8.
10. Xie Y., Qu H., Zhang D. Numerical investigation of flow and heat transfer in rectangular channel with teardrop dimple/protrusion // Int. J. Heat and Mass Transfer.– 2015.– 84.– P. 486–496.
11. Kiknadze G. I., Gachechiladze I. A., Gorodkov A. Yu. Self-organization of tornado-like jets in flows of gases and liquids and the technologies utilizing this phenomenon // Proceedings of the ASME 2009 Heat Transfer Summer Conference HT2009 July 19-23, 2009.– San Francisco, California USA.– HT2009-88644.– P. 1–14.
12. Воскобойник А. В., Воскобойник В. А., Исаев С. А., Жданов В. Л., Корнев Н. В., Турнов Й. Бифуркация вихревого течения внутри сферической лунки в узком канале // Прикладна гідромеханіка.– 2011.– 13, № 4.– С. 3–21.
13. Voskoboinick V., Voskoboinick A. Noise and separation reduction by the dimpled surfaces // Proc. Intern. Conf. and Exhibition on Automobile Engineering, September 01-02, 2015, Valencia, Spain.– 2015.– 4, Issue 1.– P. 51.
14. Воскобойник В. А., Воскобойник А. В., Воскобойник О. А. Генерация вихорів парою овальних лунок на обтічній плоскій поверхні // Прикладна гідромеханіка.– 2015.– 17, № 3.– С. 10–17.
15. Коваленко Г. В., Халатов А. А. Границы режимов течения в углублениях на плоской поверхности, имеющих форму сферических сегментов // Прикладна гідромеханіка.– 2008.– 10, № 1.– С. 23–32.
16. Voskoboinick V., Kornev N., Turnov J. Study of near wall coherent flow structures on dimpled surfaces using unsteady pressure measurements // Flow Turbulence Combust.– 2013.– 90, № 2.– P. 86–99.
17. Turnov J., Kornev N., Zhdanov V., Hassel E. Flow structures and heat transfer on dimples in a staggered arrangement // Int. J. Heat and Fluid Flow.– 2012.– 35, № 3.– P. 168–175.
18. Исаев С. А., Леонтьев А. И., Щелчков А. В., Гульцова М. Е. Анализ перестройки струйно-вихревой структуры отрывного турбулентного течения в сферической лунке на стенке узкого канала при увеличении ее глубины и интенсификации вторичного течения в ней // Инж.-физ. ж.– 2015.– 88, № 5.– С. 1–5.
19. Bai L., Bai S. Frictional performance of a textured surface with elliptical dimples: Geometric and distribution effects // Tribology Transactions.– 2014.– 57, № 6.– P. 1122–1128.
20. Voskoboinick V., Voskoboinick A., Stepanovitch V. Generation of vortex structures by pair oval dimples on flat plate // Proc. European Drag Reduction and Flow Control Meeting – EDRFCM 2015, March 23–26, 2015.– Cambridge, UK.– 2015.– P. 43–44.
21. Воскобойник В. А., Воскобойник А. В. Структура течії та пульсації тиску усередині овальної лунки // Наукоємні технології.– 2012.– 13, № 1.– С. 12–18.