УДК 532.5.517
DOI: 10.20535/1810-0546.2017.1.91517

В.М. Турик[1*], В.А. Воскобійник[2], А.В. Воскобійник[2]
[1]КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна
[2]Інститут гідромеханіки НАН України, Київ, Україна

ВПЛИВ ЛОКАЛЬНИХ ПОПЕРЕЧНО ОБТІЧНИХ ПЕРЕШКОД НА ПУЛЬСАЦІЇ ШВИДКОСТІ ТА ПРИСТІННОГО ТИСКУ

Background. Developing means to enhance the effectiveness of mass and heat transfer processes on streamlined surfaces and their hydroacoustic qualities in the objects of power, aerospace and marine engineering.
Objective. The purpose of the research is to determine the formation features and space-time characteristics of the velocity and wall-pressure fluctuation fields in flows above and on the streamlined surfaces with local obstacles as the cross-streamlined half-cylindrical trench on a flat surface and circular obstacle on the flexible longitudinal hydroacoustic antenna surface.
Methods. The research was carried out by means of hot-wire and hydroacoustic measuring in flows on streamlined obstacles and spectral analysis of statistical characteristics of the velocity and wall-pressure fluctuations in investigating systems.
Results. It has been determined experimentally the zones and conditions of vortices formation by various frequency ranges, the extremes of power spectrum densities of the velocity and wall-pressure fluctuations, vortex interaction, ejections and stalls near streamlined surfaces with local obstacles at rather wide Reynolds number ranges.
Conclusions. Basing on received space-time characteristics of the velocity and wall-pressure fluctuations and discovered typical features of their spectra the hydromechanical mechanisms of heat and mass exchange and hydroacoustic processes in the investigated systems have been determined. The results of the study can be used for designing of such systems and they reveal the perspective of directed control by mentioned processes for increase of their efficiency.
Keywords: half-cylindrical trench; circular obstacle; velocity fluctuation field; wall-pressure fluctuations; energy spectra; hydroacoustic measurements; heat and mass exchange.

Вступ

Локальні перешкоди у вигляді опуклостей і заглиблень різноманітної форми на обтічній поверхні у багатьох випадках є джерелами збурення потоку та псевдозвукових і акустичних випромінювань у навколишнє середовище. Параметри кінематичних і гідроакустичних полів залежать від геометрії неоднорідності обтічної поверхні, режимів обтікання, властивостей середовища та низки інших чинників. Локальні перешкоди, розміщені в примежовому шарі, що утворюється на тілах обтікання, впливають на структуру течії та когерентні вихрові структури, які формують цей шар, генеруючи інтенсивні пульсації швидкості та тиску [1, 2]. Крім того, у заглибленнях і в околі опуклостей утворюються властиві їм вихрові системи, які впливають на тепломасоперенос у потоках і їх гідродинамічні та гідроакустичні характеристики.

Під час обтікання поверхні, наприклад, із прямокутною траншеєю, відбувається відрив примежового шару з передньої кромки траншеї, і згодом сформований зсувний шар взаємодіє з кормовою стінкою траншеї. У результаті частина вихрових структур зсувного шару спрямовується всередину траншеї, а частина викидається назовні і, взаємодіючи з вихровими структурами примежового шару, зноситься униз за течією уздовж обтічної поверхні. Усередині траншеї утворюється циркуляційна течія, яка породжує квазістійкі великомасштабні вихори (один вихор або декілька залежно від розмірів траншеї, її конфігурації та швидкості потоку, або числа Рейнольдса), а також вторинні дрібномасштабні вихори. Періодично частина рідини з траншеї викидається назовні, порушуючи природний хід розвитку примежового шару [3, 4].

При обтіканні перешкоди у вигляді виступу над поверхнею за відповідних умов також має місце режим відривного обтікання. Попереду і позаду поперечно обтічної перешкоди утворюються області відриву і приєднання примежового шару, всередині яких формуються циркуляційні течії. Позаду виступу при перевищенні критичних чисел Рейнольдса відриваються вихрові системи, які взаємодіють із вихровими структурами приєднаного за перешкодою примежового шару. Області відриву і приєднання примежового шару, а також взаємодії зсувного шару зі стінкою за-

*corresponding autor: turick46@gmail.com

глиблення є зонами інтенсивних полів пульсацій (швидкості, тиску, завихреності, температури, тощо) [5–7]. Механізми їх утворення потребують детального вивчення.

Мета роботи

Мета експериментальних досліджень – визначення особливостей формування і просторово-часових характеристик полів пульсацій швидкості та пристінного тиску в потоках уздовж поверхонь із локальними перешкодами у вигляді поперечно обтічних напівциліндричної канавки на плоскій стінці та кільцевої перешкоди на поверхні гнучкої видовженої гідроакустичної антени.

Експериментальна установка і методика досліджень

Експериментальні дослідження структури течії у поперечно обтічному напівциліндричному заглибленні, а також вивчення його впливу на примежовий шар, утворений над пластиною із заглибленням, проводилися в аеродинамічній трубі відкритого типу. Аеродинамічна труба (рис. 1) мала внутрішній діаметр $102\cdot10^{-3}$ м, а її вимірювальна ділянка довжиною близько $600\cdot10^{-3}$ була виготовлена прозорою для проведення візуальних досліджень. Детальнішу інформацію про експериментальний стенд можна отримати в роботі [8].

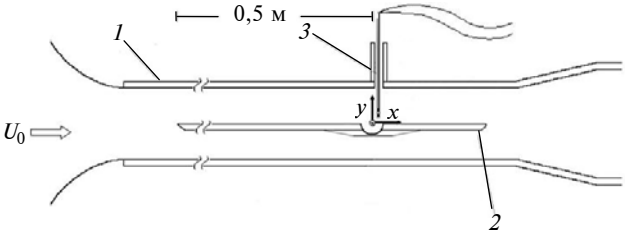

Рис. 1. Схема аеродинамічної труби та система координат: *1* – вимірювальна ділянка; *2* – гідравлічно гладка пластина з напівциліндричною канавкою; *3* – обтічна державка з дротяним датчиком однониткового термоанемометра

В осьовому перерізі вимірювальної ділянки аеродинамічної труби, в її горизонтальній площині уздовж поздовжньої осі, монтувалася плоска гідравлічно гладка пластина. На відстані 0,5 м від заокругленої вхідної крайки пластини було зроблено напівциліндричне заглиблення радіусом $R = 9{,}25\cdot10^{-3}$ м та завдовжки $L = 81\cdot10^{-3}$ м. Поздовжня вісь заглиблення розміщувалась перпендикулярно швидкості набігаючого потоку (U_0).

У верхній частині вимірювальної ділянки аеродинамічної труби в спеціально зробленому люку монтувався координатний пристрій. У ньому, через відповідні державки та вузли кріплення, встановлювались дротяні одноніткові термоанемометри. У дослідженнях використовувались датчики з вольфрамового дроту діаметром $5\cdot10^{-6}$ м і довжиною $1\cdot10^{-3}$ м. Координатний пристрій було обладнано мікрометричними голівками, які забезпечували лінійні переміщення датчиків з точністю до $10\cdot10^{-6}$ м. Як вимірювальні засоби використовувався комплект термоанемометричної апаратури фірми “DISA Elektronik” (Данія), що працював у режимі постійної температури.

Дослідження проводились для швидкості набігаючого потоку U_0 від 1 до 20 м/с, якій відповідали числа Рейнольдса, розраховані за довжиною пластини до переднього краю заглиблення: $\mathrm{Re}_x = U_0 x/\nu$ від $3{,}2\cdot10^4$ до $6{,}4\cdot10^5$, та розраховані за радіусом заглиблення $\mathrm{Re}_R = U_0 R/\nu$ від 600 до 12000, де ν – кінематичний коефіцієнт в’язкості рідини. В дослідах товщина примежового шару перед заглибленням (δ) змінювалася від $2{,}6\cdot10^{-3}$ до $11{,}3\cdot10^{-3}$ м, а товщина втрати імпульсу (θ) – від $0{,}25\cdot10^{-3}$ до $1{,}5\cdot10^{-3}$ м.

Вивчення впливу локальної перешкоди на структуру примежового шару і породжуваного ним гідродинамічного шуму проводилось на гнучкій видовженій гідроакустичній антені, яку буксирували в гідродинамічному каналі довжиною 4000 м, шириною 40 м і глибиною більше 4 м. На поверхні антени діаметром $2a = 29\cdot10^{-3}$ м встановлювалися кільцеві перешкоди круглого перерізу діаметром $d = 1{,}5\cdot10^{-3}$, $3\cdot10^{-3}$ та $6\cdot10^{-3}$ м, які обтікав поперечний потік (рис. 2).

Гнучку видовжену антену завдовжки L = 20 м буксирували катером зі швидкістю обтікання від 3 до 5 м/с, при числі Рейнольдса, розрахованому за радіусом антени: $\mathrm{Re}_a = aU_0/\nu$ від $4{,}3\cdot10^4$ до $7{,}2\cdot10^4$. Урівень з обтічною поверхнею антени встановлювався ансамбль мініатюрних п’єзокерамічних датчиків пульсацій тиску (S), діаметр чутливої поверхні яких становив $d_s = 1{,}6\cdot10^{-3}$ м.

Ці датчики розміщувалися уздовж обтічної поверхні антени, як показано на рис. 2, і не порушували структури примежового шару та відривної течії. Детальніша інформація відносно цих досліджень і параметрів гідроакустичної антени може бути отримана з роботи [9].

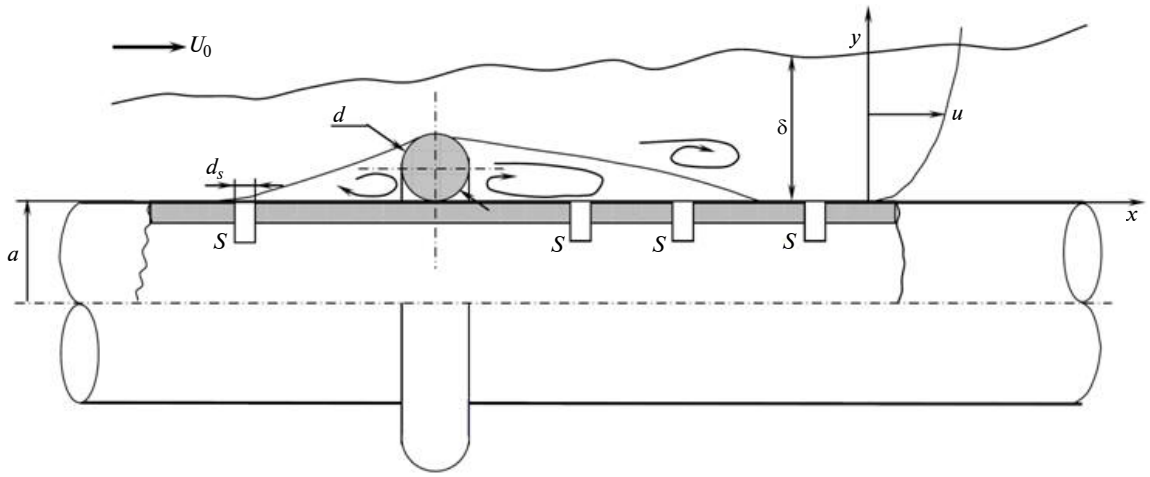

Рис. 2. Схема вимірювальної ділянки антени з кільцевою перешкодою круглого перерізу

Калібрування дротяних термоанемометрів і датчиків пульсацій пристінного тиску проводилися до початку досліджень або установки в антену, періодично під час досліджень та після закінчення експериментів як абсолютним, так і відносним методами або методом зіставлення з еталонним датчиком за спеціально розробленими програмами та методиками.

Статистична обробка й аналіз експериментальних результатів проводились із використанням апарату математичної статистики та теорії ймовірності. Кореляційні та спектральні одно- і багатовимірні характеристики обчислювались із застосуванням прямого і зворотного швидкого перетворення Фур'є на відповідній апаратурі та на спеціалізованих спектроаналізаторах фірми "Brüel & Kjær" (Данія), а також на універсальних обчислювальних комплексах.

Похибка досліджень інтегральних та усереднених даних становить не більше 10 % (з надійністю 0,95, або 2σ). Похибка досліджень спектральних характеристик не перевищувала 1-2 дБ у діапазоні частот від 0,01 Гц до 12,5 кГц для пульсацій швидкості і від 2 до 1250 Гц для пульсацій пристінного тиску.

Результати досліджень

Наявність локальної перешкоди на обтічній поверхні у вигляді поперечного обтічного напівциліндричного заглиблення призводить до певних змін структури примежового шару не лише над заглибленням та позаду нього, але і перед ним. Виявлено, що у профілях поздовжньої швидкості, виміряних в осьовому перерізі пластини із заглибленням, з'являються локальні області їх викривлення [10]. У примежовому шарі утворюються зони підвищення і зниження середньої та пульсаційної складових поздовжньої швидкості, які чергуються. Це зумовлено дією течії, що формується усередині заглиблення, на структуру примежового шару. Профіль середньої поздовжньої швидкості, який отримано для найменшої досліджуваної швидкості обтікання 1 м/с та для числа Рейнольдса у точці відриву $\mathrm{Re}_x = 3{,}2\cdot10^4$, близький до профілю Блазіуса, який притаманний ламінарному режиму течії. Зі збільшенням швидкості обтікання до 10 і 20 м/с і чисел Рейнольдса до $\mathrm{Re}_x = 3{,}2\cdot10^5$ та $\mathrm{Re}_x = 6{,}4\cdot10^5$ профілі швидкості наближаються до форми, притаманної турбулентному режиму обтікання (закон "однієї сьомої") зі зростанням їх наповненості зі збільшенням U_0. Виявлено, що з наближенням до заглиблення, незалежно від режиму обтікання, відбувається зменшення наповненості профілів поздовжньої швидкості, що вказує на гальмівну дію локального заглиблення на набігаючий потік, особливо на пристінну область примежового шару.

Як для ламінарного, так і для турбулентного режиму обтікання з проходженням переднього краю заглиблення течія прискорюється. Далі над заглибленням чергуються зони прискорення і гальмування для обох режимів обтікання. Для $U_0 = 1$ м/с найбільше значення усередненої складової швидкості $U_{\max}$ спостерігається вздовж серединного перерізу напівциліндричної канавки ($z = 0$) при координаті $x = -0{,}3R$, найменше $U_{\min}$ – при $x = 0{,}8R$, а для середньоквадратичних пульсацій швидкості $u'_{\max}$ – при $x = -0{,}3R$ та $u'_{\min}$ – при $x = 0$. Для $U_0 = 10$ м/с, відповідно, $U_{\max}$ – при $x = 0$ та $U_{\min}$ –

при $x = -0{,}9R$, а $u'_{\max}$ – при $x = 0{,}7R$ і $u'_{\min}$ – при $x = -0{,}9R$ (на рівні $y = 0{,}1\delta$). Для $U_0 =$ 20 м/с $U_{\max}$ – при $x = 0$ і $U_{\min}$ – при $x = 0{,}5R$, а $u'_{\mu\alpha\xi}$ – при $x = 0{,}7R$ та $u'_{\min}$ – при $x = -0{,}9R$.

Визначення поздовжніх та поперечних компонент поля швидкості дало змогу побудувати лінії однакових середніх швидкостей і пульсацій швидкості, завихреності, а також потоку завихреності як у примежовому шарі над пластиною із заглибленням, так і в самому напівциліндричному заглибленні. На підставі таких представлень характеристик течії вдалося виявити квазістійкі в статистичному сенсі вихрові системи, які притаманні внутрішнім течіям у досліджуваних заглибленнях [10]. Під час відриву примежового шару утворюється зсувний шар, який із просуванням униз за потоком розширюється у поперечному напрямку. Нижня та верхня області зсувного шару мають хвилеподібну форму. В зоні взаємодії з кормовою стінкою заглиблення нижня частина зсувного шару роздвоюється. Перша частина спрямовується вгору на вихід із заглиблення, а друга йде уздовж бічної стінки у придонну область заглиблення. Перша частина зсувного шару, яка виходить по дотичній назовні із заглиблення, зустрічається з верхньою частиною зсувного шару та примежовим шаром, який відірвався, викликаючи їх гальмування і деяке викривлення траєкторії руху рідини поблизу кормової стінки заглиблення. Друга частина зсувного шару (нижня), яка після взаємодії з кормовою стінкою спрямувалася до дна заглиблення і яку Д. Рокуелл [3] назвав пристінним струменем, проходить придонну область і підіймається вгору уздовж передньої стінки заглиблення. Ця частина зсувного шару, дійшовши до області відриву примежового шару, об'єднується зі знову сформованим зсувним шаром і прямує знову до кормової стінки заглиблення. Замкнена частина внутрішньої течії в заглибленні утворює циркуляційну зону, усередині якої формується великий квазістійкий первинний вихор. Як показали дослідження, для малої швидкості обтікання пластини із заглибленням $U_0 = 1$ м/с первинний великомасштабний вихор займає майже половину об'єму заглиблення і має витягнуту в поздовжньому напрямку форму. Він дещо нахилений відносно поздовжньої осі пластини. Для швидкості $U_0 =$ = 10 м/с циркуляційна зона займає одну третину об'єму заглиблення ближче до кормової стінки, а для швидкості $U_0 = 20$ м/с первинний вихор стає ще компактнішим і набуває форми еліпса, займаючи нижню кормову частину заглиблення, як і в спостереженнях [3] для турбулентного режиму обтікання пластини з прямокутним заглибленням. Поблизу кутових країв заглиблення формуються вторинні дрібномасштабні вихори, що утворюють вихрові пари. Зі збільшенням швидкості обтікання в придонній області заглиблення біля місць відділення циркуляційної зони від поверхні заглиблення або в області зіткнення пристінного струменя (за Рокуеллом) із низькошвидкісною рідиною на дні заглиблення з'являється ще одне джерело зародження вторинних дрібномасштабних вихорів.

Спектральне уявлення про поле пульсацій поздовжньої швидкості у примежовому шарі та усередині заглиблення може бути отримане з рис. 3. Тут зображено залежності спектральних густин потужностей пульсацій швидкості, які нормовані зовнішніми змінними (товщиною примежового шару δ та U_0), а саме $P^*(\omega) =$ $= P(\omega)U_0/(\overline{u'^2}\delta)$, від нормованої частоти $\omega^* =$ $= \omega\delta/U_0$, де $\omega = 2\pi f$ – колова частота. На рис. 3, *а* крива *1* відображає результати роботи [7] для турбулентного примежового шару на пластині, який має місце для $\mathrm{Re}_\theta = 2000$ та $y/\delta =$ $= 0{,}005$; криві *2–5* – наші результати, а саме: крива *2* отримана для турбулентного примежового шару в перерізі $x = -R$ (перед заглибленням) для $U_0 = 20$ м/с, $\mathrm{Re}_\theta = 320$ та $y/\delta = 0{,}4$; крива *3* – спектральна густина потужності пульсацій поздовжньої швидкості усередині заглиблення для $U_0 = 20$ м/с, $x/R = -0{,}97$; $y/R = -0{,}11$ та $z = 0$; крива *4* – $x = 0$; $y/R = -0{,}87$; $z = 0$; крива *5* – $x/R = 0{,}97$; $y/R = -0{,}16$; $z = 0$.

Спектральні густини потужності пульсацій поздовжньої швидкості у турбулентному примежовому шарі в діапазоні низьких частот зростають пропорційно квадрату частоти. На частоті близько $f = 0{,}05U_0/(2\pi\delta)$ вони мають максимум, а згодом спадають в інерційній, або універсальній, області обернено пропорційно до частоти, а в пристінній області примежового шару – пропорційно ω^{-3} і навіть ω^{-5} [11]. Отримані результати відрізняються від даних [7] в області низьких частот через дію перешкоди і тому, що в роботі [7] результати отримані для пристінної області турбулентного примежового шару, який утворюється за більших значень числа Рейнольдса. В області високих частот має місце підвищена інтегруюча здатність наших датчиків, що працюють як просторовий або

хвильовий фільтр. Це зумовлено тим, що в отриманих результатах безрозмірна довжина нитки термоанемометра, яка нормується внутрішніми змінними (кінематичною в'язкістю ν та динамічною швидкістю u_τ), на порядок більша безрозмірної довжини нитки датчиків, які використовувались у роботі [7], що обмежує їх роздільну здатність в області високих частот. Як показують досліди, для внутрішньої течії у заглибленні характерним у спектрах швидкості стає зміщення максимальної енергії пульсацій в область низьких частот і поява чітко окреслених екстремумів (максимумів) у спектральних залежностях, які обумовлені наявністю квазістійких вихорів усередині заглиблення.

На рис. 3, *б* показані залежності спектральних густин потужності пульсацій поздовжньої швидкості, нормованих, як і на рис. 3, *а*, зовнішніми змінними, над заглибленням уздовж поверхні пластини, тобто при $y = 0$ та $z = 0$, для швидкості потоку $U_0 = 20$ м/с. Крива *1* відповідає перерізу $x/R = -0{,}97$; крива *2* – $x/R = -0{,}32$; крива *3* – $x = 0$; крива *4* – $x/R = 0{,}32$ і крива *5* – $x/R = 0{,}97$. Ці залежності показують, що в безпосередній близькості від зони відриву примежового шару спектр пульсацій швидкості ідентичний тому, який є характерним саме для турбулентного примежового шару (див. криву *1* на рис. 3, *б* та криві *1* і *2* на рис. 3, *а*). З віддаленням від зони відриву примежового шару спектральні складові у зсувному шарі більше наповнюються низькочастотними компонентами. По досягненні осьового перерізу заглиблення та далі над кормовою його частиною характер поведінки спектральних густин стає схожим на той, який мав місце для поля швидкостей усередині заглиблення. На підставі цього та раніше наведених даних профілів середньої поздовжньої швидкості та пульсацій цієї швидкості, а також контурів рівних швидкостей встановлено, що в перерізі $-0{,}32 < x/R < 0$ відбувається викид вихрової системи із заглиблення з частотою близько 3–4 Гц. Це підтверджується візуальними дослідженнями за допомогою мастила, що згорало на нагрітому дроті, який встановлений перед заглибленням, та генерувало смужку або струмінець диму [12].

Частотні спектри поля пульсацій пристінного тиску на поверхні гнучкої видовженої антени з кільцевою перешкодою показані на рис. 4. На цьому рисунку спектральні густини потужностей пульсацій пристінного тиску нормовані квадратом середнього значення пульса-

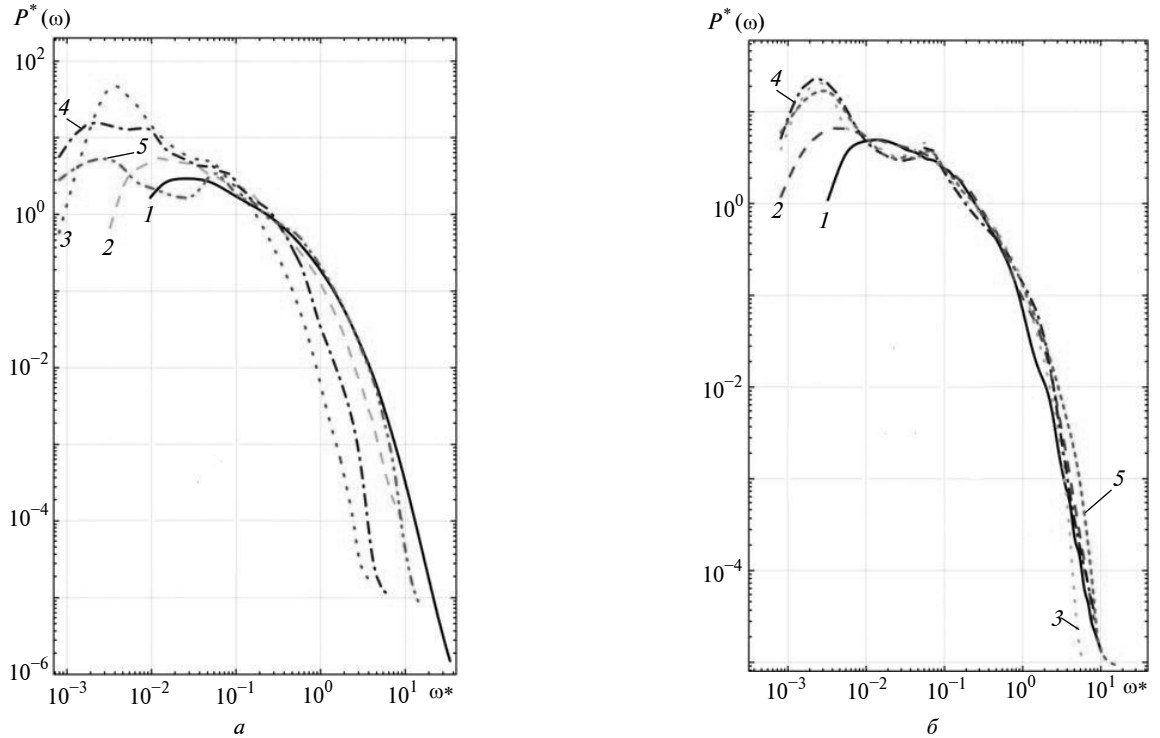

Рис. 3. Спектральні густини потужності пульсацій поздовжньої швидкості: *а* – перед та над заглибленням при $y \neq 0$: *1* – результати [7], *2* – $x/R = -1$, $y/R = 0{,}43$; *3* – $x/R = -0{,}97$, $y/R = -0{,}11$; *4* – $x/R = 0$, $y/R = -0{,}87$; *5* – $x/R = 0{,}97$, $y/R = -0{,}16$; *б* – над заглибленням при $y = 0$: *1* – $x/R = -0{,}97$; *2* – $x/R = -0{,}32$; *3* – $x/R = 0{,}00$; *4* – $x/R = 0{,}32$; *5* – $x/R = 0{,}97$

ції тиску в точці вимірювання p^2_{rms} та зовнішніми змінними – діаметром кільцевої перешкоди d і середнім значенням локальної швидкості U на рівні діаметра перешкоди від обтічної поверхні. Ця швидкість отримана з розрахованого профілю швидкості для турбулентного примежового шару, що утворюється над обтічною поверхнею видовженої гідроакустичної антени [9, 13]. Дослідження проведені за кільцевими перешкодами на циліндрі з віддаленням від носової частини антени $L_x = 0{,}3L$ для трьох діаметрів перешкод – $1{,}5\cdot10^{-3}$ м, $3\cdot10^{-3}$ м і $6\cdot10^{-3}$ м – та двох швидкостей обтікання – 3 і 5 м/с. Крива *1* відповідає безрозмірному діаметру перешкоди $d^+ = du_\tau/\nu = 165$ і віддаленню від перешкоди $x/d = 4$; крива *2* – $d^+ = 330$ і $x/d = 2$; крива *3* – $d^+ = 660$ і $x/d = 1$; крива *4* – $d^+ = 990$ і $x/d = 1$. Досліди були проведені за таких умов: $U_0 = 3$ м/с, $\mathrm{Re}_a = 4{,}3\cdot10^4$, $\delta/a = 2{,}8$ – для кривих *1–3*; $U_0 = 5$ м/с, $\mathrm{Re}_a = 7{,}2\cdot10^4$, $\delta/a = 2{,}3$ – для кривої *4*. Середні значення місцевої швидкості: $U = 0{,}55U_0$ на рівні $1{,}5\cdot10^{-3}$ м від поверхні антени; $U = 0{,}61U_0$ – на рівні $3\cdot10^{-3}$ м; $U = 0{,}69U_0$ – на рівні $6\cdot10^{-3}$ м при $U_0 = 3$ м/с та $U = 0{,}73U_0$ на рівні $6\cdot10^{-3}$ м при $U_0 = 5$ м/с. По осі абсцис частоту відображено у вигляді, який рекомендовано в [13], де найкращим комплексом для нормування спектральних рівнів та частот для поперечно обтічної перешкоди на антені є число Струхаля $\mathrm{Sh} = fd/U$. На цьому рисунку відображені спектральні дані для датчиків пульсацій тиску, що знаходяться у зоні ближнього сліду перешкоди, де спостерігаються максимальні зміни в спектрах потужності. Найбільші зміни мають місце у низькочастотному діапазоні з екстремумами на частотах відриву вихорів із поперечно обтічних кільцевих перешкод. З віддаленням від перешкоди спостерігається зниження інтенсивності низькочастотних компонент спектру та наростання високочастотних. Це вказує на те, що у сліді перешкоди відбувається трансформація енергії від низькочастотних великомасштабних вихрових систем до дрібномасштабних високочастотних вихорів подібно каскадному процесу в примежовому шарі. З віддаленням від перешкоди на відстань близько 100 його діаметрів немає різниці у значеннях спектральних густин потужності пульсацій тиску в примежовому шарі на антені з перешкодою та без неї. Отже, на відстані $x > 100d$ примежовий шар на гнучкій видовженій гідроакустичній антені відновлюється.

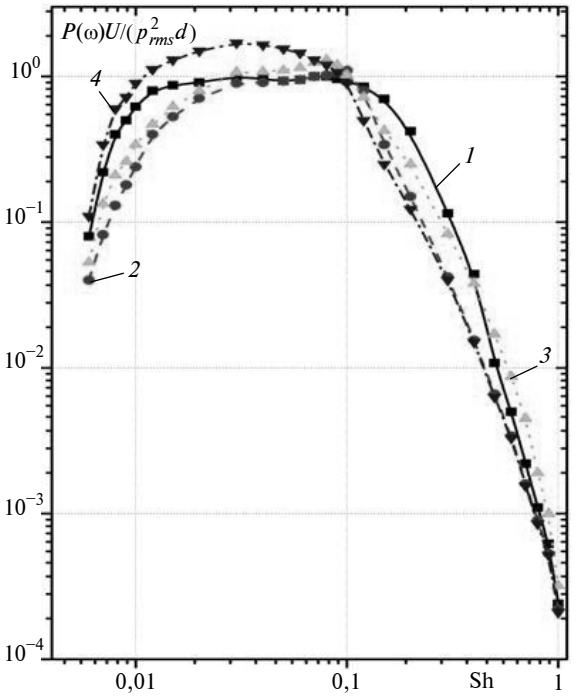

Рис. 4. Спектри пульсацій пристінного тиску: *1* – $d^+ = 165$, $x/d = 4$; *2* – $d^+ = 330$, $x/d = 2$; *3* – $d^+ = 660$, $x/d = 1$; *4* – $d^+ = 990$, $x/d = 1$

Розподіл питомого внеску різних частотних компонент у повну енергію поля пульсацій тиску в ближньому сліді перешкоди показаний на рис. 5 у вигляді першого моменту спектральних густин потужності пульсацій пристінного тиску. Тут позначення кривих відповідають даним, які наведено на рис. 4. Максимальні значення перших моментів спектральних густин перевищують величину 0,6 на частотах, яким відповідає число Струхаля близько 0,1. Це говорить про те, що у полі пульсацій пристінного тиску в ближньому сліді перешкоди є джерело, яке генерує пульсації тиску у вузькій полосі частот або має високу добротність. Джерелом таких пульсацій є вихори, які зриваються з поверхні локальної перешкоди на обтічній поверхні гнучкого циліндра. Зі збільшенням діаметра перешкоди та швидкості обтікання число Струхаля зменшується.

Звідси, для відривного обтікання локальної перешкоди, встановленої у внутрішню область турбулентного примежового шару на антені та докритичного числа Рейнольдса ($2{,}5\cdot10^3 \le \mathrm{Re}_d = Ud/\nu \le 2{,}2\cdot10^4$), визначеного за діаметром перешкоди та середнім значенням місцевої швид-

кості на рівні висоти перешкоди, число Струхаля обернено пропорційне до числа Рейнольдса, як визначено в роботі [13].

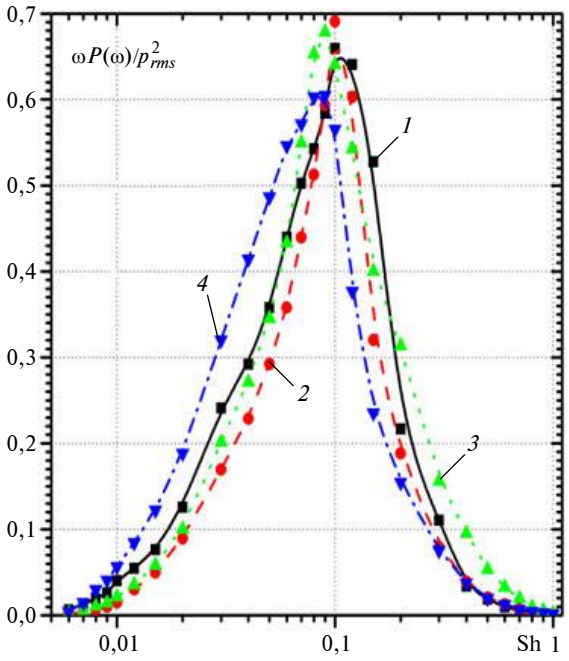

Рис. 5. Перші моменти спектральних густин потужності пульсацій пристінного тиску: *1* – $d^+ = 165$, $x/d = 4$; *2* – $d^+ = 330$, $x/d = 2$; *3* – $d^+ = 660$, $x/d = 1$; *4* – $d^+ = 990$, $x/d = 1$

Інтенсивність турбулентних пульсацій тиску зі збільшенням діаметра перешкоди та швидкості обтікання зростає і найбільшого значення досягає поблизу перешкоди (область ближнього сліду). Для перешкоди діаметром $d = 6 \cdot 10^{-3}$ м та швидкості обтікання $U_0 = 5$ м/с середньоквадратичні значення пульсацій пристінного тиску в області $x/d = 1$ перевищують більш ніж на порядок значення для незбуреного примежового шару на антені. З віддаленням від перешкоди інтенсивність поля пульсацій пристінного тиску спадає, і при досяганні відстані близько $100d$ вплив перешкоди відсутній.

Висновки

Результати експериментальних досліджень показали, що локальні перешкоди на обтічній поверхні вносять збурення в потік, викликаючи стійке збільшення інтенсивності полів пульсацій швидкості та пристінного тиску примежового шару.

Над поперечно обтічним напівциліндричним заглибленням на плоскій поверхні спостерігаються області гальмування та прискорення набігаючого потоку, які чергуються. Усередині заглиблення формуються квазістійкий великомасштабний вихор, форма, розмір та місце розташування якого залежать від режиму обтікання, і вторинні дрібномасштабні вихори, число яких росте зі збільшенням швидкості обтікання. Вторинні вихори розміщені насамперед поблизу країв заглиблення, а також за великої швидкості обтікання у місці відділення циркуляційної зони від дна заглиблення.

Спектральні густини потужності пульсацій поздовжньої швидкості у заглибленні характеризуються підвищеним вмістом низькочастотних компонент. У спектральних залежностях з'являються явно виражені екстремуми, які зумовлені наявністю квазістійких вихорів у заглибленні. Для швидкості обтікання $U_0 = 20$ м/с у перерізі $-0{,}32 < x/R < 0$ відбувається викид вихрової системи із заглиблення з частотою 3–4 Гц, що підтверджується візуальними дослідженнями.

Отримані дані можна використовувати для інтенсифікації процесів масо- і теплообміну на обтічних поверхнях об'єктів енергетичної і аерокосмічної техніки (для останніх також і для запобігання утворенню вибухонебезпечних пароподібних сумішей "пальне–окисник" у конструктивних нішах, що мають незадовільні умови продування).

Для поперечно обтічної кільцевої перешкоди, розміщеної у внутрішній області розвиненого турбулентного примежового шару на гнучкій видовженій гідроакустичній антені, найбільше зростання інтенсивності поля пульсацій пристінного тиску спостерігається у ближньому сліді перешкоди. У цій області має місце зростання спектральних густин потужності пульсацій пристінного тиску, головним чином в області низьких частот. З віддаленням від перешкоди в її сліді відбувається трансформація енергії, яку генерують низькочастотні великомасштабні вихрові системи, до високочастотних дрібномасштабних вихорів. Найбільший питомий внесок до повної енергії поля пульсацій тиску вносять вихрові системи на частотах, які відповідають числу Струхаля близько 0,1. Цими вихровими системами є вихори, що зриваються з поперечно обтічної перешкоди. Для докризового режиму обтікання перешкод число Струхаля обернено пропорційне до числа Рейнольдса. Установлено, що з віддаленням від перешкоди більше 100 її діаметрів турбулентний примежовий шар на антені відновлюється. Ці результати треба враховувати при проектуванні гідроакустичних систем для підвищення їх ефективності.

З метою удосконалення методів розрахунків тепломасопереносу та гідроакустичних характеристик систем подальші дослідження мають бути спрямовані на пошук кореляційних зв'язків між пульсаціями швидкості та тиску поблизу досліджуваних перешкод.

Список літератури

1. *Rockwell D.* Vortex-body interactions // Annu. Rev. Fluid Mech. – 1998. – **30**. – P. 199–229.
2. *Bull M.K.* Wall-pressure fluctuations beneath turbulent boundary layers: Some reflections on forty years of research // J. Sound Vibr. – 1996. – **190**, № 3. – P. 299–315.
3. *Lin J.-C., Rockwell D.* Organized oscillations of initially turbulent flow past a cavity // AIAA J. – 2001. – **39**, № 6. – P. 1139–1151.
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. *Hosseini Z., Bourgeois J.A., Martinuzzi R.J.* Large-scale structures in dipole and quadrupole wakes of a wall-mounted finite rectangular cylinder // Exp. Fluids. – 2013. – **54**, № 1595. – P. 1–16.
6. *Daniels S.J., Castro I.P., Xie Z-T.* Peak loading and surface pressure fluctuations of a tall model building // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. – 2013. – **120**. – P. 19–28.
7. *Metzger M.M., Klewicki J.C.* A comparative study of near-wall turbulence in high and low Reynolds number boundary layers // Phys. Fluids. – 2001. – **13**, № 3. – P. 692–701.
8. *Вихревое* движение в полуцилиндрической канавке на пластине / В.Н. Турик, В.В. Бабенко, В.А. Воскобойник, А.В. Воскобойник // Промислова гідравліка і пневматика. – 2011. – **33**, № 3. – С. 23–27.
9. *Воскобойник А.В., Воскобойник В.А., Макаренков А.П.* Влияние локального препятствия на структуру поля пульсаций давления // Вісник Донецьк. ун-ту. Сер. А: Природничі науки. – 2002. – Вип. 1. – С. 170–175.
10. *Воскобойник В.А., Воскобойник А.В.* Пульсации скорости внутри поперечно обтекаемого полуцилиндрического углубления // Вісник Донецьк. ун-ту. Сер. А: Природничі науки. – 2012. – Вип. 2. – С. 25–30.
11. *Смольяков А.В.* Шум турбулентных потоков. – Спб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2005. – 312 с.
12. *Воскобійник В.А., Воскобійник А.В.* Циркуляційна течія у поперечно обтічній напівциліндричній траншеї // Вісник Донецьк. ун-ту. Сер. А: Природничі науки. – 2012. – Вип. 1. – С. 45–50.
13. *Voskoboinick V.A., Grinchenko V.T., Makarenkov A.P.* Pseudo-sound behind an obstacle on a cylinder in axial flow // Int. J. Fluid Mech. – 2005. – **32**, № 4. – P. 488–510.

References

[1] D. Rockwell, "Vortex-body interactions", *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 30, no. 1, pp. 199–229, 1998. doi: 10.1146/annurev.fluid.30.1.199

[2] M.K. Bull, "Wall-pressure fluctuations beneath turbulent boundary layers: some reflections on forty years of research", *J. Sound Vibr.,* vol. 190, no. 3, pp. 299–315, 1996. doi: 10.1006/jsvi.1996.0066

[3] J.C. Lin and D. Rockwell, "Organized oscillations of initially turbulent flow past a cavity", *AIAA J.*, vol. 39, pp. 1139–1151, 2001. doi: 10.2514/2.1427

[4] Yu.F. Gortushov, *Heat-Hydraulic Efficiency of Perspective Methods of Intensification of Heat Emission in the Channels of Heat-Exchange Equipment.* Kazan', Russia: Innovation Technology Centre, 2009 (in Russian).

[5] Z. Hosseini *et al.*, "Large-scale structures in dipole and quadrupole wakes of a wall-mounted finite rectangular cylinder", *Exp. Fluids*, vol. 54, no. 9, 2013. doi: 10.1007/s00348-013-1595-2

[6] S.J. Daniels *et al.*, "Peak loading and surface pressure fluctuations of a tall model building", *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 120, pp. 19–28, 2013. doi: 10.1016/j.jweia.2013.06.014

[7] M.M. Metzger and J.C. Klewicki, "A comparative study of near-wall turbulence in high and low Reynolds number boundary layers", *Phys. Fluids*, vol. 13, no. 3, pp. 692–701, 2001. Doi: 10.1063/1.1344894

[8] V.N. Turick *et al.*, "Vortex motion in the half-cylindrical cavity on a plate", *Promyslova Hidravlika i Pnevmatyka*, vol. 33, no. 3, pp. 23–27, 2011 (in Russian).

[9] A.V. Voskoboinick *et al.*, "Influence of local obstacle on structure of pressure fluctuation field", *Visnyk Donets'koho Universytetu. Ser. A: Pryrodnychi Nauky*, iss. 1, pp. 170–175, 2002 (in Russian).

[10] V.A. Voskoboinick and A.V. Voskoboinick, "Velocity fluctuations field into the cross-streamlined half cylindrical cavity", *Visnyk Donets'koho Universytetu. Ser. A: Pryrodnychi Nauky*, iss. 2, pp. 25–30, 2012 (in Russian).

[11] A.V. Smol'yakov, *Turbulent Flow Noise.* Saint Petersburg, Russia: Krylov State Research Centre, 2005 (in Russian).

[12] V.A. Voskoboinick and A.V. Voskoboinick., "Circulation flow in the cross-streamlined half-cylindrical trench", *Visnyk Donets'koho Universytetu. Ser. A: Pryrodnychi Nauky*, iss. 1, pp. 45–50, 2012 (in Ukrainian).

[13] V. A. Voskoboinick *et al.*, "Pseudo-sound behind an obstacle on a cylinder in axial flow", *Int. J. Fluid Mech. Res.*, vol. 32, no. 4, pp. 488–510, 2005. doi: 10.1615/InterJFluidMechRes.v32.i4.60

В.М. Турик, В.А. Воскобійник, А.В. Воскобійник

ВПЛИВ ЛОКАЛЬНИХ ПОПЕРЕЧНО ОБТІЧНИХ ПЕРЕШКОД НА ПУЛЬСАЦІЇ ШВИДКОСТІ ТА ПРИСТІННОГО ТИСКУ

Проблематика. Розробка засобів підвищення ефективності процесів масо- і теплообміну на обтічних поверхнях та їх гідроакустичних якостей в об'єктах енергетичної, аерокосмічної та морської техніки.

Мета дослідження. Визначення особливостей формування і просторово-часових характеристик полів пульсацій швидкості та пристінного тиску в потоках уздовж поверхонь із локальними перешкодами у вигляді поперечно обтічних напівциліндричної канавки на плоскій стінці та кільцевої перешкоди на поверхні гнучкої видовженої гідроакустичної антени.

Методика реалізації. Термоанемометричні, гідроакустичні вимірювання в потоках при обтіканні перешкод і спектральний аналіз статистичних характеристик пульсацій швидкості й тиску в досліджуваних системах.

Результати дослідження. Експериментально визначені зони й умови утворення вихорів різних частотних діапазонів, екстремуми спектральних густин потужності пульсацій швидкості та пристінного тиску, взаємодія, викиди та зриви вихорів поблизу обтічних поверхонь із локальними перешкодами в достатньо широких діапазонах чисел Рейнольдса.

Висновки. На основі отриманих просторово-часових характеристик пульсацій швидкості та пристінного тиску, а також виявлених характерних особливостей їх спектрів визначено гідромеханічні механізми тепломасообмінних і гідроакустичних процесів у досліджуваних системах. Результати роботи можуть бути використані при проектуванні таких систем та відкривають перспективу спрямованого керування зазначеними процесами з метою підвищення їх ефективності.

Ключові слова: напівциліндрична канавка; кільцева перешкода; поле пульсацій швидкості; пульсації пристінного тиску; енергетичні спектри; гідроакустичні вимірювання; тепломасообмін.

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

ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ПОПЕРЕЧНО ОБТЕКАЕМЫХ ПРЕПЯТСТВИЙ НА ПУЛЬСАЦИИ СКОРОСТИ И ПРИСТЕНОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ

Проблематика. Разработка способов повышения эффективности процессов массо- и теплообмена на обтекаемых поверхностях и их гидроакустических качеств в объектах энергетической, аэрокосмической и морской техники.

Цель исследования. Определение особенностей формирования и пространственно-временных характеристик полей пульсаций скорости, а также пристеночного давления в потоках вдоль поверхностей с локальными препятствиями в виде поперечно обтекаемых полуцилиндрической канавки на плоской стенке и кольцевого препятствия на поверхности гибкой удлиненной гидроакустической антенны.

Методика реализации. Термоанемометрические, гидроакустические измерения в потоках при обтекании препятствий и спектральный анализ статистических характеристик пульсаций скорости и давления в исследуемых системах.

Результаты исследования. Экспериментально определены зоны и условия образования вихрей различных частотных диапазонов, экстремумы спектральных плотностей мощности пульсаций скорости и пристеночного давления, взаимодействие, выбросы и срывы вихрей вблизи обтекаемых поверхностей с локальными препятствиями в достаточно широких диапазонах чисел Рейнольдса.

Выводы. На основе полученных пространственно-временных характеристик полей пульсаций скорости и пристеночного давления, а также обнаруженных характерных особенностей их спектров определены гидромеханические механизмы тепломассообменных и гидроакустических процессов в исследуемых системах. Результаты работы могут быть использованы при проектировании таких систем и открывают перспективу направленного управления упомянутыми процессами с целью повышения их эффективности.

Ключевые слова: полуцилиндрическая канавка; кольцевое препятствие; поле пульсаций скорости; пульсации пристеночного давления; энергетические спектры; гидроакустические измерения; тепломассообмен.

Рекомендована Радою
Механіко-машинобудівного інституту
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
16 січня 2017 року