

УДК 532.5

СПРЯЖЕНЕ ОБТІКАННЯ ТРИРЯДНОГО ПАЛЬНОГО РОСТВЕРКУ НА ПЛАСКІЙ ПОВЕРХНІ. ЧАСТИНА 2. ПРОСТОРОВО-ЧАСОВІ КОРЕЛЯЦІЇ ТА СПЕКТРИ

А. В. ВОСКОВІЙНИК, В. А. ВОСКОВІЙНИК, О. А. ВОСКОВОЙНИК

Інститут гідромеханіки НАН України, Київ

Отримано 09.09.2008

В даній роботі наведено результати експериментальних досліджень з вивчення кінематики та динаміки підковоподібних вихрових систем, які обумовлено взаємодією потоку, що натікає, з трирядним пальним ростверком, який встановлено на пласкій жорсткій поверхні. Для проведення дослідів розроблено та створено вимірювальний комплекс, систему обробки і аналізу даних. Виготовлені мініатюрні термісторні датчики швидкості і п'єзореzystивні датчики швидкісного натиску. Вимірювання швидкості переносу вихрових структур поблизу моделей мостових опор здійснювалось термісторними датчиками, які знаходились у кореляційному блоці, що дозволило знайти не тільки швидкість, але й напрямку руху великомасштабних когерентних вихорів у спряжених течіях. Отримано короткочасові (миттєві) спектральні та кореляційні характеристики, які показано на тривимірних спектрограмах та корелограмах, що дозволило дослідити нестационарні і неоднорідні пульсації швидкості у вихровому потоці. Перед передньою центральною опорою формується великомасштабний підковоподібний вихор діаметром $0.3d$ і його центр розташовується на відстані $(0.15 - 0.19)d$ від поверхні кругового циліндру та $(0.11 - 0.15)d$ від поверхні пластини. Підковоподібна вихрова система перед центральною палею обертається з частотою, близькою 1 Гц, якій відповідає число Струхала $St=0.27$, і коливається в горизонтальній і вертикальній площині з частотою 0.5 Гц або $St=0.14$.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований по изучению кинематики и динамики подковообразных вихревых систем, которые обусловлены взаимодействием набегающего потока с трехрядным палым ростверком, установленным на плоскую жесткую поверхность. Для проведения экспериментов разработан и создан измерительный комплекс, система обработки и анализа данных. Изготовлены миниатюрные термисторные датчики скорости и пьезорезистивные датчики скоростного напора. Измерения скорости переноса вихревых структур вблизи моделей мостовых опор производились термисторными датчиками, находящимися в корреляционном блоке, что позволило определить не только скорость, но и направление движения крупномасштабных когерентных вихрей в сопряженных течениях. Получены кратковременные (мгновенные) спектральные и корреляционные характеристики, которые показаны на спектрограммах и корелограммах, что позволило исследовать нестационарные и неоднородные пульсации скорости в вихревом потоке. Перед передней центральной опорой формируется крупномасштабный подковообразный вихрь диаметром $0.3d$ и его центр располагается на расстоянии $(0.15 - 0.19)d$ от поверхности кругового цилиндра и $(0.11 - 0.15)d$ от поверхности пластины. Подковообразная вихревая система перед центральной сваей вращается с частотой, близкой 1 Гц, которой соответствует число Струхала $St=0.27$, и осциллирует в горизонтальной и вертикальной плоскости с частотой 0.5 Гц или $St=0.14$.

The experimental research results on the study of kinematics and dynamics of the horseshoe vortex systems, which are conditioned by interaction of stream with the three-row pile grillage, established on a flat rigid surface, are represented in this work. For carrying out of experiments the measuring complex, system of processing and the analysis of the data is developed and created. The miniature thermistor velocity sensors and piezoresistive velocity head sensors are made. The convective velocity measurements of vortical structures near to bridge pair models was made by the thermistor sensors which are taking place in the correlation block that has allowed to determine not only velocity, but also a movement direction of the large-scale coherent vortices in the junction flows. Short-time (instantaneous) spectral and cross-correlation characteristics are shown on spectrograms and correlograms. This is allowed to investigate the non-stationary and discontinuity velocity fluctuations in a vortical stream. The large-scale horseshoe vortex by a diameter $0.3d$ is formed before front central pile and his center is disposed in the distance $(0.15 - 0.19)d$ from the surface of circular cylinder and $(0.11 - 0.15)d$ from the plate surface. The horseshoe vortex system before the central pile is turned with frequency near 1 Hz, which is corresponded by the Strouhal number $St=0.27$, and its oscillated in a horizontal and vertical plane with frequency 0.5 Hz or $St=0.14$.

ВСТУП

Як було показано в наших попередніх публікаціях [1, 2], основним джерелом формування та подальшої еволюції отворів глобального та локального розмивів ґрунту поблизу трирядного пального ростверку є підковоподібні вихрові системи та слідові вихори, що утворюються навколо обтічної конструкції поблизу її спряження з дном. Формування та розвиток вихрових структур в спряженій течії навколо такої складної групової

пальної споруди має багато спільного з утворенням підковоподібних або намистоподібних вихрових систем, що виникають при обтіканні поодиноких погано обтічних конструкцій чи опор, які встановлюються на дні русел та каналів при будівництві, наприклад, мостових переходів. Для того, щоб зрозуміти механізм розмиву, в першу чергу треба якісно описати структуру когерентних вихорів, що утворюють підковоподібну або слідову вихрову систему, для різних режимів течії та кількісно охарактеризувати цей ефект у потоці та на дні ріки поблизу підмурку опори, незалежно від

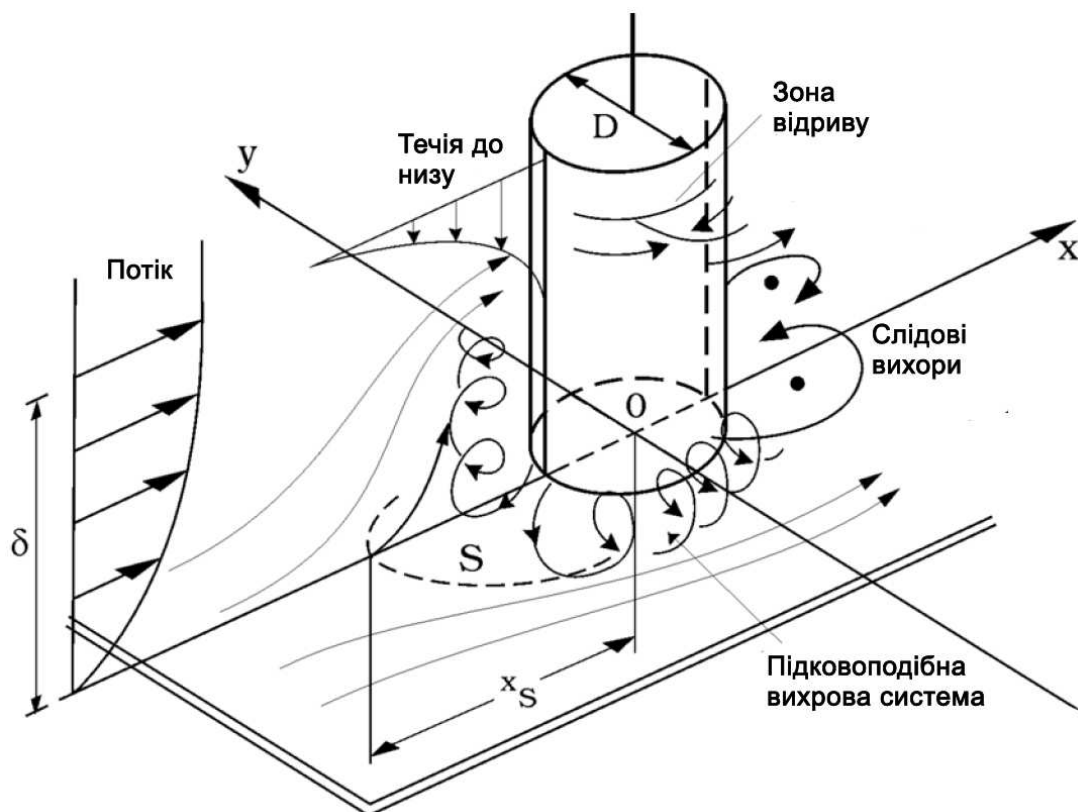


Рис. 1. Схема утворення підковоподібної вихрової системи перед круговим циліндром та слідових вихорів позаду нього

її форми і розміру. Значна комплексність глобального та локального розмивів, їх висока тривимірність і нестійкий характер поля течії, що формується розмивом, спричиняють значні труднощі при вивченні механізмів розмиву ґрунту в місцях спряження опор із дном. Структура турбулентності, яка має широкий спектр турбулентних масштабів, притаманна вихровій течії навколо опори і керує виносом та переміщенням ґрунту із отвору розмиву. Дійсно, поле течії в отворі розмиву навколо опори насичено організованими когерентними структурами у вигляді підковоподібних вихорів у підмурку опори, великомасштабних згорток у сліді позаду опори та дрібніших за розміром, але дуже енергоємних вихрових трубок у зсувних шарах, що відриваються від опори [3 – 5] (див. рис. 1). Для того, щоб зрозуміти, яким чином течія розмиває ґрунт навколо опори, треба вивчити і описати структуру цих великомасштабних когерентних вихрових систем і дрібномасштабних вихорів та їх взаємодію з обтічною поверхнею та ґрунтом у різних стадіях процесу розмиву. Добре відомо, що основний механізм, який керує формуванням та

розвитком отвору розмиву, заключає в собі спрямовану вниз течію в передній або фронтальній частині опори, формування підковоподібної вихрової системи, яка знаходиться у підмурку опори, та слідові вихори, що сходять з поверхні опори через відрив зсувного шару на обтічній поверхні опори [6 – 10].

Формування підковоподібної вихрової системи обумовлено відривом примежового шару, що натікає на опору внаслідок дії від'ємного градієнту тиску, який генерується поблизу фронтальної частини опори. Взаємодія примежового шару з поверхнею обтічної опори примушує структуру турбулентності перебудуватися поблизу передньої частини опори у місці спряження її з дном в ряд намистоподібних вихорів, що огинають опору. Ці вихрові системи витягуються під час пересування навколо опори через бічні градієнти тиску. Розташування, розмір та інтенсивність підковоподібних вихорів значним чином змінюються у часі в залежності від стадії чи фази їх формування або розвитку [8, 11]. При цьому додатково спостерігається значне збільшення турбулентної кінетичної енер-

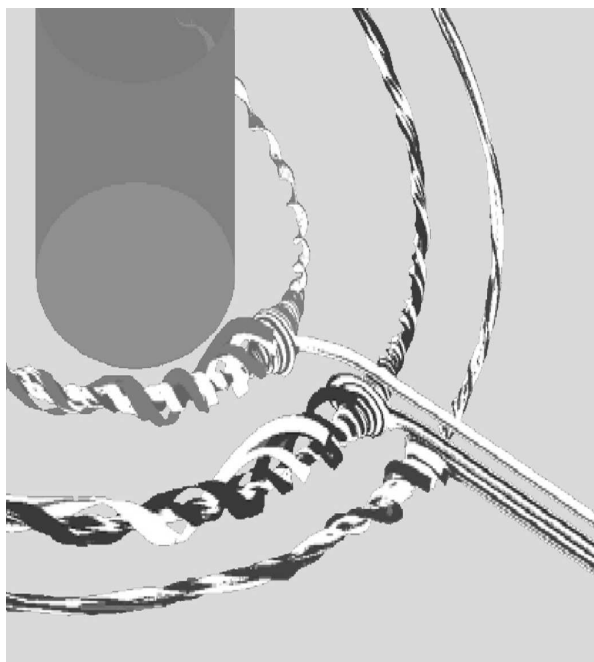


Рис. 2. Схема формування підковоподібної вихрової системи для ламінарного режиму спряженого обтікання

гії, рівнів пульсацій швидкості та тиску, а також придонних зсувних напруг усередині та поблизу підковоподібної вихрової області.

Згідно з багаточисельними теоретичними та експериментальними дослідженнями [6, 11–14] підковоподібну вихрову систему в залежності від режиму обтікання і характерних особливостей потоку та обтічної спряженої конструкції розділяють в основному на три типи: стійка вихрова система, періодично осцилююча вихрова система і турбулентноподібна хаотична вихрова система. Треба зауважити, що періодично осцилююча вихрова система далі класифікується на три підсистеми, а саме: осцилююча вихрова система з малим пересуванням, змішана вихрова система та вихрова система, що відривається [13, 14]. Ця класифікація подібна до роботи [15], де автор розділив картини течії на п'ять категорій: стійка вихрова система, осцилююча вихрова система, змішана вихрова система, вихрова система, що відривається, і перехідна вихрова система.

Еволюція підковоподібної вихрової системи навколо підмурку обтічного тіла та нестійкий слід позаду нього є два спільні явища, які мають місце в більшості вимірювань динаміки цих течій, хоча ряд відмінностей спряжених течій суттєво змінюються в залежності від параметрів потоку і форми поганообтічних тіл [3, 11, 16]. Експериментальні

досліди [17, 18] показують, що структура підковоподібної вихрової системи значно залежить від числа Рейнольдса і характеристик примежового шару, який формується перед обтічною перепону.

Структура підковоподібної вихрової системи для ламінарного режиму обтікання складається із трьох основних вихорів, які обертаються в одному напрямку. Тривимірний вид цих підковоподібних вихорів (проілюстрований за допомогою комп'ютерної графіки в роботі [16], з використанням миттєвих ліній току) показаний на рис. 2. Вихор, який розвивається, формується на позиції, яка знаходиться на найбільшій відстані від поверхні обтічної опори. Первинний вихор розташовується у середній позиції, в той час як кутовий вихор знаходиться найближче до опори. Вихор, що розвивається, породжується примежовим шаром, який відривається від обтічної поверхні дна, через інтенсивний несприятливий градієнт тиску, який генерується наявністю опори на обтічній поверхні. Цей вихор поступово переноситься вниз за потоком і, в кінці кінців, стає новим первинним вихором. В цей час первинний вихор конвектує у напрямку до кутового вихору і поступово зливається із ним. Процес цей є періодичним і відповідає тому, що в літературі [4, 12] іменують як режим ламінарного відриву.

Як відмічається у роботі [12], зливання первинного та кутового вихорів спочатку відбувається в площині симетрії обтічної опори, а далі поступово спостерігається для більш високих полярних кутів (майже до 110°). Незважаючи на те, що течія позаду опори є турбулентною, цей процес відбувається періодично в області нижок підковоподібного вихору. Формування вихрових трубок у зсувних шарах, що приєднуються позаду опори, обумовлено нестійкістю Кельвіна-Гельмгольца. Ступінь переміжності підковоподібних вихорів стає високою, а загальна структура підковоподібної вихрової системи значно змінюється у часі. Незважаючи на це, у роботі [12] знайдено, що у значну частину часу спостерігається наявність великомасштабного первинного вихору, який коливається і змінює свою когерентність випадково. Розрахунки [12] засвідчують присутність декількох нестійких вторинних когерентних вихорів у межах підковоподібної вихрової системи. Фактично комп'ютерна візуалізація показує, що підковоподібна система насичена намистоподібними вихорами, розмір яких у полярному напрямку дуже змінюється у часі. Спостерігається випадкове формування і пересування малих намистоподібних вихорів з відривної зони. Деякі із цих вихорів зливаються з

первинним вихором, який витягується, та формують новий первинний вихор, інші втрачають свою когерентність. Окремі із них можуть пересуватися навколо первинного вихору до тих пір, доки не зіллються з ним, або у ряді випадків два вторинних вихори коливаються навколо один одного і насамкінець зливаються в одне ціле.

Встановлено, що у випадку турбулентної підковоподібної вихрової системи, незалежно від числа Рейнольдса, підковоподібна вихрова система стає хаотичною [19, 20]. Одним із найбільш цікавих явищ, що пов'язані з турбулентною підковоподібною системою, є наявність бімодальних аперіодичних хаотичних осциляцій, які виступають однією із основних причин різкого збільшення пульсацій швидкості, генерації турбулентності, напруг Рейнольдса та пульсацій тиску всередині підковоподібної області [20 – 22]. Ці явища, які складаються із течії в підковоподібній області, що перемикається між двома модами у часі, і функція щільності ймовірності, яка відповідає статистичному процесу Маркова, вперше спостерігалися у роботі [20]. Ними вивчалася обтікання поверхні, на якій було встановлено крило у формі циліндричного тіла при високих числах Рейнольдса ($Re_D = 10^6$). У бімодальній області функція щільності ймовірності пульсацій швидкості мала форму з двома піками. Авторами знайдено, що перемикавання спостерігається з відносно низькою частотою у порівнянні з осциляцією (частота появи) вихорів усередині підковоподібної системи. Середня частота пульсацій швидкості, яка пов'язана із бімодальними осциляціями, складає число Струхала майже $St=0.05$, яке розраховано по швидкості потоку, що натікає на перешкоду, та його діаметру. Це підтверджує, що низькочастотні осциляції не генеруються когерентними структурами в підковоподібній області, а скоріше обумовлені пульсаціями кількості руху в зовнішній частині примежового шару, які циркулюють, коли примежовий шар вдаряється в носову частину погано обтічного тіла. Пропонується [20, 23], що бімодальне аперіодичне великомасштабне підковоподібне вихрове явище є характерною особливістю спряжених течій при турбулентному режимі обтікання за умови, що змонтоване на поверхні тіло є достатньо погано обтічне. У роботі [23] було наведено діапазон енергоємних частот $St= (0.1...0.18)$ в розрахункових спектрах пульсацій швидкості і тиску. Цей діапазон низьких частот виявляється не можна віднести до осциляцій первинного вихору або до відходу вторинних вихорів із області відриву в первинний вихор, які мають місце при більш високих частотах ($0.3 < St < 0.6$), а швидше всього до бімодальних

осциляцій.

Первинний вихор має найбільший поперечний перетин в осьовій площині опори, а потім поперечний перетин цього вихору починає затухати зі збільшенням абсолютного значення полярного кута, що являє собою показник затування інтенсивності первинного вихору при високих полярних кутах. В деякий час первинний підковоподібний вихор розташовується поблизу опори і його когерентність є достатньо високою. При цьому майже кругова область завихореності притаманна підковоподібному вихору і цей проміжок часу еволюції вихрової системи відповідає нульовій моді [20, 23]. У протилежному випадку в термінах стану підковоподібної вихрової структури, загальний розмір первинного вихору стає достатньо великим, а його форма набуває еліптичності та має малу когерентність. При цьому розподілення позитивної завихореності всередині підковоподібної вихрової області стає більш дифузійним (менш компактним), а центр цієї області переміщується на більшу відстань від поверхні опори. Цей стан пов'язують з так званою модою оберненої течії. Крім того, в дослідях [23] спостерігається також шар від'ємної завихореності під первинним вихором, який набагато довший у стані, що відповідає моді оберненої течії. Цей шар або згортки від'ємної завихореності обумовлений присутністю пристінного струменя змінної інтенсивності в цій області. Для моди оберненої течії відрив від дна примежового шару спостерігається на відстані $(0.35...0.4)D$ від поверхні опори. У випадку, коли підковоподібна вихрова структура має нульову моду, інтенсивність струменевої течії значно менша, відрив спостерігається на відстані тільки $0.2D$ від опори, а швидкість, напрямок якої відповідає нормалі від поверхні, над областю відриву стає вищою.

Пересування високошвидкісної рідини із вільного потоку, яка переноситься в підковоподібну область течією, що спрямована вздовж передньої частини опори донизу, головним чином формує моду оберненої течії. Нестійкий реверсний струменеподібний потік під підковоподібною вихровою областю збільшує її кількість руху і також підсилює первинний вихор, який переміщується далі від опори. Коли ця великомасштабна, але не дуже когерентна, намистоподібна вихрова система починає витягуватися навколо опори, то її поперечний перетин зменшується, інтенсивність струменеподібної течії під нею знижується, первинний вихор стає більш компактним і переноситься ближче до поверхні опори.

У проміжок часу, коли підковоподібний вихор знаходиться в нульовій моді, течія стає більш ста-

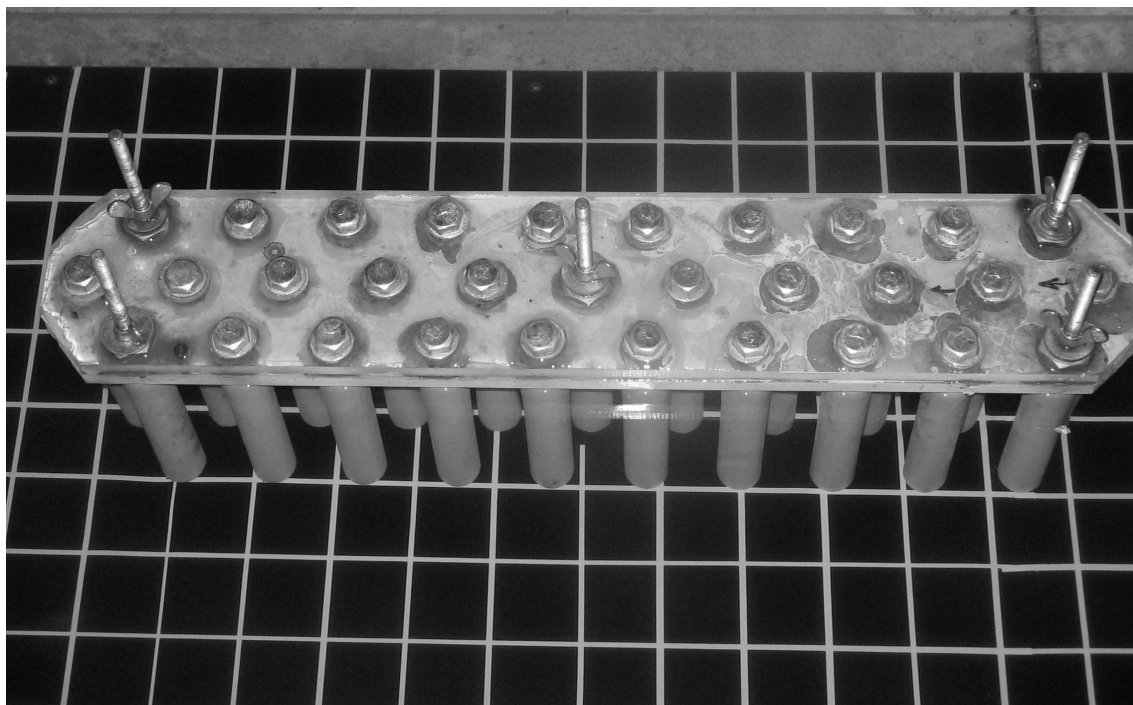


Рис. 3. Модель трирядного пального ростверку та його розташування на плоскій пластині

більшою до того часу, доки нова частина вільного потоку ежектує в підковоподібну вихрову область або коли взаємодія між первинним підковоподібним вихором і вторинними вихорами стає достатньо сильною, щоб дестабілізувати течію і породити новий крупніший і менш компактний вихор. В роботі [20] нульову моду пов'язали з ежекцією частини неінтенсивної вихрової течії із зовнішньої частини примежового шару всередину підковоподібної вихрової області. Підковоподібна вихрова система значно модифікує структуру турбулентності перед фронтальною частиною опори головним чином через підсилення рівнів турбулентних пульсацій швидкості та тиску в підковоподібній вихровій області. Найбільше підсилення в цій області, що відповідає середньому первинному вихору, стосується явища бімодального аперіодичного хаотичного модального перемикавання, яке особливо сильне за полярними кутами, меншими, ніж 45° , і звичайно зникає в ніжках підковоподібних вихорів. Низькочастотні осциляції первинного вихору між нульовою і модою оберненої течії та варіації інтенсивності приєднаного до поверхні струменя під ним обумовлюють значні зсувні напруги на дні. Додатково відносно високі пульсації тиску мають місце у безпосередній близькості до дна під підковоподібною вихровою системою. Ці характерні особливості течії можуть значно при-

скорити пересування ґрунту у випадку дна, що переміщується, і надають можливість зрозуміти ефективність підковоподібної вихрової системи у пересуванні ґрунту під час процесу розмиву.

Експериментальні дослідження комплексних конструкцій, що включають в себе обтікання ансамблю перешкод, встановлених на поверхню, є, скоріше за все, небагаточисельними. У роботах [24 – 26] виконали експериментальні вимірювання течії навколо системи кубів, що були встановлені на пласку поверхню. Для малих розмежувань відрив зсувного шару від першого куба приєднується на сторонах другої перешкоди і реєструється періодичний схід вихорів тільки в сліді нижнього за потоком куба. Таким чином, два куби діють, як одне погано обтічне тіло. Вище критичного розмежування в роботі [25] спостерігали пульсації в проміжку між кубами та явище слідової синхронізації для тривимірної тандемної геометрії. Автори у роботі [27] висвітлили деталі характерних особливостей поля осереднених швидкостей в діапазоні синхронізації та механізм сходу сліду на різних фазах циклу сходу. Для великих розмежувань з'являється другий підковоподібний вихор перед фронтальною частиною другого куба [25, 28, 29].

Враховуючи вищеведене, актуальним залишається дослідження взаємодії вихрових структур та струменеподібних течій у спряжених обтікан-

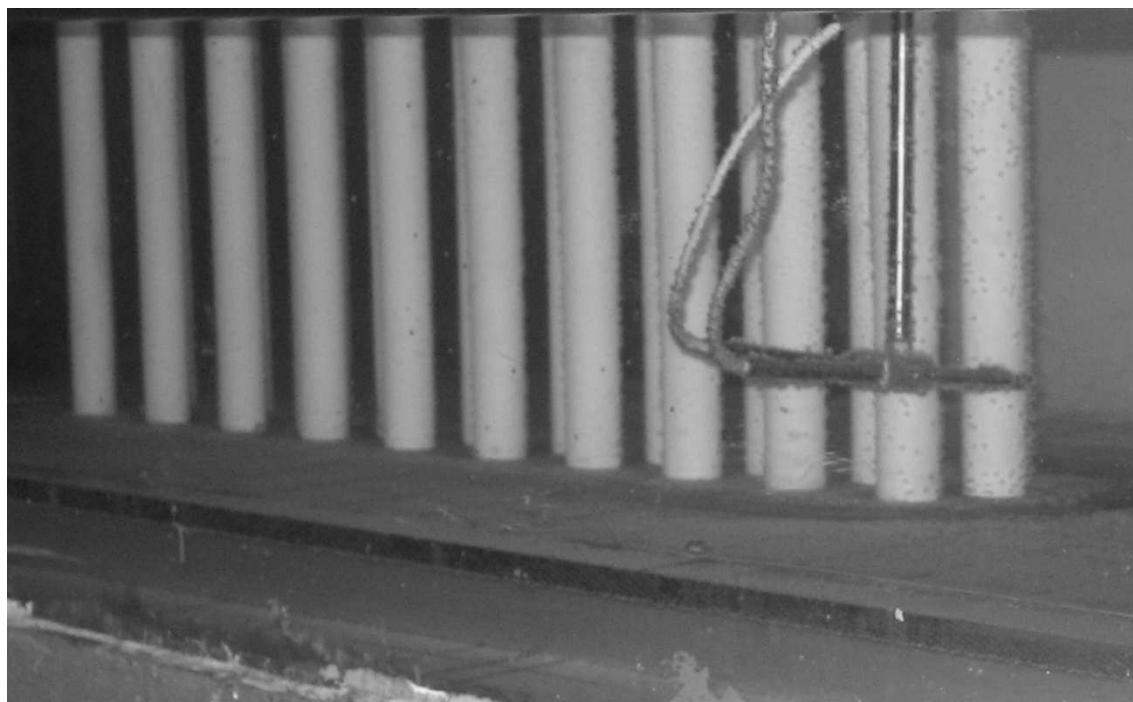


Рис. 4. Розташування кореляційного блоку термісторних датчиків швидкості поблизу трирядного ростверку

нях комплексних багатопальних конструкцій для подальшого висвітлення та вивчення механізму розмиву ґрунту біля мостових опор. Цій проблематиці присвячені проведені експериментальні дослідження з обтікання моделі трирядного пального ростверку і вивченню особливостей формування та динаміки підковоподібних вихрових структур, що утворюються при обтіканні цієї конструкції мостової опори, що будується на річці Дніпро у Києві.

1. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДІВ

Експерименти проводились у гідродинамічному лотку довжиною 1 м, шириною 0.8 м та глибиною до 0.8 м з вільною поверхнею води. Детальний опис експериментальної установки, програми та методики дослідів вихрової течії при спряженому обтіканні трирядного циліндричного ростверку на плоскій поверхні наведено в роботі [1]. Тому дамо лише стислий опис основних елементів експериментального стенду та методики дослідів, які відносяться до інструментальних вимірювань полів швидкості вихрового руху поблизу моделей обтічних опор. Вода в гідродинамічний лоток подавалася за допомогою насосів через відстійну ка-

меру, дифузор, хонейкомби та решітки, що спрямляють і турбулізують потік. На дні вимірювальної ділянки, що розташовувалася посередині лотка, було встановлено модель трирядного пального ростверку, яку було змонтовано по осі плоскої пластини довжиною 2 м [1]. Довжина ростверку була майже 0.6 м, ширина – 0.1 м, а висота – 0.2 м. Він складався із 31 циліндричної палі діаметром $d = 0.027$ м, які розташовувались у три ряди в шаховому порядку (див. рис. 3). Глибина потоку в досліді була сталою і дорівнювала 0.2 м, а його швидкість (U_∞) змінювалась від 0.06 м/с до 0.4 м/с, для яких числа Рейнольдса та Фруда складали $Re_x = xU_\infty/\nu = (60000 : 400000)$, $Re_d = dU_\infty/\nu = (1620 : 10800)$ і $Fr = U_\infty/\sqrt{gH} = (0.04 : 0.29)$, відповідно, де x – поздовжня відстань у напрямку потоку від початку плоскої пластини до першої центральної палі ростверку; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості води; g – прискорення вільного падіння; H – глибина потоку.

Згідно з розробленою програмою та методикою дослідів [1, 2], оцінка просторових і часових характеристик вихрового руху поблизу трирядного ростверку і ступеня його взаємодії з поверхнею, що обтікається, проводились під час візуальних досліджень. В місцях, де спостерігаються характерні ознаки когерентних вихрових структур у вигляді підковоподібних вихорів та слідових вихрових

структур, проводились інструментальні вимірювання полів швидкості.

Кінематичні характеристики спряженої течії вимірювались за допомогою спеціально розроблених і виготовлених мініатюрних термісторних датчиків швидкості та п'єзорезистивних датчиків швидкісного натиску. Термісторні датчики швидкості (діаметр чутливої поверхні 0.008 м) монтувались за допомогою спеціальних державок у кореляційний блок (з фіксованою відстанню між двома датчиками). Розташування пари термісторних датчиків поблизу досліджуваної моделі мостової опори показано на рис. 4. Контроль швидкості потоку здійснювався за допомогою манометричного датчика типу трубки Піто подвійного натиску, де як чутливий елемент виступав п'єзорезистивний датчик тиску. Електричні сигнали, які вироблялись датчиками, поступали на підсилюючу та контрольно-вимірювальну апаратуру, а потім на засоби реєстрації інформації та персональні комп'ютери через відповідні аналогово-цифрові перетворювачі. На персональних комп'ютерах та на спеціалізованих двоканальних аналізаторах спектрів фірми Брюль і К'єр експериментальні дані оброблялися та аналізувалися за допомогою стандартних та спеціально розроблених програм із використанням теорії ймовірності та математичної статистики.

Перед застосуванням, під час проведення дослідів і після виконання їх, засоби вимірювання, контролю та реєстрації інформації тестувалися та калібрувалися згідно з паспортними даними і методикою проведення дослідів. Датчики атестувалися і повірялися за допомогою абсолютних та відносних методів на спеціальних стендах і відповідному устаткуванні. Похибка вимірювань інтегральних і осереднених значень швидкості не перевищувала 4% (при достовірності 0.95 або 2σ), пульсаційних її складових - до 6%. Кореляційні характеристики отримано з похибкою до 8%, а спектральні залежності - до 2 дБ у частотному діапазоні від 0.2 до 1000 Гц.

2. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДІВ

Експериментальні дослідження поля швидкостей проводилися згідно з програмою за допомогою мініатюрних термісторів, формуючих кореляційну пару датчиків, встановлених у вимірювальних вертикалях поблизу фронтової частини першої центральної опори. Згідно з результатами роботи [1] перед трирядним пальним ростверком по-

близу спряжених поверхонь формуються підковоподібні вихори, які є основним джерелом розмиву ґрунту поблизу обтічних паль мостових переходів. Ці вихори утворюють значні зсувні напруги на обтічній поверхні та при нанесенні на поверхню контрастних речовин, що змиваються потоком, є можливість дослідити місця їх формування та розвитку у спряженій течії, що показано на рис. 5.

Вимірювання середньої та пульсаційної складової швидкості проводилися парою термісторів, що обтікаються потоком, у трьох вертикальних перерізах з шагом 2 та 5 мм, а також у п'яти горизонтальних перерізах з шагом 2 мм. У результаті перед передньою центральною опорою поле швидкостей вимірялось у перерізі (15 × 12) мм відповідно в горизонтальному і вертикальному напрямку відносно площини дна гідродинамічного каналу. Всі вимірювання в даному експерименті проведені в 30 точках. В результаті обробки та аналізу експериментальних даних отримано епюри осереднених та пульсаційних складових швидкості, наведено особливості їх розвитку у часі, а також знайдені спектральні та кореляційні залежності пульсацій швидкості.

Епюри ізотях або рівних середніх швидкостей в осьовому перерізі мостової трубчастої опори перед її центральною передньою палею, що проілюстровано в роботі [1], мають вигляд кривих, які замикаються у вигляді еліпсоїдів, витягнутих у вертикальній площині. Ці криві відображають поле швидкостей для вихрової течії перед циліндричною опорою у формі добре відомого підковоподібного вихору, який охоплює циліндр біля його підніжжя у місці спряження його з пласкою поверхнею. У наведених вимірюваннях в осьовому перерізі центральної опори при швидкості обтікання 0.1 м/с діаметр цього вихору складає біля $9 \cdot 10^{-3}$ м. Ядро підковоподібного вихору знаходиться в місці розташування близько $(4...5) \cdot 10^{-3}$ м в напрямку вісі x перед поверхнею опори і на відстані біля $(3...4) \cdot 10^{-3}$ м від жорсткої пласкої поверхні. Епюри рівних пульсаційних складових швидкості мають мінімум поблизу місця розташування ядра квазістійкого підковоподібного вихору. Далі, при просуванні до периферії цього вихору, рівні пульсацій швидкості зростають. Максимум пульсацій швидкості було виявлено в місці взаємодії вихору з потоком у перерізі $x \approx (7...8) \cdot 10^{-3}$ м та $y \approx (4...6) \cdot 10^{-3}$ м.

Зміни середньої і пульсаційної складових швидкості в часі, які виміряні в осьовому перетині перед центральною опорою, наведено на рис. 6, *a*, *б* для швидкості потоку 0.1 м/с. Крива *1* представляє результати, що отримані в області ядра підково-

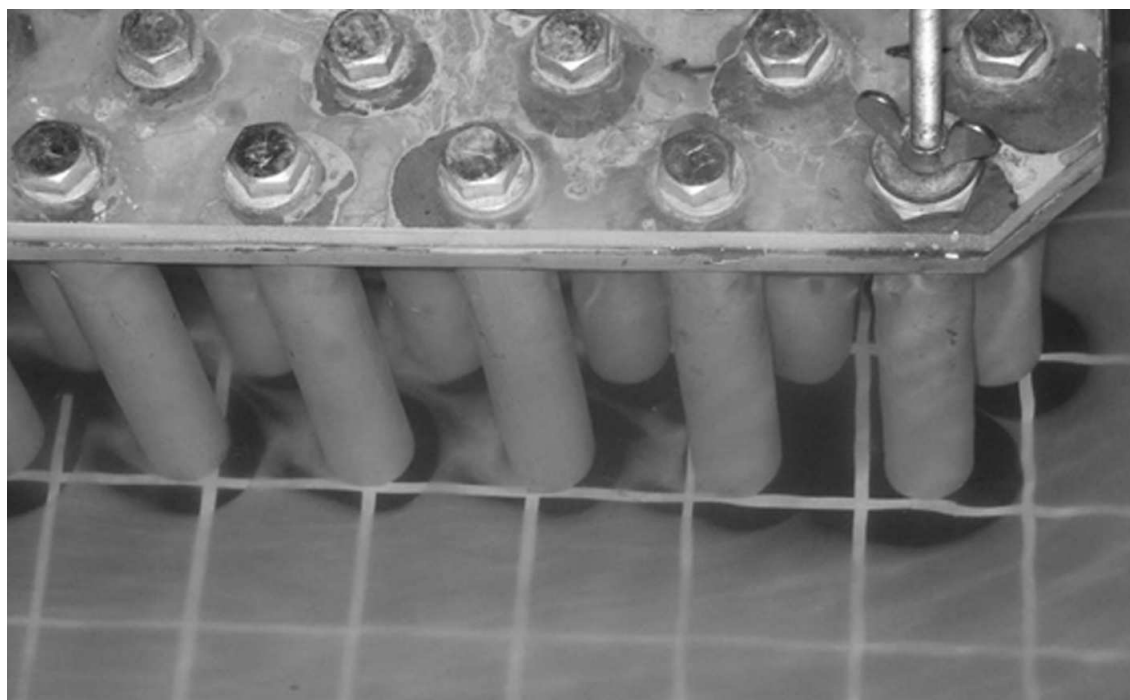


Рис. 5. Розмив контрастної речовини на поверхні пластини у передній частині пального ростверку

подібного вихору з координатами $x = 4 \cdot 10^{-3}$ м і $y = 3 \cdot 10^{-3}$ м, а крива 2 – виміряна на периферії цієї вихрової структури у розташуванні термісторного датчика $x = 6 \cdot 10^{-3}$ м і $y = 6 \cdot 10^{-3}$ м. Згідно з представленими даними рівні середньої та пульсуючої швидкостей в ядрі вихору значно нижчі, ніж на його зовнішній стороні. Так, осереднена швидкість у досліджуваному розташуванні пари термісторних датчиків майже в 1.5 рази вище на периферії підковоподібного вихору, ніж у його ядрі. При цьому спостерігаються значні осциляції осередненої швидкості на периферії вихору, які в середньому удвічі вищі, ніж в ядрі підковоподібного вихору. Пульсації швидкості на периферії цього вихору також значно вищі, що відображено на рис. 6, б. Згідно з наведеними результатами в області ядра вихору мають місце зміни швидкості, що чергуються між собою, особливо її пульсацій, з періодом біля 1 с. Разом з цим, швидкість на зовнішній границі вихору коливається з періодом біля (1.5...2) с, що особливо характерно для кривої осередненої швидкості.

Статистичний аналіз експериментальних результатів, проведений нами, не спростовує спостереження про наявність коливальних процесів у досліджуваних полях швидкостей перед центральною опорою досліджуваної моделі мостового переходу. Кореляційні та спектральні залежності отри-

мані із застосуванням алгоритму прямого та оберненого швидкого перетворення Фур'є і вагових вікон Ханна та Хенінга для частоти Найквіста 2000 Гц. Статистична обробка експериментальних даних проводилась за період 60 с і при аналізі нестационарності утворення вихорів за короткочасні проміжки часу період їх вибирався в залежності від пульсаційних характеристик когерентних вихрових структур, про що буде сказано нижче. Статистичні результати розраховувалися із 2048 значень виміряних величин коливального процесу і осереднювалися по експоненційному закону, у відповідності з рекомендаціями обробки сигналів випадкових процесів [30]. У двоканальному аналізаторі спектрів типу 2034 фірми Брюль і К'єр статистична обробка експериментальних даних у реальному масштабі часу виконувалася за допомогою 800 аналогових фільтрів, центральна частота яких змінювалася в залежності від частотного діапазону аналізу даних.

На рис. 6, в представлений характерний графік спектральної щільності потужності пульсацій швидкості для координат $x = 6 \cdot 10^{-3}$ м; $y = 6 \cdot 10^{-3}$ м і $z = 0$ при $U_{\infty} = 0.1$ м/с. Спектральна щільність потужності пульсацій швидкості перед центральною опорою зосереджена в частотному діапазоні до 10 Гц, що вказує на низькочастотний процес вихрового руху в цьому місці роз-

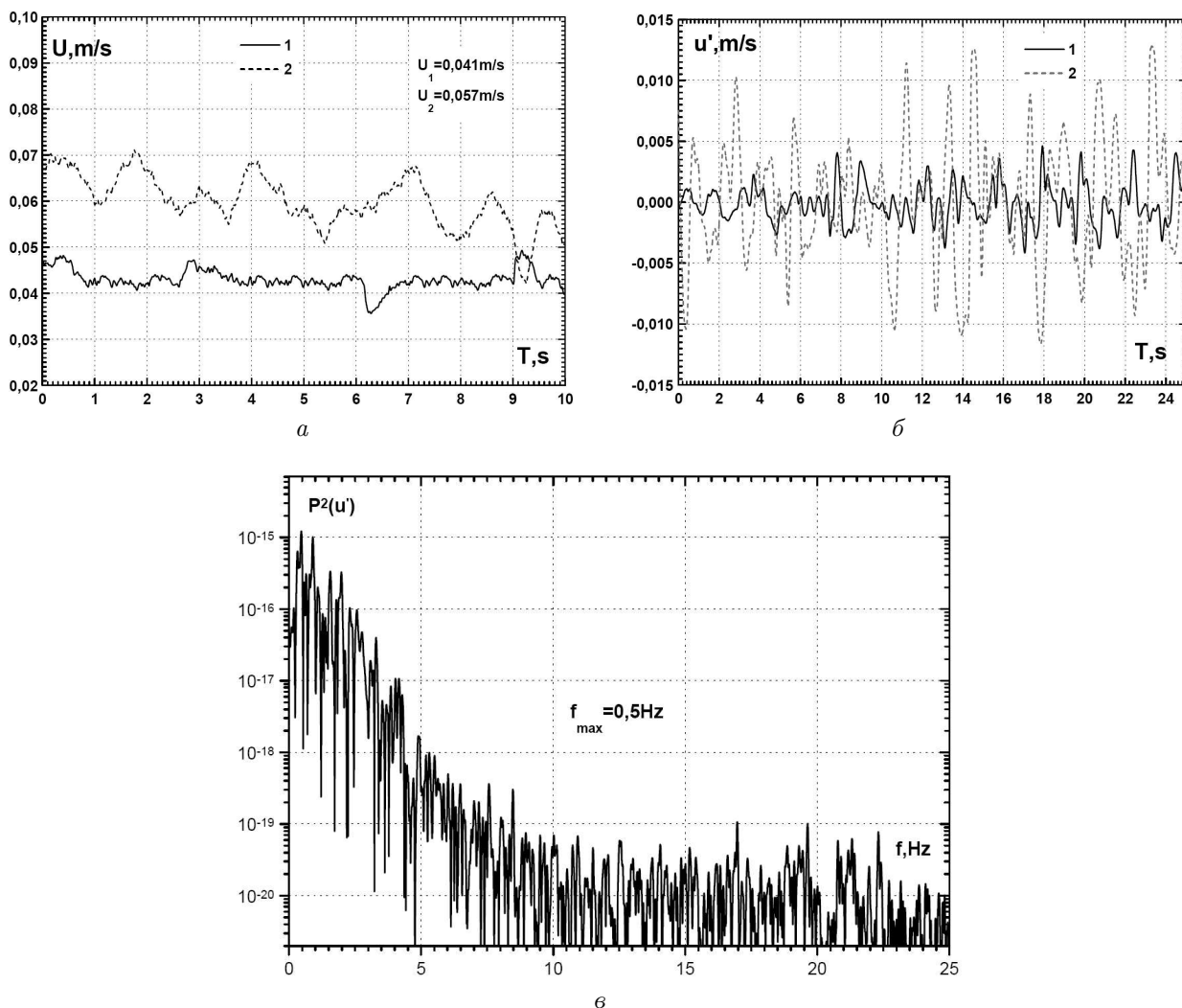


Рис. 6. Залежності середньої (а) і пульсаційної (б) швидкостей у часі та спектральні потужності пульсацій швидкості (в) перед передньою центральною палею трирядного ротору

ташування. Цьому діапазону частот відповідають числа Струхаля, розраховані по діаметру опори і швидкості потоку у гідродинамічному каналі, що не перевищують значення $St = fd/U_\infty \leq 3$. Найбільші рівні пульсацій швидкості спостерігаються на частоті 0.5 Гц або $St=0.14$ (див. рис. 6 в), що відповідає частоті коливань підковоподібного вихору у вертикальній і горизонтальній площині. Обертання підковоподібного вихору навколо своєї вісі відбувається переважно з частотою 1 Гц ($St=0.27$). Пульсації швидкості, які відповідають частоті обертання вихору, мають меншу амплітуду, що можливо визначити із порівняння спектральних рівнів на рис. 6 в для вказаних частот. Подібний коливальний процес когерентного підковоподібного вихору, що огинає передню централь-

ну опору, та його частота обертання спостерігалися в роботах [20, 23], про що раніше згадувалося, та при візуальних досліджах за допомогою контрастних речовин, що фарбували воду, які випускалися у вигляді струменя перед місцем спряження центральної опори і плоскої поверхні (див. рис. 9 у роботі [1]).

Як показує досвід експериментальних робіт і чисельного моделювання механізму утворення вихорів і їх розвитку у спряжених течіях [3, 23, 29, 31, 32], підковоподібні вихори і весь вихоровий рух поблизу погано обтічних тіл є суттєво нестаціонарним пульсуючим процесом. Крім того, подібні вихрові системи в багатьох випадках є і неоднорідні у просторі. Тому статистична обробка результатів таких випадкових процесів з явною нестаціо-

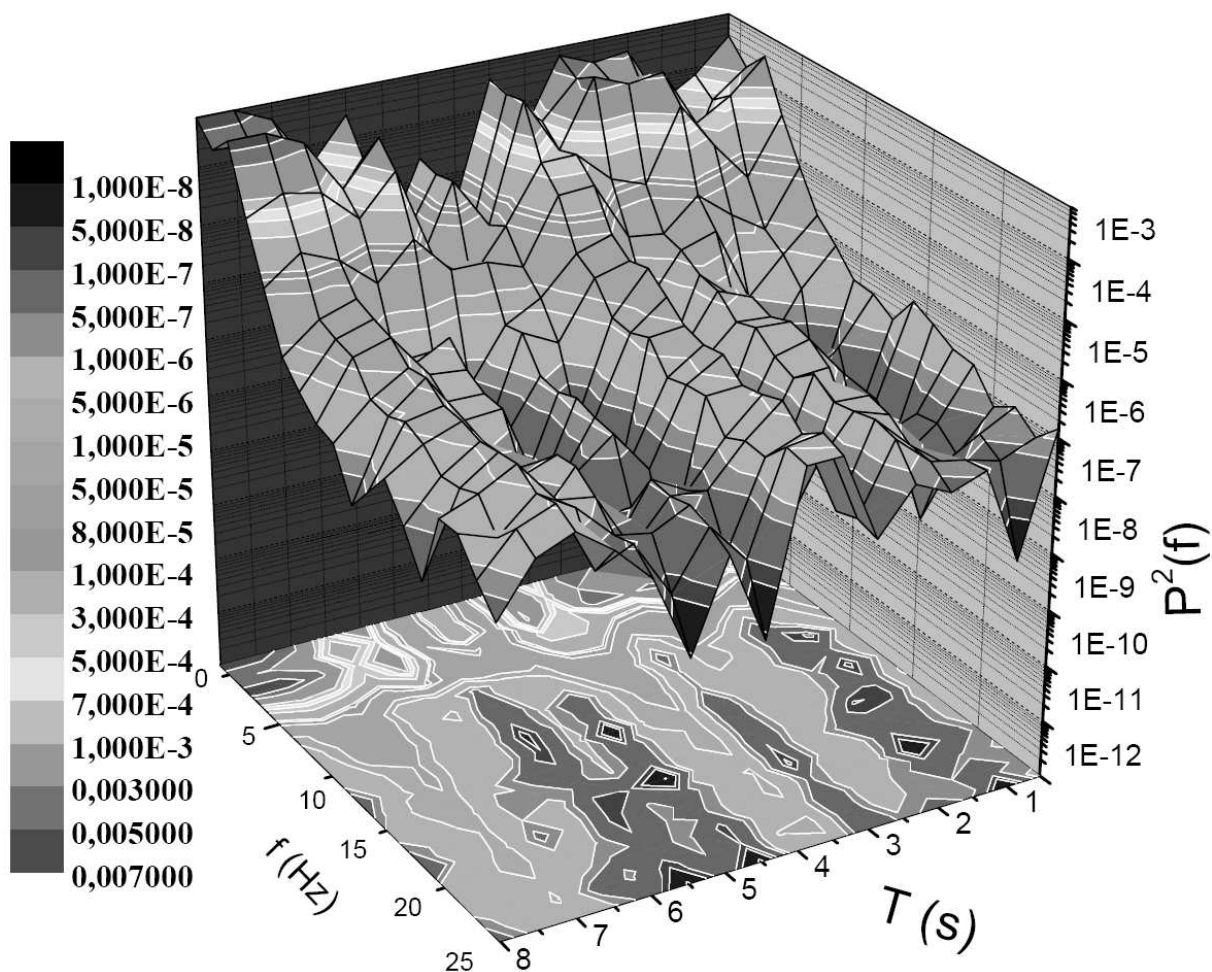


Рис. 7. Спектрограма пульсацій швидкості в процесі формування і розвитку вихрових структур перед передньою центральною палею трирядного ростверку

нарністю і неоднорідністю має бути виконана за спеціальними програмами і методиками, зокрема умовними методами аналізу [30]. У ряді робіт такі процеси аналізуються за допомогою миттєвих або короточасних спектральних і кореляційних залежностей [33, 34]. Остання методика була використана нами під час обробки та аналізу полів швидкостей вихрового руху у спряженій течії поблизу моделей мостових опор на нерозмивному дні. У нашому випадку ми використали короточасний метод обробки експериментальних даних. За проміжок часу статистичного аналізу було прийнято 1 с – а саме той час, який відповідає частотам обертання підковоподібного вихору навколо своєї осі, яка коливається, як когерентна структура, з меншою частотою або більшим періодом у просторі поблизу основи циліндричної палі. Результати дослідів аналізуються з 20% перекриттям частотних

інтервалів. Такий метод аналізу надав нам можливість слідкувати за динамікою процесу розвитку когерентних або корелюваних вихрових систем поблизу обтічних опор.

Зміна спектральних характеристик у часі показана на рис. 7 у вигляді тривимірної спектрограми, де по відповідним вісям відкладені час спостереження у с, частота у Гц і спектральна густина пульсацій швидкості у $(\text{м/с})^2/\text{Гц}$. Ця спектрограма відповідає спектральній залежності пульсацій швидкості, що отримана при статистичній обробці експериментальних даних за період 60 с, і відображеній на рис. 6, в. Спектрограма чітко характеризує нестационарність випадкового процесу, що властиве полю пульсацій швидкості в передній частині центральної опори. На ній добре видно період формування і розвитку квазістійкого підковоподібного вихору, його частота обертання і ступінь

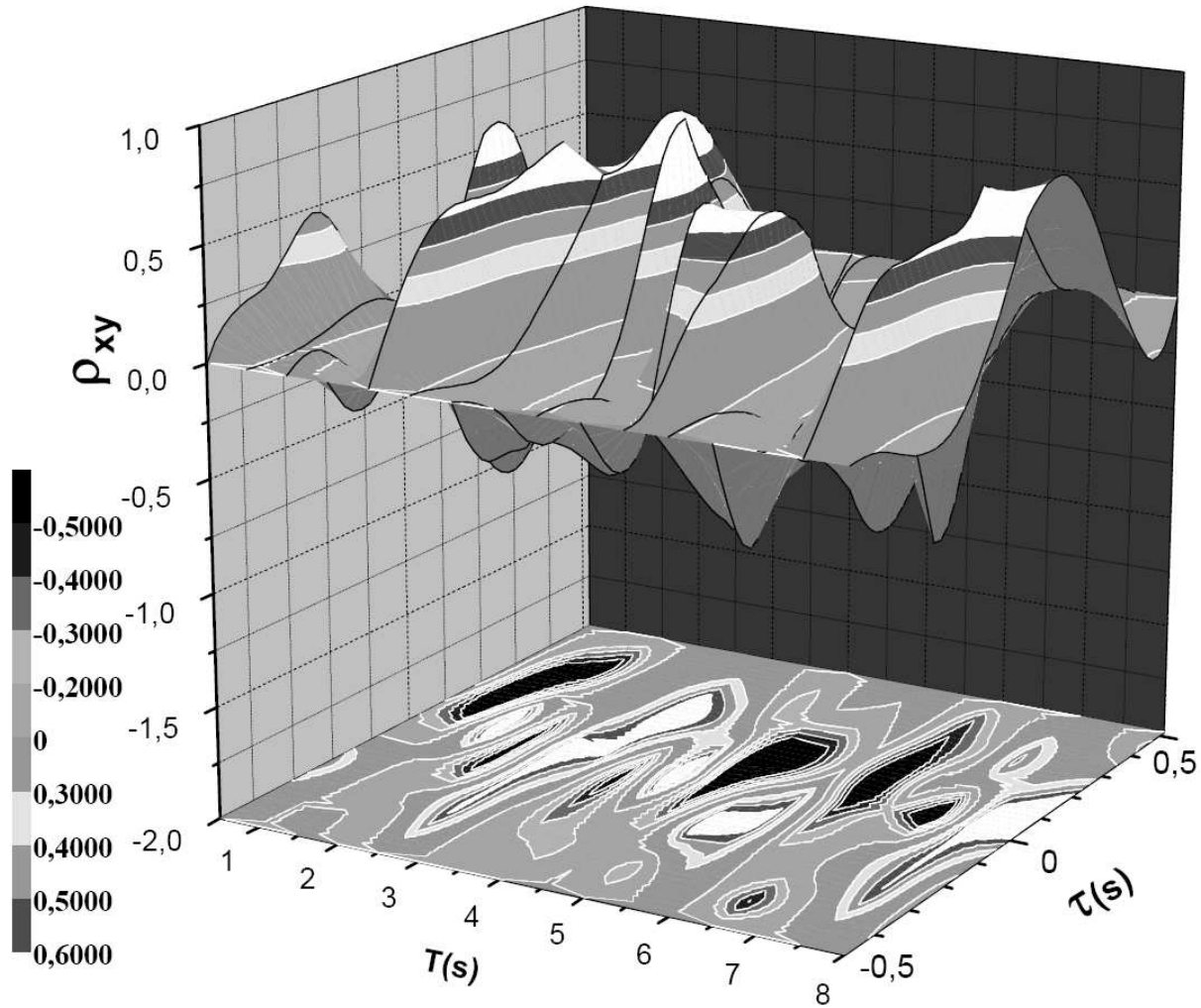


Рис. 8. Корелограма пульсацій швидкості у місці розташування когерентної підковоподібної вихрової структури в осьовому перетині першої центральної палі трирядного ростверку

трансформації енергії між частотними компонентами в процесі формування і осциляції в просторі та у часі, як самого підковоподібного вихору, так і оточуючого його вихрового потоку. Отже, частота обертання вихору близько (1...1.5) Гц, осциляції його у вертикальній і горизонтальній площинах майже (0.45...0.75) Гц, а енергія поля пульсацій швидкості в перерізі перед опорою, що досліджується, зосереджена, головним чином, до 10 Гц (зокрема, в динамічному діапазоні біля 60 дБ, дивись рис. 6, в).

Нестационарність процесу формування і розвитку підковоподібного вихору перед перешкодою, що погано обтікається, або перед мостовою опорою також характеризує тривимірна корелограма, яку показано на рис. 8. Вона відображає зміну у часі функції взаємної кореляції між сигналами термі-

сторних датчиків, розділених на відстані близько 4 мм один від одного. Корелограма характеризує ступінь корелюваності сигналів, що надходять на датчики, і час прийому корелюваного сигналу від одного до іншого. Корелограма приведена для пари датчиків, один з яких знаходився в ядрі вихору, а інший – в його периферійній області. Видно, що процес зміни корелюваності має осцилюючий характер з частотою близько 1 Гц (частота обертання вихору). Напрямок швидкості корелюваного сигналу в цьому місці відповідає напрямку основного потоку. Але періодично (близько 2 с) сигнали одного і іншого датчиків знаходяться в протифазі (світлі і темні зони на корелограмі повторюються). Ця періодична ($f \approx 0.5$ Гц) наявність максимумів кореляції і антикореляції обумовлена коливальним процесом підковоподібного вихору у про-

сторі і, відповідно, у часі, про що вище згадувалося.

Таким чином, застосування статистичних методів обробки та аналізу експериментальних даних надає можливість отримати кінематичні та геометричні характеристики когерентних вихрових структур, що утворюються поблизу моделей мостових опор внаслідок взаємодії течії, що обтікає їх, і полів тиску та швидкостей, які виникають у місці спряження обтічних поверхонь. Коротко часовий аналіз експериментальних даних надає можливість визначити динамічні особливості підковоподібних вихрових систем у спряженій течії і оцінити їх просторові та часові характеристики як у період їх формування, так і їх розвитку.

ВИСНОВКИ

Експериментальні дослідження полів швидкостей в характерних областях спряженої течії, де формуються та розвиваються великомасштабні когерентні підковоподібні вихори поблизу опор трирядного пального ростверку, дали можливість зробити наступні висновки:

1. Перед центральною опорою трирядного пального ростверку формується квазистійкий підковоподібний вихор діаметром близько 9 мм або $1/3$ діаметра опори, ядро якого розташовується на відстані (4...5) мм або $(0.15 : 0.19)d$ від опори і (3...4) мм або $(0.11 : 0.15)d$ від дна каналу, де встановлено трирядний ростверк.

2. Осереднена і пульсаційна складова швидкості у ядрі вихрової системи менша в (1.5...2) рази, ніж на його периферії. Підковоподібна вихрова система перед центральною палею обертається з частотою, близькою 1 Гц, якій відповідає число Струхала $St=0.27$, і коливається в горизонтальній і вертикальній площині з частотою 0.5 Гц або $St=0.14$.

3. Отримано короткочасові спектральні та кореляційні характеристики, які дозволили дослідити нестационарні і неоднорідні пульсації швидкості, які обумовлені дією підковоподібних вихорів на поле швидкостей у спряженій течії. Тривимірні спектрограми і корелограми показали динаміку вихрового процесу поблизу спряжених поверхонь.

4. Встановлено характерні особливості поля пульсацій швидкості як у просторі, так і у часі, показано місце розташування квазистійкого підковоподібного вихору, його частоту обертання, швидкості переносу та частоту коливання поблизу центральної опори трирядного ростверку.

ПОДЯКА

Автори щиро вдячні проф., докт. фіз.-мат. наук В. І. Нікішову та ст. наук. співр., канд. фіз.-матем. наук В. О. Горбаню за активну участь при розробці програми експериментів та обговоренні результатів дослідів і пров. наук співр., канд. техн. наук А. П. Макаренкову та зав. сектором О. О. Коту за участь при проведенні експериментальних досліджень.

1. Воскобійник А. В., Воскобійник В. А., Воскобойник О. А. Спряжене обтікання трирядного пального ростверку на пласкій поверхні. Частина 1. Формування підковоподібних вихорів // Прикл. гідромех.– 2008.– 10, № 3.– С. 28–39.
2. Воскобойник А. А., Воскобойник А. В., Воскобойник В. А., Марченко А. Г., Никишов В. И. Локальний размыв грунта при взаимодействии мостовых опор, находящихся в следе друг за другом // Прикл. гидромех.– 2006.– 8, № 3.– С. 16–26.
3. Melville B. W. Pier and abutment scour: Integrated approach // J. Hydr. Eng.– 1997.– 123, № 2.– P. 125–136.
4. Kirkil G., Constantinescu S. G., Ettema R. Coherent structures in the flow field around a circular cylinder with scour hole // World Water and Environmental Resources Congress, EWRI.– Alaska.– 2005.– P. 1–12.
5. Hatton K. A. Scour and ripple migration offshore of a vertically mounted pile subjected to irregular waves.– M.S. thesis : Graduate School of The Ohio State University, 2006.– 96 p.
6. Ettema R. Scour at bridge piers.– Report 216 : School of Engineering, The University of Auckland, New Zealand, 1980.– 67 p.
7. Dargahi B. Flow field and local scouring around a cylinder.– Bulletin No: TRITA-VBI-137: Royal Institute of Technology, Hydraulics Laboratory, Stockholm, Sweden, 1987.– 49 p.
8. Dargahi B. Controlling mechanism of local scouring // J. Hydr. Eng.– 1990.– 116, № 10.– P. 1197–1214.
9. Sumer B. M., Bundgaard K., Fredsoe J. Global and local scour at pile groups // Int. J. Offshore Polar Eng.– 2005.– 15, № 3.– P. 204–209.
10. Ettema R., Kirkil G., Muste M. Similitude of large-scale turbulence in experiments on local scour at cylinders // J. Hydr. Res.– 2006.– 132, № 1.– P. 33–40.
11. Simpson R. L. Junction flows // Annu. Rev. Fluid Mech.– 2001.– 33.– P. 415–443.
12. Lin C., Lai W.-J., Chang K.-A. Simultaneous particle image velocimetry and laser Doppler velocimetry measurements of periodical oscillatory horseshoe vortex system near square cylinder-base plate juncture // J. Eng. Mech.– 2003.– 129, № 10.– P. 1173–1188.
13. Chen J. W. Study on the flow characteristics of horseshoe vortex system near the juncture of a rectangular pillar.– M.S. thesis : Dept. of Civil Engineering, National Chung-Hsing Univ., Taiwan, 1999.– 117 p.

14. *Lin C., Chiu P. H., Shieh S. J.* Characteristics of horseshoe vortex system near a vertical plate-base plate junction // *Exp. Therm. Fluid Sci.*– 2002.– **27**, № 1.– P. 25–46.
15. *Greco J. J.* The flow structure in the vicinity of a cylinder-flat plate junction: Flow regimes, periodicity, and vortex interactions.– M.S. thesis : Dept. of Mechanical Engineering and Mechanics, Lehigh Univ., Bethlehem, Pa, 1990.– 121 p.
16. *Constantinescu G., Koken M.* Time dependent and time averaged turbulence structure of flow past a surface mounted cylinder // *Proc. 4-th ICCHMT, Paris, France.*– 2005.– № 139.– P. 1–3.
17. *Baker C. J.* The laminar horseshoe vortex // *J. Fluid Mech.*– 1979.– **95**, pt. 2.– P. 347–367.
18. *Dargahi B.* The turbulent flow field around a circular cylinder // *Exp. Fluids.*– 1989.– **8**, № 1.– P. 1–12.
19. *Paik J., Escauriaza C., Sotiropoulos F.* On the bimodal dynamics of the turbulent horseshoe vortex system in a wing-body junction // *Phys. Fluids.*– 2007.– **19**, № 4.– P. 045107-1–20.
20. *Devenport W. J., Simpson R. L.* Time-dependent and time-averaged turbulence structure near the nose of a wing-body junction // *J. Fluid Mech.*– 1990.– **210**.– P. 23–55.
21. *Olcmen S. M., Simpson R. L.* Influence of wing shapes on surface pressure fluctuations at wing-body junctions // *AIAA J.*– 1994.– **32**.– P. 6–15.
22. *Olcmen S. M., Simpson R. L.* Experimental transport-rate budgets in complex 3-D turbulent flow near a wing/body junction // *Int. J. Heat Fluid Flow.*– 2008.– **29**, № 4.– P. 874–890.
23. *Kirkil G., Constantinescu S. G., Ettema R.* Investigation of the velocity and pressure fluctuations distributions inside the turbulent horseshoe vortex system around a circular bridge pier // *In River Flow 2006*, ed. R. M. L. Ferreira.– Taylor and Francis.– 2006.– P. 709–718.
24. *Meinders E. R., Hanjalic K.* Vortex structure and heat transfer in turbulent flow over a wall-mounted matrix of cubes // *Int. J. Heat Fluid Flow.*– 1999.– **20**.– P. 255–267.
25. *Martinuzzi R., Havel B.* Turbulent flow around two interfering surface-mounted cubic obstacles in tandem arrangement // *ASME J. Fluids Eng.*– 2000.– **122**.– P. 24–31.
26. *Meinders E. R., Hanjalic K.* Experimental study of the convective heat transfer from in-line and staggered configurations of two wall-mounted cubes // *Int. J. Heat and Mass Transfer.*– 2002.– **45**.– P. 465–482.
27. *Martinuzzi R., Havel B.* Vortex shedding from two surface-mounted cubes in tandem // *Int. J. Heat Fluid Flow.*– 2004.– **25**.– P. 364–372.
28. *Paik J., Sotiropoulos F., Porte-Agel F.* Detached Eddy Simulation of flow around two wall-mounted cubes in tandem // *Int. J. Heat Fluid Flow.*– 2008.– **29**, № 4.– P. 1190–1198.
29. *Yakhot A., Liu H., Nikitin N.* Turbulent flow around a wall-mounted cube: A direct numerical simulation // *Int. J. Heat Fluid Flow.*– 2006.– **27**, № 6.– P. 994–1009.
30. *Бендаг Дж., Пирсол А.* Измерение и анализ случайных процессов: Пер. с англ.– М: Мир, 1974.– 464 с.
31. *Sahin B., Ozturk N. F., Gurlek C.* Horseshoe vortex studies in the passage of a model plate-fin-and-tube heat exchanger // *Int. J. Heat Fluid Flow.*– 2008.– **29**, № 2.– P. 340–351.
32. *Ataie-Ashtiani B., Beheshti A. A.* Experimental investigation of clear-water local scour at pile groups // *J. Hydr. Eng.*– 2006.– **132**, № 10.– P. 1100–1104.
33. *George W. K., Beuther P. D., Lumley J. L.* Processing of random signals // *Proc. of the Dyn. Flow Conf.*– 1978.– № 7.– P. 757–800.
34. *Вентцель Е. С., Овчаров Л. А.* Теория случайных процессов и ее инженерные приложения.– М.: Высш. шк., 2000.– 383 с.