

УДК 532.5

СПРЯЖЕНЕ ОБТІКАННЯ ТРИРЯДНОГО ПАЛЬНОГО РОСТВЕРКУ НА ПЛАСКІЙ ПОВЕРХНІ. ЧАСТИНА 1. ФОРМУВАННЯ ПІДКОВОПОДІБНИХ ВИХОРИВ

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

Інститут гідромеханіки НАН України, Київ

Отримано 09.04.2008

Наведено результати експериментальних досліджень з вивчення генерації та розвитку підковоподібних і слідових вихорів, які обумовлені взаємодією потоку, що натікає, з трирядним палним ростверком, що встановлено на плоскій жорсткій поверхні. Для проведення дослідів розроблено та створено вимірювальний комплекс, систему обробки та аналізу даних. Виготовлені мініатюрні термісторні датчики швидкості та п'єзорезистивні датчики швидкісного натиску. Проведено візуальні вимірювання структури вихрового потоку в області спряження ростверку і плоскої пластини за допомогою фарб та контрастного покриття, що змиваються водою. Вимірювання швидкості переносу вихрових структур поблизу моделей мостових опор здійснювалось термісторними датчиками, які знаходились у кореляційному блоці. Це дозволило знайти не тільки швидкість, але й напрямок руху великомасштабних когерентних вихорів у спряжених течіях. Встановлено джерела локального та глобального розмиву ґрунту перед груповою опорою. Ними стали підковоподібні та слідові вихори, а також бічна течія між циліндричними палями. Інтенсивність підковоподібних вихорів і зсувних напруг на стінці збільшується в носовій та кормовій частинах трирядного ростверку. Групування опор та бічні течії призводять до порушення періодичності появи вертикальних торнадо подібних слідових вихорів позади обтічних конструкцій. Найбільші зсувні напруги спостерігаються перед передніми опорами та між першою і другою боковими опорами трирядного ростверку.

Представлены результаты экспериментальных исследований по изучению генерации и развития подковообразных и следовых вихрей, которые обусловлены взаимодействием набегающего потока с трехрядным свайным 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. Проведены визуальные измерения структуры вихревого потока в области сопряжения ростверка и плоской пластины посредством красящих веществ и смываемых контрастных покрытий. Измерения скорости переноса вихревых структур вблизи моделей мостовых опор производилось термисторными датчиками, находящимися в корреляционном блоке, что позволило определить не только скорость, но и направление движения крупномасштабных когерентных вихрей в сопряженных течениях. Установлены источники локального и глобального размыва грунта перед групповой опорой. Ими стали подковообразные и следовые вихри, а также боковые течения между цилиндрическими сваями. Интенсивность подковообразных вихрей и касательных напряжений на стенке увеличивается в носовой и кормовой частях трехрядного ростверка. Группирование опор и боковые течения приводят к нарушению периодичности появления вертикальных торнадо подобных следовых вихрей позади обтекаемых конструкций. Наибольшие касательные напряжения наблюдаются перед передними опорами и между первой и второй боковыми опорами трехрядного ростверка.

The experimental research results on the study of generation and development of horseshoe and wake vortices, 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, processing and the analysis data system is developed and created. The miniature thermistor velocity sensors and piezoresistive velocity head sensors are made. Visual measurements of the vortex flow structure are carried out in the junction region of a grillage and a flat plate by means of dye-stuffs and washed off contrast coatings. 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. Local and global sources of a bed scours before a complex pair are established. That is the horseshoe and wake vortices and also lateral currents between cylindrical piles. Intensity of the horseshoe vortices and wall shear stresses increases in front and rear regions of the three-row grillage. Group piles and lateral currents result in aperiodicity of the vertical tornado-similar wake vortices behind the streamlined constructions. The greatest shear stresses are observed before forward piles and between the first and second lateral piles of the three-row grillage.

ВСТУП

Проектування та будівництво мостових опор зв'язане, в першу чергу, з урахуванням гідродинамічних особливостей руслових потоків, через які споруджуються мости, оскільки надмірний розмив ґрунту поблизу мостових опор нерідко призводить до руйнування будівельних конструкцій. Це особливо актуально, коли будуються мостові опори складної форми або реалізується їх групування,

що істотним чином ускладнює інженерний розрахунок оцінки умов експлуатації мостових переходів. Тому в переважній більшості випадків разом з математичним моделюванням гідродинаміки обтікання опор застосовується фізичне моделювання руслових потоків, через які будуються мостові переходи. Не дивлячись на велику кількість робіт (див., наприклад, [1-6]), які сфокусовано, головним чином, на прогноз розмірів отвору розмиву і максимальної його глибини, чіткого розуміння механізмів, які обумовлюють взаємодію потоку з мо-

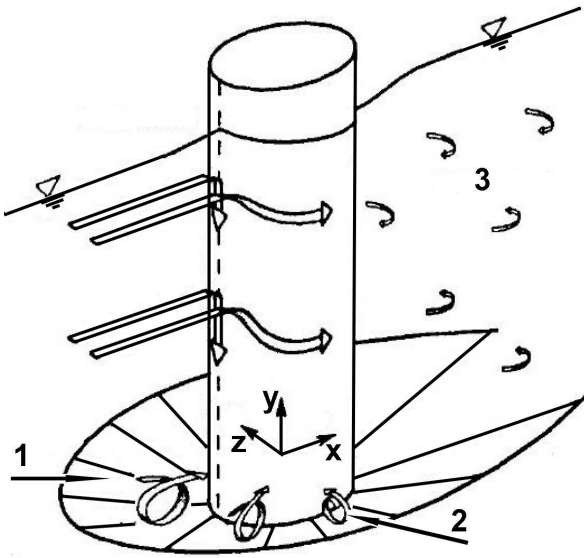


Рис. 1. Схема утворення підковоподібної вихрової системи перед круговим циліндром та слідових вихорів позаду нього: 1 – отвір розмиву; 2 – підковоподібний вихор; 3 – слідові вихори

стовою опорою та дном річки, ще поки не отримано.

Навколо мостової опори існує досить широкий діапазон масштабів вихрових структур, які керують процесом перенесення ґрунту. Незалежно від форми опори, одним з основних механізмів [7–9], який управляє формуванням і подальшою еволюцією отвору розмиву, є поява намистоподібної вихрової структури зазвичай відомої, як підковоподібна система (рис. 1). Так, щоб зрозуміти механізм розмиву, в першу чергу, необхідно якісно описати структуру когерентних вихорів, що формують підковоподібну систему, в різних режимах течії та кількісно охарактеризувати цей ефект у потоці та на дні річки поблизу основи опори.

Відрив примежового шару та формування відривної (застійної) лінії на поверхні дна навколо опори є наслідком несприятливого градієнта тиску, обумовленого наявністю обтічної опори. Ці повздовжні несприятливі градієнти тиску є також основними чинниками формування намистоподібних вихорів навколо фронтальної частини основи опори [10–13]. Підковоподібні вихори виникають через реорганізацію завихреності примежового шару вниз за потоком від відривної лінії. Первинна підковоподібна вихрова структура має той же напрямок обертання, що і завихреність у примежовому шарі. Підковоподібний вихор витягується навколо опори і охоплює її передню частину поблизу дна, частково через поперечні градієнти

тиску. Отже, бічні вихрові лінії стають орієнтованими в повздовжньому напрямку і мають завихреність, протилежно направлену по обох бічних сторонах обтічної опори. Основні намисто подібні вихори переносять більш високошвидкісну рідину уздовж фронтальної частини опори у напрямку до дна, яке звичайно називається спадаючою течією. Як результат взаємодії між спадаючою течією, дном і підковоподібним вихором, опір навколо фронтальної частини опори збільшується. У разі турбулентної течії розташування, масштаб і інтенсивність підковоподібних вихорів сильно змінюється в часі. Вони генерують високу турбулентність і пульсації тиску та утворюють значні дотичні напруги на дні, що призводить до розмиву ґрунту поблизу обтічних опор [8, 9, 14].

Відрив властивий як ламінарному, так і турбулентному примежовому шару, через повздовжній несприятливий градієнт тиску, але ламінарний примежовий шар відривається значно легше, ніж турбулентний [15–17]. Оскільки в першому випадку збільшення швидкості з відстанню від плоскої пластини відбувається повільніше, тому несприятливий градієнт тиску може легше затримувати поволі рухома рідину поблизу плоскої поверхні. Турбулентний примежовий шар чинитиме опір цьому несприятливому градієнту тиску на деякій відстані далі вниз за потоком перед відривом і ближче до обтічної опори. От чому відрив потоку від поверхні дна відбувається пізніше при вищих значеннях чисел Рейнольдса. У ламінарному потоці розмір підковоподібного вихору і дотичні напруги на дні ростуть із збільшенням числа Рейнольдса, але, з іншого боку, спостерігаються протилежні зміни при турбулентному режимі обтікання [12]. Огляд літературних даних [18–20] показує фундаментальні аспекти течії навколо погано обтічних тіл, зокрема, обтікання кругового циліндра. У роботах [2, 21, 22] зроблено висновок, що структура підковоподібної вихрової системи сильно організована і періодична, коли набігаючий примежовий шар є ламінарним. Навпаки, підковоподібна вихрова система має багаточисельний ансамбль когерентних структур різних масштабів у широкому діапазоні енергомістких частот у спектрах пульсацій швидкості і тиску, коли набігаючий потік є турбулентним [22, 23].

Для спряженого обтікання кругового циліндра на плоскій поверхні лінії току в площині симетрії циліндра і лінії дотичних напруг на дні, розраховані у роботах [24, 25], показані на рис. 2. Дифундуюча поперечна завихреність набігаючого примежового шару організовується в два первинні вихори (фокуси F_3 і F_5), розділені внутрішньою сідловою

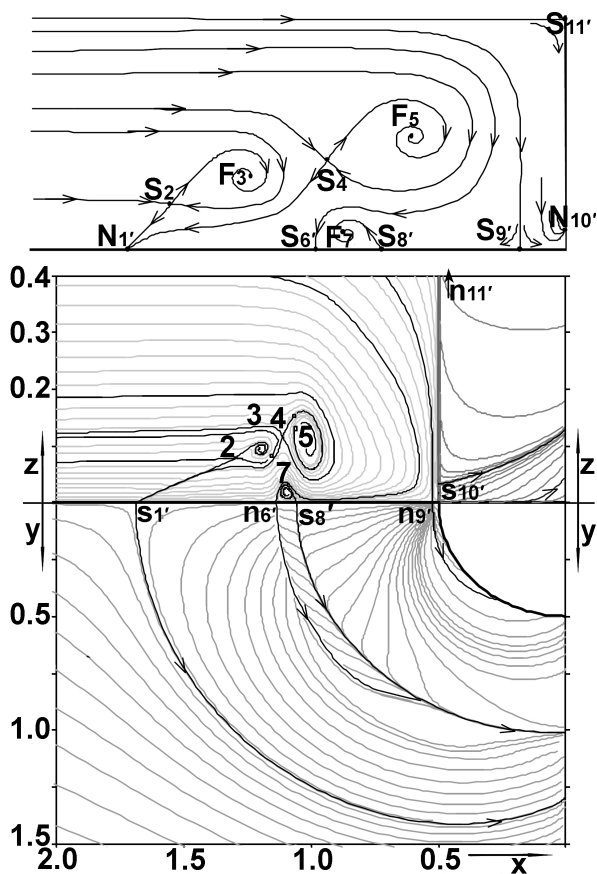


Рис. 2. Топологічна схема ліній току вихрової течії навколо кругового циліндра та ліній зсувних напружень на обтічній поверхні плоскої пластини

точкою (S_4). Вторинний вихор (F_7) відривається від поверхні дна і концентрує завихореність протилежного знаку, що генерується поворотною течією над поверхнею дна. Найбільш віддалена особлива точка на дні (N_1'), яка звичайно іменується, як початок відривного шару, що дає зростання первинної вихрової структури, є в даному випадку точкою приєднання. В той же час, друга внутрішня сідлова точка (S_2) відокремлює рідину, що поступає у вихрову структуру, від рідини, що спадає до жорсткої поверхні. Остаточна, вторинна циркуляція формується в кутовій області спряження циліндра і плоскої поверхні, де напівсідлова точка S_9' розділяє основну поворотну течію від течії, що збирається в напіввузлову точку N_{10}' .

Топологічна структура течії однозначно ідентифікується числом, природою та схемою зв'язку цих особливостей, оскільки всі лінії току повинні починатися і закінчуватися в критичних точках, і вони не можуть перетинатися одна з іншою. Додатково до цього, виразні групи особливо-

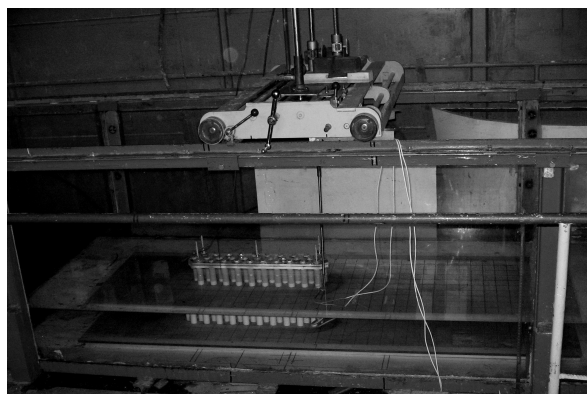


Рис. 3. Робоча ділянка гідродинамічного лотка, експериментальна модель та координатний пристрій для пересування датчиків

стей можуть ідентифікуватися топологічною структурою течії. Основна група формується фокусами двох основних вихорів (F_3 та F_5), напіввузлом N_1' , двома внутрішніми сідловими точками S_2 та S_4 і чверть-сідловою точкою S_{11}' на верхньому краю циліндра. Вторинний вихор визначається типовою комбінацією: напівсідловою точкою відриву S_8' плюс напівсідлова точка приєднання S_6' плюс фокус F_7 . Напівсідлова точка приєднання S_9' і напіввузлова точка приєднання N_{10}' ідентифікують кутову циркуляцію.

Використання комплексних або групових опор при будівництві мостових переходів призводить до глобального розмиву ґрунту навколо мостової конструкції в цілому разом з локальним розмивом окремих опор. Глобальний розмив утворюється підковоподібними вихровими структурами, що охоплюють всю складну мостову опору [26–28]. Механізм генерації та формування таких підковоподібних вихорів ідентичний тому, який властивий для одиночних опор, але при обтіканні комплексних опор присутня взаємодія між вихровими потоками, що генеруються поблизу кожного елемента мостової конструкції. Вихрова взаємодія залежить від низки гідродинамічних і гідрологічних параметрів та істотно змінюється від форми і конструкції групової опори, що накладає певні обмеження на чисельні та експериментальні оцінки особливостей генерації та розвитку вихрових структур поблизу опор і їхньої дії на прилеглий ґрунт [29, 30].

У представленій роботі передбачається експериментально визначити механізм генерації та розвитку вихрових структур, сформованих при спряженому обтіканні моделі мостової опори у вигляді трирядного пального ростверку на плоскій по-

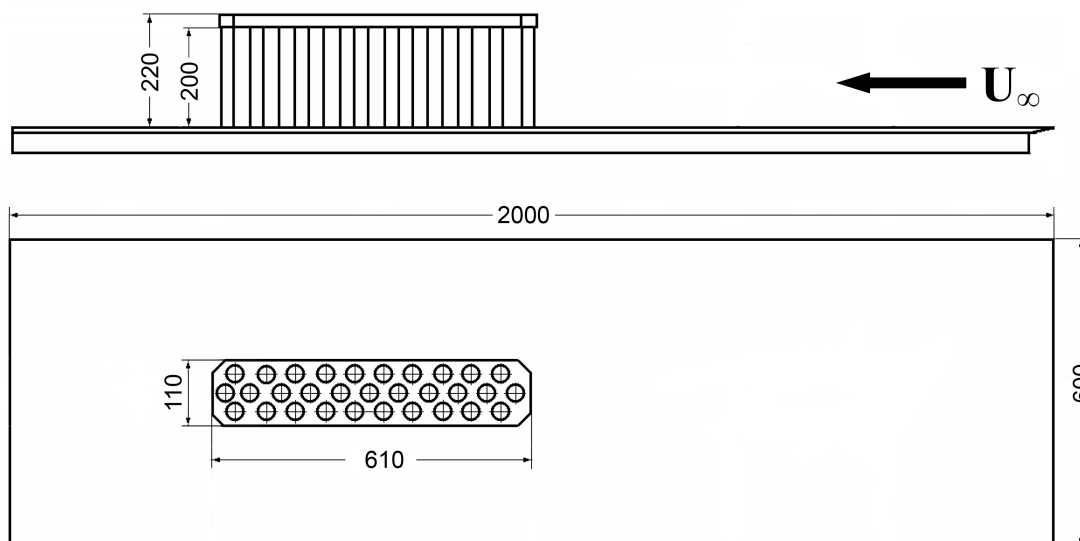


Рис. 4. Схема трирядного пального ростверку та його розташування на плоскій пластині

верхні. Разом з цим, необхідно оцінити особливості взаємодії підковоподібних вихорів, відповідальних за формування локального і глобального розмивів поблизу групової опори, а також слідових вихорів, які генеруються позаду мостових опор.

1. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА

Експериментальні дослідження проводились в гідродинамічному лотку в гідравлічній лабораторії Інституту гідромеханіки НАН України. Лоток має довжину приблизно 14 м і перетин 0.8 м на 1 м. Вимірювальна ділянка знаходилась на відстані 6 м від входу лотка. Стінки гідродинамічного лотка виготовлені із прозорого товстого скла для проведення візуальних досліджень (рис. 3). Вода в лоток подавалась за допомогою насосів через відстійну камеру, дифузори, хонейкомби та решітки, що спрямляють і турбулізують потік. Скидання води з гідродинамічного лотка здійснювалось через щити і заслінки, які регулюють рівень, а також конфузори і пристрої, котрі направляють потік та поглинають його шум. Таким чином, устаткування та обладнання гідродинамічного лотка дозволяють у широких діапазонах регулювати швидкість потоку, його рівень і ступінь турбулентності. Наявність координатних пристосувань, добре обтічних підтримуючих елементів та ножів, дозволяють досить точно, в відповідності із розрахун-

ковими значеннями, встановлювати досліджувані моделі, а також вимірювальні прилади, інструменти та датчики.

Модель трирядного пального ростверку встановлювалась на спеціально виготовленій плоскій пластині зі змінними тонкими листами, на яких була зроблена координатна сітка. При проведенні візуальних дослідів на тонкі листи наносився контрастний шар покриття, який змивався потоком, що натікав на досліджувану конструкцію. Плоска пластина мала ширину 0.6 м і довжину 2 м. Модель трирядного ростверку розташовувалась на відстані 1 м від початку пластини, в її серединному перетині (рис. 4). Плоска пластина з моделлю, що досліджується, встановлювалась вздовж осі і поблизу дна гідродинамічного лотка на висоту приблизно $70 \cdot 10^{-3}$ м (для зменшення впливу прилеглої шару над дном і крайових ефектів від стінок гідродинамічного лотка). Рівень води над пластиною з моделлю був приблизно 0.2 м і швидкість потоку регулювалась від 0.06 м/с до 0.25 м/с. Виміри проводились для моделі трирядного пального ростверку (рис. 5) шириною 0.103 м і довжиною 0.597 м, який складався із 31 палі діаметром 0.027 м, при цьому число Рейнольдса: $Re_x = xU_\infty/\nu = (4.4 - 18.6) \cdot 10^5$ і число Фруда $Fr = U_\infty/\sqrt{gH} = (0.04 - 0.18)$. Рівень турбулентності потоку в гідродинамічному лотку не перевищував декількох відсотків.

Оцінка просторових і часових характеристик ви-

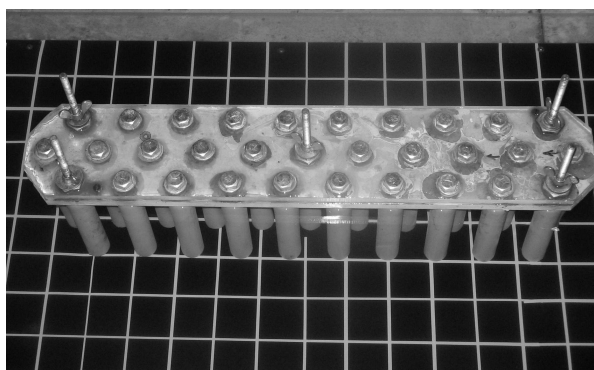


Рис. 5. Конструкція трирядного ростверку

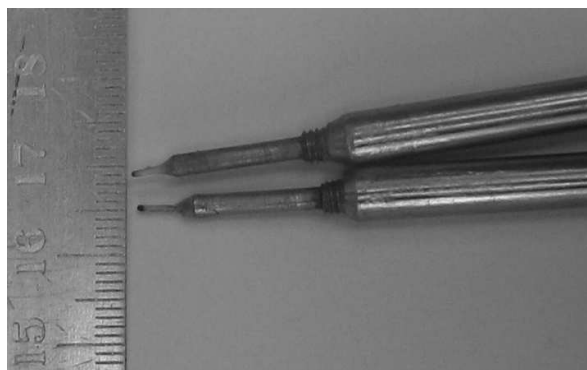


Рис. 6. Термісторні датчики осередненої та пульсаційної швидкості

хрового руху поблизу досліджуваних об'єктів і ступеня їх взаємодії з поверхнею, що обтікається, проводились під час візуальних досліджень. Візуалізація здійснювалась за допомогою водорозчинних фарб та чорнил, які вводились в досліджувану область потоку через мініатюрні трубки, а також нанесенням контрастних покриттів, які змивались потоком рідини, на поверхні, що обтікаються.

Кінематичні характеристики спряженої течії вимірювались за допомогою спеціально розроблених і виготовлених мініатюрних термісторних датчиків швидкості і п'єзорезистивних датчиків швидкісного натиску. Відомо, що при обдуванні потоком газу чи рідини нагрітого тіла відбувається конвективний теплообмін і нагріте тіло охолоджується. Ступінь охолодження тіла залежить як від теплофізичних властивостей взаємодіючих середовищ, так і від швидкості потоку. На принципі тепловідведення побудована робота термоанемометрів або термісторних датчиків. В наших дослідях був використаний чутливий елемент–термістор, що застосовується в електроніці при вимірах температур. Термістор – це напівпровідниковий кристал діаметром $0.8 \cdot 10^{-3}$ м з двома струмопровідними ніжками діаметром приблизно $0.1 \cdot 10^{-3}$ м, які фіксуються в циліндричній державці (рис. 6). При подачі електричного струму кристал нагрівається, а при обдуванні його потоком – охолоджується. В результаті цього внутрішній опір термістора змінюється і може бути зафіксованим. Для цього термістор включають у мостову чи напівмостову схему і по зміні напруги на відповідних плечах електричного мосту фіксують зміну температури, яка залежить від швидкості обтікаючого потоку. Потім електричний сигнал підсилюють, фільтрують і подають на контрольно-вимірювальну апаратуру та систему збору експериментальної інформації.

Манометричний датчик швидкісного натиску

фіксував тиск, який створював потік при натіканні на прийомну частину датчика. Датчик був виготовлений за принципами трубки Піто подвійного натиску (рис. 7), де в якості манометра використовувався п'єзорезистивний чутливий елемент. П'єзорезистор було нанесено на п'єзокварцевий кристал у вигляді дискової мембрани товщиною $1 \cdot 10^{-6}$ м і діаметром $1 \cdot 10^{-3}$ м, яка була затиснута по периферії. На цій мембрані з одного і іншого боку напилялись радіоелектронні елементи за мікроелектронної технології. В результаті мембрана під тиском згинається і діє на нанесені на її поверхню радіоелементи, опір яких змінювався пропорційно прикладеному навантаженню. Чутливий елемент датчика включається в мостовий чи напівмостовий електричний ланцюг. Далі електричний сигнал, пропорційний зміні тиску, і відповідно, швидкості потоку, як і для термісторного датчика, поступав на підсилювач та фільтри і подавався на контрольно-вимірювальну апаратуру та систему збору експериментальної інформації.

Як контрольно-вимірювальна апаратура використовувались підсилювачі напруги і струму, октавні і третиноктавні фільтри верхніх і нижніх частот, осцилографи, вольтметри пікових і середньоквадратичних значень, блоки живлення, акумуляторні батареї, джерела безперебійного живлення. Електричні сигнали термісторних датчиків швидкості і п'єзорезистивних датчиків швидкісного натиску реєструвались на чотирьох каналний прецизійний вимірювальний магнітофон фірми Брюль і К'єр.

Картини візуалізації фіксувались цифровими фотокамерами, встановленими в різних місцях вимірювальної ділянки гідродинамічного лотку, а також цифровими відеокамерами, забезпеченими відповідною системою синхронізації відеокадрів. Вся апаратура реєстрації інформації мала

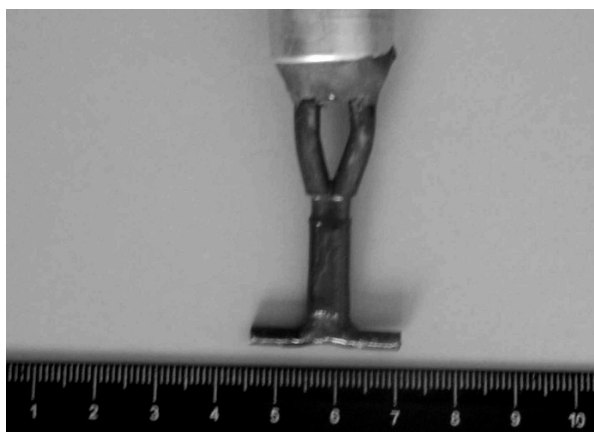


Рис. 7. Манометричний датчик швидкісного натиску

необхідні державки, штативи, кронштейни і вузли кріплення. Контроль відзнятого відео- та фотоматеріалу проводився за допомогою рідиннокристалічних екранів, якими обладнано фотоапарати і відеокамери. Відео- та фотоматеріал подавався на монітори персональних комп'ютерів і на екран телевізора, які було встатковано спеціальними інтерфейсами і системами електричного зв'язку.

Зареєстровані на вимірювальний магнітофон електричні сигнали від термісторних датчиків швидкості і датчика швидкісного натиску подавались на аналогово-цифрові перетворювачі, а потім на персональні комп'ютери або на спеціалізовані двоканальні комплекси кореляційного і спектрального аналізу фірми Брюль і К'єр. Фотографії та відеозображення з цифрових фотоапаратів і відеокамер реєструвались за допомогою відповідної апаратури і програмного забезпечення на персональних комп'ютерах. Обробка і аналіз експериментальних даних здійснювався за стандартними і спеціально розробленими програмами та методиками з застосуванням теорії ймовірності, математичної статистики і теорії випадкових процесів.

2. ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Як відомо, течія поблизу погано обтічних тіл, а також тих, що знаходяться одне за одним в сліді, є дуже складною вихровою течією. Тут формуються великомасштабні вихрові структури та дрібномасштабні вихори, які взаємодіють як між собою, так і з поверхнею, що обтікається. В результаті виникають складні, головним чином, нестаціонарні як в просторі, так і в часі поля швидкостей, тиску, концентрацій, температур та інших

скалярних та векторних параметрів взаємодіючих середовищ. Вивчення таких процесів потребує використання відповідного математичного апарату, який оперує з тривимірним простором, а також потужних і швидкодіючих обчислювальних комплексів. Вимірювання кінематичних і динамічних характеристик у такого класу процесах вимагає використання великої кількості високоточних малогабаритних датчиків, що мають високі техніко-економічні показники і значну швидкодію. Датчики, що використовуються для заміру фізичних параметрів, повинні вносити мінімальні спотворення вихрових потоків в області, що досліджується (бажано, щоб вони взагалі не впливали на потік). Опрацювання зареєстрованих такими датчиками сигналів вимагають використання значних баз даних, а також потужного математичного апарату, головним чином, статистичного, який дозволяє визначити характерні особливості вихрового руху та визначити його динамічні і кінематичні характеристики.

Методика проведення дослідів з вивчення взаємодії спряженої течії з трирядним палевим ростверком на жорсткій пласкій поверхні проводилась наступним чином. Перш ніж провести інструментальні заміри, робилась візуалізація потоку за допомогою водорозчинних фарб, які подавались в зону досліджень, і контрастних плівок згущеного молока на поверхні пластини. Спостереження за рухом барвників та розмивом плівки, а також обробка і аналіз картин візуалізації з відео- та фотоматеріалу дали можливість зареєструвати зони найбільших розмивів контрастного шару біля опор і масштаби та швидкості переносу та обертання вихрових структур у цих зонах. Потім в найбільш характерних областях вихрового руху у вигляді підковоподібних та слідових вихорів проводились інструментальні дослідження за допомогою термісторних та п'езорезистивних датчиків за спеціально розробленою програмою.

Наведені вимоги накладають певні умови на розробку програми і методики експериментальних досліджень по вивченню кінематичних характеристик вихрового руху поблизу опор мостового переходу і вплив їх на ступінь розмиву ґрунту біля опор. Малі геометричні розміри моделей мостових опор, а також швидкостей обтікання дають певні обмеження на засоби вимірювання, що використовуються (на їхні габарити, швидкодію і чутливість). Вимірювання потоків з малими швидкостями обумовлює великі труднощі, оскільки традиційні датчики стають для цього непридатними. Наприклад, мікровертушки зупиняються через внутрішній опір частин, що в них рухаються.

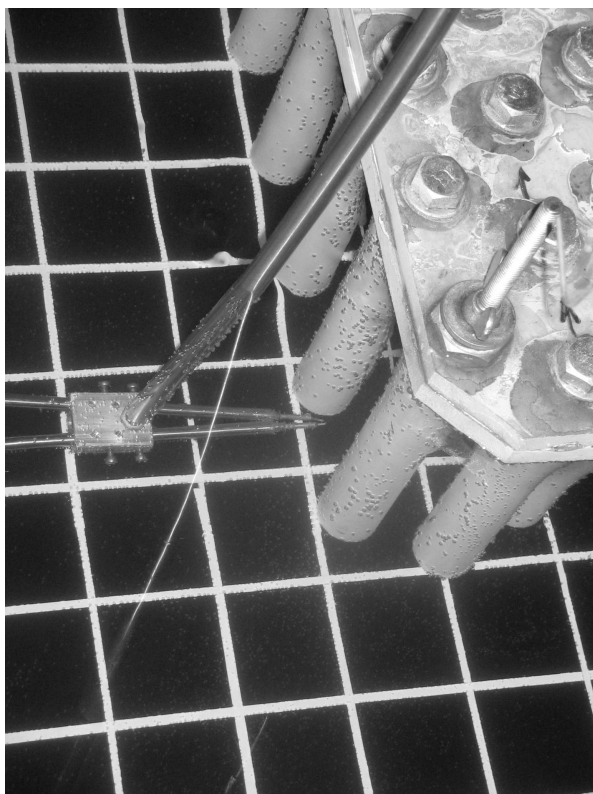


Рис. 8. Розташування кореляційного блоку термісторних датчиків швидкості поблизу трирядного ростверку

Дротяні та плівкові термоанемометри або термістори охолоджуються настільки повільним потоком, що тепловідведення практично немає і датчики не можуть реєструвати малі швидкості. В датчиках швидкісного натиску тиск змінюється так мало, що немає можливості зареєструвати його значення навіть високоточними в наш час електронними манометрами. Тому швидкості, які не перевищують 0.1 м/с, застосовані нами термісторний датчик швидкості і п'єзорезистивний датчик швидкісного натиску реєструють на межі своєї чутливості, де порушується лінійність їхніх характеристик. Крім того, термістор не має спрямованості при визначенні швидкості потоку, який його охолоджує, і використання такого датчика в складних вихрових течіях з явною нестаціонарністю стає проблематичним, а в деяких випадках й неможливим. Трубка Піто, хоч і відноситься до класу направлених датчиків, має відносно великі габарити і вимірювання за її допомогою нестаціонарних вихрових потоків у куткових областях обтікання і поблизу опор є нереальним.

У зв'язку з цим нами запропонована методика використання двох неексцентричних термісторних да-

тчиків у кореляційному блоці. Датчики встановлюються в державці на фіксованій відстані один від одного (рис. 8). Вимірюється взаємна кореляція між сигналами, що зареєстровані двома датчиками. Якщо між датчиками сигнал повністю не корельований (лінійно не зв'язаний), то коефіцієнт взаємної кореляції дорівнює нулю. Якщо сигнал повністю корельований (перешкоди між двома сигналами відсутні), то коефіцієнт взаємної кореляції дорівнює одиниці. Проміжні значення коефіцієнта взаємної кореляції (між 0 та 1) двох випадкових сигналів говорять про ступінь корельованості сигналів на фоні перешкод [31]. Реєстрація часу затримки, що досягається з великою точністю, при якому спостерігається максимум коефіцієнта взаємної кореляції, дозволяє визначити швидкості переносу кореляційного сигналу, оскільки відстань між датчиками відома. Знак часу затримки дає можливість знайти напрям кореляційного сигналу між двома прийомними точками в просторі, де знаходяться чутливі елементи датчиків.

Згідно з запропонованою програмою дослідів контроль швидкості потоку, який обтікає трирядний ростверк, здійснювався за допомогою датчика швидкісного натиску, який був розташований перед опорами на відстані 1.5 м і на глибині 0.1 м від поверхні потоку в гідродинамічному лотку. Поле швидкостей і масштаби вихрових структур і зон розмиву контрастного покриття біля опор трирядного ростверку оцінювались в результаті обробки та аналізу візуальних дослідів. Відео- та фотоматеріали оброблялись на персональних комп'ютерах з використанням відповідного програмного забезпечення. Значення швидкостей вихрової течії, які отримані із замірів термісторними датчиками, оброблялись на персональних комп'ютерах, а також на спеціалізованих кореляційних аналізаторах. Це дало можливість отримати статистичні характеристики поля швидкостей в вимірюваних областях у вигляді осереднених складових швидкості переносу корельованого сигналу, що обумовлений дією великомасштабних когерентних вихрових структур у спряженій течії.

3. МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

Всі засоби, які застосовувались при досліді, калібрувались або тестувались за відповідними програмами та методиками. Контрольно-вимірювальна апаратура і засоби реєстрації та аналізу даних відповідали паспортним характери-

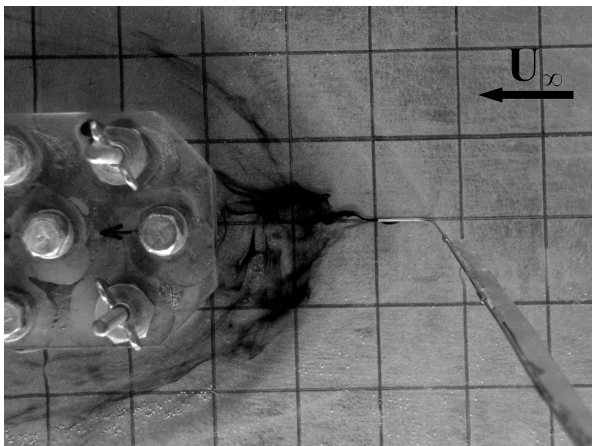


Рис. 9. Підковоподібна вихрова система перед фронтальною частиною мостової опори

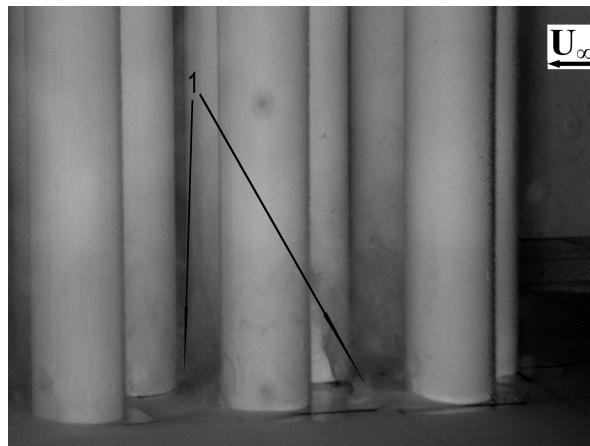


Рис. 10. Слідві вертикальні вихори позаду кругових циліндрів, які складають трирядну мостову опору

стикам та технічним вимогам до них. Датчики та вимірювальні пристрої, які були спеціально розроблені та виготовлені для проведення даних досліджень, пройшли атестаційні та тестові випробування з метою отримання достовірних результатів науково-дослідних робіт. Калібрування та тестування проводились за допомогою абсолютних та відносних методів на спеціальних стендах і устаткуванні в лабораторіях Інституту гідромеханіки НАН України і в інших організаціях. В результаті здобуто метрологічні характеристики засобів вимірювання як в амплітудно-частотному, так і фазочастотному представленнях.

Похибка при вимірюваннях осереднених показань швидкості не перевищувала 4% (при достовірності 0.95 або 2σ), для пульсаційних значень похибка була меншою ніж 6%. Кореляційні залежності отримані з похибкою до 8% при достовірності 0.95. Кількісні параметри поля швидкостей та просторових і часових характеристик вихрових структур і зон розмиву контрастних шарів на поверхні плоскої пластини при візуалізації були встановлені з похибкою, яка не перевищувала 10%. Інструментальні дані та результати, які знайдені при візуалізації, загалом співпадали між собою з достатньою якісною і кількісною точністю.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДІВ ТА АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

Результати експериментальних дослідів по візуалізації спряженої течії навколо трирядного палевого ростверку показали, що перед циліндричними опорами формуються підковоподібні вихрові си-

стеми, які мають деяку відмінність від вихорів, що мають місце при класичному обтіканні одиночних циліндрів або їх груп у вигляді повздовжньої перенги [27, 32, 33]. При трирядному розташуванні циліндрів на плоскій поверхні, які відповідають конструкції ростверкової опори мостового переходу, що будується на річці Дніпро у Києві, інтенсивні підковоподібні вихрові системи формуються перед кожним із обтічних циліндрів, особливо передньої за потоком групи. Крім того, перед трирядною мостовою опорою зароджується підковоподібний вихор, який має невисоку інтенсивність. Цей вихор охоплює трирядну опору як одну цілу конструкцію. Так, для швидкості потоку 0.1 м/с і глибини русла 0.2 м, де досліджувалося спряжене обтікання трирядного ростверку, зона відриву пограничного шару і місце формування цього великомасштабного підковоподібного вихору знаходиться на відстані близько двох діаметрів циліндричної палі (див. рис. 9) від першого осьового циліндру. Ця підковоподібна вихрова структура огинає передню частину трирядної палевої конструкції на відстані $2d$ або 0.5 ширини самого трирядного ростверку, а потім розширюється під кутом приблизно 5° при пересуванні вниз за потоком.

Дрібніші за масштабом підковоподібні вихори формуються перед кожним із циліндрів, які складають дослідну конструкцію, і їхня інтенсивність зменшується при збільшенні відстані вниз за потоком у залежності від розташування окремої палі у обтічному ряду. В кормовій частині трирядного ростверку інтенсивність підковоподібних вихорів збільшується, що обумовлено ростом пористості трирядної конструкції, а звідси і зменшенням гідродинамічного тиску та опору в його кормі. Вза-

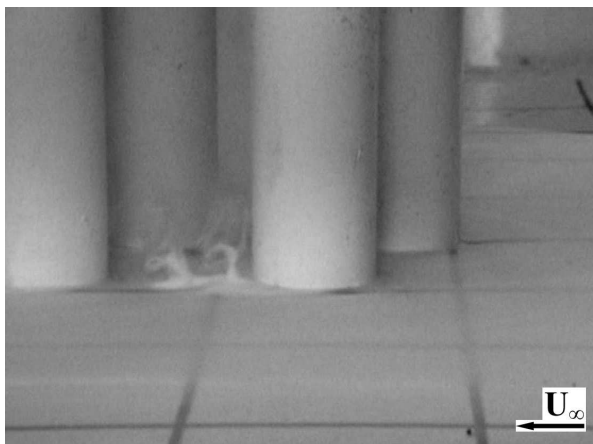


Рис. 11. Одночасне зародження пари вертикальних вихорів у ближньому сліді циліндричної палі

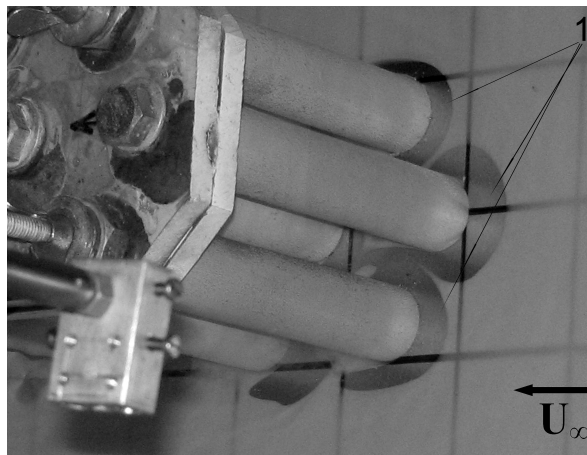


Рис. 12. Розмив контрастного покриття перед передньою групою циліндричних паль

емодія підковоподібного вихору, що обтікає першу центральну палю в дослідній конструкції, з підковоподібними вихорами, які зароджуються при обтіканні перших за потоком бічних паль, приводить до появи інтенсивної течії між першими та другими бічними циліндрами. Подібна, але менше інтенсивна, спряжена течія з'являється між передостанньою і останньою бічними палями в конструкції трирядного циліндричного ростверку.

Позаду обтічних циліндрів виникають торнадоподібні вертикальні вихрові системи, які створюють симетричну доріжку вихорів Кармана за першою центральною палею в трирядному ростверку. За боковими циліндрами, особливо там, де з'являються бічні течії (про які вище згадувалося), симетричність протилежно обертових вертикальних вихорів суттєво порушується. Наприклад, для швидкості потоку 0.075 м/с (рис. 10) один із ланцюжків торнадоподібних вихорів зароджується на відстані близько $(0.2 - 0.4)d$ вздовж зовнішньої бічної межі трирядної конструкції. Другий ланцюжок торнадо подібних вихорів, що обертаються в протилежному напрямку відносно перших, зароджується в осьовому перетині бокових циліндрів і на відстані приблизно $(0.4 - 0.6)d$ позаду першого бокового циліндра. Формування протилежно обертових вертикальних вихорів загалом спостерігається періодично то з одного, то з іншого боку, але іноді відбувається одночасне зародження пари вихорів, що проілюстровано на рис. 11. Частота появи торнадоподібних вихорів складає приблизно 0.5 Гц , що відповідає числу Струхала $St = fd/U_\infty \approx 0.18$.

Як відомо, формування і розвиток підковоподібних вихорів, вертикальних торнадоподібних ви-

хорів позаду обтічних тіл, а також існування інтенсивних пристінних течій, які спостерігаються між групою паль трирядного ростверку, приводить до появи значних зсувних напружень на обтічній поверхні поблизу з'єднання паль з плоскою поверхнею. Застосування контрастних покриттів, які змиваються потоком, дозволяє зробити оцінку значень зсувних напружень, що спостерігаються на обтічній поверхні. Так, розмив покриття в першу чергу відбувається спочатку перед першою бічною палею (азимутальний кут близько 65°), а потім перед першою центральною палею (азимутальний кут близько 45°). З плином часу розмив контрастного покриття спостерігається навколо фронтальних частин передньої групи паль і найбільша область розмиву з'являється між першими і другими боковими палями, де до розмивної дії підковоподібних та торнадоподібних вихорів долучається бічна течія між цими палями. На рис. 12 і 13 показано ступінь розмиву контрастної речовини на поверхні пластини під дією спряженої течії. Мінімальний розмив барвника, а отже мінімум зсувних напружень, буде в середній частині трирядного пального ростверку, що добре проілюстровано на рис. 13.

Експериментальні дослідження поля швидкостей проводились згідно з програмою за допомогою мініатюрних термісторів, формуючих кореляційну пару датчиків, встановлених у вимірювальних вертикалях поблизу фронтальної частини першої центральної опори і перед другою боковою опорою. В цих місцях спостерігається максимальне вихореутворення, що витікає із візуальних дослідів, а також спостерігається потужний пристінний вихровий потік. Вимірювання середньої групової швидкості переносу корельованих сигналів

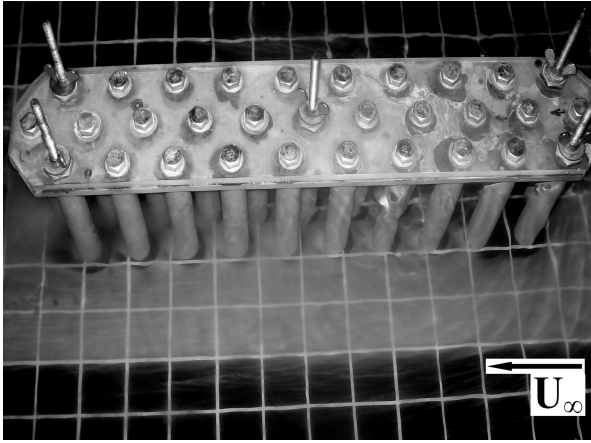


Рис. 13. Глобальний та локальний розмив барвника на поверхні пластини навколо трирядного ростверку

проводились парою термісторів, що обтікаються вихровим потоком (рис. 8), які розташовувались у трьох вертикальних перерізах з кроком 2 і 5 мм, а також у п'яти горизонтальних перерізах з кроком 2 мм. В результаті перед передньою центральною опорою поле швидкостей поміряно в перерізі $(0.4 \times 0.6)d$ відповідно в горизонтальному і вертикальному напрямку відносно площини пластини.

На рис. 14 наведена епюра ізотях або рівних середніх швидкостей в осьовому перерізі мостової трубчатой опори перед її центральною передньою палею. Як видно з рисунка, ізотяхи становлять собою криві, що замикаються в вигляді еліпсоїдів, які витягнуті в вертикальній площині. Ці криві відображають поле швидкостей для вихрової течії перед циліндричною опорою в вигляді добре відомого підковоподібного вихору, який обхоплює циліндр біля його підніжжя на плоскій поверхні. В проведених вимірюваннях в осьовому перерізі центральної опори діаметр цього вихору складає приблизно $9 \cdot 10^{-3}$ м або $1/3d$ при швидкості обтікання 0.1 м/с, числі Фруда $Fr \approx 0.07$ і діаметрі опори $27 \cdot 10^{-3}$ м. Ядро цього вихору знаходиться в місці розташування близько $(0.15 - 0.19)d$ в напрямку осі від поверхні передньої центральної палі і на відстані біля $(0.11 - 0.15)d$ від жорсткої плоскої поверхні. З віддаленням від центру вихору лінійна швидкість зростає і максимум її спостерігається поблизу опори на висоті розташування ядра вихору. Тут напрямок швидкості спрямовано до обтічної пластини, а її значення складає майже $0.6U_\infty$. Потім напрямок руху рідини поблизу дна змінюється і стає протилежним напрямку швидкості. Ця течія є основним джерелом розмиву ґрунту поблизу опор мостових переходів і, замикаючись над

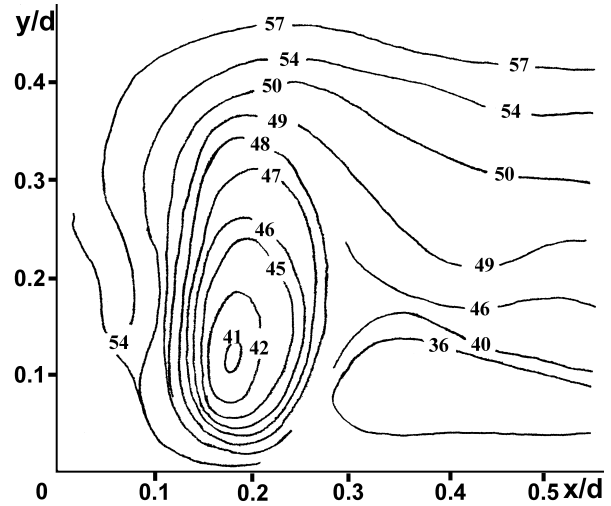


Рис. 14. Ізотяхи осереднених швидкостей в осьовому перетині перед центральною палею трирядного ростверку

обтічною поверхнею, вона створює циркуляційний рух. Епюри рівних пульсаційних складових швидкості мають мінімум поблизу місця розташування ядра квазистійкого підковоподібного вихору. Далі, при просуванні до периферії квазистійкого вихору, рівні пульсацій швидкості зростають. Максимум пульсацій швидкості було виявлено в місці взаємодії вихору з потоком, що обтікає досліджувану конструкцію поблизу центральної передньої палі, в перерізі $x \approx (0.26 - 0.30)d$ і $y \approx (0.15 - 0.22)d$.

Згідно з ізотяхами середніх і пульсаційних швидкостей в передній частині другої бокової опори формується вихор масштабом 14 мм на 10 мм або $(0.52 \times 0.37)d$, відповідно в горизонтальному (вісь x) і вертикальному (вісь y) напрямках. Ядро цього квазистійкого підковоподібного вихору, що омиває другу бокову опору, знаходиться в області з координатами $x \approx (0.26 - 0.30)d$; $y \approx (0.15 - 0.19)d$ і має яйцеподібну форму, видовжену в горизонтальному напрямку. Більш гостра частини форми вихору знаходиться ближче до кормової частини першої бокової палі. Значення швидкостей в ядрі і на периферії цього підковоподібного вихору на $(20 - 30)\%$ вище, ніж для квазистійкого вихору перед першою центральною палею. Поле пульсацій швидкості перед другою боковою палею також вище як в самому вихорі, так і в сусідніх з ним частинах потоку на $(15 - 20)\%$. Інтенсивність турбулентності у вигляді $\sqrt{u'}/U$ становить 12% і 50% відповідно в ядрі і на периферії квазистійкого вихору перед центральною першою палею, а перед другою боковою палею – 7% та 29% . Зменшення

інтенсивності турбулентності перед другою боковою палею обумовлене значним зростанням осередненої швидкості вихрової течії відносно пульсації швидкості.

ВИСНОВКИ

Експериментальні досліді з візуалізації спряженої течії та інструментальних вимірів кінематичних і динамічних характеристик вихрового потоку, результати яких наведено в даній публікації, надали можливість зробити наступні висновки.

1. Перед кожним із обтічних циліндрів, що складають трирядну мостову опору, локально формуються інтенсивні підковоподібні вихрові системи, особливо перед передніми із них. Крім того, перед трирядною мостовою опорою зароджується великомасштабний підковоподібний вихор, який має невисоку інтенсивність. Цей вихор охоплює трирядну опору як одну цілу конструкцію. Великомасштабна підковоподібна вихрова структура огинає передню частину трирядної палевої конструкції на відстані $2d$ або 0.5 ширини самого трирядного ростверку, а потім розширюється під кутом приблизно 5° при пересуванні вниз за потоком.

2. Встановлено, що інтенсивність дрібномасштабних підковоподібних вихорів, сформованих перед кожним із циліндрів, зменшується при збільшенні відстані вниз за потоком в залежності від розташування окремої палі у обтічному ряду. В кормовій частині трирядного ростверку інтенсивність підковоподібних вихорів збільшується, що обумовлено ростом пористості трирядної конструкції, а звідси і зменшенням гідродинамічного тиску та опору в його кормі.

3. Між першими та другими бічними циліндрами з'являється інтенсивна течія, яку викликає взаємодія підковоподібного вихору, що обтікає першу центральну палею, з підковоподібними вихорами, які зароджуються при обтіканні перших за потоком бічних паль. Подібна, але менше інтенсивна, спряжена течія виникає між передостанньою і останньою бічними палями в конструкції трирядного циліндричного ростверку.

4. Знайдено, що позаду обтічних циліндрів виникають торнадоподібні вертикальні вихрові системи, які створюють симетричну доріжку вихорів Кармана за першою центральною палею в трирядному ростверку. За боковими циліндрами, особливо там, де з'являються бічні течії, симетричність протилежно обертових вертикальних вихорів суттєво порушується, а саме іноді відбувається одночасне зародження пари вихорів. Частота по-

яви торнадоподібних вихорів складає приблизно 0.5 Гц, що відповідає числу Струхаля $St \approx 0.18$.

5. Встановлено, що розвив контрастного покриття відбувається спочатку перед першою бічною палею (азимутальний кут близько 65°), а потім перед першою центральною палею (азимутальний кут близько 45°). З плином часу розвив покриття спостерігається навколо фронтальних частин передньої групи паль і найбільша область розмиву з'являється між першими і другими боковими палями, де до розмивної дії підковоподібних та торнадо подібних вихорів долучається бічна течія між цими палями.

6. Знайдено, що в осьовому перерізі перед центральною опорою формується підковоподібний вихор, який має діаметр приблизно $9 \cdot 10^{-3}$ м або $1/3d$ при швидкості обтікання 0.1 м/с, числі Фруда $Fr \approx 0.07$ і діаметрі опори $27 \cdot 10^{-3}$ м. Ядро цього вихору знаходиться в місці розташування близько $(0.15 - 0.19)d$ в напрямку осі від поверхні передньої центральної палі і на відстані біля $(0.11 - 0.15)d$ від жорсткої пласкої поверхні. З віддаленням від центру вихору лінійна швидкість зростає і максимум її спостерігається поблизу опори на висоті розташування ядра вихору. В передній частині другої бокової опори формується вихор масштабом 14 мм на 10 мм або $(0.52 \times 0.37)d$ відповідно в горизонтальному (вісь x) і вертикальному (вісь y) напрямках. Ядро цього квазистійкого підковоподібного вихору, що омиває другу бокову опору, знаходиться в області з координатами $x \approx (0.26 - 0.30)d$; $y \approx (0.15 - 0.19)d$. Вихор має яйцеподібну форму, видовжену в горизонтальному напрямку. Значення швидкостей в ядрі і на периферії цього підковоподібного вихору на $(20 - 30)\%$ вище, ніж для квазистійкого вихору перед першою центральною палею.

Автори вдячні проф., докт. фіз.-матем. наук В. І. Нікішову та ст. наук. співр., канд. фіз.-матем. наук В. О. Горбаню за активну участь при підготовці 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. Melville B. W. Pier and abutment scour: Integrated approach // J. Hydr. Eng.– 1997.– **123**, № 2.– P. 125–136.
2. 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.
3. 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.

4. Dargahi B. Controlling mechanism of local scouring // J. Hydr. Eng.– 1990.– **116**, № 10.– P. 1197–1214.
5. Akilli H., Rockwell D. Vortex formation from a cylinder in shallow water // Phys. Fluids.– 2002.– **14**, № 11.– P. 2957–2967.
6. Chiew Y.-M. Local scour and riprap stability at bridge piers in a degrading channel // J. Hydr. Eng.– 2004.– **130**, № 3.– P. 218–226.
7. Chen G., Du X. D., Wei Q. D. The effects of cylinder shape on the primary horseshoe vortex of juncture flow // 9th Symposium on Flow Visualization.– 2000.– № 54.– P. 1–9.
8. Dargahi B. The turbulent flow field around a circular cylinder // Exp. Fluids.– 1989.– **8**.– P. 1–12.
9. Simpson R. L. Junction flows // Annu. Rev. Fluid Mech.– 2001.– **33**.– P. 415–443.
10. 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.
11. Fu H., Rockwell D. Shallow flow past a cylinder: transition phenomena at low Reynolds number // J. Fluid Mech.– 2005.– **540**.– P. 75–97.
12. Roulund A., Sumer B. M., Fredsoe J., Michelsen J. Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile // J. Fluid Mech.– 2005.– **534**.– P. 351–401.
13. Bateman A., Fernandez M., Velasco D., Medina V. Vortices and morphodynamics aspects at bridge pier scour processes // Geophysical Research Abstracts.– 2005.– **7**, № 09854.– P. 1–14.
14. Zhang X., Liu Z., Liang C., Fu Q. Application of energy approach to estimating scour depth // Nature and Science.– 2004.– **2**, № 2.– P. 77–82.
15. 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**.– P. 340–351.
16. Sahin B., Ozturk N. A., Akilli H. Horseshoe vortex system in the vicinity of the vertical cylinder mounted on a flat plate // Flow Measur. Instrum.– 2007.– **18**, № 2.– P. 57–68.
17. Lin Y.-Y., Cheng C.-M., Wu J.-C. Effects of deck shape and oncoming turbulence on bridge aerodynamics // J. Science Eng.– 2005.– **8**, № 1.– P. 43–56.
18. Sarpkaya T. A critical review of the intrinsic nature of vortex induced vibrations // J. Fluids Struct.– 2004.– **18**.– P. 389–447.
19. Muzzammil M., Gangadhariah T. The mean characteristics of horseshoe vortex at a cylindrical pier // J. Hydr. Res.– 2003.– **41**, № 3.– P. 285–297.
20. Salaheldin T. M., Imran J., Chaudhry M. H. Numerical modeling of three-dimensional flow field around circular piers // J. Hydr. Eng.– 2004.– **130**, № 2.– P. 91–100.
21. Kirkil G., Constantinescu S. G., Ettema R. The horseshoe vortex system around a circular bridge pier on a flat bed // XXXI-st Int. Association Hydraulic Research Congress.– Seoul, Korea.– 2005.– P. 1–10.
22. 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.
23. Melville B. W., Chiew Y.-M. Time scale for local scour at bridge piers // J. Hydr. Eng.– 1999.– **125**, № 1.– P. 59–65.
24. Ballio F., Franzetti S. Topological analysis of a junction vortex flow.– Advances in Fluid Mechanics III: 2000, **29**.– 255–264 p.
25. Ballio F., Bettoni C., Franzetti S. A survey of time-averaged characteristics of laminar and turbulent horseshoe vortices : (Data bank contribution) // J. Fluids Eng.– 1998.– **120**, № 2.– P. 233–242.
26. Coleman S. E. Clearwater local scour at complex piers // J. Hydr. Eng.– 2005.– **131**, № 4.– P. 330–334.
27. Neharia D., Armenio V., Ballio F., Adjlout L. A 3D investigation of the dynamic loads over an array of in-line cylinders at low KC and Re numbers // Ocean Eng.– 2004.– **31**, № 11-12.– P. 1503–1535.
28. 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.
29. Воскобойник А. А., Воскобойник А. В., Воскобойник В. А., Марченко А. Г., Никишов В. И. Локальный размыв грунта при взаимодействии мостовых опор, находящихся в следе друг за другом // Прикл. гідромех.– 2006.– **8**, № 3.– С. 16–26.
30. Wang H. F., Zhou Y., Chan C. K., Lam K. S. Effect of initial conditions on interaction between a boundary layer and a wall-mounted finite-length-cylinder wake // Phys. Fluids.– 2006.– **18**, № 6.– P. 065106-1–12.
31. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов: Пер. с англ.– М.: Мир, 1974.– 464 с.
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. Sheppard D. M., Glasser T. Sediment scour at piers with complex geometries // Proc. 2nd Int. Conf. on Scour and Erosion.– World Scientific, Singapore.– 2004.– P. 1–6.