

УДК 532.5.517

**ВПЛИВ ГРУПУВАННЯ МОСТОВИХ ОПОР НА РОЗМИВ ҐРУНТУ****В. А. Воскобійник**, д-р техн. наук, ст. наук. співроб.,**В. І. Нікішов**, член-кор. НАН України, д-р фіз.-мат. наук, проф.,**О. А. Воскобойник**, канд. техн. наук; **А. В. Воскобійник**, канд. техн. наук, ст. наук. співроб.

Інститут гідромеханіки НАН України

vlad.vsk@gmail.com

*Досліджено вплив групування мостових опор на розмив донної поверхні. Наведено результати експериментальних досліджень впливу мостової опори у вигляді трирядного багатопального ростверку, встановленої в сліді призматичної опори, на форму та глибини локального і глобального розмивів ґрунту.*

**Ключові слова:** мостова опора, локальний та глобальний розмив ґрунту, підковоподібна та слідна вихрова структура.

*Influence of grouping of the bridge piers on scour of the ground surface is investigated. Experimental research results of influence of bridge pier as three-row much pile grillage, which is placed behind of prismatic pier, on a form and depths local and global scours are presented.*

**Keywords:** bridge pie, local and global scour, horseshoe and wake vortex structure.

**Постановка проблеми**

Збільшення інтенсивності автомобільного та залізничного транспорту у великих містах потребує розширення доріг і магістралей. У тих містах, де є мостові переходи через річки, канали чи інші водоймища, виникає потреба споруджувати мостові автомобільні або залізничні переходи поблизу існуючих, раціонально використовуючи шляхоексплуатаційну інфраструктуру. Зокрема, в м. Києві виникла така проблема під час проектування та будівництва автомобільно-залізничного мостового переходу через р. Дніпро поблизу існуючого Дарницького залізничного мостового переходу. Спорудження нового мостового переходу, опори якого знаходяться у сліді існуючого, призвело до необхідності визначення взаємного впливу мостових опор на розмив ґрунту поблизу них. Для спорудження нового мостового переходу було спроектовано сучасну матеріалекономичну багатопальну опору у вигляді трирядного ростверку, де циліндричні палі розташовувалися одна поблизу іншої.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Процес утворення отворів розмиву ґрунту поблизу мостових опор, розташованих на розмивному ґрунті, зумовлений формуванням і розвитком підковоподібних і слідних вихорів, які утворюються навколо обтічних конструкцій поблизу їх спряження із дном. Еволюція вихрових структур у спряженій течії навколо групової пальової споруди має багато спільного з утворенням підковоподібних або намистоподібних вихрових систем, які виникають під час обтікання одиночних погано обтічних конструкцій і мостових опор на розмивному ґрунті. Для того щоб зрозуміти динаміку процесу розмиву, в першу чергу, треба якісно описати структуру когерентних ви-

хорів, що утворюють підковоподібну й слідну вихрову систему, для різних режимів течії та кількісно охарактеризувати цей ефект у потоці та на дні ріки поблизу підмурку опори. Тривимірність і нестійкість течії, яка формується розмивом, викликає значні труднощі під час вивчення механізмів розмиву ґрунту в місцях спряження опор з дном. Структура турбулентності, що має широкий спектр турбулентних масштабів, притаманна вихровій течії навколо погано обтічного тіла та керує виносом і пересуванням ґрунту навзовні з отвору розмиву. Тут поле течії насичено організованими когерентними структурами у вигляді підковоподібних вихорів навколо підмурку опори, великомасштабних згортків у сліді позаду опори та менших за розміром, але дуже інтенсивних вихрових трубок у зсувних шарах на бічних поверхнях, які відриваються від погано обтічного тіла [1–3].

Добре відомо, що основний механізм, який керує формуванням і розвитком отвору розмиву ґрунту, складається з течії, яку направлено до дна вздовж передньої або фронтальної частини опори, разом з формуванням системи підковоподібних вихорів навколо підмурку опори та слідними вихорами, що відриваються від кормової частини опори, за певних умов утворюючи вихрову доріжку Кармана [4–6]. Підковоподібний вихор обумовлений відривом примежового шару, що натікає на опору, в результаті дії від'ємного градієнта тиску, який генерується поблизу фронтальної частини опори. Взаємодія примежового шару з обтічною поверхнею опори примушує структуру примежового шару перебудуватися поблизу передньої частини опори в місці спряження її з дном у ряд підковоподібних вихорів, які огинають опору. Ці вихрові системи під час

пересування витягуються навколо опори через дію бічних градієнтів тиску. Розташування, розмір і інтенсивність підковоподібних вихорів значним чином змінюються у часі залежно від стадії або фази їх формування чи розвитку [2; 3; 6]. При цьому додатково спостерігається значне збільшення турбулентної кінетичної енергії, рівнів пульсацій швидкості та тиску, а також придонних зсувних напруг усередині та поблизу підковоподібної вихрової області.

Еволюція підковоподібної вихрової системи навколо підмурку обтічного тіла та нестійкий слід позаду нього є загальними явищами, які мають місце в більшості досліджень динаміки подібних течій, хоча ряд відмінностей спряжених течій суттєво змінюються залежно від параметрів потоку та форми погано обтічних тіл [1; 3; 7; 8]. Експериментальні та чисельні дослідження [1; 2; 9] показують, що структура підковоподібної та слідної вихрової системи залежить від чисел Рейнольдса і Фруда, а також характеристик примежового шару, який формується перед опорою.

Процеси формування та розвитку когерентних вихрових структур поблизу групи погано обтічних тіл, а також визначення механізму розмиву ґрунту є достатньо складними, залежать від багатьох факторів і зумовлені нелінійною взаємодією вихрових структур з обтічною поверхнею. Крім того, явище групового обтікання великої кількості палей і опор, які знаходяться в умовах ближнього сліду, в науковій літературі висвітлено недостатньо. Тому проведення експериментальних досліджень для отримання фізичної картини течії поблизу погано обтічних тіл та вивчення особливостей розмиву ґрунту перед групою цих тіл є достатньо актуальним та доцільним.

**Мета досліджень** — експериментально дослідити вплив групування мостових опор, які знаходяться в сліді одна за іншою, на форму та глибини локального і глобального розмивів донної поверхні в околі опор та на просторово-часові характеристики підковоподібних і слідних вихорів, які обумовлюють вищезгадані розмиви.

#### **Експериментальна установка та методика проведення досліджень**

Дослідження проводились у спеціально зробленому гідродинамічному каналі та гідравлічному лотку. Канал мав довжину 14 м, ширину 1,5 м і глибину 0,65 м. Дно було засипане просіяним кварцовим піском, середній діаметр зерен якого становив  $d_{50} = 0,35 \cdot 10^{-3}$  м, у вигляді плоского піщаного дна. Гідравлічний лоток з нерозмивною плоскою поверхнею мав довжину 14 м, ширину 0,8 м та глибину 0,8 м. Вода в гідродинамічний лоток, а потім у канал подавалася за допомогою

насосів через відстійну камеру, конфузори, хонейкомби та решітки, що зумовлює однорідність потоку. На дні вимірювальних ділянок, розташованих посередині лотка і каналу, було встановлено моделі призматичної опори та трирядного пального ростверку, які знаходилися у сліді одна за одною, у масштабі 1:50 та 1:150 до природи. Трирядний ростверк складався з 31 циліндричної палей, які розташовувалися у три ряди вздовж напрямку потоку в шаховому порядку. Відстань між палями становила майже 0,9 діаметра палей ( $d$ ), а відстань між призмою та ростверком — 3 ширини призми ( $b$ ). Глибина потоку ( $H$ ) у гідродинамічному каналі була сталою і дорівнювала 0,2 м, а його швидкість ( $v_\infty$ ) змінювалася від 0,06 до 0,4 м/с.

У гідродинамічному лотку глибина потоку змінювалася від 0,17 до 0,34 м, а швидкість — від 0,15 до 0,59 м/с. Для цих умов числа Рейнольдса, які розраховано за діаметром палей або за шириною призматичної опори, становили  $Re_d = v_\infty d / \nu = (2...54) \cdot 10^3$ , а числа Фруда  $Fr = v_\infty / \sqrt{gH} = (0,04...0,3)$ , де  $\nu$  — кінематичний коефіцієнт в'язкості води;  $g$  — прискорення вільного падіння.

Оцінювання просторово-часових характеристик вихрового руху поблизу призми і трирядного ростверку та ступеня його взаємодії з поверхнею, що обтікається, проводилось під час візуальних досліджень у гідродинамічному лотку. В місцях, де спостерігалися характерні когерентні вихрові структури у вигляді підковоподібних вихорів, бічних течій та слідних вихрових структур, проводились інструментальні вимірювання полів швидкості та тиску.

Кінематичні характеристики спряженої течії вимірювались за допомогою спеціально розроблених і виготовлених мініатюрних термісторних датчиків швидкості та п'єзорезистивних датчиків динамічного тиску. Поле пульсацій тиску на обтічній поверхні реєструвалося мініатюрними п'єзокерамічними датчиками пульсацій тиску.

Розмив ґрунту досліджувався за допомогою спеціально розробленої групи датчиків розмиву ґрунту на базі п'єзорезистивних датчиків тиску, які вимірювали глибину потоку над отворами розмивів (рис. 1).

Отримані датчиками електричні сигнали надходили на спеціалізований двоканальний аналізатор спектрів фірми «Брюль і К'єр» та через відповідні багатоканальні аналогово-цифрові перетворювачі на персональні комп'ютери.

Результати експериментальних досліджень оброблялися та аналізувалися за допомогою стандартних та спеціально розроблених програм.

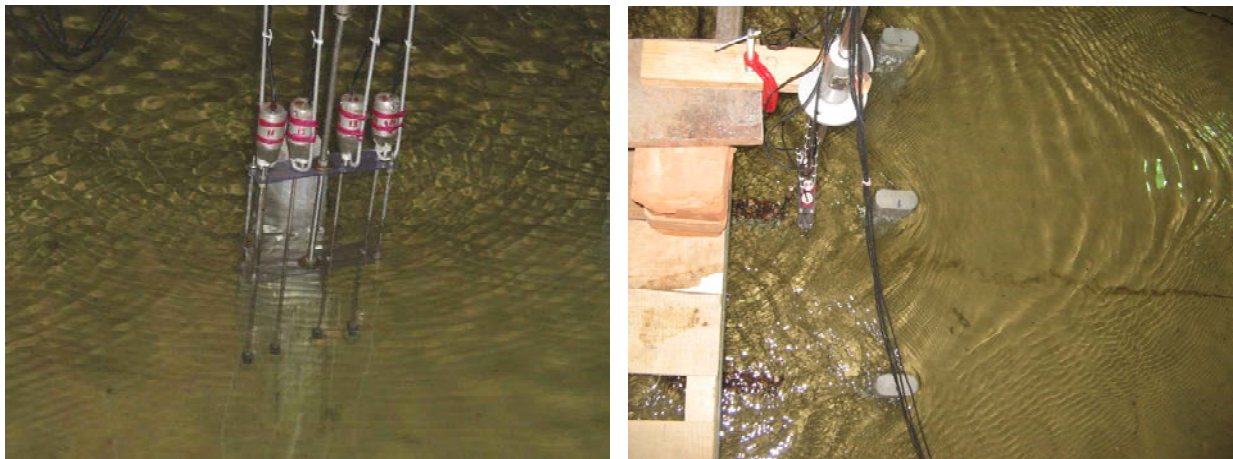


Рис. 1. Розташування датчиків розмиву ґрунту перед моделлю (а) призматичної опори і (б) трирядного циліндричного ростверку

Датчики атестувались і перевірялись за допомогою абсолютних та відносних методів на спеціалізованих стендах.

Глибина розмиву ґрунту поблизу досліджуваних моделей вимірювалася з похибкою, яка не перевищувала 5 % (з надійністю 0,95 або  $2\sigma$ ). Похибка вимірювань усереднених значень швидкості та тиску не перевищувала 4 %, а середньоквадратичних значень пульсацій — до 6 %.

Спектральні складові пульсацій швидкості, динамічного та пристінного тиску вимірювались з похибкою не більше 2 дБ у частотному діапазоні від 0,01 до 1000 Гц, також з надійністю 95 %.

#### Результати досліджень та аналіз даних

Як показують дослідження [1–4], розмив поблизу групи мостових опор незалежно від їх форми та розміру має два типи, а саме: локальний розмив, який формується поблизу кожного елемента мостових опор, та глобальний розмив, що виникає на розмивному дні навколо всієї групової конструкції.

Виникнення та розвиток розмивів обумовлені дією на донний ґрунт відривної течії перед погано обтічним тілом та течії, яка спрямована до дна, вздовж його передньої або фронтальної частини.

При цьому відбувається формування підковоподібних вихрових структур в основі опори, інтенсивних вихрових трубок у зсувних шарах на бічних поверхнях та слідних вертикальних вихорів, які відриваються від її обтічної поверхні.

Взаємодія відривної течії з поверхнею обтічного тіла приводить до перебудови потоку поблизу передньої частини опори: у її основі виникає ряд намистоподібних або підковоподібних вихрових структур, які огинають опору (рис. 2, а).

Візуальні дослідження за допомогою водорозчинних контрастних речовин, нанесених на обтічну пласку поверхню, на яку встановлено групову модель призматичної опори та трирядного ростверку, демонструють розподілення зсувних напруг (рис. 2, б).



Рис. 2. Візуалізація обтікання моделей мостових опор за допомогою (а) барвників і (б) контрастного покриття, яке розмивається водою



Так, перед кожною із опор, де контрастне покриття розмито водою, генеруються інтенсивні вихрові структури (підковоподібні та слідні вихори), а також бічні течії, що обумовлені особливостями обтікання досліджуваної групової конструкції [5; 10].

Підвищені зсувні напруги у відривних течіях, де генеруються підковоподібні та слідні вихрові структури, а також бічні течії між опорами, які близько розташовані одна від одної, приводять до появи глобального і локального розмивів ґрунту поблизу групових мостових опор. З плином часу ці розмиви набувають рівноважного стану, при якому форма і розміри розмиву залишаються незмінними [10].

Ґрунт, що виноситься назовні з отворів розмивів, відкладається на поверхні дна у вигляді рифелів і дюн.

Таке формування донної поверхні поблизу групи моделей мостових опор, що були розташовані на пласкому дні, показано на рис. 3.

Вимірювання глибин і форми розмивів ґрунту за допомогою датчиків розмиву дозволило отримати тривимірні схеми розмиву ґрунту поблизу одиночної моделі призматичної опори (рис. 4, а) і поблизу групової моделі досліджуваних мостових опор (рис. 4, б). Ці схеми отримано для швидкості течії 0,25 м/с і чисел Рейнольдса  $Re_b = 285000$  та Фруда  $Fr = 0,15$ .

Визначено, що ширина отвору розмиву перед призматичною опорою майже в 2,5 разу більша, ніж глибина розмиву, незалежно від групування мостових опор. При цьому максимальна глибина розмиву перед призматичною опорою спостерігається на відстані  $0,25b$  від її передньої стінки.



Рис. 3. Розмив ґрунту поблизу групи моделей мостових опор масштабом (а) 1:50 і (б) 1:150 до натурі

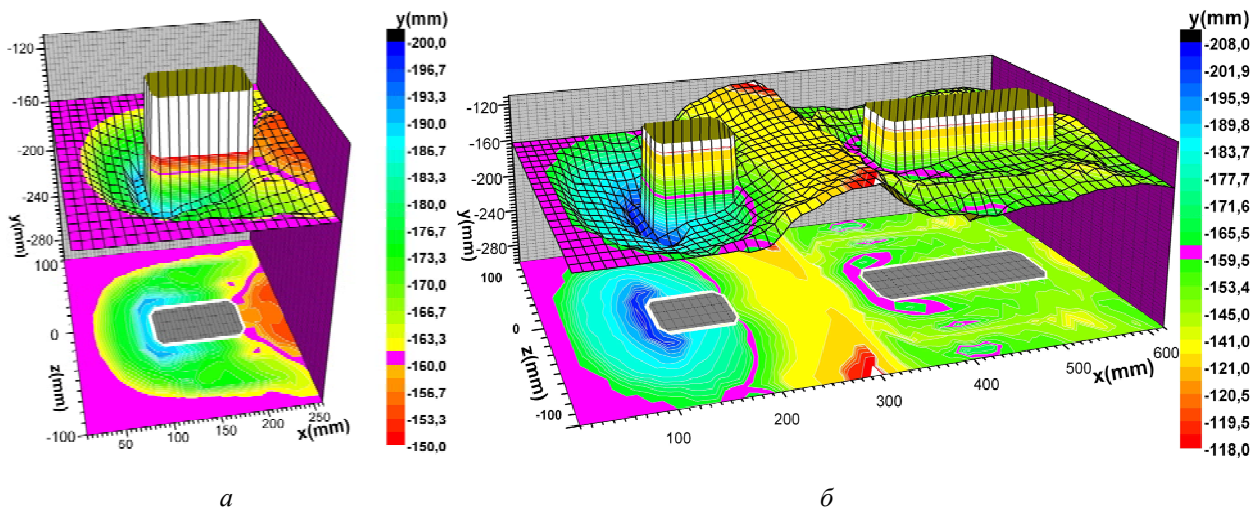


Рис. 4. Аксонометрія розмиву ґрунту поблизу (а) призматичною опори і (б) групового розташування моделей мостових опор

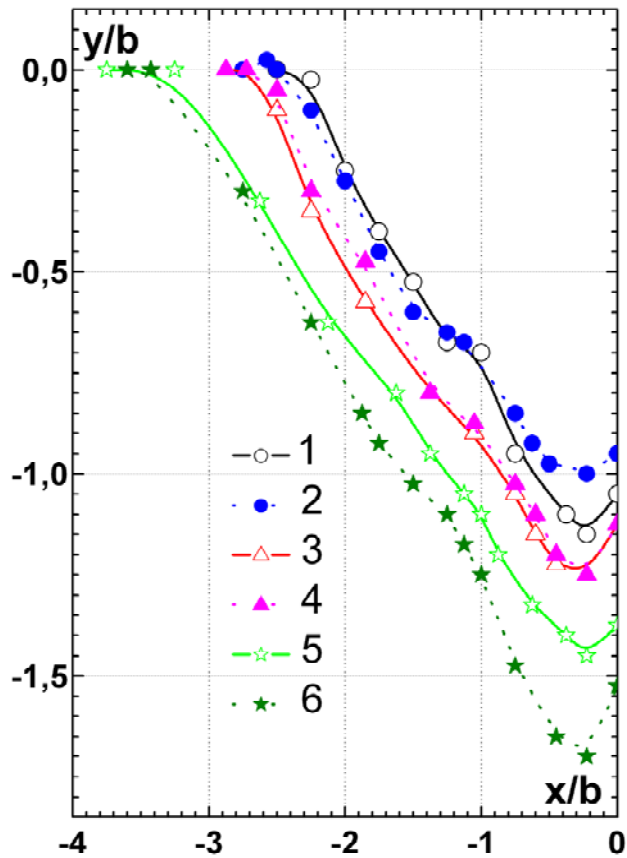


Рис. 5. Глибина розмиву ґрунту перед призматичною опорою

Профілі локального розмиву ґрунту перед фронтальною частиною призматичної опори (в перетині її осьової симетрії) для одиночного і групового обтікання показано на рис. 5. Тут криві 1 та 2 отримано для докритичних швидкостей течії  $v_\infty \approx 0,6V_c$  і чисел Рейнольдса  $Re_b = 23000$  та Фруда  $Fr = 0,13$ , криві 3 та 4 — для критичних швидкостей  $v_\infty \approx V_c$ ,  $Re_b = 36000$  і  $Fr = 0,18$ , а криві 5 та 6 — для надкритичних швидкостей  $v_\infty \approx 1,8V_c$ ,  $Re_b = 67000$  і  $Fr = 0,42$ . Криві 1, 3 і 5 виміряно під час обтікання одиночної призматичної опори, а криві 2, 4 і 6 — для групового обтікання мостових опор. Критична швидкість, що відповідає початку пересування частинок ґрунту, визначалася із емпіричної залежності  $V_c = 6,19H^{1/6}d_{50}^{1/3}$ , яку наведено в роботі [1].

Так, зі збільшенням швидкості течії та зменшенням глибини потоку глибина розмиву ґрунту збільшується. Але ширина отвору розмиву незалежно від того обтікається одиночна опора чи група мостових опор змінюється мало. Групування мостових опор викликає зменшення на (10...15)% глибини розмиву ґрунту поблизу призматичної опори для докритичних швидкостей потоку. Для критичних швидкостей глибина розмиву ґрунту не залежить від групування опор,

а для надкритичних швидкостей глибина розмиву ґрунту перед призматичною опорою (модель опори старого залізничного моста через р. Дніпро у м. Києві) збільшується (15...20)% (рис. 5, криві 5 і 6).

Як показали дослідження, профілі розмиву ґрунту перед передньою стінкою призматичної опори мають дві характерні ділянки з різними кутами нахилу (див. рис. 3–5). Вони обумовлені формуванням двох систем квазістійких великомасштабних підковоподібних вихрових структур.

Коли погано обтічне тіло, незалежно від його форми, розташовується на нерозмивній поверхні, то перед ним генерується система підковоподібних вихорів, що схематично показано на рис. 6, а. Ця система складається із двох пар протилежно обертових вихорів, які огинають мостову опору. Ці вихрові структури коливаються у просторі поблизу опори і взаємодіють між собою та обтічною поверхнею. Як показали дослідження просторово-часових характеристик полів швидкості та тиску поблизу моделей мостових опор, частота коливань великомасштабних вихорів 1 і 3 на рис. 6, а відповідає числам Струхаля  $St = fd/v_\infty = (0,15...0,2)$ .

На розмивній поверхні, коли придонна швидкість, зумовлена вихровим рухом, перевищує критичну швидкість перенесення частинок ґрунту, то піщинки починають пересуватися і поблизу опор формується розмив. Спочатку розмив утворюється поблизу фронтальних ребер призми та по боках циліндрів трирядного ростверку через дію вихрових трубок у зсувних шарах, які утворюються на ребрах призми і на передніх бокових частинах циліндрів. Потім розмив починається під дією великомасштабних підковоподібних вихорів, які позначено цифрами 1 і 3 на рис. 5б. Визначено, що розмив під вихором № 3 відбувається інтенсивніше. Разом з тим, дрібномасштабні вихрові структури № 2 і № 4 поступово вироджуються. Коли глибина розмиву ґрунту досягає величини близької до половини ширини призми або діаметру циліндру, квазістійка підковоподібна вихрова система складається з двох великомасштабних вихорів, які сформовано з вихорів 1 і 3, що показано на рис. 6, а.

Схему рівноважного стану розмиву ґрунту в його фронтальному серединному перетині показано на рис. 6, б. У заглибленні обертаються дві великомасштабні підковоподібні вихрові структури, які формують розмив ґрунту та переносять частинки піску з фронтальної частини конструкції в її кормову частину. Підковоподібні вихори мають коливальний рух, обмінюються один з одним енергією, іноді об'єднуються та розпадаються на більш дрібні вихрові системи.

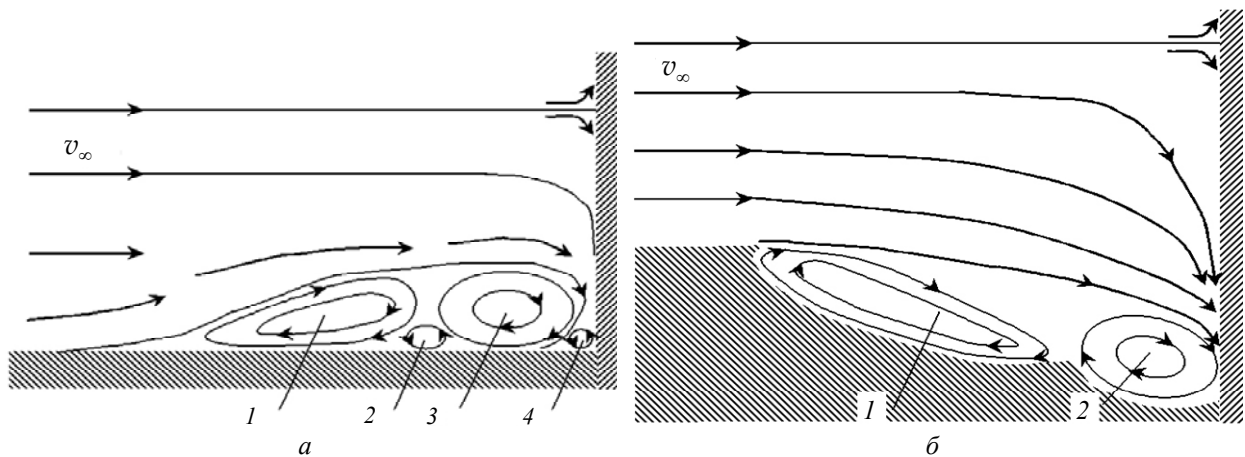


Рис. 6. Схема утворення підковоподібних вихорів перед опорою над (а) жорсткою поверхнею, яка не розмивається, та (б) розмивною поверхнею

Перед призматичною опорою вихрова структура, що розташовується ближче до фронтальної стінки, має менший масштаб і її частота обертання, як показали дослідження поля пульсацій пристінного тиску всередині отвору розмиву, майже втричі вища, ніж частота обертання вихору 1, який зображено на рис. 6, а. Перед опорою, у місці спряження поверхні опори та дна там, де розташовується вихор 4 на рис. 6, а, на всіх профілях розмиву ґрунту реєструється намив ґрунту. Також між двома заглибленнями, які формуються великомасштабними підковоподібними системами, в профілях розмиву ґрунту спостерігається намив піску (рис. 6, б). Цей намив піску розділяє два схили заглиблення і під час візуальних спостережень має досить чіткі обриси, хоча йому й притаманний осцилюючий у просторі характер, який відповідає частотам коливального руху вихрових структур.

Досліди показали, що поблизу трирядного ростверку формується підковоподібний вихор, який огинає всю конструкцію (див. рис 2, а). Цей великомасштабний вихор обумовлює глобальний розмив донної поверхні навколо ростверку. Перед кожною палею, у свою чергу, виникають підковоподібні вихори меншого масштабу, дія яких приводить до локального розмиву ґрунту навколо окремих паль (див. рис. 2, б).

Між циліндрами ростверку, особливо між першими шістьма фронтальними, спостерігаються інтенсивні бокові течії у вигляді закручених придонних струменів, які розмивають ґрунт. Найбільші заглиблення утворюються перед другими боковими циліндрами. Позаду обтічних циліндрів генеруються вертикальні слідні вихори, які за певних умов утворюють симетричну доріжку Кармана за першим центральним циліндром трирядного ростверку. Позаду бічних циліндрів, особливо там, де виникають бічні течії, симетричність формування протилежно обертових

слідних вихорів порушується, але іноді виникає одночасне зародження пари вихорів. Частота появи слідних вихорів позаду центрального циліндра відповідає числу Струхаля  $St \approx 0,18$ .

### Висновки

На підставі отриманих експериментальних результатів з вивчення впливу групування мостових опор, які знаходяться в сліді одна за іншою, на форму та глибини локального і глобального розмивів донної поверхні в околі опор можна зробити такі висновки:

1. Установлено, що під час одиночного і групового обтікання мостових опор на жорсткій і розмивній поверхні генеруються великомасштабні підковоподібні вихрові системи в області спряження поверхонь опор із дном, інтенсивні вихрові трубки в зсувних шарах на бічних поверхнях погано обтічних тіл, слідні вихори позаду опор та струменеві течії між близько розташованими опорами. Визначено особливості вихрової течії і механізми взаємодії вихрових систем між собою та обтічними поверхнями, які залежать від режимів потоку й геометричних параметрів погано обтічних тіл.

2. Визначено, що в площині осьової симетрії опори профіль розмиву складається з двох схилів відкладання піску. Верхній схил має менший кут нахилу і утворюється дією на частинки піску підковоподібного вихору, який виникає під час відриву примежового шару з верхнього фронтального краю отвору розмиву. Нижній схил відкладання піску обумовлений дією підковоподібного вихору, який зароджується течією, яка направлена до розмивного дна вздовж передньої частини опори.

3. Показано, що ширина отвору розмиву майже у 2,5 рази більша, ніж його глибина. Максимальна глибина розмиву спостерігається перед призматичною опорою на відстані у чверть її

ширини, де розташовується ядро нижнього квазі-стійкого енергоємного підковоподібного вихору.

4. Визначено значний вплив трирядного циліндричного ростверку на розмив ґрунту поблизу призматичної моделі, яка знаходиться вище за потоком. Глибина розмиву перед призматичною опорою збільшилася на 15 %, порівняно з її поодиноким обтіканням, для надкритичних швидкостей потоку та зменшилася на 10 % для докритичних швидкостей потоку.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. *Melville B. W.* Pier and abutment scour: Integrated approach / B. W. Melville // *J. Hydraulic Eng.* — 1997. — Vol. 123, № 2. — P. 125–136.
2. *Kirkil G.* Coherent structures in the flow field around a circular cylinder with scour hole / G. Kirkil, S. G. Constantinescu, R. Ettema // *J. Hydraulic Eng.* — 2008. — Vol. 134, № 5. — P. 572–587.
3. *Kumar A.* Flow structure and scour around circular compound bridge piers — A review / A. Kumar, U.C. Kothiyari, K.G.R. Raju // *Journal of Hydroenvironment Research.* — 2012. — Vol. 6. — P. 251–265.
4. *Ettema R.* Similitude of large-scale turbulence in experiments on local scour at cylinders / R. Ettema, G. Kirkil, M. Muste // *J. Hydr. Eng.* — 2006. — Vol. 132, № 1. — P. 33–40.
5. *Воскобійник А. В.* Спряжене обтікання трирядного пального ростверку на пласкій поверхні. Ч. 1. Формування підковоподібних вихорів / А. В. Воскобійник, В. А. Воскобійник, О. А. Воскобойник // *Прикладна гідромеханіка.* — 2008. — Т. 10, № 3. — С. 28–39.
6. *Das S.* Circulation characteristics of horseshoe vortex in scour region around circular piers / S. Das, R. Das, A. Mazumdar // *Water Science and Engineering.* — 2013. — Vol. 6, № 1. — P. 59–77.
7. *Simpson R.* Junction flows / R. Simpson // *Annu. Rev. Fluid Mech.* — 2001. — Vol. 33. — P. 415–443.
8. *Beg M.* Scour reduction around bridge piers: A review / M. Beg, S. Beg // *International Journal of Engineering Inventions.* — 2013. — Vol. 2, № 7. — P. 7–15.
9. *Воскобійник А. В.* Особливості вихрового руху у спряженій течії між групою паль трирядної мостової опори / А. В. Воскобійник, В. А. Воскобійник, О. А. Воскобойник, В. О. Горбань, І. М. Горбань // *Прикладна гідромеханіка.* — 2009. — Т. 11, № 2. — С. 16–29.
10. *Воскобойник А. А.* Локальный размыв грунта при взаимодействии мостовых опор, находящихся в следе друг за другом / А. А. Воскобойник, А. В. Воскобойник, В. А. Воскобойник, А. Г. Марченко, В. И. Никишов // *Прикладна гідромеханіка.* — 2006. — Т. 8, № 3. — С. 16–26.

Стаття надійшла до редакції 10.04.2014.