

УДК 532.5+624.21.8
UDC 532.5+624.21.8

DOI:10.33744/0365-8171-2025-117.2-285-296

РОЗМИВ ГРУНТУ ПРИ ГРУПОВОМУ РОЗТАШУВАННІ МОСТОВИХ ОПОР

SOIL ERASING DURING GROUP PLACEMENT OF BRIDGE SUPPORTS



Воскобійник Володимир Анатольович, доктор технічних наук, Завідувач відділу, Відділ гідродинаміки хвильових та руслових потоків, Інституту гідромеханіки НАН України. e-mail: vlad.vsk@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0003-2161-6923>



Онищенко Артур Миколайович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, професор Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com, тел. +380687771899,

<https://orcid.org/0000-0002-1040-4530>



Аксёнов Сергій Юрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: Aksenov121@gmail.com, тел. +380971534406,

<https://orcid.org/0000-0002-6749-3909>



Чиженко Наталія Петрівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: chyzhenko_np@ukr.net, тел. +380507355080,

<https://orcid.org/0000-0002-9152-2474>



Ворошинов Сергій Миколайович, кандидат технічних наук, доцент, Національний транспортний університет, професор кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд, e-mail: voroshnov52@ukr.net, тел. +38067709707,

<https://orcid.org/0000-0003-0642-8289>



Труденко Денис Володимирович, аспірант кафедри мостів, тунелів та гідротехнічних споруд. Національний транспортний університет. e-mail: tdv.83@ukr.net

<http://orcid.org/0009-0001-3720-1952>

Анотація. Однією із причин руйнування гідротехнічних споруд є розмив ґрунту, що утворюється під дією спряженої течії поблизу погано обтічних тіл, які мають місце у ході будівництва та експлуатації мостових переходів через водні перешкоди, при встановленні бурових опор і основ вітроенергетичних установок у шельфовій зоні, будівництві причальних споруд на ґрунті. У зв'язку з цим значна кількість експериментальних і теоретичних робіт спрямовано на вивчення явища локального розмиву та розробки засобів і методів його зниження, що є надзвичайно актуальним.

Процес утворення отворів розмиву ґрунту поблизу погано обтічних тіл, встановлених на розмивний ґрунт, обумовлений формуванням і подальшим розвитком системи підковоподібних вихрових структур і слідних вихорів, що формуються навколо обтічної конструкції поблизу її сполучення з дном. Основний механізм, відповідальний за формування і розвиток отвору розмиву, включає направлений на дно потік у передній або фронтальній частині опори, разом з формуванням системи підковоподібних вихрових структур поблизу основи опори і слідними вихорами, які відриваються від поверхні опори.

Метою роботи є визначення особливостей розмиву ґрунту при груповому розташуванні мостових опор за допомогою лабораторних експериментальних досліджень.

Експериментальні дослідження особливостей формування розмиву ґрунту під час групового розташування опор двох мостових переходів, які знаходилися у сліді одне за одним, проводилися на моделях опор в лабораторних умовах в гідродинамічному каналі з застосуванням методів візуальних та інструментальних досліджень. Гідродинамічні характеристики вихрових і струменевих течій було отримано з застосуванням спеціально розроблених і виготовлених датчиків швидкості та тиску, а параметри і форма розмивів була визначена за допомогою датчиків глибини розмиву ґрунту.

Експериментальні дослідження дозволили визначити особливості формування розмиву ґрунту навколо групової конструкції мостових опор. Отримано профілі локальних розмивів ґрунту перед фронтальною частиною призматичної опори в залежності від швидкості спряженої течії, глибини потоку та чисел Фруда для поодинокого розташування опор верхнього за потоком мостового переходу та сумісного розташування опор двох мостових переходів. Наведено особливості формування розмивів і наливів ґрунту поблизу опор мостових переходів в аксонометричному представленні.

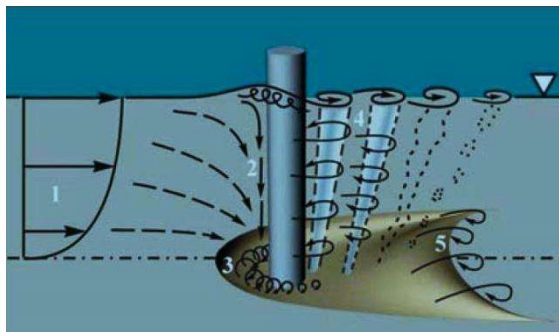
В результаті досліджень встановлено, що взаємне розташування моделей опор двох мостових переходів приводить до суттєвих змін розмиву перед призматичними опорами першого за потоком мостового переходу. Так, локальний розмив збільшився на 15% за надкритичними швидкостями течії на мілкій воді і зменшився майже на 20% за докритичними швидкостями на глибокій воді. Показано, що профілі розмиву ґрунту мають дві характерні ділянки з різними кутами нахилу фронтальної поверхні отвору розмиву, які обумовлені формуванням двох систем квазістійких великомасштабних підковоподібних структур.

Ключові слова: локальний розмив, призматична опора, трирядний ростверк, підковоподібний вихор, профіль розмиву, мостовий перехід.

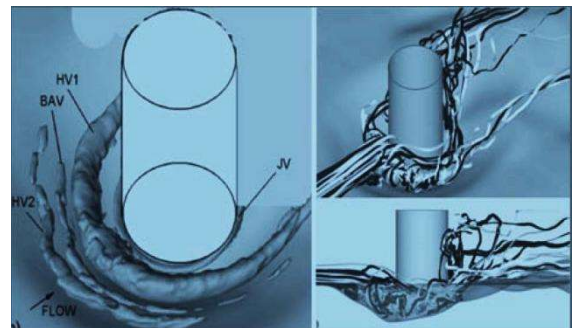
Вступ. Розмив ґрунту утворюється під дією спряженої течії поблизу погано обтічних тіл, які мають місце у ході будівництва та експлуатації мостових переходів через водні перешкоди, при встановленні бурових опор і основ вітроенергетичних установок у шельфовій зоні, будівництві причальних споруд на ґрунті [1-4]. В результаті в області сполучення дна водойми з обтічними мостовими опорами утворюються локальні або місцеві розмиви ґрунту, які є причиною підмивання опор та нерідко аварії мостових переходів [5-7]. Так, наприклад, в роботі [8] проведений аналіз причин руйнування 1716 мостів, які було зруйновано за останні 200 років у США, Китаї та інших країнах. Результати аналізу показали, що понад 30% руйнувань мостів викликані розмивом мостових опор. У зв'язку з цим значна кількість експериментальних і теоретичних робіт спрямовано на вивчення явища локального розмиву та розробки засобів і методів його зниження, що є надзвичайно актуальним в

будівництві та експлуатації мостових переходів, видобутку корисних копалин і виробництві відновлюваної енергетики з використанням морських платформ у шельфовій зоні.

Проблематика. Процес утворення отворів розмиву ґрунту поблизу погано обтічних тіл, встановлених на ґрунт, що розмивається, обумовлений формуванням і подальшим розвитком системи підковоподібних вихрових структур і слідних вихорів, що формуються навколо обтічної конструкції поблизу її сполучення з дном [9-11]. Еволюція вихрових структур навколо групової пальової споруди має багато спільного з утворенням підковоподібних або намисто подібних вихрових систем, що виникають при обтіканні поодиноких погано обтічних конструкцій або опор, які встановлюються на дні річкових русел і каналів. Для того, щоб зрозуміти механізм розмиву, в першу чергу потрібно якісно описати структуру когерентних вихорів, які утворюють підковоподібну або слідну вихрову структуру, для різних режимів течії та кількісно охарактеризувати цей ефект у потоці та на дні річки поблизу основи опори, незалежно від її форми та розміру. Тривимірність і нестійкий характер поля течії, що формується розмивом [12- 14], спричиняють значні труднощі щодо механізмів розмиву ґрунту в місцях сполучення опор з дном.



а



б

Рисунок 1 – Схема формування розмиву та намиву ґрунту (а) та схема генерації підковоподібних і слідних вихрових структур (б)

Figure 1 – Scheme of the formation of erosion and soil washing (a) and scheme generation of horseshoe-shaped and trailing vortex structures (b)

Структура турбулентності, що має широкий спектр турбулентних масштабів, властива вихровій течії навколо погано обтічного тіла і керує виносом і переміщенням ґрунту з отвору розмиву [15-17]. Дійсно поле течії в отворі розмиву навколо опори, як і навколо, наприклад, циліндра, встановленого на жорстку (не розмивну) поверхню, насичене організованими когерентними структурами у вигляді підковоподібних вихорів в основі опори, великомасштабних згортків у сліді позаду опори і більш дрібних за розміром, але дуже інтенсивних вихорів, що відриваються від погано обтічного тіла [18, 19] (рис. 1). Для того щоб зрозуміти, як течія розмиває ґрунт навколо опори потрібно вивчити і описати структуру цих великомасштабних когерентних вихрових структур і дрібномасштабних вихорів, а також визначити механізм їх взаємодії з обтічною поверхнею опори та ґрунтом на різних стадіях процесу розмиву.

Основний механізм, відповідальний за формування і розвиток отвору розмиву (рис. 1а), включає направлений на дно потік у передній або фронтальній частині опори (2), разом з формуванням системи підковоподібних вихрових структур (3) поблизу основи опори і слідними вихорами (4), які відриваються від поверхні опори [18, 19, 20]. В результаті взаємодії відривної та спадаючої течії перед опорою, системи підковоподібних вихорів і слідних вихорів ґрунт перед опорою розмивається, а позаду неї утворюється намив ґрунту (5) у вигляді дюн або рифелів. Підковоподібна вихрова структура обумовлена відривом примежового шару, що натікає на опору (1), внаслідок дії негативного градієнта тиску, що генерується поблизу фронтальної частини опори.

Взаємодія примежового шару з поверхнею опори змушує структуру турбулентності перебудуватися поблизу передньої частини опори в місці сполучення її з дном в ряд намисто подібних вихорів, що огинають опору [21-23]. Ці вихрові структури під час пересування витягуються навколо опори, через бічні градієнти тиску. Розташування, розмір та інтенсивність підковоподібних вихорів значною мірою змінюються у часі залежно від стадії чи фази їх формування чи розвитку [24-27]. 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.

Експериментальні та чисельні дослідження [13, 20, 28, 29] показують, що структура підковоподібної вихрової системи сильно залежить від числа Рейнольдса та характеристик примежового шару, що формується перед обтічною перешкодою. Структура підковоподібної вихрової системи, наприклад, для режиму ламінарного обтікання складається з низки основних великомасштабних вихорів [7, 13] (рис. 16). Первинний вихор (HV1) розташовується в середній позиції, тоді як кутовий вихор (JV) знаходиться найближче до опори. Вторинний вихор (HV2), що розвивається, формується на позиції, що знаходиться на найбільшій відстані від поверхні обтічної опори. Між первинним і вторинним вихором генерується придонний приєднаний вихор (BAV). Вихор, що розвивається, породжується примежовим шаром, який відривається від обтічної поверхні дна. Цей вихор поступово переноситься вниз потоком і, зрештою, стає новим первинним вихором. У цей час первинний вихор конвектує у напрямку до кутового вихора і поступово зливається з ним. Процес цей є періодичним [7, 13, 30, 31], генеруючи низькочастотні коливання вихрової течії як навколо погано обтічних тіл, встановлених як на жорстку поверхню, так на розмивний ґрунт.

Групування опор призводить до зміни глибини локального розмиву та формування глобального розмиву ґрунту, що обумовлено взаємним впливом вихрової течії навколо окремих опор, які формують групову конструкцію [32-36]. Так, при слідному групуванні циліндричних опор (відстань близько 5 діаметрів один від одного), локальний розмив ґрунту у фронтальній частині поблизу першої за напрямом течії опори збільшується майже на 20%. В роботах [34, 37] показано, що процес формування отвору розмиву по часу ділиться на три стадії: початковий, той, що має розвиток та рівноважний. В дослідженнях [36] визначено, що часові зміни глибини розмиву на передній та задній палях суттєво відрізняються для малих значень числа Фруда. Рівноважна глибина розмиву групи паль зменшується зі зменшенням розділення між палями, а глибина розмиву на задній palі, очевидно, менша, ніж на передній palі. Критичне значення розділення між палями, що відображає ефект групи паль, має тенденцію до збільшення зі збільшенням числа Фруда. Під час групового розташування паль в конфігурації 5*3 palі, які розташовано з боків від центральних паль, призводять до більше глибоких і ширших отворів розмиву відносно однорядної конфігурації паль 5*1 роботах [37,]. Визначено, що часова еволюція глибини розмиву для паль, розташованих нижче за течією, у груповій конструкції суттєво відрізняється від еволюції глибини розмиву для однієї palі залежно від значень інтенсивності потоку роботах [34]. Взаємодія групи мостових опор, що мають неоднакову форму конструкції, а також слідове розташування опор паралельних та близько розташованих

мостових переходів, практично не вивчено та літературних даних для таких конструктивних рішень наведено недостатньо. Це зумовлює необхідність проведення чисельних та експериментальних досліджень на вирішення такого класу завдань.

Мета роботи, є визначення особливостей розмиву ґрунту при груповому розташуванні мостових опор за допомогою лабораторних експериментальних досліджень.

Матеріали і методи. Експериментальні дослідження особливостей формування отворів розмиву навколо групової конструкції моделей мостових переходів проводилися в лабораторних умовах за допомогою візуальних досліджень та інструментальних вимірювань полів швидкості, тиску та глибини розмивів в околі групи опор призматичної та циліндричної форми. Моделювання виконувалося у зменшеному масштабі існуючих і спроектованих мостових переходів, які було

зроблено з призматичних опор, у сліди яких на відстані близько трьох довжин опори розташовувалися опори іншого мостового переходу з опорами у вигляді трирядного ростверку.

Для виконання фізичного моделювання взаємодії спряжених течій навколо опор двох мостових переходів було створено експериментальний стенд на базі гідродинамічного лотка, в якому розташовувалися групові конструкції опор. Гідродинамічний лоток, що мав довжину робочої ділянки близько 14 м, ширину – 1,5 м і глибину – 0,65 м. Вода в лоток подавалася за допомогою насоса, що знаходився на відстані більше 30 м від робочою ділянки. Вода подавалася на проміжний гідравлічний канал довжиною близько 20 м, де збурення течії, що генерувалися в потік насосом, згасали. Далі вода надходила у водозбірник, що мав форму добре обтічного конфузора, перед робочою ділянкою, який було обладнано хонейкомбами і сітчастими пристроями, які спрямляли та направляли потік. Позаду прямолінійної робочої ділянки розташовувався зливний водозбірник у вигляді дифузора з регульованою системою скидання води в підземне водосховище, розташоване під гідравлічною лабораторією, з якого воду качав насос для проведення досліджень. Таким чином, в експериментах використовувалася вода, що мала постійну температуру, а отже, і кінематичну в'язкість.



а



б

Рисунок 2 – Розташування групи моделей призматичних опор (а) та моделей опор двох мостових переходів (б) на плоскому піщаному дні гідродинамічного лотка

Figure 2 – Location of a group of models of prismatic supports (a) and models of supports of two bridge crossings (b) on a flat sandy bottom of a hydrodynamic trough

На відстані близько 8 м від початку робочої ділянки гідродинамічного лотка розташовувалися три пари моделей мостових опор, засипані просіяним кварцовим піском на висоту близько 0,2 м від дна лотка. У дослідженні пісок формувався у вигляді плоского дна і як модель існуючого рельєфного дна досліджуваної ділянки русла Дніпра. Приклад фотографії розмитого ґрунту поблизу мостових опор для плоского дна показано на рис. 2. Опори у вигляді прямокутних призм першого мостового переходу розташовувалися вище за течією від мостових опор у вигляді трубчастого трирядного ростверку другого мостового переходу. Ширина прямокутника $b_1=40 \cdot 10^{-3}$ м, а довжина $a_1=95 \cdot 10^{-3}$ м, ширина ростверку $b_2=40 \cdot 10^{-3}$ м, а довжина $a_2=200 \cdot 10^{-3}$ м, діаметр циліндричної опори ростверку $D=10 \cdot 10^{-3}$ м. Відстань між осями моделей мостових опор становила $l_x=0,31$ м і $l_y=0,35$ м, де x – поздовжня координата у напрямку швидкості набігаючого потоку (U), а y і z – поперечні координати. Глибина і швидкість набігаючого потоку регулювалися за допомогою засувки в системі скидання води і числом оборотів двигуна відцентрового насоса. Середній розмір зерен кварцового піску становив $d_{50}=0,35 \cdot 10^{-3}$ м. У ході вимірювань глибина потоку (H) змінювалася від 0,17 м до 0,34 м, а середньовитратна швидкість (U) від 0,15 м/с до 0,59 м/с.

Перед тим як провести вимірювання гідродинамічних характеристик течії навколо групової конструкції моделей мостових опор та визначити особливості взаємодії спряженої течії з

призматичними та трирядними циліндричними опорами було проведено візуальні дослідження. Тривимірний характер полів швидкостей, властивий обтіканню мостових опор, вивчався за допомогою візуалізації потоку контрастними речовинами, такими як кольорові водорозчинні фарби та чорнило, а також алюмінієва пудра. Кольорові барвники вводилися в потік і одночасно реєструвалися цифровими відео і фотокамерами. Отримані кадри та знімки реєструвалися та оброблялися на персональних комп'ютерах із застосуванням відповідних редакторів та програм. Крім барвників у потік вводилися контрастні частинки нейтральної плавучості і застосовувалася методика реєстрації руху шовковинок (кольорові шовкові нитки), які набували форми траєкторій руху вихрових структур. Використання мічених частинок під час проведення відео зйомки дозволило визначити як амплітуду, так і напрямок руху цих частинок, які відображали поле швидкостей в досліджуваній області вихрової течії.

За допомогою мікровертушок і мініатюрних термісторних датчиків швидкості вимірювали осереднені та пульсаційні складові швидкості течії. Мікровертушки та термістори переміщалися за допомогою відповідних добре обтічних державок та кронштейнів у характерні місця вимірювань полів швидкостей. Мікровертушки діаметром близько 10-3 м вимірювали середні швидкості набігаючого потоку. Виміряні дані дозволили побудувати профілі швидкості і визначити середньовитратну швидкість набігаючого потоку. Мініатюрні термісторні датчики (діаметр чутливої поверхні термісторних елементів складав $0,8 \cdot 10^{-3}$ м) були об'єднані в кореляційні блоки, щоб визначити напрямок вихрової течії та дали можливість вимірювати середні та пульсаційні складові швидкості. Малі розміри цих датчиків дозволили вводити мінімальні збудження у вихровий рух, який властивий обтіканню мостових опор. Просторово тимчасова кореляція пульсацій швидкості, виміряна ансамблем термісторних датчиків, дала можливість оцінити кінематичні характеристики вихрових структур і струменевих течій, що формуються та розвиваються всередині отворів розмиву і в околі мостових опор.

Для вимірювання глибини розмиву ґрунту та форми отвору розмиву було розроблено і виготовлено систему датчиків глибини розмиву на базі п'єзорезистивних датчиків статичного тиску. В основу роботи датчика було покладено механізм вимірювання глибини, де знаходиться чутливий елемент датчика повного тиску. Датчик тиску був закріплений на видовженому жорсткому стрижні, який опускався на поверхню отвору розмиву. Стрижень був використаний тонким для зменшення його впливу на вихровий рух у вимірюваній області отвору розмиву. На кінці стрижня поміщався наконечник у вигляді напівсфери для того, щоб стрижень під вагою датчика тиску не поринав у піщане дно лотка. У вимірах використовувався ансамбль із чотирьох датчиків глибини розмиву, рознесених на відому відстань один від одного. Конструкція вимірювального блоку дозволяла вільно переміщатися під власною вагою датчиків розмиву у напрямних отворах добре обтічних державках. При переміщенні вимірювального блоку до дна лотка датчики розмиву по черзі зупинялися у своєму переміщенні на тій глибині, де проводяться вимірювання. Після зупинки останнього датчика переміщення вимірювальної конструкції припинялося. Дані глибини переміщення датчиків передавалися через відповідний багатоканальний аналогово-цифровий перетворювач на персональний комп'ютер, де по моменту зміни наростання тиску, що реєструвалася кожним із вимірювальних датчиків, визначалася глибина розмиву ґрунту. За виміряними глибинами будувався профіль отвору розмиву в різних перерізах поблизу мостових опор. Ці виміри проводилися періодично у міру проведення експериментальних досліджень, що дозволяло визначити глибину розмиву та її рельєф залежно від часу вимірів.

Крім цієї системи вимірювання глибини та форми розмиву за допомогою датчиків статичного тиску було також розроблено і виготовлено спеціальний датчик, який також дозволяв виміряти глибину розмиву. Чутливим елементом цього датчика було використано п'єзокераміку, що застосовувалася в конструкціях мініатюрних п'єзокерамічних датчиків пульсацій тиску з діаметром чутливої поверхні, який дорівнював $1,3 \cdot 10^{-3}$ м [38, 39]. В основу роботи цього датчика було покладено механізм різкої зміни акустичного імпедансу під час торкання чутливої поверхні датчика

піщаної поверхні отвору розмиву. Датчик пульсацій тиску заглиблювався до піщаного дна за допомогою добре обтічної державки, яку було закріплено на тастері зі шкалою поділу точністю до $0,1 \cdot 10^{-3}$ м. Тастер опускав датчик глибини розмиву до торкання з піщаною поверхнею до тих пір поки на осцилоскопі, який було під'єднано до датчика, не виникав різкий сплеск у показниках осцилограми. По шкалі тастера відраховувалася глибина занурення датчика пульсацій тиску до поверхні отвору розмиву. Вся ця система була встановлена на координатному пристрої, який дозволяв визначити просторові координати точок вимірювання глибини та форми отвору розмиву.

Після закінчення експериментальних досліджень та висихання, отриманого в ході вимірювань, рельєфу дна проводилася фотозйомка та виміри характерних особливостей дна (профілі дюн, отворів розмивів). Вимірювання рельєфу дна проводилися за допомогою голчастих датчиків, що переміщуються тастером.

Результати дослідження. Залежності профілів локального розмиву ґрунту перед фронтальною частиною для одиночної призматичної опори (в площині її осьової симетрії) для різних глибин і швидкостей потоку показані на рис. 3а, для конструкції взаємного розташування мостових опор (призматичної та ростверку) – на рис. 3б. Так, на рис. 3а крива 1 виміряна для швидкості течії $U=0,27$ м/с, глибини потоку $H=0,2$ м і числа Фруда $Fr=U/(gH)^{1/2}=0,19$; крива 2 - $U=0,59$ м/с, $H=0,2$ м та $Fr=0,42$; крива 3 - $U=0,23$ м/с та $H=0,33$ м і $Fr=0,13$ та крива 4 - $U=0,32$ м/с та $H=0,34$ м і $Fr=0,18$.

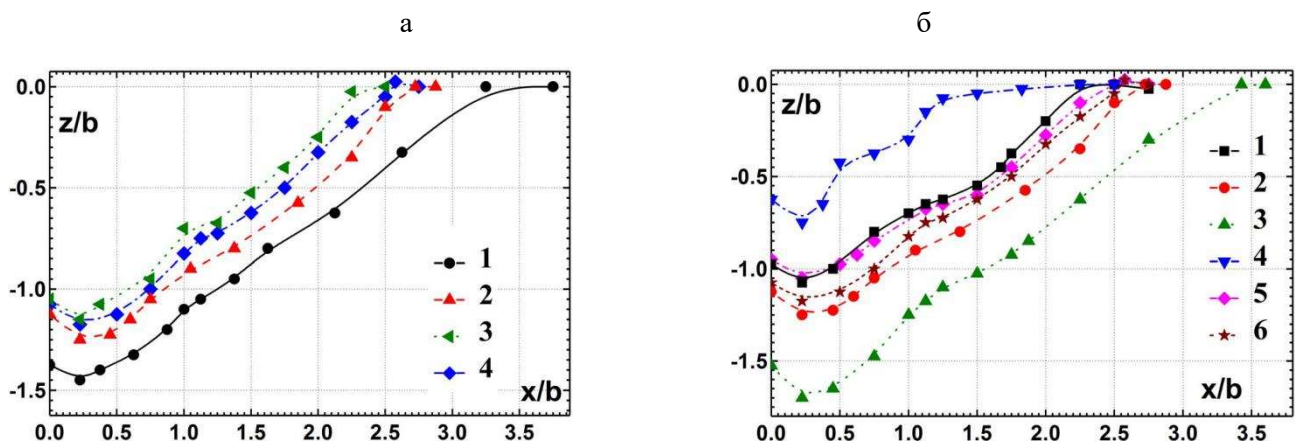


Рисунок 3 – Профілі локального розмиву ґрунту перед призматичною опорою під час обтікання одного мостового переходу (а) та взаємного розташування двох мостових переходів (б)
Figure 3 – Profiles of local soil erosion in front of a prismatic support during flow around one bridge crossing (a) and mutual location of two bridge crossings (b)

Слід зазначити, що профілі розмиву ґрунту мають дві характерні ділянки заглиблення з різними кутами нахилу. Вони зумовлені формуванням двох систем квазістійких великомасштабних підковоподібних вихрових структур. При цьому вихрова структура, яка розташована ближче до опори і знаходиться глибше, має менший масштаб. Вона розмиває і менше за розмірами заглиблення. Перед опорою, у місці сполучення поверхні опори та дна, на всіх профілях реєструється намивання ґрунту. Також між двома ділянками заглиблення, що формуються підковоподібними структурами, у профілі розмиву спостерігається намивання піску. Це намивання піску поділяє два схили заглиблення і при візуальному спостереженні має досить чіткі обриси, хоча і має характер, що осцилює в просторі, який відповідає частотам коливань вихрових структур. Результати досліджень показують, що зі збільшенням швидкості обтікання та зменшенням глибини потоку, розмив збільшується. Ширина отвору розмиву майже в (2-2,5) рази більша за глибину розмиву і максимальна глибина

спостерігається перед призматичною опорою на віддаленні близько 0,25 ширини опори. Розташування моделі другого мостового переходу позаду опор першого моста, призвело до змін у профілях розмиву, що проілюстровано на рис. 3б. Тут крива 1 отримана для швидкості течії $U=0,17$ м/с, глибини потоку $H=0,17$ м і числа Фруда $Fr=0,13$; крива 2 - $U=0,30$ м/с, $H=0,19$ м та $Fr=0,21$; крива 3 - $U=0,57$ м/с, $H=0,18$ м та $Fr=0,44$; крива 4 - $U=0,16$ м/с, $H=0,31$ м та $Fr=0,09$; крива 5 - $U=0,20$ м/с, $H=0,34$ м та $Fr=0,11$ і крива 6 - $U=0,31$ м/с, $H=0,32$ м та $Fr=0,18$. Взаємодія двох конструкцій мостових опор не призводить до суттєвих змін характеру та механізму формування розмиву перед призматичною опорою. Також на розмив ґрунту найбільший вплив мають підковоподібні вихрові структурами, що формуються під час відриву прилежового шару з верхньої передньої кромки заглиблення і під час взаємодії набігаючого потоку і фронтальної поверхні призматичної опори. При порівнянні профілів розмиву, представлених на рис. 3а та рис. 3б, можна визначити наступне. Внесення в потік моделей опор другого мостового переходу призводить до збільшення розмиву майже на 15% за надкритичними швидкостями потоку ($U/V_c \geq 1.8$) для неглибокої води (див., наприклад, криву 2 на рис. 3а і криву 3 на рис. 3б), де критична швидкість початку переміщення частинок ґрунту (V_c), визначеної залежністю $V_c = 6.19H^{1/6}d^{1/3}$ [40]. Цей режим обтікання відповідає 50 випадку течії з ґрунтом, що переміщається. Для режиму обтікання, так званого чистої води ($U/V_c < 1$), глибина розмиву зменшується майже на 20 % (крива 4 на рис. 3а і крива 6 на рис. 3б) за спільного розташування опор двох мостових переходів.

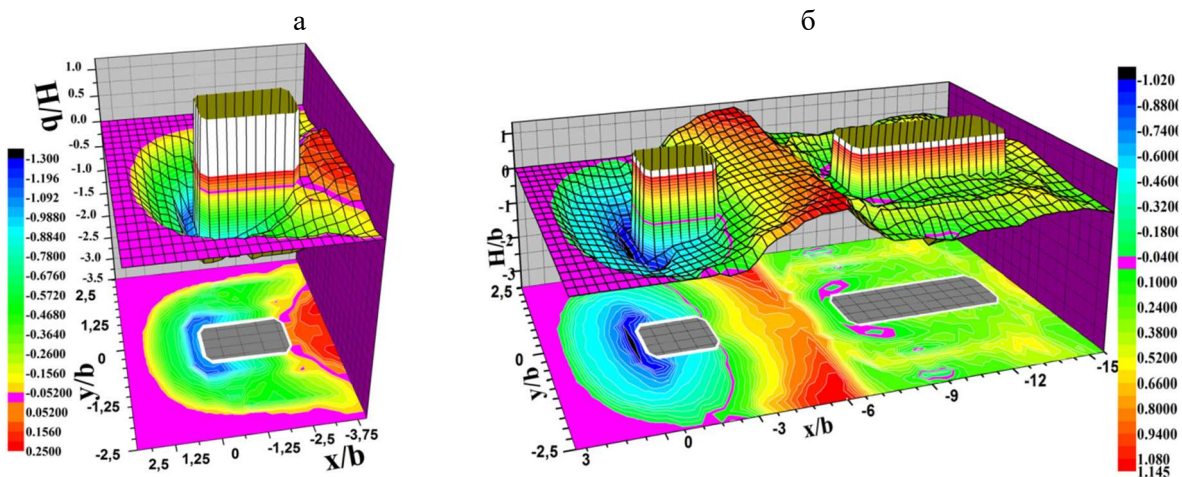


Рисунок 4 – Аксонометрія особливостей формування розмиву та наміву ґрунту у випадку поодинокого розташування призматичної опори (а) та взаємного розташування опор двох мостових переходів (б) на плоскому піщаному дні гідродинамічного лотка

Figure 4 – Axonometry of the features of the formation of erosion and soil washing in the case of a single location of a prismatic support (a) and mutual location of the supports of two bridge crossings (b) on a flat sandy bottom of a hydrodynamic trough

Аксонометрія формування розмиву ґрунту та наміву піску позаду мостових опор в результаті вимірювання профілю ґрунту під час обтікання моделей мостових переходів як в поодинокій конструкції, так і у випадку одночасного розташування опор двох мостових переходів приведена на рис. 4.

Результати вимірювань та оцінок під час візуальних та інструментальних досліджень показали, що взаємне розташування призматичних опор першого за потоком мостового переходу та трирядних циліндричних опор у вигляді ростверку другого мостового переходу суттєво впливають на форму та розміри отворів розмиву та наміву піщаного ґрунту на плоскій поверхні піщаного дна гідродинамічного лотка.

Висновки. Установлено, що за взаємного розташування моделей двох мостових переходів, що знаходяться у сліді один за одним, локальний розмив ґрунту перед призматичною опорою переднього за потоком мостового переходу збільшилася майже на 15% за надкритичними швидкостями течії на мілкій воді і зменшилася майже на 20% за докритичними швидкостями на глибокій воді.

Визначено, що характер і механізм формування розмиву ґрунту перед призматичною опорою не змінювалися внаслідок взаємного розташування опор мостових переходів в сліді одне за одним, а саме профілі розмиву мали дві характерні ділянки з різними кутами нахилу фронтальної поверхні заглиблення, які обумовлені формуванням двох систем квазістійких великомасштабних підковоподібних вихрових структур. Так, вихрова структура, яка розташована ближче до обтічної опори і знаходиться глибше, має менший масштаб і утворює менший за розмірами розмив.

Показано, що між двома заглибленнями, що формуються підковоподібними структурами, у профілі розмиву спостерігалися намивання піску. Встановлено, що ширина отвору розмиву ґрунту більш ніж у 2 рази більша за глибину розмиву і максимальна глибина спостерігається перед призматичною опорою на віддаленні близько чверті ширини опори.

Перелік посилань

1. Puspasari A.D., Haw-Tang J. A review on the numerical simulation model of scouring around bridge pier by using Flow-3D software. *J. Civil Engineering, Planning, and Design*. 2024.3(2).P. 78-92.
2. Prendergast L.J., Gavin K. A review of bridge scour monitoring techniques. *J. Rock Mech. Geotechn. Eng.* 2014. 6 P. 138-149. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.01.007>
3. Jamel A.A.J., Ali M.I. Comparing scour characteristics around different bridge piers - A review. *Samarra j. Eng. Sci. Research*. 2024. 2(1). P. 28-44.
4. Beg M., Beg S. Scour reduction around bridge piers: A review. *Intern. J. Eng. Inventions*. 2013. 2(7). P. 7-15.
5. Dong H., Li Z, Sun Z. Study on the mechanism of local scour around bridge piers. *J. Mar. Sci. Eng.* 2025. 13. P. 1021. <https://doi.org/10.3390/jmse13061021>
6. Chen Q., Huang R., Zhang H., Zhong Q. An energy conservation model for the temporal evolution of local scour depth at bridge piers during floods. *Intern. J. Sediment Res.* 2024.39. P. 654-669. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.05.001>
7. Ettema R., Kirkil G., Muste V. Similitude of large-scale turbulence in experiments on local scour at cylinders. *J. Hydr. Eng.* 2006. 132(1). P. 33–40.
8. Xiong W., Cai C.S., Zhang R., Shi H., Xu C. Review of hydraulic bridge failures: Historical statistical analysis, failure modes, and prediction methods. *J. Bridge Eng.* 2023. 28(4). P. 03123001.
9. Voskoboinyк A.V., Voskoboinick V.A., Voskoboinyк O.A., Tereshchenko L.M., Khizha I.A. Feature of the vortex and the jet flows around and inside the three-row pile group // Abstracts 8th International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2016) (12-15 September 2016). Oxford, UK, 2016. P. 176. <https://doi.org/10.1201/9781315375045-114>
10. Ikani N., Pu J.H., Soori S. Flow pattern and turbulent kinetic energy analysis around tandem piers: Insights from k-ε modelling and Acoustic Doppler Velocimetry measurements. *Water*. 2025. 17. P. 1100. <https://doi.org/10.3390/w17071100>
11. Voskoboinick V.A., Gorban I.M., Voskoboinick A.A., Tereshchenko L.N., Voskoboinick A.V. Junction flow around cylinder group on flat plate. In: Sadovnichiy V.A., Zgurovsky
12. Misuriya G., Eldho T.I. Turbulent structures and local scour around a cylindrical pier under unsteady flows. *Environmental Fluid Mechanics*. 2023. 23. P. 1359-1380. <https://doi.org/10.1007/s10652-023-09951-z>
13. Gorban I. Application of the model of trapped vortices to the control of flow around a bridge pier. *J. Physics: Confer. Series*. 2024. 2899. P. 012015. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1/012015>

14. Bauri K.P., Sarkar A., Nones M. Three-dimensional bursting process and turbulent coherent structure within scour holes at various development stages around a cylindrical structure. *J. Fluid Mech.* 2024. 997. P. A61. <https://doi.org/10.1017/jfm.2024.642>
15. Krajnovic S. Flow around a tall finite cylinder explored by large eddy simulation *J. Fluid Mech.* 2011. 676. P. 294-317.
16. Kirkil G., Constantinescu G. A numerical study of the laminar necklace vortex system and its effect on the wake for a circular cylinder. *Phys. Fluids.* 2012. 24(7). P. 073602-1-26.
17. Escarriaza C., Sotiropoulos F. Lagrangian model of bed-load transport in turbulent junction flows. *J. Fluid Mech.* 2011. 666. P. 36-76.
18. Kirkil G., Constantinescu G., Ettema R. Coherent structures in the flow field around a circular cylinder with scour hole. *J. Hydraulic Eng.* 2008. 134 (5). P. 572-587.
19. Radice A., Tran C.K. Study of sediment motion in scour hole of a circular pier. *J. Hydraulic Res.* 2012. 50(1). P. 44-51.
20. Das S., Das R., Mazumdar A. Comparison of characteristics of horseshoe vortex at circular and square piers. *Res. J. Applied Sci., Eng. Technology.* 2013. 17(5). P. 4373-4387.
21. Воскобойник А.В., Воскобойник В.А., Воскобойник О.А. Просторово часові кореляції та спектри пульсацій швидкості спряженої течії поблизу трирядного ансамблю циліндрів. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2009. Вип. 12. С. 165-177.
22. Voskoboinick A., Voskoboinick V., Turick V., Voskoboinyk O., Cherny D., Tereshchenko L. Interaction of group of bridge piers on scour. In: Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He
23. Voskoboinick V.A., Voskoboinick A.V., Areshkovych O.O., Voskoboinyk O.A. Pressure fluctuations on the scour surface before prismatic pier. *Proc. 8th International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2016) (12-15 September 2016).* Oxford, UK, 2016. P. 905-910. <https://doi.org/10.1201/9781315375045-115>
24. Voskoboinick V.A., Voskoboinick A.A., Turick V.N., Voskoboinick A.V. Space and time characteristics of the velocity and pressure fields of the fluid flow inside a hemispherical dimple generator of vortices. *J. Eng. Physics Thermophysics.* 2020. 93(5). P. 1205-1220. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02223-3>

SOIL ERASING DURING GROUP PLACEMENT OF BRIDGE SUPPORTS

Volodymyr Voskoboinick, Doctor of Technical Sciences, Head of Department, Department of Hydrodynamics of Wave and Channel Flows, Institute of Hydromechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, e-mail: vlad.vsk@gmail.com <http://orcid.org/0000-0003-2161-6923>

Artur Onyshchenko, Doctor of Technical Science, Professor, Head of bridges, tunnels and hydraulic structures Department, National Transportation University Kyiv, Ukraine, e-mail: onyshchenko.a.m.ntu@gmail.com, +380687771899, <https://orcid.org/0000-0002-1040-4530>.

Sergii Aksonov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Bridges, Tunnels and Hydraulic Structures, National Transport University, Kyiv, Ukraine, Aksenov121@gmail.com, tel. +380971534406, <https://orcid.org/0000-0002-6749-3909>.

Nataliia Chyzenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of bridges, tunnels and hydraulic structures Department National Transportation University Kyiv, Ukraine, e-mail: chyzenko_np@ukr.net, +380507355080, <https://orcid.org/0000-0002-9152-2474>.

Serhii Voroshnov, Candidate of Technical Sciences, Ph. D, National Transportation University, Professor of bridges, tunnels and hydraulic structures Department, e-mail: voroshnov52@ukr.net, +38067709707, <https://orcid.org/0000-0003-0642-8289>

Denys Trudenko, Postgraduate student of the department of bridges, tunnels and hydraulic structures. National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: tdv.83@ukr.net <http://orcid.org/0009-0001-3720-1952>

Summary. Introduction. Scour is one of the causes of the destruction of hydraulic structures, which is formed under the action of junction flow near bluff bodies, which occurs during the construction and operation of bridge crossings over water obstacles, during the installation of drilling supports and foundations of wind power plants in the shelf zone, and the construction of mooring structures on the ground. In this regard, a significant number of experimental and theoretical studies aimed at studying the phenomenon of local scour and developing means and methods for its reduction, which is extremely relevant.

Problem Statement. The process of formation of scour holes near bluff bodies installed on erosive soil is due to the formation and further development of a system of horseshoe vortex structures and wake vortices that are formed around the streamlined structure near its connection with the bottom. The main mechanism responsible for the formation and development of the scour hole includes a flow directed to the bottom in the front or frontal part of the pier, together with the formation of a system of horseshoe vortex structures near the base of the pier and wake vortices that break away from the pier surface.

Purpose. The purpose of the work is to determine the features of scour during the group arrangement of bridge piers using laboratory experimental researches.

Materials and methods. Experimental researches of the features of scour formation during the group arrangement of piers of two bridge crossings, which were in the wake of each other, were carried out on models of piers in laboratory conditions in a hydrodynamic channel using visual and instrumental research methods. Hydrodynamic characteristics of vortex and jet flows were obtained using specially designed and manufactured velocity and pressure sensors, and the parameters and shape of scour holes were determined using scour depth sensors.

Results. Experimental researches allowed to determine the features of scour formation around the group structure of bridge piers. Profiles of local scour in front of the frontal part of the prismatic pier were obtained depending on the junction flow velocity, flow depth and Froude numbers for the single arrangement of the piers of the upper streamlined bridge crossing and the joint arrangement of the piers of two bridge crossings. The features of the formation of scour and alluvium near bridge crossing piers in an axonometric representation are presented.

Conclusions. As a result of the research, it was established that the mutual arrangement of the models of the piers of two bridge crossings leads to significant changes in the scour in front of the prismatic piers of the first streamlined bridge crossing. Thus, the local scour increased by 15% at supercritical flow velocities in shallow water and decreased by almost 20% at subcritical velocities in deep water. It is shown that the scour profiles have two characteristic sections with different angles of inclination of the front surface of the scour hole, which are due to the formation of two systems of quasi-stable large-scale horseshoe vortex structures.

Keywords: local scour, prismatic pier, three-row grillage, horseshoe vortex, scour profile, bridge crossing

References

1. Puspasari A.D., Haw-Tang J. A review on the numerical simulation model of scouring around bridge pier by using Flow-3D software. *J. Civil Engineering, Planning, and Design*. 2024.3(2).P. 78-92.
2. Prendergast L.J., Gavin K. A review of bridge scour monitoring techniques. *J. Rock Mech. Geotechn. Eng.* 2014. 6 P. 138-149. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.01.007>
3. Jamel A.A.J., Ali M.I. Comparing scour characteristics around different bridge piers - A review. *Samarra j. Eng. Sci. Research*. 2024. 2(1). P. 28-44.
4. Beg M., Beg S. Scour reduction around bridge piers: A review. *Intern. J. Eng. Inventions*. 2013. 2(7). P. 7-15.
5. Dong H., Li Z, Sun Z. Study on the mechanism of local scour around bridge piers. *J. Mar. Sci. Eng.* 2025. 13. P. 1021. <https://doi.org/10.3390/jmse13061021>
6. Chen Q., Huang R., Zhang H., Zhong Q. An energy conservation model for the temporal evolution of local scour depth at bridge piers during floods. *Intern. J. Sediment Res.* 2024.39. P. 654-669. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2024.05.001>

7. Ettema R., Kirkil G., Muste V. Similitude of large-scale turbulence in experiments on local scour at cylinders. *J. Hydr. Eng.* 2006. 132(1). P. 33–40.
8. Xiong W., Cai C.S., Zhang R., Shi H., Xu C. Review of hydraulic bridge failures: Historical statistical analysis, failure modes, and prediction methods. *J. Bridge Eng.* 2023. 28(4). P. 03123001.
9. Voskobijnyk A.V., Voskoboynick V.A., Voskoboynik O.A., Tereshchenko L.M., Khizha I.A. Feature of the vortex and the jet flows around and inside the three-row pile group // Abstracts 8th International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2016) (12-15 September 2016). Oxford, UK, 2016. P. 176. <https://doi.org/10.1201/9781315375045-114>
10. Ikani N., Pu J.H., Soori S. Flow pattern and turbulent kinetic energy analysis around tandem piers: Insights from k- ϵ modelling and Acoustic Doppler Velocimetry measurements. *Water.* 2025. 17. P. 1100. <https://doi.org/10.3390/w17071100>
11. Voskoboynick V.A., Gorban I.M., Voskoboynick A.A., Tereshchenko L.N., Voskoboynick A.V. Junction flow around cylinder group on flat plate. In: Sadovnichiy V.A., Zgurovsky
12. Misuriya G., Eldho T.I. Turbulent structures and local scour around a cylindrical pier under unsteady flows. *Environmental Fluid Mechanics.* 2023. 23. P. 1359-1380. <https://doi.org/10.1007/s10652-023-09951-z>
13. Gorban I. Application of the model of trapped vortices to the control of flow around a bridge pier. *J. Physics: Confer. Series.* 2024. 2899. P. 012015. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1/012015>
14. Bauri K.P., Sarkar A., Nones M. Three-dimensional bursting process and turbulent coherent structure within scour holes at various development stages around a cylindrical structure. *J. Fluid Mech.* 2024. 997. P. A61. <https://doi.org/10.1017/jfm.2024.642>
15. Krajnovic S. Flow around a tall finite cylinder explored by large eddy simulation *J. Fluid Mech.* 2011. 676. P. 294-317.
16. Kirkil G., Constantinescu G. A numerical study of the laminar necklace vortex system and its effect on the wake for a circular cylinder. *Phys. Fluids.* 2012. 24(7). P. 073602-1-26.
17. Escauriaza C., Sotiropoulos F. Lagrangian model of bed-load transport in turbulent junction flows. *J. Fluid Mech.* 2011. 666. P. 36-76.
18. Kirkil G., Constantinescu G., Ettema R. Coherent structures in the flow field around a circular cylinder with scour hole. *J. Hydraulic Eng.* 2008. 134 (5). P. 572-587.
19. Radice A., Tran C.K. Study of sediment motion in scour hole of a circular pier. *J. Hydraulic Res.* 2012. 50(1). P. 44-51.
20. Das S., Das R., Mazumdar A. Comparison of characteristics of horseshoe vortex at circular and square piers. *Res. J. Applied Sci., Eng. Technology.* 2013. 17(5). P. 4373-4387.
21. Воскобійник А.В., Воскобійник В.А., Воскобойник О.А. Просторово часові кореляції та спектри пульсацій швидкості спряженої течії поблизу трирядного ансамблю циліндрів. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2009. Вип. 12. С. 165-177.
22. Voskoboynick A., Voskoboynick V., Turick V., Voskoboynik O., Cherny D., Tereshchenko L. Interaction of group of bridge piers on scour. In: Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He
23. Voskoboynick V.A., Voskoboynick A.V., Areshkovych O.O., Voskoboynik O.A. Pressure fluctuations on the scour surface before prismatic pier. Proc. 8th International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2016) (12-15 September 2016). Oxford, UK, 2016. P. 905-910. <https://doi.org/10.1201/9781315375045-115>
24. Voskoboynick V.A., Voskoboynick A.A., Turick V.N., Voskoboynick A.V. Space and time characteristics of the velocity and pressure fields of the fluid flow inside a hemispherical dimple generator of vortices. *J. Eng. Physics Thermophysics.* 2020. 93(5). P. 1205-1220. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02223-3>