



УДК 556.537:532

ХЛАПУК М.М., докт. техн. наук, проф.,
ЩОДРО О.Є., докт. техн. наук, доцент,
Національний університет водного
господарства та природокористування

ДОСЛІДЖЕННЯ МІСЦЕВИХ РОЗМИВІВ БІЛЯ РІЧКОВИХ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД



ХЛАПУК М.М.



ЩОДРО О.Є.

Актуальність теми. Вдосконалення технічного рівня об'єктів регулювання русел гірсько-передгірської зони пов'язано з підвищенням якості і надійності таких відповідальних гідротехнічних споруд як руслорегулюючі напівзагати, струмененапрямні дамби, автодорожні мости, заплавні і руслові опори ліній електропередач, водозабори та ін. Відомо, що 70...75% всіх аварій автодорожних мостів пов'язані з місцевими розмивами біля мостових опор і підмивом їх основ. На навальних ділянках берегів гірських річок Карпат не витримує натиску потоку більшість споруд внаслідок інтенсивного їх підмиву зі зривом відмостки.

За останні п'ять років великі паводки трапляються в середньому по два рази на рік, а за багатовіковими даними мають місце 1,4–1,7 раз на рік. Саме при катастрофічних повенях можливі істотні зміни в кінематичній структурі потоку, які обумовлені, зокрема, динамікою наносних відкладень та потоку, що їх обтікає. Наслідками таких змін є, як правило, різке наближення потоку до берега, або до споруди і зрив відмостки, що дає поглиблення розмиву в кілька разів.

Дана робота присвячена врахуванню всіх, найбільш важливих, гідродинамічних факторів, а також властивостей ґрунту шляхом теоретичного та експериментального вивчення структури потоку в зоні розмиву і закономірностей відриву та перенесення ґрунтових часток. Проблемою місцевих розмивів біля мостових опор та напівзагат займалося багато вчених, наприклад, В.С. Алтунін, О.В. Андреев, К.Ф. Артамонов, В.О. Большаков, Н.П. Буданов М.М. Журавльов, І.І. Кирієнко, О.А. Курганович, Е. Лаурсен, Є.Ф. Лісіцин, В.О. Маглакелідзе, А.О. Мартиненко, А.С. Марченко, Ц.Є. Мірцхулава, В.С. Муромов, Ю.Л. Пейч, М.М. Петров, Т.П. Радченко, Г.Б. Руруа, В.Ш. Ципін, З.К. Еріставі, та багато інших, але ще нема методики, яка б давала можливість врахувати зміну інтенсивності розмиву в часі, особливості ґрунту та турбулентного потоку, рух транзитних наносів, тощо. Дані цих робіт дозволяють прогнозувати місцеві розмиви в багатьох випадках, але нема узагальнюючих робіт, які могли б встановити зв'язки між характеристиками потоку в придонній області та інтенсивністю змиву донних відкладень. Концептуальна схема даної роботи

була розвинута у роботах [1–4], основні експериментальні результати описано, зокрема у роботах [1, 3, 5–8], практичні аспекти застосування ідей даної роботи – у [2, 3, 5, 9–11].

Мета роботи полягає в розробці нової наукової концепції місцевих розмивів біля річкових гідротехнічних споруд та нових методів їхнього гідравлічного розрахунку з врахуванням зміни кінематичної структури потоку в часі, інтенсивності руху транзитних наносів, зміни геометрії границь потоку, гранулометричного складу та параметрів донних відкладень.

Для досягнення поставленої мети було поставлено та вирішено конкретні задачі:

- розроблено математичну модель трьохвимірного турбулентного усталеного руху рідини біля споруд з використанням у якості замикаючої модифікованої двопараметричної $k-\epsilon$ моделі турбулентності та запропоновано алгоритм її реалізації;

- розроблено математичну модель змулення та перенесення часток відносно дрібного однорідного ґрунту на основі системи рівнянь балансу маси часток дифузійно-конвективного типу;

- розроблено імовірнісну модель відриву ґрунтових часток від дна та їх руху у потоці з врахуванням реальних кінематичних характеристик потоку та складу ґрунту на підставі імітаційного моделювання та статистичного підходу;

- проведено експерименти, які дозволили калібрувати запропоновані математичні моделі та уточнити деякі характеристики потоку в зоні місцевого розмиву, підібрати та оптимізувати конструкції споруд, які зменшують наслідки дії водної стихії, а також регулюють рух наносів;

- розроблено методи розрахунку місцевих розмивів зосередженого і розосередженого типів біля споруд вказаного вище типу.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є рух турбулентного водного потоку, насиченого наносами, який взаємодіє з ґрунтом дна і берегів та обтікає гідротехнічні споруди.



Предмет дослідження. Предметом досліджень є теорія і методи гідравлічного розрахунку процесу деформації русла під впливом турбулентного водного потоку.

Явище місцевого розмиву пов'язано з відривом окремих частинок ґрунту, що лежать на поверхні дна, та наступним їхнім виносом на деяку відстань, яка більша відносно розмірів зони активного вимиву ґрунту. Відрив окремих частинок проходить шляхом їхнього викочування із гнізда, або шляхом їх вертикального підняття. На частинку в початковий момент її руху і в наступні моменти часу діють дві зсувні горизонтальні сили. Одна з них пов'язана з квадратом миттєвої швидкості обтікання частинки, інша — це сила в'язкого опору, що пропорційна швидкості обтікання в першій степені. Вертикальні сили, що діють на частинку, пов'язані з пульсацією гідродинамічного тиску.

Інтенсивність вимиву ґрунту в зоні розмиву в значній мірі залежить від потужних низькочастотних пульсацій тиску, що виникають в зоні появи гвинтоподібних, циркуляційних, відривних та інших видів нерівномірних течій. Причинами виникнення місцевих розмивів є такі фактори [4]:

- збільшення осереднених швидкостей біля дна або укусу, яке пов'язано з змінами умов набігання потоку, наприклад, різкого навалу потоку на берег;

- виникнення вторинних гвинтоподібних течій в зоні місцевого розмиву, підвищення рівня пульсацій швидкостей і гідродинамічних тисків в зоні утворення таких течій;

- збільшення наносотранспортуючої спроможності течій в зоні;

- утворення вихору та підвищення інтенсивності турбулентності в ній [1, 4–7];

- підвищення перепадів тисків, які пов'язані з обтіканням споруд або руслових форм.

Усі вказані фактори присутні, як правило, при будь-якому розмиві, але деякі з них найбільш істотні в окремих випадках. В зв'язку з цим пропонується наступна класифікація умов розмиву.

Класифікація за генетичним принципом:

- 1) розмив при обтіканні споруди, яка піднімається над дном (мостові опори, півзагати та ін.) Тут присутні всі вищезначені фактори розмиву;

- 2) розмив при натіканні потоку на берег, на вертикальну або нахилену площину; тут біля берега збільшуються швидкості, градієнти швидкостей, інтенсивність турбулентності та градієнти тисків;

- 3) розмиви при звуженні, або злитті потоків. Тут підвищуються швидкості, градієнти тисків, і з'являються місцеві вимоїни, в яких утворюються гвинтоподібні течії, і далі розмив посилюється;

- 4) виникнення місцевих вимоїн на дні, біля берега, або в центрі русла у зв'язку з обтіканням островів, наносних відкладень, гряд та перепадів. Тут велику роль виконують місцеві вихрові течії, перепади тисків.

За видом ґрунтів, які розмиваються, розмиви класифікуються на розмиви в однорідних і в неоднорідних ґрунтах.

В однорідних ґрунтах руйнування поверхневого шару ґрунту під дією водного потоку може проходити двома шляхами:

- 1) масовим змивом ґрунту з деякої площі дна;
- 2) відривом окремих часток ґрунту.

Завдяки значній неоднорідності ґрунтів гірських річок розмив по першому типу, як правило, не іде, і відбувається лише відрив окремих часток, інтенсивність якого залежить від локальних умов в зоні розмиву. В неоднорідних ґрунтах розмиви можуть проходити з утворенням відмостки або без її утворення.

При формуванні відмостки — шару найбільш крупних часток, які не можуть бути винесені потоком за межі зони розмиву, подальший розмив припиняється. Товщина шару відмостки приблизно дорівнює подвійному середньозваженому діаметру ґрунту.

Відмостка формується, як правило, при наявності в ґрунті крупних фракцій не менше 20 % по масі. Діаметри часток, які утворюють відмостку, приблизно дорівнюють від 1,6 до 2,0 середньозваженого діаметру ґрунту.

За характером процесу розмиву їх можна класифікувати таким чином:

- зосереджений розмив, при якому формується поглиблення, яма розмиву, планові розміри якого одного порядку з глибиною, або з характерним розміром споруди;

- розосереджений по довжині розмив, при якому вздовж розмивної ділянки довжиною $l \gg h_p$, умови вимиву ґрунту змінюються несуттєво;

- розосереджений по площі розмив, при якому на деякій площі дна умови вимиву ґрунту змінюються несуттєво. Зосереджений розмив, зокрема, має місце біля мостових опор всіх типів при будь-якому куті підходу потоку до опори; біля перемичок, оголовків напівзагат, бун і аналогічних споруд, які розташовані біля берега;

- закономірності взаємодії турбулентного потоку з руслом. Особливо питання силовій дії потоку на поверхню розмивного ложа і на окремі ґрунтові частки. Розглянуто роль пульсації гідродинамічних параметрів придонних течій на стійкість поверхневого шару, а також окремих донних часток.



Швидкісна структура потоку біля напівзагат та мостових опор була досліджена на трьох експериментальних установках — в прямолінійному гідравлічному лотку шириною 2,5 м, довжиною 17,5 м з глибинами наповнення від 5 до 20 см і витратами до 275 л/с, де досліджувались напівзагати з відтворенням просторових умов їх роботи; в прямолінійному дзеркальному гідравлічному лотку з вертикальними стінками шириною 1,3 м, довжиною 8,5 м з глибинами заповнення від 4,5 до 30 см і витратами до 178 л/с, а також криволінійному лотку шириною 1,5...3,0 м із змінним радіусом кривизни $R = 3...4,5$ м і змінним відношенням $B/R = 1/2...1/3$. В другому лотку досліджувалась робота одиноких мостових опор в основному круглоциліндричної форми діаметрами від 5 до 25 см, а в третьому — робота напівзагат біля вигнутого берега. Робота водовипускних споруд досліджувалася у спеціальному лотку довжиною 17,5 м, шириною 2,5 м і глибиною до 40 см. При цьому лотку був організований боковий підвід води, де будувалися моделі водовпускної споруди різних типів, які відповідають конкретним натурним гідротехнічним спорудам. Різноманітні абстрактні схеми злиття потоків досліджувалися у другому лотку для мостових опор та напівзагат, що описаний вище [3, 9, 11].

Швидкості вимірювалися за допомогою однокомпонентного тензометричного датчика з діаметром приймального елемента 5 мм, який встановлювався біля дна на відстані 5 мм від осередненої його поверхні, перпендикулярно до напрямку вектора осередненої швидкості.

Моделі досліджуваних споруд встановлювалися в ґрунтових касетах з однорідним піском із середнім діаметром 1,4 мм. На початку проводився розмив основи біля моделі споруди до визначеної глибини, а потім поверхня дна моделі закріплювалась тонкою цементною кіркою шляхом розпилення цементу на поверхні вологого піску, після затвердіння проводилися заміри миттєвих швидкостей тензодатчиком. Аналогічним чином проводилися і заміри швидкостей при нерозмитому дні, відповідно моменту початку розмиву [1–5].

Структура потоку в початковий і наступні моменти часу при обтіканні оголовків напівзагат і механізм виносу наносів якісно не відрізняються від структури при обтіканні опор. Обтікання оголовка відрізняється лише несиметричною формою зони розмиву і потоку, що пов'язано з несиметричною формою самої споруди.

Моделювання замулення та конвективно-дифузійного перенесення донних часток дрібного ґрунту ($w_0/U_0 < 3,5...4,0$). Для аналізу переходу у потік і транспортування таких відносно дрібних часток ґрунту розглянуто динамічну рівновагу

поверхневого шару ґрунту, в якому і вода і ґрунтові частки рухаються. Спочатку було проаналізовано поведінку самого ґрунту при швидкостях потоку над ним, близьких до критичних. Показано, що для розмірів часток менше 1 мм однорідного ґрунту варто враховувати закономірності проникнення тиску в ґрунт, а для часток з $d > 5$ мм варто враховувати і фазу затримки процесу зміни тиску в ґрунті. Тобто неперервний характер проникнення тиску й пов'язаних з ними малих рухів часток ґрунту свідчить в цьому випадку про доцільність розглядання процесу змушення часток як неперервного переходу від нерухомого ґрунту основи до водогрунтової суміші, яка рухається з потоком та обмінюється з дном частками за рахунок їх дифузії. Показано також, що існує прямий однозначний зв'язок осереднених дотичних напруг на поверхні і ймовірності втрати стійкості часток дрібних ґрунтів.

Відрив і транспортування відносно дрібних часток досліджувалися за допомогою системи конвективно-дифузійних рівнянь. При цьому розглядався процес конвективної дифузії донних частинок ґрунту внаслідок дії на них турбулентного водного потоку, швидкість якого $\vec{V}(u(x, y), v(x, y))$, в області $G = \{(x, y): -\infty < x < +\infty, 0 < y < l(x, t)\}$, обмеженій горизонтальною лінією $y = 0$ (поверхнею рідини) та змінною в часі границею $L(y = l(x, t))$ — межею розділу даної рідини і твердої фази. у випадку переважання його конвективної складової над дифузійною. Відрив, переміщення та осідання часток під впливом водного потоку в такій моделі будемо розглядати як дифузю з деяким фіктивним "коефіцієнтом дифузії". Внаслідок масопереносу донних частинок через лінію L (поверхню дна), її вигляд з часом змінюється. Процес деформації русла, таким чином, може бути описаний такою модельною задачею

$$\varepsilon \frac{\partial}{\partial y} \left(D(x, y) \frac{\partial c}{\partial y} \right) - u(x, y) \frac{\partial c}{\partial x} - v(x, y) \frac{\partial c}{\partial y} = \frac{\partial c}{\partial t}, \quad (1)$$

$$c(x, y, 0) = \bar{c}(x, y), \quad \left. \frac{\partial c}{\partial y} \right|_{y=0} = 0, \quad c|_{y=l(x,t)} = c_*, \quad (2)$$

де $c(x, y, t)$ — концентрація наносів (дифундуючих частинок) у точці (x, y) в момент часу t ; $\varepsilon D(x, y)$ — фіктивний "коефіцієнт дифузії", який пов'язаний з інтенсивністю проникнення частинок ґрунту в рідину; ε — малий параметр; $l(x, t)$ — невідома функція, що характеризує положення поверхні дна в даний момент часу, $l(y, t) > 0$. Для визначення значень фіктивного коефіцієнта дифузії D пропонується співвідношення:

$$D = \chi \lambda^{\mu \nu + \beta} \frac{\partial V}{\partial \varphi}, \quad (3)$$

де $\chi, \lambda, \mu, \beta$ — деякі числа.

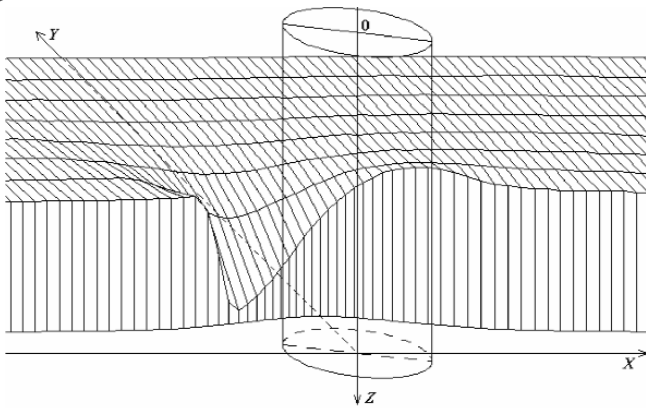


Рис. 1. Розрахункова конфігурація поверхні дна поблизу циліндричної перешкоди (мостової опори): $u_{\infty} = 1,5$ м/с, $R=1$ м, $H=1$ м; ґрунт однорідний з діаметром частинок 2 мм

Розв'язка задачі (1)–(2) проводиться шляхом дискретизації часу t з настільки малим кроком Δt , щоб на кожному із проміжків $[t_k, t_{k+1}]$ можна було б знехтувати зміною границі L . Вважатимемо її при $t_k < t < t_{k+1}$ фіксованою – $L = L_k = \{(x, y): y = l(x, t_k)\}$. Далі спеціальним чином будемо нове положення кривої $L = L_{k+1}$, яку прийматимемо за наближення границі області для наступного моменту часу. На наступних стадіях розмиву замість змінних x та y вводяться змінні s та r таким чином, що розрахункова область деформується по вертикалі, ставляться відповідні крайові умови. Враховується також кривизна дна в умові балансу твердого матеріалу біля дна. Підбір параметрів $\chi, \lambda, \mu, \beta$ в формулі (3) для практичних розрахунків здійснюється шляхом порівняння результатів числових експериментів при різних значеннях цих параметрів з даними експериментальних та натурних досліджень, причому приймалися до уваги не лише глибина воронки розмиву, але і її форма. Нами отримані такі значення цих параметрів: $\lambda = 2; \mu = 0,75; \beta = 1,5$. Для знаходження значень коефіцієнта χ отримана формула $\chi = 0,05R^{3,4}d^{0,13}e^{1,1u_{\infty}}$. Область зміни параметрів в даній залежності наступна: $d = 0,1...2$ мм, $U_0 = 0,25...4$ м/с. Приклад розрахунку показано на Рис. 1.

В цьому розділі розглянуто також питання взаємодії потоку з донними частинками. Основними факторами, що визначають умови відриву окремої частинки від дна, є діючі на неї зовнішні навантаження, а також сили інерції, пов'язані з прискоренням частинки в початковий момент її руху. В якості зовнішніх навантажень розглядаються сили власної ваги, архімедові сили, а також гідродинамічна сила взаємодії турбулентного потоку з нерухомою частинкою.

Зміни миттєвих швидкостей і тиску в придонній області потоку носять випадковий, стохастичний характер і можуть бути представлені детерміністичними характеристиками – значення-

ми моментів розподілу, автокореляційною функцією та спектральною густиною випадкового процесу. Неоднорідність механічного складу наносів, параметри їх форми і укладка також задаються статистично.

В роботах багатьох авторів, наприклад, М.А. Дементьєва, І.І. Леві, В.С. Кнороза, Ц.Є. Мірцхулави та інших, виконано детальний аналіз взаємодії потоку з донними частинками, розкривається природа сил, що впливають на відрив частинок, і приводяться кількісні залежності, що дозволяють ці сили визначити. Проте, в роботі всіх авторів не враховані реальні статистичні закони зміни факторів, що визначають взаємодію потоку з донними частинками і відрив самих частинок від дна. В роботах К.В. Гришаніна, В.М. Доненберга, В.О. Базилевича та інших вчених обґрунтовано статистичний підхід до проблеми відриву і початку руху донних частинок. Показано, що ймовірність відриву частинок пов'язана статистичними закономірностями зміни поздовжньої швидкості, або дотичної напруги на дні. У всіх роботах розглядаються не всі можливі види втрати стійкості частинки, а тільки викочування її із гнізда, або вертикальний підйом, розв'язуються відповідні рівняння руху цієї частинки. Автори ряду робіт враховують стохастичні властивості турбулентного потоку, але не розглядають процесу руху самої частинки з врахуванням її інертності. Їх припущення про рівність між кількістю змивів частинок і перевищення миттєвих швидкостей потоку критичних значень виконується лише наближено і точніше для відносно дрібних часток.

Особливості розв'язки задачі полягають у тому, що розглядається велика група окремих придонних частинок кулеподібної форми різних діаметрів, розподілених у відповідності із заданою кривою гранулометричного складу донних відкладень. Імітуються випадкові числа, що мають ті ж середні значення, дисперсію і автокореляційні функції, що й задана послідовність випадкових чисел. Ймовірність викиду визначається шляхом розв'язки повної системи диференціальних рівнянь, що описують початкову стадію їх руху. При цьому частинка вважається відірваною від дна, якщо час відриву менший, або дорівнює часу впливу.

На Рис. 2 представлена схема силових впливів на одну кулеподібну частинку, що лежить на поверхні дна та обтікається потоком. Нормальні і дотичні сили, що діють на частинку, розподілені нерівномірно. Горизонтальну і вертикальну складові сили P позначимо P_x та P_y ,

$$P_x(t) = C_x \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{V^2(t)}{2g}, \quad (4)$$

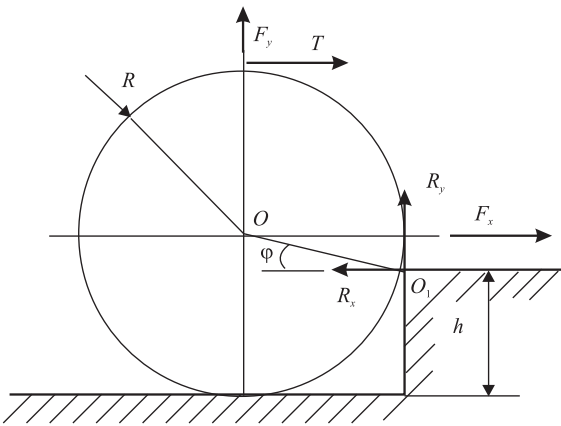


Рис. 2. Схема сил, які діють на ґрунтову частинку в потоці

$$P_y(t) = C_y \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{V^2(t)}{2g} \quad (5)$$

При проведенні досліджень в роботі прийнята статистична модель відриву твердих часток від дна, виконані числові розрахунки по визначенню ймовірності відриву окремих часток, що лежать на поверхні дна. При цьому розв'язувалась задача імітації зовнішніх впливів, а також інтегрувались рівняння руху частинок від початку їх руху до моменту відриву від дна.

Для системи координат, позначеній на Рис. 2, запишемо рівняння динамічної рівноваги частинки з врахуванням сил інерції, що включаються згідно принципу Д'Аламбера до системи зрівноважених сил:

$$m \ddot{x}_0 = F_x(t), \quad m \ddot{y}_0 = F_y(t), \quad (6)$$

$$x_c(x, y)|_{t=0} = x_0, \quad y_c(x, y)|_{t=0} = y_0, \quad (7)$$

$$x'_c|_{t=0} = 0, \quad y'_c|_{t=0} = 0, \quad (8)$$

$$\varphi''_t = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^n M_i(t), \quad (9)$$

$$\varphi|_{t=0} = \varphi_0, \quad \varphi'_t|_{t=0} = 0, \quad (10)$$

де x_c, y_c – координати центру мас частинки; m – маса частинки з врахуванням приєднаної маси води; x_0, y_0 – координати центру мас в момент часу $t = 0$; F_x та F_y – проекції рівнодіючої всіх діючих сил на осі OX та OY відповідно; I – момент інерції кулеподібної частинки відносно осі, що проходить через точку дотику O . Рівняння (9) характеризує обертовий рух частинки навколо осі O .

Розглядається три можливих варіанти відриву частки від дна. Перший – вертикальний відрив – має місце, коли сума вертикальних підйомних сил, що діють на частинку, стає більшою суми сил ваги і вертикальної складової сили тертя $F_y(t) \geq 0$. Другий – обертання частки навколо точки O та її

відрив від точки дотику в момент, коли реакція опори $R(t) \leq 0$ стає рівною нулю. Третій варіант – перекочування частки ґрунту через сусідню частку і подальший її рух у формі перекочування. При цьому частка повністю залишає своє гніздо, коли її кут повороту стає більшим $\pi/2$.

Алгоритм статистичної імітації працює наступним чином. Генерується випадковий діаметр частки і розв'язуються рівняння початкового руху частки при багатьох випадкових значеннях швидкостей потоку. Основні сили, що діють на частинку, визначаються за формулами

$$P_x = \rho C_x \Omega V^2; \quad P_y = \rho C_y \Omega V^2, \quad (11)$$

де C_x та C_y – коефіцієнти опору частки (знаходяться за даними вимірювань Мацеї А.В.), Ω – площа міделевого перетину частки. Далі розв'язується система диференціальних рівнянь (6–10) та визначається функція $\varphi(t)$, а також складові реакції в точці опори. Після чого перевіряються умови відриву. Якщо одна з умов виконується, фіксується факт відриву частки. Після випробування першої частки генерується наступний діаметр і розрахунок повторюється. Після завершення циклу визначається ймовірність відриву часток $P = n / N$, де n та N – кількість часток, що відірвались, та загальна їх кількість.

Результати розрахунків дозволяють оцінити також нерозвиваючу швидкість потоку із заданою надійністю. Для умов рівномірної течії збіжність даних розрахунків з даними вимірів Ц.Є. Мірцхулави характеризується коефіцієнтом якості апроксимації 0,943, що вказує на задовільну збіжність (граничне допустиме значення становить 0,8 – 0,85).

З метою моделювання перенесення часток в потоці розроблено алгоритм стохастичної імітації руху часток в потоці. Задаються початкові координати частки на дні потоку. Координати точок приземлення визначаються шляхом розв'язування системи диференціальних рівнянь руху частинки у воді для заданого поля осереднених швидкостей (u, v, w) та початкових умов руху частинки, її координат та прискорень, які залежать від імпульсу діючих підйомних сил. Початкові сили знаходяться в залежності від кутового прискорення, кутової та лінійної швидкості частки в момент її відриву від дна, які, в свою чергу, беруться з даних імітаційного моделювання. Система рівнянь, що описує рух одиночної частки у воді, має вигляд по координатно розписаного другого закону Ньютона з врахуванням даних про рух частинок у потоці біля границь, підйомної сили, яка виникає внаслідок несиметричності обтікання і обертання частки, а також дії на неї вертикальних пульсацій-



Рис. 3. Картина обтікання і місцевих розмивів біля мостової опори без кріплення дна (а) та з гнучким кріпленням (б) [8]

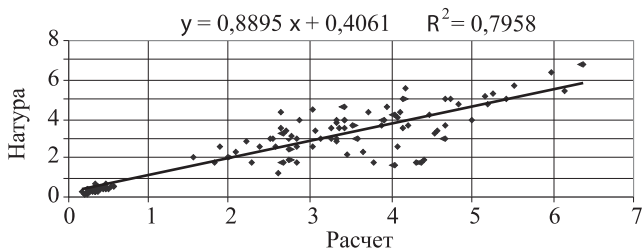


Рис. 4. Порівняння натурних розмивів біля круглоциліндричних мостових опор з розрахунковими

них швидкостей. Ця сила має статистичну природу і задається в програмі за допомогою генератора випадкових чисел з розподілом ймовірностей за нормальним законом. Розрахунок руху частки ведеться скінченнорізницею методом. Розрахунок розмиву повторюється для кожного моменту часу при заданій кінематиці, що також змінюється з часом до стабілізації.

Прийнятій концептуальній схемі дослідження відповідає і експериментальна його частина, вона повинна не тільки підтверджувати саму схему, але й давати інженерам-практикам інформацію про якісні і кількісні характеристики течій в зоні активного переформування русла. Тому дослідження проводилися для різних конкретних випадків — розмив біля мостової опори, біля оголовка напівзагати, або будь-якої перешкоди, біля



Рис. 5. Фізична модель криволінійного розмивного русла, підготовлена до експерименту [11].

берега, або струмененапрямної чи огорожуючої дамби. Особливу роль відіграє дослідження деформацій дна в зоні злиття потоків, бо розмивна спроможність в цьому випадку визначається двома потоками і картина розмиву найбільш чітко виражається як продукт гвинтоподібної течії, створеної цими потоками.

Проводилися також досліди по вивченню розмивів зосередженого типу біля навалного берега і розосереджених розмивів у зонах поперечного стиснення потоків у підмостовому руслі, в зоні злиття потоків, встановлений зв'язок між інтенсивністю змиву наносів і характеристиками потоку при відсутності руху транзитних наносів.

Порівняння натурних розмивів біля круглоциліндричних мостових опор з розрахунковими, які отримано за нашими емпіричними залежностями відображено на Рис. 4.

На Рис. 5 показано розмивну модель, виконану у практично однорідному великопіщаному руслі з різким поворотом для дослідження гідравлічних явищ при різкому наближенні потоку до берега. На Рис. 6—8 показано результати експериментів у розмивному руслі з фіксацією форми розмиву нитяними горизонталіями біля оголовків напівзагат. На рисунках видно, що розмив не загрожує береговому укосу.

Результати вимірювання поступальних швидкостей у гвинтоподібній течії в зоні активного вимиву ґрунту показано на Рис. 8. Видно, що максимальні поступальні швидкості у зазначеній зоні закономірно зменшуються як при збільшенні відносної глибини розмиву, так і при зменшенні розміру діаметра опори.

На Рис. 9 показано захисні низькі напівзагати, розміщені під гострим кутом назустріч потоку біля с. Добровляни на р. Лімниця. Видно занесення міжнапівзагатних проміжків гравійною масою наносів.

Основним висновком, який був зроблений з усіх серій досліджень, в яких вивчалася структура потоку у випадку зосередженого розмиву, необхідність врахування основного структурного елемента розмиву — гвинтоподібної течії, що описана вище, і подібність явищ, що супроводжують місцевий розмив, у різних випадках.

Дослідження швидкісної структури потоку в воронці розмиву дозволяє знайти закономірності зміни осереднених швидкостей в зоні активного



вимиву ґрунту при зміні відносної глибини ями розмиву біля круглоциліндричної мостової опори (Рис. 3). Знайдено також аналогічні закономірності для пульсаційних швидкостей. Також знайдено залежності і від кінетичності потоку, форми опори, числа Рейнольдса, форми ями розмиву та шорсткості поверхні дна.



Рис. 6. Розмив дна біля системи з п'яти напівзагат

ЛІТЕРАТУРА

1. Щодро А.Е. Кинематика потока и водообмен за косорасположенными донными уступами гидротехнических сооружений // Гидравлика и гидротехника: Респ. межвед. научно-техн. сборник. – К.: Техніка, 1978. – Вып. 26. – С. 59–64.

2. Щодро О.Є., Шинкарук Л. А., Напримерова О. П. Методи розрахунків регуляційних споруд на передгірських ділянках річок. // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: Міжвідомчий науково-технічний збірник. – К.: УТУ, 2006. – Вып. 73. – С. 354–357.

3. Щодро А. Е., Шлихта В.М. Экспериментальное и численное исследование структуры и размывающей способности потока у водовыпусков в каналы. // Машиностроение: Вестник Национального технического университета Украины КПИ. – К., 1999. – Т. 2. – Вып. 36. – С. 404–410.

4. Щодро А.Е. Физические основы расчетов местного размыва возле речных гидротехнических сооружений // Гидравлика и гидротехника: Респ. межведомств. научно-техн. сборник. – К.: Техніка, 1997. – Вып. 59. – С. 100–107.

5. Савенко В.Я., Щодро О.Є., Славінська О.С. Дослідження місцевих розмивів біля мостових опор // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – К.: НТУ, 2003. – Вып.66. – С. 188–198.

6. Shchodro A.E. Local Scour Investigation on Steep River Bends in Ukrainian Carpathian: Proceedings of the Tenth International Symposium on River Sedimentation. Effects of River Sediments and Channel Processes on Social, Economic and Environmental Safety (august 1–4). – Moscow, Russia, 2007. – V. 3. – P. 275–284.

7. Schodro Alexei E. River bed deformations near banks and hydraulic structures due to river flow // River Basin Management IV: Fourth International Conference on River Basin Management Including all Aspects of Hydrology, Ecology, Environmental Management, Flood Plains and Wetlands. – Boston: WIT-Press, Southampton, 2007. – P. 381–387.

8. Unger J. Basic flow pattern in spur dykes. 29-th Convegno di idraulica e costruzioni idrauliche / J. Unger, W. H. Hager, A. E. Shchodro. – Trento, 7–10 settembre. – Edit. Bios. – 2004. – Vol. 1, Tema A, Pp. 1147–1154.

9. Гурьев А.П., Щодро А.Е., Чумичева М.М., Шлихта В.М. Кинематические характеристики потока впускного сооружения с криволинейным порогом // Гидротехническое строительство. – 1991. – N4. – С. 17–19. Особистий внесок (1, 5, 6, 7).

10. Щодро О.Є., Мокляк М.М., Ходневич Я.В. Покращення екологічного стану малих річок за допомогою затоплюваних бун // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування: Збірник наукових праць. – Рівне, 2007. – Випуск 1 (37). – С. 133–142.

11. Щодро О.Є., Славінська О.С., Шитов В.М. Дослідження звальних течій та місцевих розмивів на криволінійних ділянках передгірських річок // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – К.: НТУ, – Вып.67. – 2003. – С. 173–180.

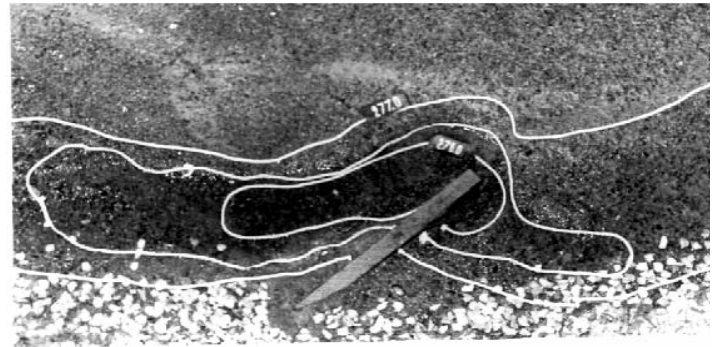


Рис. 7. Характер розмиву дна біля одиночної напівзагати, встановленої біля вигнутого берега

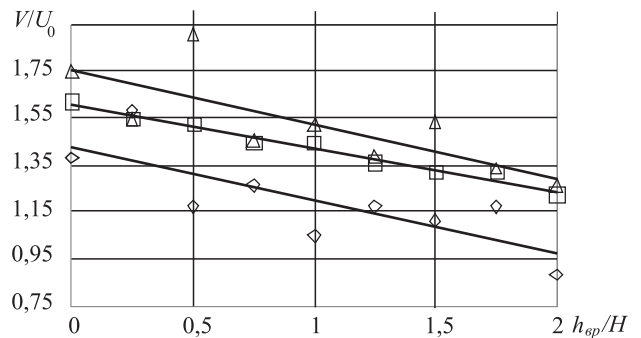


Рис. 8. Залежність осереднених придонних швидкостей біля мостової опори від відносних глибин розмиву при різній ширині опори – 1(Δ) – B = 15.0 см; 2(□) – B = 12.0 см; 3(♦) – B = 10.0 см.



Рис. 9. Захист берега від розмиву на р. Лімниця

