

О. Є. ЩОДРО,
к.т.н., доцент,
Національний університет
водного господарства та природокористування
О. П. НАПРИМЕРОВА,
старший викладач,
Міжнародний економіко-гуманітарний університет
ім. академіка С. Дем'ячука

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ СИСТЕМ РЕГУЛЯЦІЙНИХ СПОРУД НА ПРЯМО- І КРИВОЛІНІЙНИХ ДІЛЯНКАХ ГІРСЬКИХ РІЧОК

Анотація

Розглядаються результати дослідження структури потоку на ділянках поворотів русел з врахуванням впливу наносних відкладень на кінематику потоку та гранулометричного складу донних відкладень. Дається опис алгоритму та програми для здійснення розрахунків деформації русла з врахуванням впливу регуляційних споруд на структуру течій. Здійснено аналіз реалізованої моделі, на основі якого відмічено співпадіння з даними експериментів з косо розташованими напівзагатами, які суттєво перебудовують структуру течії.

Annotation

The hydraulic investigation results are examined for the river-bend flow structure with consideration of sediment transport and ground non-homogeneity. The algorithm and program description is given for river-bed deformations calculation with assumption of regulation constructions influence. The analysis of the realized model was performed. It was concluded that the experiment with low submerged spurs data are of conformity with numerical results.

Актуальність роботи витікає з необхідності проведення широкомасштабних робіт в галузі регулювання передгірських ділянок річок. Зокрема, це стосується річок Карпатського регіону, а також покращення екологічного стану малих і середніх річок різних регіонів. Саме регулювання річок є найбільш дешевим і раціональним засобом впливу на природні гідроморфологічні процеси.

В роботах [1,2] описано звальні течії, пов'язані з натіканням потоку на перешкоду і поворотом його до берега. Саме на передгірських ділянках річок в місці звалу формується потік з високими уклонами, що викликається місцевим підпором перед перешкодою. Активність течії з точки зору її розмивної спроможності можна розглядати в усіх зонах ділянки повороту русла (як придонно-

му шарі, так і біля берегів).

Наукова новизна полягає у побудові чисельних моделей для обчислення характеристик потоку на прямолінійних і криволінійних ділянках річки з врахуванням впливу регуляційних споруд і їх тестування на основі даних лабораторних експериментів. В основу математичних моделей було покладено результати спеціальних досліджень руслового потоку біля напівзагат на крутих поворотах річкових русел (з відношенням радіуса повороту русла до його ширини $R/B < 2,5$).

Об'єктом дослідження є ділянки річок з розмивними берегами та берегозахисні споруди.

Предметом дослідження є математичні моделі кінематичної структури потоку біля берегів.

Попередньо було проведено лабораторні гідравлічні дослідження, методика яких та параметри дослідів описані у роботах [3-5]. Метою досліджень було створення рекомендацій до проектування берегозахисних споруд, призначених для захисту звальних берегів, які зазнають найістотнішої деформації в природних умовах. В задачі дослідження входило вивчення елементів кінематичної структури потоку біля берега, без встановлення напівзагат і при їх наявності, а також значення глибин місцевих розмивів біля берега та голів штучних споруд. Експерименти проводилися на жорсткій та розмивній моделях штучного прямолінійного та криволінійного русел, причому відносна кривина русла змінювалася в межах $R/B = 3 \dots 5$. Проводилися також модельні гідравлічні дослідження конкретних об'єктів регулювання.

На жорсткій моделі вивчалася поле актуальних та осереднених швидкостей біля дна, а на розмивній моделі - в кількісно-відносному розумінні вивчалася розмивна спроможність потоку для варіантів русла без споруд і напівзагат різних конструкцій та параметрів.

Загальний характер і глибина розмиву дна біля напівзагат з кутами β встановлення відносно берега характеризується фотографіями розмивних ділянок з вкладеними горизонталями.



Рис.1. Розмив біля берега річки з напівзагатою ($\alpha = 90^\circ$)

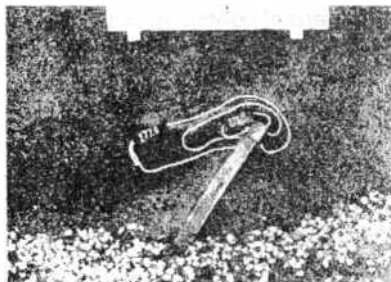


Рис.2. Розмив біля берега річки з напівзагатою ($\alpha = 45^\circ$)

Характерний приклад - переформування дна в районі одиночної напівзагати представлений на Рис. 1,2. У місці розмиву, біля верхового відкосу формується підковоподібний вихровий шнур, який сприяє виносу наносів з поглиблення вниз за течією. Простір між напівзагатами повністю заносився піском, винесеним потоком із зон вимиву, які лежать вище напівзагат.

Максимальні розмиви дна розміщуються безпосередньо біля голови напівзагат з невеликим зміщенням вниз по течії.

Вимірювання глибин у розмивних ділянках і середніх швидкостей потоку на вертикалі дали змогу визначити максимальну питому витрату води в місці максимального розмиву.

Математичне моделювання динаміки потоку на повороті здійснювалось на основі поетапного наближення. Спочатку будувалась наближена алгебраїчна модель розподілу осереднених швидкостей і глибин. При цьому використовувались теоретичні дослідження І.Л.Розовського та експериментальні дослідження Г.М. Замбахідзе. Зокрема, найбільш точні залежності були отримані для принципових параметрів, а саме траєкторій донних струмин на ділянці повороту русла в залежності від геометрії потоку і шорсткості дна.

Найоптимальнішою характеристикою для обчислення миттєвих швидкостей, за допомогою яких здійснювалась побудова відповідних траєкторій струмин, є кут між середнім напрямком донної струмини у фіксованій зоні повороту русла відносно дотичної до осі русла в місці перетину траєкторії цієї осі. Найкращими розрахунковими формулами для обчислення тангенса кута, згідно досліджень Розовського, вважаються формули Прус-Часинського для гідравлічно-гладкого русла

$$tg\varphi_0 = 17,4 \frac{\kappa}{r_0} Re^{-0,25} \text{ та для шорсткого } tg\varphi_0 = \frac{2gk}{C^{2\sigma}} \cdot \frac{B}{r_0},$$

κ , σ - змочений периметр, κ , σ - відповідні сталі.

І.Л. Розовський використовував у своїх розрахунках оптимально спрощену

формулу, а саме $tg\varphi_0 = (10 \dots 11) \frac{h}{r_0}$. Її було взято і для наших розрахунків інтен-

сивності циркуляції для умов виконаних нами лабораторних дослідів. Саме завдання кута відхилення донних струмин φ_0 і енергетичного параметра циркуляції дозволили контролювати правильність обчислення траєкторії руху часток.

На наступному етапі побудована модель зазнавала корекції на основі алгоритму розв'язування планової задачі гідравліки, яка враховувала неоднорідність геометричного окреслення твердих границь, їх гідравлічної шорсткості та граничних умов. Після цього застосовувався апарат рівнянь Рейнольдса, записаних в циліндричній системі координат для фрагмента повороту.

Застосовувались ідеї наближеного розв'язання задачі гідромеханіки із використанням методу розщеплення та стандартної моделі турбулентності.

На основі даних розрахунків побудовано наступну модель взаємодії потоку і окремих часток, що лежать на дні. Далі - модель перенесення придонних часток, тобто **опис руху наносів, який** розпочато з вивчення конкретно однієї частки - складової донних наносів. Аналітично її поведінка може бути досліджена в результаті завдання її руху в трьохвимірному просторі наступними рівняннями:

$$\begin{cases} \frac{d^2 x_p}{dt^2} = \rho_0 C_D \frac{(U - U_p)^2}{m + m_n} \cdot \text{sign}(U - U_p) \\ \frac{d^2 y_p}{dt^2} = \rho_0 C_D \frac{(V - V_p)^2}{m + m_n} \cdot \text{sign}(V - V_p) \\ \frac{d^2 z_p}{dt^2} = \rho_0 C_D \frac{(W - W_p)^2}{m + m_n} \cdot \text{sign}(W - W_p) \end{cases} \quad (1)$$

де C_D -коефіцієнт обтікання; U, V, W - швидкості по осях X, Y, Z (вони складаються з осереднених і пульсаційних компонент). Осереднені швидкості задавались на основі даних експерименту. При необхідності здійснювалась сплайнова апроксимація в 3D просторі експериментальних даних, заданих на грубій сітці. Значення кутів відхи-

лення придонних струмин також визначалось експериментально. Для практичних розрахунків рекомендується використовувати запропоновані вище залежності, причому перевагу слід віддати формулі Розовського, а також використовувати його ре-

Система (1) враховано дві маси - маса самої частки $m = \rho_1 \frac{4}{3} \pi R^3$, та при-

єднана маса $m_n = \rho_0 \frac{2}{3} \pi R^3$ рухомої ділянки рідини, де ρ_1 і ρ_0 відповідно гус-

тини самої частки і води Саму систему рівнянь рекомендується розв'язувати за наступною системою різницьових рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{X_{p_{n+1}} - 2X_{p_n} + X_{p_{n-1}}}{(\Delta t)^2} = \rho_0 C_D \frac{\left(U - \frac{X_{p_n} - X_{p_{n-1}}}{\Delta t}\right)^2}{m - m_n} \cdot \text{sign}\left(U - \frac{X_{p_n} - X_{p_{n-1}}}{\Delta t}\right) \\ \frac{Y_{p_{n+1}} - 2Y_{p_n} + Y_{p_{n-1}}}{(\Delta t)^2} = \rho_0 C_D \frac{\left(V - \frac{Y_{p_n} - Y_{p_{n-1}}}{\Delta t}\right)^2}{m - m_n} \cdot \text{sign}\left(V - \frac{Y_{p_n} - Y_{p_{n-1}}}{\Delta t}\right) \\ \frac{Z_{p_{n+1}} - 2Z_{p_n} + Z_{p_{n-1}}}{(\Delta t)^2} = \rho_0 C_D \frac{\left(W - \frac{Z_{p_n} - Z_{p_{n-1}}}{\Delta t}\right)^2}{m - m_n} \cdot \text{sign}\left(W - \frac{Z_{p_n} - Z_{p_{n-1}}}{\Delta t}\right) \end{cases}$$

Шляхом **імітаційного моделювання** будувалися контури наносних відкладень, які враховували особливості динаміки потоку та надходження транзитних наносів. При цьому автоматично генерувалися такі форми рельєфу дна, як крупні донні гряди на початковій ділянці русла. Відомо, що найбільш інтенсивне винесення наносів має місце при розвинутій гвинтоподібній течії, яка виникає в лійці розмиву за вищезгаданою донною грядою [1,7,9].

Таким чином, на основі досліджень розроблено методику розрахунку перетворювання русла та місцевих розмивів в незв'язному неоднорідному ґрунті біля берегів річок та руслових споруд [8-9]. При цьому враховується ряд наступних факторів:

- надходження транзитних наносів в лійку розмиву;
- формуванні відмостки та зміна складу ґрунту при його переробці потоком;
- зміна геометрії лійки та його кінематичних характеристик в процесі розмиву.

Розрахунки та результати експериментальних досліджень показують, що **типовою формою лійки розмиву** в плані є витягнута вздовж течії ложбина, яка звужується в цьому напрямі. Більша частина цієї ложбини розміщена нижче голови напівзагати. Найбільш круті відкоси формуються на початку ложбини і поступово вирівнюються до її кінця. Простір безпосередньо нижче напівзагати в усіх випадках заноситься наносами, винесеними із зони розмиву, в чому і проявляється основна захисна дія таких напівзагат.

Загальна циркуляція потоку на повороті криволінійного русла, як і місцева, викликана роботою косо розміщених до потоку затоплюваних напівзагат.

В дослідях чітко прослідковується збільшення інтенсивності загальної циркуляції в потоці із збільшенням кута повороту від 60° до 135° , яка також зростала при збільшенні глибини потоку і зменшенні радіуса заокруглення. Про це свідчить більш крутий поворот донних струмин до випуклого берега.

Цікавим є той факт, що, незважаючи на інтенсивну загальну циркуляцію, затоплювані напівзагати створюють місцеву циркуляцію з напрямом струменів, протилежних до напрямку струменів основної циркуляції. В результаті цього наноси, які попадають в циркуляційну течію, утворювану напівзагатами, спрямовують свій рух не до випуклого, а до ввігнутого берега, захищаючи його тим самим від розмиву. Прослідковується також сприятливий вплив напівзагат на поверхневі потоки, які при переливі через напівзагати відхиляються від увігнутого берега, що також сприяє його стійкості.

Характер розподілу швидкостей по перерізу русла відображає відому кінематичну картину протікання потоку на заокругленні, де швидкості дещо зростають біля випуклого берега на початку заокруглення. Далі швидкості вирівнюються по ширині всередині заокруглення і зростають біля ввігнутого берега на виході із нього. Аналогічно цьому будувались епюри середніх швидкостей, які

використовувались надалі у якості вихідних для визначення розрахункових значень питомих витрат біля голів окремих напівзагат.

Характерною є форма розмиву дна в плані, яка представляє собою витягнуту лійкоподібну вимоїну, в якій лінія дна з максимальними розмивами проходить біля голів напівзагат. Таким чином, окремих ізольованих лійок розмиву біля голів напівзагат не спостерігається. Навіть при максимальному розмиві дна в три із зайвим метри укіс захищованого ввігнутого берега не підмивається, а кореневі ділянки напівзагат заносяться наносами до самого гребеня напівзагати.

Залежність відносної глибини в зоні розмиву від кута повороту потоку і відносної висоти напівзагати біля останньої напівзагати системи свідчить, що максимальні розмиви тут мають місце при $\beta=90^\circ$. Вони зростають із збільшенням відносної висоти напівзагати.

Зміна рівня пульсації донних швидкостей у зонах розмиву за напівзагатами на криволінійній ділянці русла у порівнянні з рівнями пульсації в тих же місцях до установки напівзагат характеризується тим, що, як правило, ці відношення мало відрізняються від вихідного. Це дає змогу зробити висновок про можливості не враховувати при розрахунку розмиву дна біля напівзагат зміну розмивної здатності потоку, пов'язаної із зміною рівня пульсації швидкостей. Деяке збільшення рівня пульсації у зонах розмиву спостерігається при зростанні уклону дна.

Висновок. Проведені дослідження свідчать про позитивну роль низьких затоплюваних напівзагат як з точки зору русло регулюючих споруд, так і з точки зору екологічних споруд, які суттєво активізують масообмін у потоці. Споруди такого типу мало збурюють потік, м'яко впливають на нього, і тому розмиви біля їх голів мають невеликі глибини і планові розміри.

Література:

1. Щодро О.Є., Шинкарук Л.А., Корбутяк В.М., Шитов В.М. Катастрофічні розмиви, пов'язані зі звальними течіями, та їх зв'язок з геоморфологією. // Науково-технічний збірник НТУ Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. - Вип. 72. - К., 2004. - с. 186-193.
2. Щодро О.Є., Пацелюк В.Г., Фесун А.В. Дослідження звальних течій та транспортування наносів на гідравлічній моделі Вісник Рівненського державного технічного університету Збірник наукових статей. Рівне, - 2000, - Вип.2(4), - С. 99-703 3. Кириенко И.И., Щодро А.Е. и др. Проектирование низких затопливаемых полузапруд // Гидромелиорация и гидротехническое строительство. - Вип. 9. - Львов: Вища школа, 1981.
3. Кириенко И.И., Щодро А.Е. Структура потока у низких затопливаемых полузапруд // Гидравлика и гидротехника. Республ. межвед. науч.-техн. сборник. - Вип. 28. — К: Техника, 1979.

4. Щодро О. Є. Місцеві розмиви та кінематика потоку біля оголовків пізагат та мостових опор // Матеріали ювілейної конференції УДАВЕ, присвяченій 75-річчю академіїРівне, 1997

5. И.И.Кириенко, В.Д. Шуминский, Л.А. Шинкарук. Рекомендации по проектированию затопливаемых полупрудов на реках Карпат - Ровно: Минводхоз УССР, УИИВХ, 1986

6. Розовский И.Л. Движение воды на повороте открытого русла. АН Украинской ССР, Институт гидрологии и гидротехники., К.-1957, 190 С.

7. Щодро О.Є., Шинкарук Л.А., Напимерова О.П. Методи розрахунків регуляційних споруд на передгірських ділянках річок //Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. Міжвідомчий науково-технічний збірник. - Вип. 73. - К.: УТУ, 2006 - с. 354-357

8. Методика розрахунку розмивів дна та берегів передгірських ділянок річок та місцевих розмивів біля річкових гідротехнічних споруд. МРР 218-02070915-231-2003. Державна служба автомобільних доріг України (УКРавтодор) Національний транспортний університет України.

9. ShchodroA.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, 2007, Moscow, Russia, V. 3, p. 275-284

10. Бухин М.Н., Кириенко И.И., Щодро А.Е. Экспериментальные исследования полупруды сквозной конструкции//Мелиорация и водное хозяйство. - Вип. 69 - К.: Урожай, 1988. - С. 63-69.