

УДК 532.5:519.63

**Ходневич Я.В., старший викладач** (Міжнародний економіко-гуманітарний університет ім. акад. Степана Дем'янчука, м. Рівне)

### **ЗАДАЧА ОБЧИСЛЕННЯ РІВНІВ ВІЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ У РУСЛІ. ПРОБЛЕМА ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ШОРСТКОСТІ**

**Запропоновано підхід до моделювання місцевих розмивів русел. Розглянуто задачу розрахунку кривої вільної поверхні та її програмна реалізація. Розглянуто проблему визначення коефіцієнта шорсткості дна русла. Описано алгоритм наближеного обчислення коефіцієнта шорсткості.**

**The approach to the design of the local washings away of river-beds is offered. The task of calculation of crooked free-form is considered and its program realization. The problem of determination of coefficient of roughness of bottom of river-bed is considered. The algorithm of close calculation of coefficient of roughness is described.**

Численні факти катастрофічних розмивів берегів і руйнувань при паводках об'єктів народного господарства, що розташовані на берегах гірських і передгірних рік Українських Карпат, труднощі прогнозу гідродинамічної структури потоків гірських рік спонукають до розробки ефективних на практиці методів чисельних розрахунків таких потоків. Тому метою наукової роботи є розробка загального алгоритму та комплексу програмного забезпечення, що здійснює обчислення місцевих розмивів річкових русел.

Для розрахунку місцевих розмивів русел пропонується наступний підхід:

1. Вивчення необхідної інформації по досліджуваній ділянці річки:
  - гідрометеорологічний прогноз;
  - дані по топографії (геоморфології) русла, витрати води, що відповідають прогнозу або заданій забезпеченості;
  - дані про інженерні об'єкти, що прилягають до русла, координати початку та кінця об'єкта і ін.
2. Обчислення рівнів вільної поверхні.
3. Виділення небезпечних ділянок русла.
4. Розрахунок плану течій на небезпечних ділянках. Визначення глибин та середніх швидкостей на даних ділянках.
5. Оцінка витрати наносів загального розмиву в руслі.
6. Прогноз параметрів гряд при відкладенні наносів.
7. Розрахунок трьохвимірної течії за грядами в зонах навалу потоку на берег.

В цій статті розглянемо розв'язання однієї з вказаних вище задач, а саме

### Задача обчислення рівнів вільної поверхні в рамках одновимірної задачі гідравліки

Середні відмітки поверхні в руслі  $Z$  на кожному розрахунковому кроці  $k$  визначаються шляхом розв'язування рівняння нерівномірного плавно змінно-го усталеного руху водного потоку в непрямокутному руслі (1):

$$\Delta z_k = \frac{Q^2}{\Omega_k^2 C_k^2 H_k} \Delta l_k + \frac{Q^2}{2g} \left( \frac{1}{\Omega_{k+1}^2} - \frac{1}{\Omega_k^2} \right), \quad (1)$$

де  $Q$  – витрата потоку,  $\Omega_k$  – площа живого перерізу,  $H_k$  – середня по перерізу русла глибина,  $C_k = \frac{1}{n} R_k^{1/6}$  – коефіцієнт Шезі,  $n$  – коефіцієнт шорсткості,  $R_k$  – гідравлічний радіус,  $\Delta l_k$  – відстань між сусідніми топостворами,  $g$  – прискорення вільного падіння.

Розрахунок поздовжніх профілів вільної поверхні потоку у природних руслах здійснюється методом Ейлера з врахуванням сил інерції та гідравлічного опору. Вихідними даними є значення: витрати води, висотних позначок дна, ширин русла по його довжині. Початкова глибина задається точно, а кінцева – з точністю  $\pm 10\%$ . Коефіцієнт опору підбирається з великою точністю, що дає змогу задовільнити реальні виміри глибин в кінцевому перерізі русла.

Алгоритм розрахунку кривої вільної поверхні передбачає виконання таких операцій:

1. Визначення повздовжніх координат розрахункового створу:

$$L_k = \sum_{k=0}^k \Delta l_k = L_{k-1} + \Delta l_k .$$

2. Визначення ширини русла по дну:  $b_k = b_{k-1} + \frac{b_{кін} + b_{ноч}}{k_{кін} - k_{ноч}} \times (k_{кін} - k_{ноч})$ .

В даному випадку  $b_{ноч}$  та  $b_{кін}$  – це значення ширини русла по дну, які вводяться користувачем на попередньому та даному створах топографічної зйомки (СТЗ);  $k_{ноч}$  та  $k_{кін}$  – це відповідно порядкові номери створів, на яких розміщені СТЗ.

3. Визначення ширини русла по поверхні:  $B_k = b_k + 2mH_k$ .

Тут  $m$ -коефіцієнт закладання укосів каналу. Оскільки в даному випадку ро-

зглядається прямокутне (непризматичне) русло, то  $m = 0$ . Тобто ширина по дну русла рівна ширині по поверхні.

4. Визначення площі живого перерізу:  $\Omega_k = \frac{(b_k + B_k)}{2} H_k$ .

5. Визначення швидкість потоку:  $V_k = \frac{Q}{\Omega_k}$ .

6. Змочений периметр:  $\chi_k = b_k + 2\sqrt{H_k^2 + mH_k^2}$ .

7. Гідравлічний радіус визначається слідующим чином:  $R_k = \frac{\Omega_k}{\chi_k}$ .

8. Визначення коефіцієнта Шезі:  $C_k = \frac{1}{n} R_k^{1/6}$ .

9. Визначення позначки дна:  $\nabla_{\text{днк}} = \nabla_{\text{днк-1}} - J(L_k - L_{k-1})$ , де  $J$  – усереднений нахил русла.

10. Нахил інерції:  $J_{\text{ін-к}} = \frac{V_k}{g} \left( \frac{\partial V}{\partial L} \right)_k$ .

11. Визначення нахилу тертя русла:  $J_{T-k} = \frac{V^2}{C_k^2 R_k}$ ;

12. Сумарний нахил:  $J_{s-k} = J_{T-k} + J_{\text{ін-к}}$ .

13. Визначення перепадів вільної поверхні:  $\Delta Z_k = J_{s-k} \Delta L$ ;

14. Горизонти води в руслі відносно початково заданої поверхні:

$$Z_{-1} = Z'_{-1}; Z_0 = Z_{-1} - \Delta Z_0;$$

$$Z_k = Z_{k-1} + \Delta Z_k.$$

15. Визначення глибин русла:  $H_k = Z_k - \nabla_{\text{днк}}$ .

Запропонований алгоритм реалізовано в програмному забезпеченні „Розрахунок кривої вільної поверхні з врахуванням сил тертя та інерції” (рис. 1).

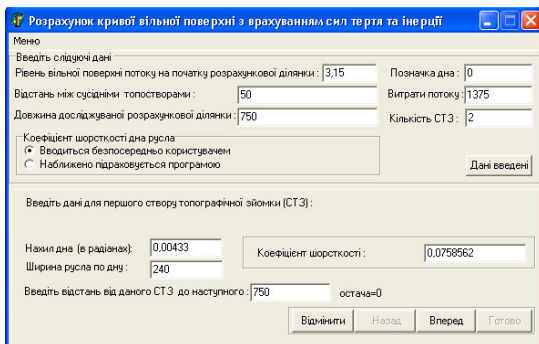


Рис. 1. Програма обчислення рівнів вільної поверхні

Вказане програмне забезпечення здійснює обчислення кривої вільної поверхні потоку з врахуванням сил інерції та гідравлічного опору в непризматичному руслі, як пропонується в роботі [2], та, крім того, при необхідності дозволяє здійснювати обчислення коефіцієнта шорсткості.

Програма вимагає введення загальних початкових даних:

- рівень вільної поверхні на початку розрахункової ділянки;
- довжина загальної розрахункової ділянки;
- розрахунковий крок (відстань між топостворами);
- початкова позначка дна;
- витрата води;
- кількість створів топографічної зйомки (неменше двох).

Для досягнення більшої точності в обчисленні значень вільної поверхні на заданій ділянці русла, в програмі реалізований механізм, який розрахункову ділянку розбиває на декілька підділянок. На границях цих підділянок (які називають створами топографічної зйомки (СТЗ)) користувачем вводяться відповідні параметри русла (визначені в реальних умовах): нахил дна, ширина русла по дну, коефіцієнт шорсткості. Для кожної з виділених ділянок, відповідно до введених параметрів, розраховує значення кривої вільної поверхні потоку.

Так, наприклад, якщо користувач на всій розрахунковій ділянці хоче мати три створи топографічної зйомки, то, очевидно, значення кривої вільної поверхні потоку будуть розраховуватись на двох підділянках (між першим та другим СТЗ, і між другим та третім СТЗ).

Результати розрахунку кривої вільної поверхні автоматично виводяться на графік або в таблицю (за вибором користувача), що дає змогу проаналізувати відповідність математичних розрахунків реальній фізичній картині. Наприклад, обчислена крива вільної поверхні для випадку, що зображений на рис. 1, виведена у вигляді графіка (рис. 2):

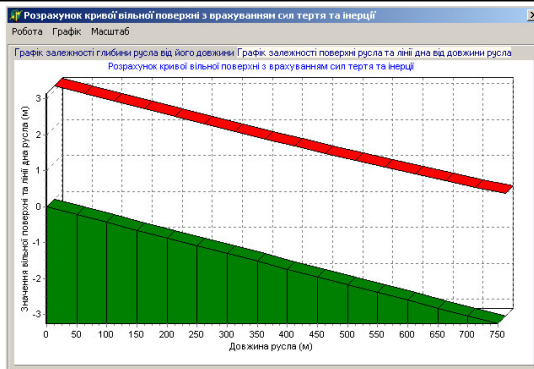


Рис. 2. Графік кривої вільної поверхні у руслі

### Проблема визначення коефіцієнта шорсткості

При розв'язанні задачі обчислення рівнів вільної поверхні виникла **проблема підбору коефіцієнта шорсткості** (опору), який би відповідав реальним вимірам глибин русла, враховуючи не тільки фізичний гідравлічний опір (рослинності в руслі, гряди, розширення та звуження потоку, зміни дна і ін.), а також комп'ютерну в'язкість.

Для обчислення коефіцієнта шорсткості розроблений наступний підхід:

- 1) коефіцієнт шорсткості буде підбиратись на інтервалі  $[N_{\min}, N_{\max}]$ , який вводиться користувачем (наприклад, для умов гірських річок коефіцієнт шорсткості знаходиться в межах 0.04 - 0.09);
- 2) шуканим є те значення коефіцієнта шорсткості  $n$  з цього інтервалу, яке наближено відповідатиме початковій глибині  $h_0$ ;
- 3) початкова глибина  $h_0$  знаходиться як різниця між початковим рівнем вільної поверхні ( $Z_0$ ) та початковою позначкою дна ( $\nabla_{\text{дна}}$ ).

Алгоритм визначення коефіцієнта шорсткості пропонується у вигляді схеми на рис. 3.

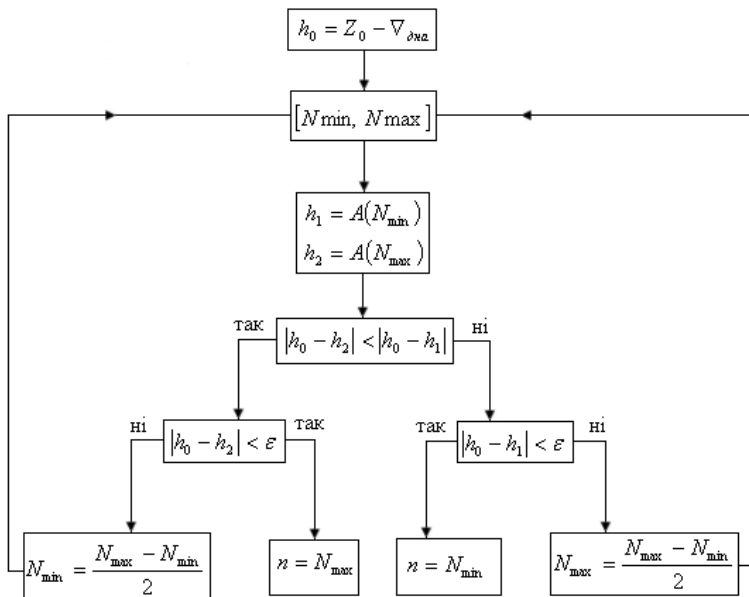


Рис. 3. Алгоритм обчислення коефіцієнта шорсткості

Алгоритм обчислення коефіцієнта шорсткості працює наступним чином.

Нам відомо інтервал значень коефіцієнта шорсткості  $[N_{\min}, N_{\max}]$  на досліджуваній ділянці русла та початкову глибину  $h_0$ . Інтервал  $[N_{\min}, N_{\max}]$  ділиться пополам. В крайніх точках інтервалу знаходимо значення глибин  $h_{N_{\min}}$  і  $h_{N_{\max}}$ , тобто  $h_{N_{\min}} = h_1 = A(N_{\min})$ ,  $h_{N_{\max}} = h_2 = A(N_{\max})$ , де  $A(n)$  – це функція обчислення значення глибини  $h$  для відповідного коефіцієнта шорсткості  $n$  за алгоритмом, який описаний вище (алгоритм розрахунку кривої вільної поверхні).

Якщо  $h_{N_{\max}}$  менше відрізняється від  $h_0$ , ніж  $h_{N_{\min}}$  (тобто виконується умова:  $|h_0 - h_2| < |h_0 - h_1|$ ), то вибирається для подальшої роботи другий інтервал. В протилежному випадку – перший інтервал. Вибраний інтервал знову ділиться пополам (інший – відкидається), в його крайніх точках знаходяться значення глибин. Знову вибирається той інтервал з двох, в крайніх точках якого значення глибин менше відрізняються від початкової глибини  $h_0$  і т.д. Цей процес продовжується доти, доки обчислене значення  $h$  не

наблизиться до  $h_0$ , тобто буде виконуватись нерівність:  $|h_0 - h| < \varepsilon$ , де  $\varepsilon$  – константа, яка дорівнює 0,001. Значення коефіцієнта шорсткості  $n$ , яке відповідатиме такому  $h$  і буде результуючим.

Алгоритм обчислення коефіцієнта шорсткості успішно реалізовано в програмі „Розрахунок кривої вільної поверхні з врахуванням сил тертя та інерції” (рис. 4, 5). На рис. 4 бачимо, що для розрахунку кривої вільної поверхні введені всі необхідні дані, але при цьому також наближено буде обчислюватись коефіцієнт шорсткості дна русла на інтервалі значень [0.05, 0.09]. На рис. 5 бачимо обчислене значення коефіцієнта шорсткості  $n$  дорівнює 0.0759375 для випадку, який розглянуто на попередньому рисунку.

The screenshot shows a software window titled "Розрахунок кривої вільної поверхні з врахуванням сил тертя та інерції". The interface is divided into several sections:

- Введіть наступні дані:** This section contains input fields for:
  - Рівень вільної поверхні потоку на початку розрахункової ділянки: 3,15
  - Позначка дна: 0
  - Відстань між сусідніми топостворами: 50
  - Витрати потоку: 1375
  - Довжина досліджуваної розрахункової ділянки: 750
  - Кількість СТЗ: 2
- Коефіцієнт шорсткості дна русла:** This section has two radio buttons:
  - Вводиться безпосередньо користувачем
  - Наближено підраховується програмою
- Введіть дані для першого створу топографічної зйомки (СТЗ):** This section contains:
  - Нахил дна (в радіанах): 0,00433
  - Мінімально можливий коеф. шорсткості: 0,05
  - Ширина русла по дну: 240
  - Максимально можливий коеф. шорсткості: 0,09
- Введіть відстань від даного СТЗ до наступного:** 750, with "остача=0" next to it.

At the bottom, there are four buttons: "Відмінити", "Назад", "Вперед", and "Готово".

Рис. 4. Розв'язання основної задачі та наближене обчислення коефіцієнта шорсткості

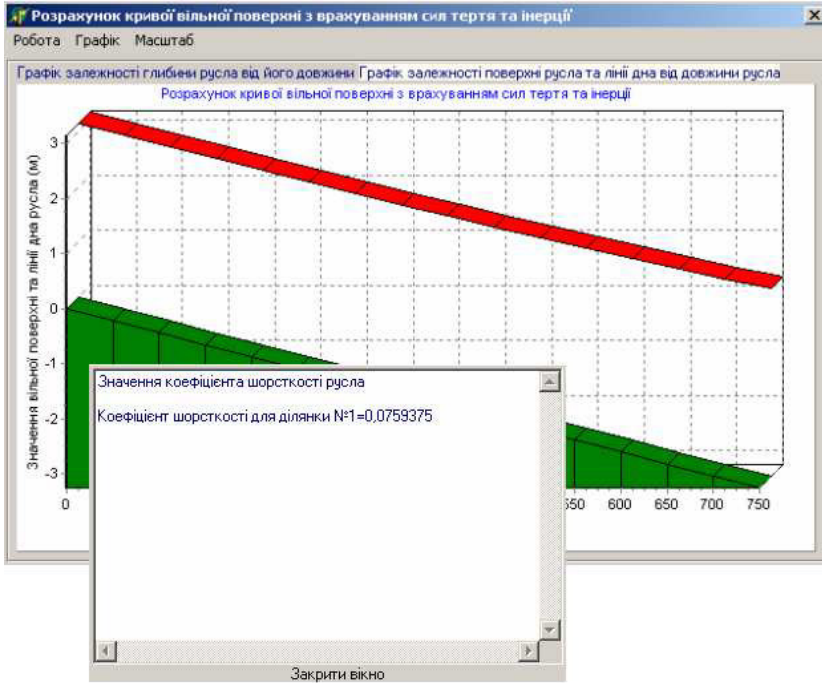


Рис. 5. Обчислене значення коефіцієнта шорсткості та крива вільної поверхні

Розрахунок вільної поверхні потоку в рамках одновимірної задачі гідравліки є важливою складовою комплексу задач спрямованих до моделювання місцевого та загального розмиву русел. З врахуванням даних гідравлічних розрахунків одновимірної задачі і плану течій можна оцінити величину середніх швидкостей саме в зоні звальних течій та небезпечних деформацій. Знайдені швидкості дозволяють оцінити інтенсивність вимиву ґрунту, а також поглиблення і розширення зони розмиву в часі.

1. Науменко І.І. Гідравліка. Підручник для ВНЗ. – Рівне: РДТУ, 2001 – 361 с.
2. Щодро О.Є. Комплекс програм до розрахунків місцевого розмиву // Вісник НУВГП: збірник наукових праць. – Вип. 3 (47). Частина 1. – Рівне: НУВГП, 2009. – С. 588-599.

Рецензент: д.т.н., професор Хлапук М.М. (НУВГП)