

УДК 502.58:556.166: 57:681.3

**ПРО ОДИН ПІДХІД ДО ПРОГНОЗУВАННЯ  
МІСЦЕВИХ РОЗМИВІВ РУСЕЛ ТА БЕРЕГІВ  
НА ПЕРЕДГІРНИХ ДІЛЯНКАХ РІК  
З ВИКОРИСТАННЯМ МОЖЛИВОСТЕЙ  
МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

*Д. В. Стефанишин, д-р техн. наук  
(Інститут телекомунікацій та глобального  
інформаційного простору НАН України, м. Київ);*

*Я. В. Ходневич  
(Міжнародний економіко-гуманітарний університет  
ім. С. Дем'янчука, м. Рівне);*

*О. Є. Щодро, канд. техн. наук  
(Національний університет водного господарства  
та природокористування, м. Рівне)*

*Розглядається задача прогнозування місцевих розмивів русел та берегів на передгірних ділянках рік з використанням можливостей математичного моделювання.*

*Рассматривается задача прогнозирования местных размывов русел и берегов на предгорных участках рек с использованием возможностей математического моделирования.*

*The problem of forecasting of local erosion of riverbeds and banks of Submountain Rivers with using of possibilities of mathematical modeling is considered.*

Як показують дані натурних спостережень та лабораторних досліджень [1—4], під час спаду паводків на передгірних ділянках рік у великій кількості починають виникати донні гряди наносів, острови й мілини. Гряди наносів переміщуються при паводках вниз за течією ріки і, зазвичай, уповільнюються в своєму русі перед поворотами русел, й розміщуються при цьому під різними

кутами відносно потоку. Стиснення русла грядами наносів призводить до збільшення швидкостей потоку на локальних ділянках ріки, а розміщення донних гряд під гострим кутом до берега породжує гвинтоподібні течії за грядами й переміщення наносів у напрямку від берега. Особливо актуальними для інтенсифікації місцевих розмивів є косо розташовані до берегів донні гряди, що мають висоту від 1/4 до 1/3 від глибини потоку. Саме за такими утвореннями розвиваються найбільш інтенсивні гвинтоподібні течії, посилена турбулентність потоку в яких при проходженні нового паводку призводить до інтенсифікації переміщення наносів від берега і локальних розмивів русла та берегів ріки.

Численні приклади руйнації мостових та інших транспортних переходів, об'єктів народного господарства, будівель тощо в результаті катастрофічних розмивів русел та берегів при проходженні паводків на річках в передгірних районах Українських Карпат визначають актуальність проблеми прогнозування місцевих (локальних) руслових деформацій, приурочених до розміщення в руслах рік різного роду перешкод. На разі відсутні ефективні методики складання таких прогнозів, зокрема з врахуванням деформацій за русловими новоутвореннями, що виникають при попередніх паводках.

**Залежність напрямку переміщення наносів** гвинтоподібними течіями від кута розташування та висоти перешкоди в руслі давно використовується на практиці для закріплення берегів рік в Українських Карпатах шляхом облаштування напівзагат, що розміщуються під гострим кутом до потоку, що набігає (рис. 1). При такому розташуванні напівзагати в руслі гвинтоподібна течія за нею має напрям до берега. В результаті наноси активно транспортуються до берега, забезпечуючи його захист й закріплення від розмивів.

На відміну від штучно виконаних напівзагат, з фіксованим розміщенням в руслі ріки, природні гряди постійно переміщуються, змінюється не тільки їх місце розташування, а й висота, кут до потоку, що набігає, склад наносів тощо. При цьому у випадку природних гряд зазвичай косо їх розташування відносно берега не сприяє його закріпленню, оскільки за такими грядами виникають гвинтоподібні течії, направлені від берега (рис. 2, 3).

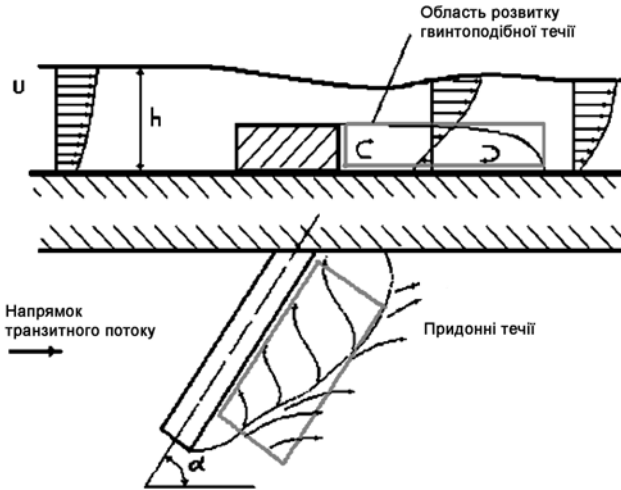


Рис. 1. Гідродинамічна картина потоку за напіввагатою, розміщеною під гострим кутом до потоку, що набігає.

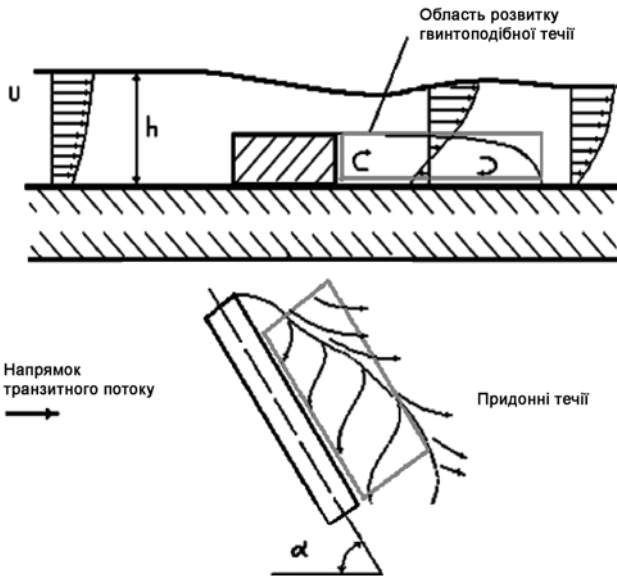


Рис. 2. Гідродинамічна картина потоку за грядою наносів, розміщеною під гострим кутом до берега.

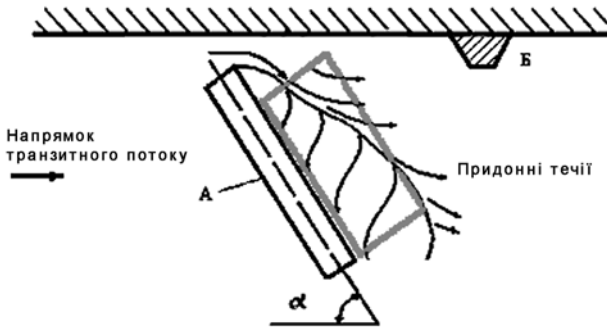


Рис. 3. Гідродинамічна картина потоку за грядою наносів з додатковою перешкодою.

Коли ж потік (рис. 3) безпосередньо за грядою (А), розміщеною під гострим кутом до берега, зустрічає ще одну перешкоду (Б) (наприклад, випадкову перешкоду, опору мосту тощо), яка має більшу висоту, ніж гряда, то швидкості та витрати гвинтоподібної течії у напрямку від берега зростають ще більше (в 1,5—1,75 разів в порівнянні зі швидкістю потоку, що набігає на гряду). Масообмін в потоці за грядою при цьому ще більше інтенсифікується [5, 6] й місцеві розмиви, як наслідок, ще більше зростають.

**Гвинтоподібні течії**, що виникають за перешкодами в руслах рік, мають надзвичайно складну гідродинамічну структуру. Тому розрахунки таких течій, в тому разі і з врахуванням транспорту наносів, можуть бути виконані лише чисельними методами [1—4], в рамках чисельного моделювання. Проведення експериментальних досліджень в цьому випадку з метою вирішення практичних задач зазвичай потребує значних матеріальних та фінансових затрат. Однак і чисельне моделювання, оскільки воно проводиться для турбулентних течій в тривимірних областях, також може суттєво ускладнюватися.

Слід зазначити, що в багатьох випадках застосування «тонкого» математичного апарату при вирішенні практичних задач може лише посилювати «розрив» між математичною моделлю й реальністю [7], вимагати застосування потужної обчислювальної техніки чи значних затрат машинного часу.

Нижче пропонується методика проведення чисельних розрахунків основних характеристик звального турбулентного потоку у відривних зонах для локальної трьохвимірної області у формі паралелепіпеда (рис. 1—3). В якості робочої гіпотези умов для формування місцевих розмивів берегів біля різного роду перешкод в руслі приймається гіпотеза, згідно з якою найбільш інтенсивні й глибокі розмиви спричиняються гвинтоподібними течіями біля підніжжя донних гряд [1]. Нагадаємо, що такі течії мають високий рівень турбулентності й високі здатності розмиву й транспорту наносів.

Розглядається стаціонарна задача, що описується системою квазілінійних параболічних рівнянь Нав'є-Стокса:

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = X_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} - \overline{\frac{\partial u_i u_j'}{\partial x_j}}, \quad (1)$$

де  $u_i$  — компоненти вектора швидкості;  $x_i$  — координати точки;  $X_i$  — компоненти вектора масової сили;  $\rho$  — щільність рідини;  $p$  — гідродинамічний тиск;  $\overline{u_i u_j'}$  — момент кореляції пульсацій швидкостей;  $i$  — номер рівняння,  $i = \overline{1,3}$ ,  $j$  — номер члена в рівнянні  $j = \overline{1,3}$ .

Початкове наближення розподілу швидкостей й тисків потоку в'язкої нестислої рідини в розрахунковій області може задаватися на основі експериментальних даних [1—3], або гідравлічним розрахунком кривої вільної поверхні в руслі, середніх глибин й швидкостей для одновимірної задачі. Далі поле швидкостей уточнюється шляхом розрахунків плану течій на характерних ділянках. Після цього, в залежності від встановлених параметрів донної гряди, виконується розрахунок в тривимірній області турбулентного потоку за грядою. Задача вирішується поетапно [4, 8]:

1) знаходиться наближений чисельний розв'язок з встановленням поля осереднених швидкостей потоку для розрідженої рівномірної сітки з використанням неявної різницевої схеми для стаціонарної задачі, що описується системою (1);

2) здійснюється перевірка інтегральної умови нерозривності потоку:

$$\iint_{(S_i)} U(y, z) dydz - \iint_{(S_{i-1})} U(y, z) dydz \Big|_{(S_0)} \varepsilon \iint_{(S_0)} U(y, z) dydz, \quad (2)$$

де  $U(y, z)$  — поле швидкостей в поперечному перерізі  $S_i$  розрахункової області;  $\varepsilon$  — константа,  $\varepsilon = 0,0001$ ;

3) сітка згущається й виконується сплайнова апроксимація отриманих результатів;

4) здійснюється перерахунок поля осереднених швидкостей й параметрів турбулентності з використанням відомої  $k - \varepsilon$  моделі:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = v_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_D \frac{k^{3/2}}{L} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v_t}{\delta_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \right),$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{v_t}{\delta_\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \left( C_{1\varepsilon} \frac{p}{\varepsilon} - C_{2\varepsilon} \right) \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (3)$$

де  $k$  — енергія турбулентності;  $\varepsilon$  — швидкість дисипації енергії турбулентності;  $t$  — час;  $\bar{u}_i$  — компоненти вектора осередненої швидкості;  $v_t$  — коефіцієнт турбулентної в'язкості;  $L$  — довжина шляху перемішування;  $p$  — гідродинамічний тиск;  $C_D$ ,  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$ ,  $\delta_k$ ,  $\delta_\varepsilon$  — модельні константи;  $i$  — номер рівняння,  $i = \overline{1, 3}$ ;  $j$  — номер члена в рівнянні  $i = \overline{1, 3}$ .

5) здійснюється корегування полів тисків, швидкостей і турбулентних характеристик потоку.

Такий підхід дозволяє суттєво скоротити час для проведення чисельних розрахунків для вирішення складної гідродинамічної задачі, отже з'являється можливість проводити моделювання з використанням мобільної обчислювальної техніки (ноутбука).

Серед переваг підходу слід також відзначити можливість проведення імітаційного моделювання в залежності від величини та забезпеченості майбутнього паводку, варіації параметрів й кута розміщення гряди відносно напрямку транзитного потоку.

Для апробації методики й верифікації чисельної схеми проводились ретроспективні розрахунки руслових деформацій на модельній ділянці русла р. Стрий біля села Луги Стрийського району Львівської області на відстані 28 км від місця впадіння ріки в р. Дністер. На цій ділянці русло має середній нахил 0,0022, складено гравійними й гальковими ґрунтами з середнім діаметром 4,85 см, коефіцієнт шорсткості русла — 0,038 [9]. Розрахунки велися за даними, що мали місце перед травневим паводком 1991 року при витратах води різної забезпеченості (табл. 1), яка встановлювалася за кривою трьох параметричного гама-розподілу Крицького-Менкеля при коефіцієнті асиметрії  $C_s = 2C_v$  й коефіцієнті варіації  $C_v = 0,83$ .

Розрахункові значення глибин розмиву й планових переміщень бровки русла при різних витратах й глибинах потоку для модельної ділянки за грядюю наносів наведені в табл. 1.

**Таблиця 1 – Гідрологічні та розрахункові морфологічні характеристики р. Стрий на модельній ділянці русла за грядюю наносів біля села Луги**

Забезпеченості, %	1	3	5	10	20	30	50
Витрати води, м <sup>3</sup> /с (для створу Луги — Хомовичі)	2625	2066	1793	1425	1057	832	538
Глибини потоку, м	4,83	4,29	3,98	3,62	3,15	2,8	2,62
Глибини розмиву біля берега, м	3,2÷3,3	2,9÷3,2	2,5÷2,8	2,5÷2,7	2,4÷2,5	2,2÷2,4	2,0÷2,3
Зміщення берегової лінії, м	4,2÷4,8	4,0÷4,5	3,7÷3,9	3,5÷3,7	2,9÷3,2	2,7÷3,0	2,4÷2,9

Отримані розрахункові значення порівнювалися з натурними даними, згідно з якими було встановлено зміщення правого берега на вибраній ділянці при проходженні травневого паводку 1991 року на 3 м. Максимальні місцеві розмиви русла за грядюю наносів склали 3,2–3,5 м. Цей паводок характеризувався витратою води 1250 м<sup>3</sup>/с (10–15% забезпеченості). Можна зауважити, що зміщення берегової лінії та глибини розмивів русла в натурі в цілому відповідають розрахунковим значенням.

**Розроблена авторами методика** чисельних розрахунків турбулентних потоків у відривних зонах за місцевими перешкодами

може використовуватися при прогнозуванні місцевих руслових деформацій у руслах передгірних рік з урахуванням натурних даних про розташування й геометрію різних перешкод, зокрема донних гряд наносів в руслі, що сформувалися попередніми паводками. При цьому дорогі експериментальні дослідження можуть бути замінені математичним, імітаційним моделюванням.

\* \* \*

1. Щодро А. Е. Физические основы расчетов местного размыва возле речных гидротехнических сооружений / А. Е. Щодро // Гидравлика и гидротехника. — К.: Техніка, 1997. — Вып. 59.

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

3. Shchodro A. E. Local Scour Investigation on Steep River Bends in Ukrainian Carpathian /A. E. Shchodro // 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.

4. Щодро О. Є. Розрахунки трьохвимірних турбулентних течій у відривних зонах за регулюючими спорудами / О. Є. Щодро, Я. В. Ходневич // Зб. наукових праць «Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво». — Вип. 4(40). — Рівне: НУВГП, 2007. — С. 213—218.

5. Щодро О. Є. Покращення екологічного стану малих річок за допомогою затоплюваних бун / О. Є. Щодро, М. М. Мокляк, Я. В. Ходневич // Зб. наукових праць «Вісник Національного університету водного господарства та природокористування». — Вип. 1 (37). — Рівне: НУВГП, 2009. — С. 133—142.

6. Щодро О. Є. Дослідження динаміки потоку зі змінною масою за донними уступами та річковими грядами / О. Є. Щодро, Я. В. Ходневич, М. М. Мокляк // Зб. наукових праць «Вісник Національного університету водного господарства та природокористування». — Вип. 1(45). — Рівне: НУВГП, 2009. — С. 74—82.

7. Стефанишин Д. В. Вибрані задачі оцінки ризику та прийняття рішень за умов стохастичної невизначеності / Д. В. Стефанишин. — К.: Азимут-Україна, 2009. — 104 с.



8. Ходневич Я. В. Математичне моделювання просторових течій з врахуванням інтегральної умови нерозривності / Я.В. Ходневич // Зб. наукових праць «Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво». — Вип. 31. — Рівне, НУВГП, 2007. — С. 287—292.

9. Кафтан О. Н. Залишковий вплив закритих кар'єрів на хід руслових деформацій / О. Н. Кафтан, М. В. Корбутяк // Автомобільні дороги та дорожнє будівництво: Міжвідом. науково-технічний збірник. — К.: НТУ, 2001. — Вип. 63. — С. 170—172.

***Отримано: 15.03.2011 р.***