

УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ ДЕФОРМАЦІЙ НА ЗАПЛАВАХ В ЗОНІ ВПЛИВУ МОСТОВОГО ПЕРЕХОДУ

Славінська О. С.,

д-р техн. наук, професор, Національний транспортний університет,
Кафедра транспортного будівництва та управління майном, Україна, м. Київ,
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-9709-0078>

Цинка А. О.,

Державне підприємство «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М. П. Шульгіна» Україна, м. Київ, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-0357-2325>

DOI: https://doi.org/10.31435/rsglobal_wos/31052020/7089

ARTICLE INFO

Received: 24 March 2020

Accepted: 14 May 2020

Published: 31 May 2020

KEYWORDS

bridge influence zone,
bridge transition,
vegetation on the floodplains,
deformations on the floodplains.

ABSTRACT

Deformations from high flooding can reach critical proportions, resulting in bridge failures. Accordingly, an improved method for calculating erosion in floodplains in the area affected by the bridge transition has been presented. The mathematical model for the floodplain dependent flow is obtained, based on the assumption of the small particles, the low acceleration of the flow relative to the acceleration of gravity, the general equation for the transport of the heterogeneous flow, and the nonsymmetry equation. The model form of the equations takes into account the constituent forces of resistance of vegetation in the flow and resistance of removal of soil grains during the process of erosion, and initial and boundary conditions for their realization are formed. A sequence for calculating the hydrodynamic characteristics of the flood flux in the area of the bridge transition influence is provided for determining the deformation values on the flood plains. The results of the calculation of the erosion in the underside floodplains of the plain river are presented.

Citation: Slavinska O. S., Tsynka A. O. (2020) Advanced Method of Calculation of Deformations on Floats in the Zone of Influence of the Bridge Crossing. *International Academy Journal Web of Scholar*. 5(47). doi: 10.31435/rsglobal_wos/31052020/7089

Copyright: © 2020 Slavinska O. S., Tsynka A. O. This is an open-access article distributed under the terms of the **Creative Commons Attribution License (CC BY)**. The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) or licensor are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.

Вступ. Мостовий перехід виконує подвійну функцію транспортної та гідротехнічної споруди, яка повинна забезпечувати не тільки безперервний та безпечний пропуск транспортних засобів, а також розрахункові витрати води і наносів, стійкість до динамічної дії потоку та перебігу руслових і заплавних деформацій. Ці деформації від впливу високих повеней можуть сягати таких розмірів, які призводять до аварій на мостах, що є підтвердженням актуальності представлених досліджень.

В роботі [1] представлено результати експериментальних досліджень транспорту наносів в лабораторному руслі, наведені порівняння з розрахунками на основі теоретичних моделей переносу річкового потоку. В роботі не представлені дослідження в зонах штучного стиснення відкритих русел, процеси що в них відбуваються суттєво відрізняються від стану природних потоків. Результати натурних досліджень розмивних процесів в підмостових руслах представлено в роботі [2]. Для уникнення аварійного стану мосту запропоновано способи укріплення та захисту мостових опор. Але в роботі не запропоновано методи прогнозування деформацій в зоні впливу мостового переходу, особливо на заплавних ділянках.

Метою даної роботи є розробка удосконаленого методу розрахунку розмивів на заплавах ділянках в зоні впливу мостового переходу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- розробити математичну модель для зависенесного заплавного потоку з трав'яною рослинністю та сформулювати початкові і межові умови для її реалізації;
- розробити та удосконалити метод розрахунку деформацій на заплавах ділянках в зоні впливу мостового переходу;
- провести розрахунок розмивів на заплавах ділянках річки в зоні впливу мостового переходу за запропонованим методом розрахунку.

Математична модель для зависенесного заплавного потоку з трав'яною рослинністю в комплексі з початковими та межовими умовами. Запропонований метод розрахунку розмивів на заплавах в зоні впливу мостових переходів дозволяє визначити рівні вільної поверхні потоку на різних етапах проходження розрахункового паводка, відповідний розподіл глибин і швидкостей на заплавах ділянках з можливими інтенсивними переформуваннями, а також розмивів на заплавах в зоні впливу мостового переходу. Модельна форма рівнянь для заплавного зависенесного потоку отримана, спираючись на припущення про мализну часток та мализну прискорень потоку в порівнянні з прискоренням сили тяжіння, на основі загального рівняння переносу неоднорідного потоку та рівняння нерозривності, з урахуванням складових сил опору рослинності в потоці та опору відриву зерен ґрунту в процесі розмиву.

Розподіл по ширині заплавної течії осереднених по вертикалі швидкостей та глибин на розрахункових поперечних перетинах в представленому методі розрахунку передбачає розв'язування скінченно-різницевою методом основних рівнянь відкритого потоку у вигляді:

- поздовжньої рівноваги потоку

$$[\alpha_h - N_p 2\Lambda] 2U \frac{\partial U}{\partial x_1} = - \left(g - N_p \Lambda \frac{U^2}{h} + N_{ch} \langle \bar{S} \rangle \right) \frac{\partial h}{\partial x_1} - h \left(-N_p \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\Lambda \frac{U^2}{h} \right) + N_{ch} \frac{\partial \langle \bar{S} \rangle}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\Lambda \frac{\partial U^2}{\partial x_2} \right) - \quad (1)$$

$$- \left[\frac{C_f}{hK_\Phi} + N_p \alpha_h \right] U^2,$$

- поперечної рівноваги потоку

$$\left(g - N_p \Lambda \frac{U^2}{h} + N_{ch} \langle \bar{S} \rangle \right) \frac{\partial h}{\partial x_2} = -h \left(-N_p \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\Lambda \frac{U^2}{h} \right) + N_{ch} \frac{\partial \langle \bar{S} \rangle}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\Lambda \frac{\partial U^2}{\partial x_2} \right) + N_p \Lambda \frac{\partial U^2}{\partial x_2}. \quad (2)$$

- рівняння нерозривності

$$\frac{\partial U h}{\partial x_1} = 0, \quad (3)$$

де U – поздовжня швидкість потоку;

h – глибина заплавної течії;

$\langle \bar{S} \rangle$ – осереднена по вертикалі мутність потоку;

x_1, x_2 – поздовжні та поперечні координати;

α_h – коефіцієнт, який враховує нерівномірність розподілу швидкостей на вертикалі;

Λ – коефіцієнт турбулентного обміну;

C_f – емпіричний коефіцієнт тертя;

N_p – коефіцієнт, який враховує опір елементів рослинності на заплаві;

N_{ch} – коефіцієнт, який враховує опір відриву зерна ґрунту в придонній області заплавної течії;

K_Φ – коефіцієнт, який враховує вплив форми поперечного перетину заплави.

Числова реалізація запропонованих математичних моделей за ітераційними методами розрахунку гідродинамічних характеристик заплави з рослинністю обумовила необхідність формулювання початкових та граничних умов для врахування характерних особливостей руху заплавної течії в зоні впливу мостових переходів.

На границях розрахункової області, у вузлах, сусідніх з твердими поверхнями – дамбами мостового переходу, в якості межових використовується залежність для швидкості:

$$U_{i,j} = \frac{U_{\tau_{i,j}}}{\kappa} \ln((x_2)_c^+ E), \quad (4)$$

де E – коефіцієнт шорсткості [3], $E = \frac{1}{\beta} = 8,8$; $\beta = 0,111$;

$U_{\tau_{i,j}}$ – динамічна швидкість на заплавах;

κ – параметр Кармана;

$(x_2)_c^+$ – безрозмірна відстань від стінки [3], визначається за залежністю:

$$(x_2)_c^+ = \frac{\Delta x_2 U_{\tau_{i,j}}}{\nu}. \quad (5)$$

Безпосередньо на самих твердих поверхнях (стілці дамби, мостової опори), а також для випадку пологих берегів діє умова прилипання, тобто значення швидкості потоку приймається рівним нулю.

Гранична відмітка вільної поверхні H , як для випадку пологих берегів, так і для випадку вертикальних стінок (крутих берегів, мостових опор, дамб), визначається за допомогою лінійної екстраполяції [4] за значеннями відміток вільної поверхні внутрішніх точок розрахункової області за формулою:

$$h(x_1, x_2) = 2h(x_1, x_2 - 1) - h(x_1, x_2 - 2). \quad (6)$$

Всі розрахунки проводяться відповідно на кожній гілці повені або паводку, на певну добу.

Метод розрахунку деформацій на заплавах ділянках в зоні впливу мостового переходу. Послідовність розрахунку передбачає визначення наступних параметрів заплавної потоку. Визначають коефіцієнт трансформації витрати руслового потоку в зоні стиснення за формулою:

$$\beta_{z-ci} = \left(1 - \frac{l_i}{R_{z-c}} \right)^{-1}, \quad (7)$$

де l_i – поточна відстань від створу початку стиснення, змінюється від 0 до l_{z-c} ;

R_{z-c} – параметри центральної струмини в зоні стиснення.

Розраховують коефіцієнт трансформації витрати руслового потоку в зоні розтікання за формулою:

$$\beta_{z-si} = \left(1 - \frac{l_{z-c} + l_{z-s} - l_i}{R_{z-s}} \right)^{-1}, \quad (8)$$

де l_{z-c} – довжина зони стиснення;

l_{z-br} – довжина впливу мостового переходу;

l_i змінюється від l_{z-c} до l_{z-br} .

Визначають витрату заплавної потоків в зоні стиснення за формулою:

$$Q_{f-p0i} = Q_{riv} - Q_r \beta_{z-ci}, \quad (9)$$

де для більшої заплави

$$Q_{f-pb0} = Q_{f-p0} \cdot k_{f-pb}, \quad (10)$$

для меншої заплави

$$Q_{f-ps0} = Q_{f-p0} \cdot k_{f-ps}, \quad (11)$$

де Q_{riv} – загальна витрата річкового потоку;

Q_r – руслова витрата;

$$k_{f-pb} = \frac{b_{f-pb}}{B_{f-p}}, k_{f-ps} = \frac{b_{f-ps}}{B_{f-p}}, B_{f-p} = b_{f-pb} + b_{f-ps};$$

B_{f-p} – загальна ширина заплав;

b_{f-pb} – середня ширина більшої заплави;

b_{f-ps} – середня ширина меншої заплави.

Розраховують витрату заплавних потоків в зоні розтікання за формулою:

$$Q_{f-p0b(s)i} = Q_{riv} - Q_r \beta_{z_{si}}. \quad (12)$$

витрати більшої та меншої заплав визначаються за формулами (10–11).

Визначають коефіцієнт Шезі для більшої та меншої заплав за формулою:

$$C_{f-pb(s)i} = \frac{Q_{f-p0b(s)i}}{b_{f-pb(s)} h_{f-pb(s)cep,i}^{3/2} I_{x_1}^{1/2}}, \quad (13)$$

де $h_{cep,i} h_{f-pb(s)cep,i}^{3/2}$ – середня глибина більшої або меншої заплав;

I_{x_1} – поздовжній уклон водної поверхні.

Розраховують значення швидкості першого наближення в зонах стиснення та розтікання за формулою:

$$U_{0i,j} = C_i \sqrt{h_{f-pb(s)i,j} I_{x_1}}. \quad (14)$$

Визначають величину динамічної швидкості на заплавах

$$U_{a,j} = \sqrt{g h_{f-pb(s)i,j} I_{x_1}}. \quad (15)$$

Проводять розрахунок межових умов біля струмененапрямних дамб за залежностями (5–6).

Розраховують коефіцієнт Шезі за глибиною за формулою:

$$C_{hi} = \frac{h_{cep,i}^{1/6}}{n}, \quad (16)$$

де $h_{cep,i}$ – середня глибина річкового потоку;

n – коефіцієнт шорсткості.

Визначають коефіцієнт, який враховує нерівномірність розподілу швидкостей на вертикалі, згідно [5]:

$$\alpha_{hi,j} = 1 + \frac{U_{a,j}^2}{\kappa^2 U_{i,j}^2}, \quad (17)$$

де κ – параметр Кармана, $\kappa = 0,435$.

Розраховують емпіричний коефіцієнт тертя за формулою:

$$C_{fi,j} = \frac{n^2 g}{h_{f-pb(s)i,j}^{1/3}}. \quad (18)$$

Визначають коефіцієнт турбулентного обміну за формулою:

$$\Lambda_{i,j} = \frac{h_{f-pb(s)i,j}}{2MC_i}, \quad (19)$$

де M – функція коефіцієнта Шезі, при $10 \leq C \leq 60$ $M = 0,7C + 6$, при $C > 60$ - $M = 48$.

Розраховують середню швидкість заплавного потоку за формулою:

$$V_{f-pb(s)cepi} = Q_{f-pb(s)0i} / b_{f-pb(s)} h_{f-pb(s)cepi}. \quad (20)$$

Визначають виправний коефіцієнт, який враховує вплив поперечного перерізу більшої та меншої заплав. Для цього розраховують характеристику форми живого перетину – універсальний параметр форми річкового потоку за формулою:

$$\beta_{\Phi_i} = \frac{1}{\omega_{f-pb(s)i} \sqrt{h_{f-pb(s)cep.i}}} \int_0^{b_{f-pb(s)}} h_{f-pb(s)i,j}^{3/2} dx_2. \quad (21)$$

де $\omega_{f-pb(s)i}$ – площа живого перетину більшої або меншої заплави.

За визначеним параметром форми підбирають виправний коефіцієнт K_{Φ_i} [5].

Розраховують загальну міделеву площу, яка розподілена у об'ємі шару рослин, що обтікаються потоком за формулою:

$$S_{Pi,j} = \frac{D_{cm} \cdot \Delta z_{cm.}}{\Delta x_1 \Delta x_2 h_{f-pb(s)i,j}}, \quad (22)$$

де $D_{cm.}$ – діаметр стебла рослини, що обтікається, $D_{cm.} = 7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;

$\Delta z_{cm.}$ – частина стебла рослини, що обтікається за висотою, якщо $h_{посл.} > h_{f-p}$, тоді $\Delta z_{cm.} = h_{f-p}$, якщо $h_{посл.} < h_{f-p}$, тоді $\Delta z_{cm.} = h_{посл.}$.

Розраховують коефіцієнт, який враховує опір елементів рослинності на заплаві за формулою

$$N_{Pi,j} = \frac{C_X S_{Pi,j}}{2}. \quad (23)$$

де C_X – коефіцієнт опору рослинності, $C_X = 0,4$.

Знаходять середньозважений діаметр відкладень D_{cep} на основі обчислення добутків медіанних значень діаметрів часток на їх відсотковий склад за формулою [4]:

$$D_{cep} = \sum_{k=1}^n \frac{P_n d_m}{100} \quad (24)$$

Розраховують коефіцієнт, який враховує опір відриву зерна ґрунту в придонній області заплавного потоку за формулою:

$$N_{Ch} = \frac{k_{Ch} C_{Ch} \cdot g}{C_{\Phi_1} D_{cep} \rho_{LS}}. \quad (25)$$

де k_{Ch} – коефіцієнт для визначення сили зчеплення [4], $k_{Ch} = 0,035$;

C_{Ch} – зчеплення ґрунту у стані повного водонасичення;

C_{Φ_1} – перший коефіцієнт форми частки наносів, $C_{\Phi_1} = \pi/6$.

Для визначення осередненої мутності по вертикалі $\langle \bar{S} \rangle$ розраховують відлікову концентрацію донних наносів і F -фактор, що враховує параметр зважування частинок наносів. Розрахунок цих параметрів проводиться згідно [6]. Для цього визначають:

- відносну щільність донного ґрунту

$$s = \frac{\rho_s}{\rho_{LS}}, \quad (26)$$

де ρ_s – щільність донного ґрунту;

ρ_{LS} – густина води річкового потоку, $\rho_{LS} = 998 \text{ кг/м}^3$;

- безрозмірний параметр частки

$$D_* = D_{cep} \left[\frac{(s-1)g}{v^2} \right]^{1/3}, \quad (27)$$

v – коефіцієнт кінематичної в'язкості води (в залежності від температури води), $v = 115 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$;

- критичне значення параметра Шильдса

$$\begin{aligned}
 \theta_{кр} &= 0,24(D_*)^{-1} \text{ при } D_* \leq 4; \\
 \theta_{кр} &= 0,14(D_*)^{-0,68} \text{ при } 4 < D_* \leq 10; \\
 \theta_{кр} &= 0,04(D_*)^{-0,1} \text{ при } 10 < D_* \leq 20; \\
 \theta_{кр} &= 0,013(D_*)^{0,29} \text{ при } 20 < D_* \leq 150; \\
 \theta_{кр} &= 0,55 \text{ при } D_* > 150,
 \end{aligned}
 \tag{28}$$

- квадрат динамічної швидкості початку руху наносів

$$U_{\tau кр}^2 = gD_{сеп}(s-1)\theta_{кр}; \tag{29}$$

- параметр стійкості частки

$$T = \begin{cases} U_{\bar{n},j}^2 / U_{\tau кр}^2 - 1 & \text{при } U_{\bar{n},j}^2 / U_{\tau кр}^2 > 1; \\ 0 & \text{при } U_{\bar{n},j}^2 / U_{\tau кр}^2 \leq 1; \end{cases} \tag{30}$$

- відлікову концентрацію донних наносів

$$S_0 = 0,03 \frac{D_{сеп}}{\Delta} \frac{T^{1,5}}{D_*^{0,5}}; \tag{31}$$

- нерозмивну швидкість

$$U_{n_{i,j}} = 1,47 \sqrt{gD_{сеп}^{1/3} h_{i,j}^{1/6}}; \tag{32}$$

- висоту донних форм

$$\Delta = \begin{cases} 0,25h_{i,j} \left(1 - \frac{U_{n_{i,j}}}{U_{i,j}} \right) & \text{при } 0 < \frac{U_{n_{i,j}}}{U_{i,j}} < 1; \\ 2,5D_{сеп} & \text{при } \frac{U_{n_{i,j}}}{U_{i,j}}, \end{cases} \tag{33}$$

- діаметр зважених наносів

$$D_{зваж} = D_{сеп} [1 + 0,016(T-25)]; \tag{34}$$

- гідравлічну крупність зважених наносів

$$\left. \begin{aligned}
 W_z &= \frac{1}{18} \frac{(s-1)gD_{зваж}}{\nu} && \text{при } D_{зваж} < 10^{-4}; \\
 W_z &= 10 \frac{\nu}{D_{зваж}} \left\{ \left[1 + \frac{0,01(s-1)gD_{зваж}}{\nu} \right]^{0,5} - 1 \right\} && \text{при } 10^{-4} \leq D_{зваж} \leq 10^{-3}; \\
 W_z &= 1,1 \sqrt{(s-1)gD_{зваж}} && \text{при } D_{зваж} > 10^{-3}.
 \end{aligned} \right\} \tag{35}$$

- параметр зважування

$$z_{i,j} = \frac{2,5W_z}{\left[1 + 2 \left(\frac{W_z}{U_{\tau}} \right)^2 \right] U_{\tau_{i,j}}} + 2,5 \left(\frac{W_z}{U_{\bar{n},j}} \right)^{0,8} \left(\frac{S_0}{0,65} \right)^{0,4}. \tag{36}$$

- F-фактор

$$F_{i,j} = \frac{\left(\frac{a}{h_{i,j}} \right)^2 - \left(\frac{a}{2h_{i,j}} \right)^{1,2}}{\left[1 - \left(\frac{a}{h_{i,j}} \right) \right]^z (1,2 - z_{i,j})}, \tag{37}$$

де a – відносний рівень, відстань від осередненого рівня дна до відносного рівня. Ця величина приймається рівній половині висоти донних виступів шорсткості $a = 0,5\Delta$, у випадку, якщо розміри донних виступів невідомі, то a слід приймати рівним еквівалентній висоті виступів шорсткості.

Остаточно визначають осереднену мутність по вертикалі за формулою:

$$\langle \bar{S} \rangle_{i,j} = F_{i,j} S_0, \quad (38)$$

На основі рівнянь (1–3), за допомогою ітерацій визначають поздовжню швидкість в усталеному заплавному потоці з елементами рослинності за формулою:

$$U_{i+1,j} = U_{i,j} - \frac{\Delta x_1}{[\alpha_h - N_p 2\Lambda] 2U_{i,j}} \left[\left(g - N_p \Lambda_{i,j} \frac{(U^2)_{i,j}}{h_{i,j}} + N_{Ch} \langle \bar{S} \rangle_{i,j} \right) \frac{h_{i+1,j} - h_{i,j}}{\Delta x_1} + h_{i,j} \left[-\frac{N_p}{\Delta x_1} \left[\left(\Lambda \frac{U^2}{h} \right)_{i+1,j} - \left(\Lambda \frac{U^2}{h} \right)_{i,j} \right] + N_{Ch} \frac{\langle \bar{S} \rangle_{i+1,j} - \langle \bar{S} \rangle_{i,j}}{\Delta x_1} \right] - \frac{1}{\Delta x_2^2} [\Lambda_{i,j} (U^2)_{i,j+1} - (\Lambda_{i,j} + \Lambda_{i,j-1}) (U^2)_{i,j} + \Lambda_{i,j-1} (U^2)_{i,j-1}] + \left[\frac{C_f}{h_{i,j} K_\Phi} + \alpha_h N_p \right] (U^2)_{i,j} \right], \quad (39)$$

На заплавних потоках можна приймати $\frac{\partial h}{\partial x_1} = 0$ та проводити розрахунок за спрощеним рівнянням:

$$U_{i+1,j} = U_{i,j} - \frac{\Delta x_1}{[\alpha_h - N_p 2\Lambda] 2U_{i,j}} \left[h_{i,j} \left[-\frac{N_p}{\Delta x_1} \left[\left(\Lambda \frac{U^2}{h} \right)_{i+1,j} - \left(\Lambda \frac{U^2}{h} \right)_{i,j} \right] + N_{Ch} \frac{\langle \bar{S} \rangle_{i+1,j} - \langle \bar{S} \rangle_{i,j}}{\Delta x_1} \right] - \frac{1}{\Delta x_2^2} [\Lambda_{i,j} (U^2)_{i,j+1} - (\Lambda_{i,j} + \Lambda_{i,j-1}) (U^2)_{i,j} + \Lambda_{i,j-1} (U^2)_{i,j-1}] + \left[\frac{C_f}{h_{i,j} K_\Phi} + \alpha_h N_p \right] (U^2)_{i,j} \right]. \quad (40)$$

Визначають розподіл глибини в поперечних перетинах заплавного потоку за формулою:

$$h_{i,j+1} = h_{i,j} - \frac{\Delta x_2}{g - N_p \left(\Lambda \frac{U^2}{h} \right)_{i,j} + N_{Ch} \langle \bar{S} \rangle_{i,j}} \left[h_{i,j} \left[-\frac{N_p}{\Delta x_2} \left[\left(\Lambda \frac{U^2}{h} \right)_{i,j+1} - \left(\Lambda \frac{U^2}{h} \right)_{i,j} \right] + N_{Ch} \frac{\langle \bar{S} \rangle_{i,j+1} - \langle \bar{S} \rangle_{i,j}}{\Delta x_2} \right] + \left[\frac{C_f}{h_{i,j} K_\Phi} + \alpha_h N_p \right] (U^2)_{i,j} \right] - \frac{1}{2\Delta x_1 \Delta x_2} [\Lambda_{i+1,j} ((U^2)_{i+1,j+1} - (U^2)_{i+1,j-1}) - \Lambda_{i,j} ((U^2)_{i,j+1} - (U^2)_{i,j-1})] - N_p \Lambda_{i,j} \frac{(U^2)_{i,j+1} - (U^2)_{i,j}}{\Delta x_2}. \quad (41)$$

Проводять розрахунок межових умов біля струмененапрямних дамб за залежністю (6).

При перевірці умови нерозривності обчислюють питомі витрати потоку на вертикалях $q_{f-pij} = U_{i,j} \cdot h_{ij}$. Після того обчислюють повну витрату шляхом сумування питомих витрат за кожним поперечним перерізом і множення на ширину розрахункової смуги $Q_{f-pi} = \sum_j q_{f-pij} \times \Delta B$, $\Delta B = x_{2i} - x_{21}$. Обчислюють коефіцієнти $k_i = \frac{Q_{f-pi}}{Q_{f-p0}}$, де Q_{f-p0} – витрата в

початковому створі. Коректуються швидкості $U_{i,j}^{II} = \frac{U_{i,j}^I}{k_i}$, де I, II – номери відповідних

наближень. При розрахунку швидкості коректуються два рази. Необхідно проводити перевірку умови нерозривності, обчислюючи питомі витрати $q_{f-pij} = U_{i,j} \cdot h_{ij}$. Далі знов обчислюють

швидкості $U_{i,j}^{III} = \frac{U_{i,j}^I}{k_i}$. По коректованих швидкостях обчислюють питомі витрати, знов

знаходяться коефіцієнти, які всі повинні дорівнювати одиниці. При необхідності можна збільшити кількість ітераційних циклів перевірки масивів величин. Кінцеву перевірку виконують за дискретним аналогом рівняння (3):

$$(U \cdot h)_{i,j} = \frac{(U \cdot h)_{i+1,j}}{\Delta x_1} \quad (42)$$

Роблять перерахунок поздовжнього уклону водної поверхні заплави за формулою:

$$I_{x_1} = \frac{h_{i+1,j} - h_{i,j}}{\Delta x_1}, \quad (43)$$

Далі перераховуються в наступному наближенні величини за залежностями (13), (15–19), (21–23), (26–38). Визначається розподіл поздовжніх швидкостей та глибин в плані заплавних потоків за виразами (39–41) до виконання умови нерозривності. Матриця відміток поверхні рельєфу дна заплави на розрахунковій області Z_{f-p} та матриця глибин заплавного потоку h_{f-p} оновлюються після кожної сходинки паводку.

Розрахунок розмивів на заплавних ділянках річки в зоні впливу мостового переходу за запропонованим методом розрахунку. Розрахунок загального та максимального розмиву проведено на заплавних ділянках підмостового русла на р. Сіверський Донець біля с. Брусівка на автомобільній дорозі Т-05-14, км 83+575, Донецька область. Розрахунок проводився на ділянці р. Сіверський Донець довжиною 220 м, шириною – 540 м. Заплава переважно 2-стороння, чергується по берегах. Ґрунти мулисто-піщані та глинисті, на заболочених ділянках торф'янисті. Щорічно в період весняної повені та дощових паводків заплава затоплюється на глибину від 0,5 до 3,3 м на 1-2 тижні, на пониженнях вода тримається на протязі 1-3 місяців. Запроектований автодорожній міст перетинає р. Сіверський Донець під кутом 26° , має довжину 297м.

В якості вихідних даних використовують загальну витрату річкового потоку (рис. 1), рівень поверхні річки (рис. 2), а також розподіл глибин русла та заплави (рис.3.).

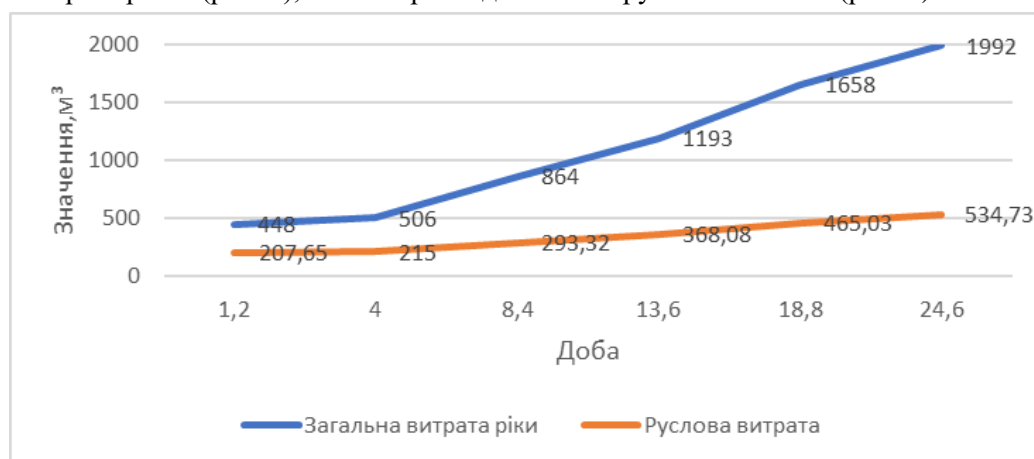


Рис. 1. Загальна витрата ріки Q_{riv} , м³

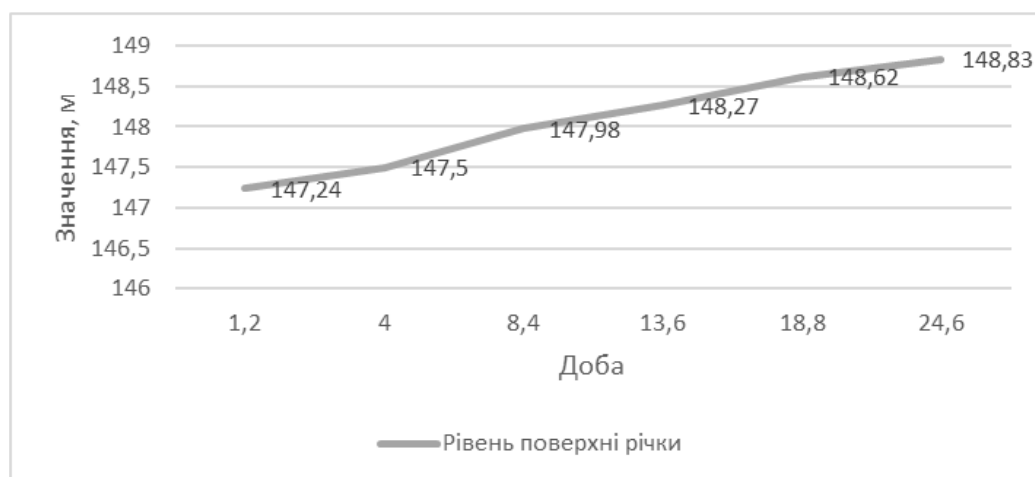


Рис. 2. Рівень поверхні річки, H , м

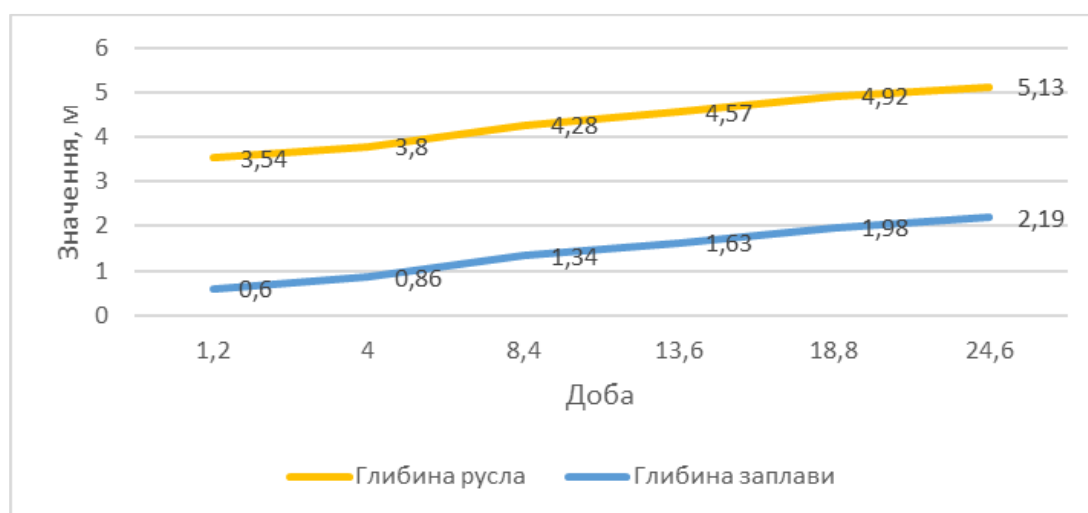


Рис. 3. Розподіл глибин русла h_r та запливи h_{f-p} .

На початку розрахунку за методом, наведеним у роботі [7], визначають зону впливу мостового переходу, основні параметри наведені у табл. 1.

Таблиця 1. Параметри зони впливу мостового переходу

Показники	Доба					
	1,2	4	8,4	13,6	18,8	24,6
Природна питома витрата заплав, q_{f-p} , м	0,589	0,713	1,398	2,021	2,923	3,57
Коефіцієнт стиснення β_{br}	1,355	1,391	1,476	1,51	1,542	1,556
Довжина впливу мостового переходу, l_{z-br} , м	1194,8	1349,2	1673,6	1842,2	2035,0	2144,3
Число Фруда F_r	0,01061	0,0095	0,01578	0,0224	0,0314	0,0379
Значення повного підпору ξ	0,794	0,823	0,7232	0,613	0,464	0,355
Довжина зони стиснення, l_{z-c} , м	245,7	239,5	464,4	713,7	1090,3	1382,0
Довжина зони розтікання, l_{z-s} , м	949,1	1109,8	1209,3	1128,6	944,7	762,3
Параметри центральної струмини в зоні розтікання R_{z-s} , м	3621,6	3950,5	3748,1	3341,3	2687,9	2133,2
Параметри центральної струмини в зоні стиснення R_{z-c} , м	937,5	852,4	1439,3	2112,9	3102,1	3867,5

Запропонований підхід дозволяє в двовимірній постановці провести розрахунок середньої швидкості на кожній з заплав (рис. 4), величини розмиву-наміву (рис. 5), отримати масив даних глибин в поперечних перетинах потоку та відмітки поверхні рельєфу заплав, надавати точний прогноз розвитку деформаційних процесів (рис. 6).

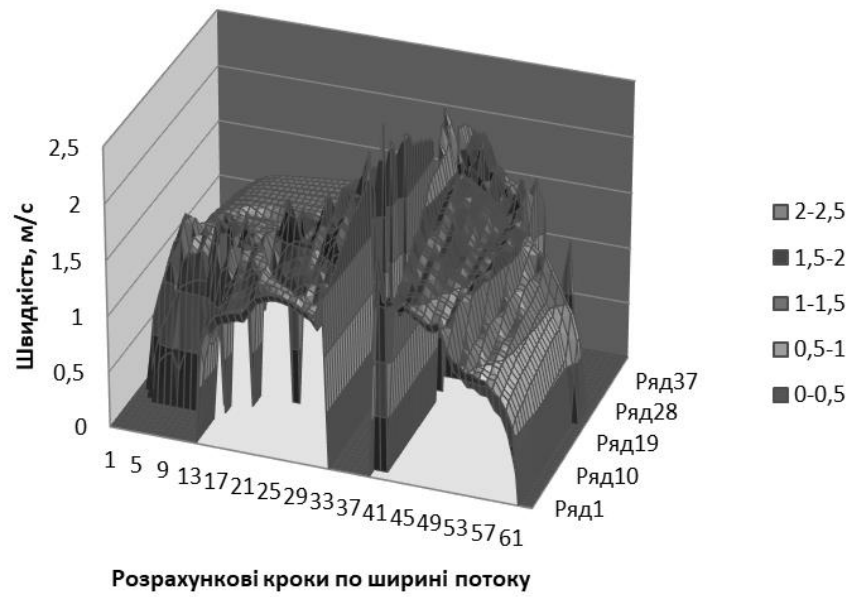


Рис. 4. Розрахунок поздовжньої швидкості в заплавному потоці з елементами рослинності U_{ij} після 6-ої сходинок розрахункового паводку

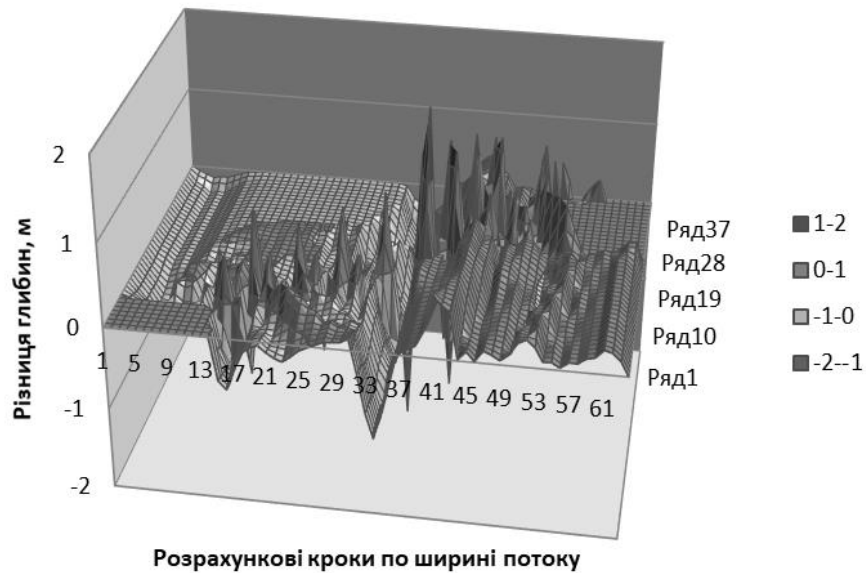


Рис. 5. Розрахунок величини розмиву-намиву після 6-ої сходинок розрахункового паводку

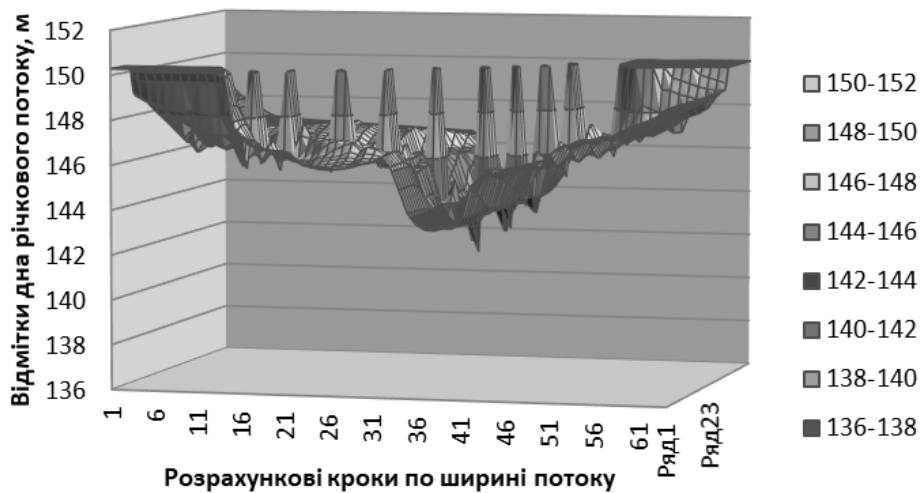


Рис. 6 Відмітки поверхні рельєфу дна заплави після 6-ої сходинок розрахункового паводку

Висновки. Запропоновано метод розрахунку розмивів на заплавах враховує особливості протікання відкритих потоків в зоні впливу мостових переходів. Розмив русла р. Сіверський Донець зупиняється лише на спаді весняної повені після шостої за вихідним гідрографом розрахункової сходинки (рис. 1). Згідно з розрахунками проведеними за методикою розмив більшої заплави становить $h_p = 0,96$ м, меншої заплави – $h_p = 1,28$ м. Максимальне значення поздовжньої швидкості потоку за результатами числового експерименту спостерігається на меншій заплаві та складає 2,5 м/с. Після проведення розрахунку на р. Сіверський Донець визначено, що на меншій заплаві з меншою пропускною здатністю та, відповідно, більшим стисненням, значення розмиву більше в порівнянні з деформацією більшої заплави, що відповідає реальним умовам.

ЛІТЕРАТУРА

1. Sean j. Bennett , John S. Bridge An experimental study of flow, bedload transport and bed topography under conditions of erosion and deposition and comparison with theoretical models / THE Journal of The international association of Sedimentologists, Volume42, Issue1, February 1995, Pages 117-146/ <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-3091.1995.tb01274.x>
2. FernandoDe Falco, RaffaeleMele The monitoring of bridges for scour by sonar and sediment / NDT & E International Volume 35, Issue 2, March 2002, Pages 117-123, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0963869501000317>
3. Савенко В.Я., Славинская Е.С. Моделирование процессов развития внутренних течений с учетом анизотропии открытых турбулентных потоков / – К.:НТУ, 2004. – 176 с.
4. Савенко В.Я. Математические модели и методы расчета квазитрехмерных безнапорных потоков. - К.: Техніка, 1995. 184 с.
5. Гришанин К.В. Теория руслового процесса. - М.:Транспорт, 1972. - 216с.
6. Методика прогнозування розвитку загальних руслових деформацій біля струмененапрямних дамб мостових переходів та рекомендацій по усуненню цих деформацій (МРР 218–02070915–410–2004) / розроб. В.Я. Савенко, О.С. Славінська, О.Є. Щодро – К.: УКРАВТОДОР: НТУ, 2004. – 27 с.
7. Ткачук С.Г. Прогнозування руслових деформацій на мостових переходах. Частина 3 і 4. Навчальний посібник. К.: НТУ, 2004. – 98 с.