

УДК 627.13:519.711.3

DOI: 10.15587/2706-5448.2020.210504

## ВИЗНАЧЕННЯ ЗОНИ ВПЛИВУ МОСТОВОГО ПЕРЕХОДУ В РІЧКОВОМУ ПОТОЦІ

Славінська О. С., Цинка А. О.

*Об'єктом дослідження є процес формування зони впливу мостового переходу в річковому потоці. Метод визначення довжини зони впливу мостового переходу передбачає розрахунок таких параметрів, як питома витрата заплав, довжина зон стиснення та розтікання, повний підпір перед створом мосту. Запропонований підхід базується на зміні властивостей центральної струмини річкового потоку в зоні штучного впливу мостової споруди. Визначення глибини потоку та похилу вільної поверхні проводиться за відповідними скінченно-різницевиими аналогами диференційних рівнянь, які описують зміну цих величин. Всі розрахунки проводяться відповідно на кожній гілці повені або паводку, на певну добу. Обчислення починаються зі створу повного розтікання, де всі гідравлічні характеристики потоку мають природні значення.*

*В роботі представлено розрахунок зони впливу мостового переходу на р. Сіверський Донець на автомобільній дорозі Т-05-14 в межах Донецької області (Україна). Встановлено, що розвиток загальних руслових деформацій в руслі та на заплавах відбувається на ділянці довжиною від 1195 м до 2144 м. Отримано розподіл глибини річкового потоку, яка в створі мостового переходу за ходом повені збільшується від 0,58 м до 2,17 м. Визначено межі зон стиснення та розтікання за зміною похилу водної поверхні. Зі збільшенням витрати річкового потоку параметри зони стиснення також збільшуються від 246 м до 1382 м, а зони розтікання – зменшуються від 949 м до 762 м. Зміна параметру центральної струмини відбувається відповідно до розподілу зон стиснення та розтікання за ходом повені. Отримані результати є початковими умовами для проведення досліджень щодо прогнозування розмивних процесів в річковому потоці з урахуванням штучного стиснення в зоні впливу мостового переходу.*

**Ключові слова:** мостовий перехід, заплава, зона впливу мосту, зона стиснення річки, зона розтікання річки.

### 1. Вступ

Прогнози можливого притоку води до мосту та розвитку неминучих руслових деформацій є основою для правильного призначення необхідних розмірів споруд мостового переходу. Чим більше стиснення річкового потоку, тим більшими стають руслові деформації та, як наслідок, збільшується глибина заглиблення опор. Із зменшенням отвору мостового переходу збільшується повний підпір перед мостом, який спонукає до підвищення насипів підходів та прогінних будівель. При великих стисненнях ріки, за умов напруженої роботи переходу, також передбачають певні види регуляційних споруд. Відповідно, актуальним питання є

визначення домінантної характеристики мостового переходу – ширини отвору, яка визначає довжину мосту та решту його параметрів.

## **2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит**

*Об'єктом дослідження* є процес формування зони впливу мостового переходу в річковому потоці.

Загальний розмив річкового потоку формується в зоні впливу мостового переходу, яка за протяжністю складається із двох зон – стиснення та розтікання. Зона стиснення – зона верхнього б'єфу мостового переходу, де відбувається збільшення руслової витрати за течією річки та, відповідно, зближення ліній току течії річки, вона обмежується створом початку стиснення та створом мостового переходу. Зона розтікання – зона нижнього б'єфу мостового переходу, де відбувається зменшення руслової витрати та, відповідно, збільшення витрати на заплавах за течією річки, вона обмежується створом мостового переходу та створом повного розтікання, де відновлюється природний режим річки.

## **3. Мета та задачі дослідження**

*Метою даної роботи* є визначення параметрів зони впливу мостового переходу, де відбувається формування загального розмиву (розвиток загальних деформацій) в річковому потоці. Для цього необхідно виконати наступні завдання:

1. Розробити метод визначення довжини зон стиснення та розтікання, з урахуванням параметрів центральної струмини та математичної моделі зміни рівня та похилу вільної поверхні річкового потоку.
2. Провести розрахунок параметрів зони впливу мостового переходу на рівнинній річці за запропонованим методом.

## **4. Дослідження існуючих рішень проблеми**

В роботі [1], на основі результатів натурних та лабораторних досліджень представлено тривимірну модель річки з зонами вигинів, злиття та поділу потоку. Модель запропонована з метою прогнозування зміни конфігурації русла та заплави, а також транспорту річкових наносів. Розділення річкового, зокрема заплавного потоку на зони в залежності від режиму транспорту наносів, їх відкладання на заплавах ділянках, представлено в роботі [2]. Прогнозування транспорту наносів з метою ліквідації наслідків проходження повенів та паводків в зонах вигинів річкового потоку наведено в роботі [3]. Дослідження в згаданих роботах представлені для природних зон, без урахування наявності штучних споруд та відповідного впливу штучного стиснення на швидкісну структуру річкового потоку.

З метою прогнозування розмивних процесів в зоні мостового переходу в роботі [4] змодельована швидкісна структура річкового потоку на вигині. Дослідження ґрунтуються на одновимірній та двовимірній моделях русла за методом скінчених елементів, але визначення величин деформацій на заплавах ділянках не запропоновано.

Дослідження паводкового стоку в зоні мостового переходу розглянуто в роботі [5]. Автори представили результати експериментальних досліджень щодо пропускної здатності річкового потоку безпосередньо в створі мосту, розвитку місцевих розмивів біля мостових опор та параметрів швидкісної структури на заплавних ділянках. В роботі [6] наведено зміну глибини потоку, розглянуто зони умовного поділу руслового та заплавного потоків, вплив їх конфігурацій на розмивні процеси. Вплив будівництва мосту на гідрологію заплав в межах великих міст проаналізовано в роботі [7]. В рамках представленого дослідження проведена концептуальна оцінка морфологічних змін у річці та її заплави. Вплив конфігурації річкових потоків, форм поперечних перетинів річищ та заплав на швидкісну структуру, зміну глибин досліджено на основі числових експериментів в роботі [8]. Визначення меж впливу мостового переходу на основі натурних спостережень або за результатами числового експерименту в роботах [5–8] не було проаналізовано.

Дослідження розвитку загального розмиву у нижньому б'єфі гідротехнічних споруд на основі моделювання транспорту наносів та деформаційних процесів у руслі в нерівномірному потоці представлено в роботі [9]. В роботі [10] встановлено залежність відносної глибини розмиву від ступеня стиснення річкового потоку. Але в наведених межових умовах, в [9, 10], не зазначено саме параметри зон впливу гідротехнічної споруди.

Таким чином, результати аналізу дозволяють зробити висновок про те, що визначення зони впливу штучного стиснення гідротехнічних споруд, мостових переходів зокрема, є актуальною задачею при прогнозуванні деформаційних процесів в річкових потоках.

## 5. Методи досліджень

Метод з визначення довжини зони впливу мостового переходу в річковому потоці ґрунтується на підході, запропонованому в роботах [11, 12]. На основі аналізу гідравлічних явищ на мостовому переході щодо трансформації руслової витрати отримані залежності зміни параметрів центральної струмини річкового потоку. На початку розрахунку задаються основні вихідні данні, які характеризують загальні параметри розрахункової області (табл. 1).

**Таблиця 1**

Вихідні данні розрахунку зони впливу мостового переходу

№ з/п	Назва параметру	Позначка	Од. вим.	Значення параметру
1	2	3	4	5
1	Поздовжній уклон дна	$J$	–	0,00018
2	Середня відмітка дна русла	$Z_r$	–	143,7
3	Середня відмітка дна заплав	$Z_{f-p}$	–	146,64
4	Прискорення вільного падіння	$g$	м/с <sup>2</sup>	9,81
5	Ширина розливу річки	$B_{riv}$	м	466,3
6	Середня ширина русла	$B_r$	м	58,11

Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5
7	Середня ширина більшої заплави	$b_{f-pb}$	м	212,26
8	Середня ширина меншої заплави	$b_{f-ps}$	м	149,08
9	Коефіцієнт шорсткості на заплавах	$n$	–	0,067
10	Ширина отвору мостового переходу	$B_{br}$	м	267

Розрахунок передбачає послідовність з визначенням наступних величин. Визначають природну питому витрату заплав:

$$q_{f-p} = \frac{Q_{riv} - Q_r}{B_{riv} - B_r}, \quad (1)$$

де  $Q_{riv}$  – загальна витрата річки, м<sup>3</sup>/с;  $Q_r$  – руслова витрата річки, м<sup>3</sup>/с;  $B_{riv}$  – ширина розливу річки, м;  $B_r$  – середня ширина русла, м.

Розраховують коефіцієнт стиснення річкового потоку:

$$\beta_{br} = \frac{Q_{riv}}{Q_r + q_{f-p} (B_{br} - B_r)}, \quad (2)$$

де  $B_{br}$  – ширина отвору мостового переходу, м.

Визначають довжину впливу мостового переходу:

$$l_{z-br} = \frac{h_r \left( \frac{\beta_{br}^2}{2\beta_{br} - 1} \right)^{0,3} - 1}{J \beta_{br} - 1}, \quad (3)$$

де  $J$  – поздовжній похил дна;  $h_r$  – глибина русла, м.

Розраховують площу живого перетину річкового потоку:

$$\omega_{riv} = B_r h_r + b_{f-p} h_{f-p}, \quad (4)$$

де  $b_{f-p}$  – середня ширина заплави (більшої та меншої), м;  $h_{f-p}$  – середня глибина заплави (більшої та меншої), м.

Визначають число Фруда:

$$Fr = \frac{Q_{riv}^2 B_{riv}}{g \omega_{riv}^3}. \quad (5)$$

Визначають значення повного підпору:

$$\xi = 1 - 0,5Fr \frac{\beta_{br}^2 - 1}{\left(\frac{\beta_{br}^2}{2\beta_{br} - 1}\right)^{0,3} - 1}. \quad (6)$$

Визначають довжину зони стиснення:

$$l_{z-c} = \xi \cdot l_{z-br}. \quad (7)$$

Визначають довжину зони розтікання:

$$l_{z-s} = (1 - \xi) l_{z-c}. \quad (8)$$

Визначають параметри центральної струмини в зоні розтікання:

$$R_{z-s} = \frac{l_{z-s} \beta_{br}}{\beta_{br} - 1}. \quad (9)$$

Визначають параметри центральної струмини в зоні стиснення:

$$R_{z-c} = \frac{l_{z-c} \beta_{br}}{\beta_{br} - 1}. \quad (10)$$

Призначають крок поздовжньої координати розрахункового створу  $\Delta l_i$ , загальну довжину ділянки визначають як:

$$l_i = \sum_{i=0}^i \Delta l_i = l_{i-1} + \Delta l_i, \quad (11)$$

де  $l_i$  змінюється від 0 до  $l_{z-c}$  в зоні стиснення та від 0 до  $l_{z-s}$  в зоні розтікання.

Виконують розрахунок значень кривої вільної поверхні річкового потоку в зоні впливу мостового переходу. Визначення зони впливу мостового переходу ґрунтується на рівнянні усталеного нерівномірного руху у відкритих руслах в одномірній постановці. Запропонований підхід до рішення задачі базується на розв'язку, згідно роботи [11], за методом Ю.В. Абрамова з використанням властивостей центральної струмини річкового потоку в зоні штучного стиснення. Скінченно-різницевий аналог диференційного рівняння, яке описує зміну глибин потоку, має вигляд:

$$h_i - h_{i-1} = J(l_i - l_{i-1}) - JR \left[ \left(1 - \frac{l_i}{R}\right)^{-1} - \left(1 - \frac{l_{i-1}}{R}\right)^{-1} \right] \pm \frac{Jh_r^{4/3} m^2}{2g} \left[ \left(1 - \frac{l_i}{R}\right)^{-2} - \left(1 - \frac{l_{i-1}}{R}\right)^{-2} \right], \quad (12)$$

де  $m$  – зворотна величина до коефіцієнту шорсткості русла  $n$ ,  $m = \frac{1}{n}$ ;  $R$  – параметр центральної струмини;  $l_i$  – поздовжня координата розрахункового створу, м;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>.

Початкові умови:  $h = h_0$  при  $l = 0$ ;  $h = h_i$  при  $l = l_i$ . Всі розрахунки проводяться відповідно на кожній гілці повені або паводку, на певну добу. Обчислення треба починати зі створу повного розтікання, де всі гідрравлічні характеристики потоку мають природні значення, третій доданок рівняння (12) береться зі знаком «+». При чому  $l_{i-1} = 0$ , а  $l_i$  змінюється в зоні розтікання від 0 до  $l_{z-s}$ . Величина параметру центральної струмини в зоні розтікання дорівнює  $R = R_{z-s}$ . Значенню  $l_i = l_{z-s}$  відповідає величина підмостового підпору.

Дійшовши до мостового створу, для продовження розрахунку в зоні стиснення необхідно замінити знак перед третім доданком на «-». Величині  $h_{i-1}$  надати значення отриманої глибини під мостом, відстань прийняти  $l_{i-1} = 0$  та змінити величину параметру центральної струмини в зоні стиснення  $R = R_{z-c}$ . Значення  $l_i$  змінюється від 0 до  $l_{z-c}$  величини, що є відстанню від мосту до початку зони стиснення, де утворюється повний підпір під мостом.

Ґрунтуючись на рівнянні (12), проводять розрахунок уклону вільної поверхні річкового потоку:

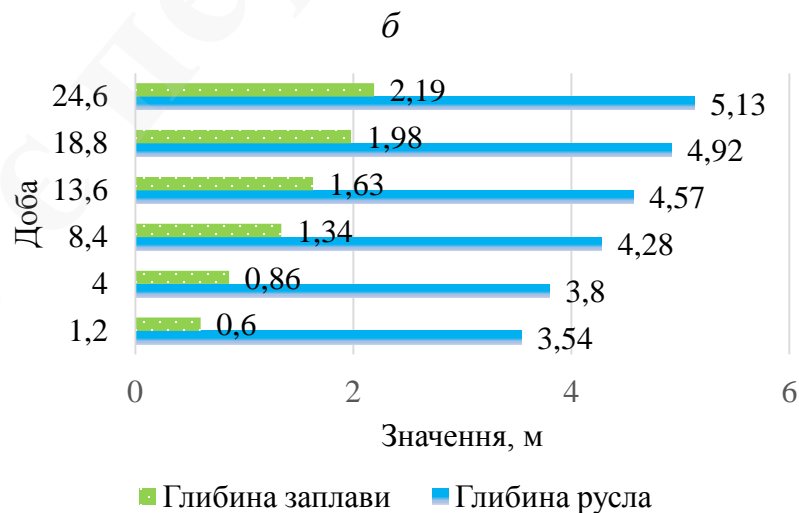
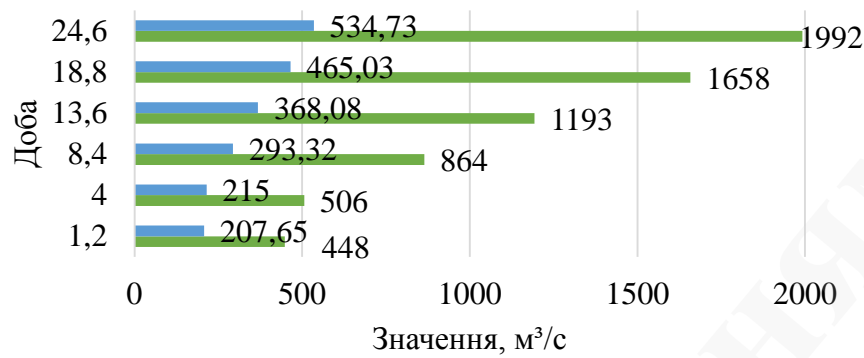
$$I_{x_1} = \frac{h_i - h_{i-1}}{l_i - l_{i-1}} = J - \frac{JR}{l_i - l_{i-1}} \left[ \left(1 - \frac{l_i}{R}\right)^{-1} - \left(1 - \frac{l_{i-1}}{R}\right)^{-1} \right] \pm \frac{Jh_r^{4/3} n^{-2}}{2g(l_i - l_{i-1})} \left[ \left(1 - \frac{l_i}{R}\right)^{-2} - \left(1 - \frac{l_{i-1}}{R}\right)^{-2} \right]. \quad (13)$$

Зміна уклону вільної поверхні дозволить уточнити межі зон стиснення та розтікання в створі мостового переходу.

## 6. Результати досліджень

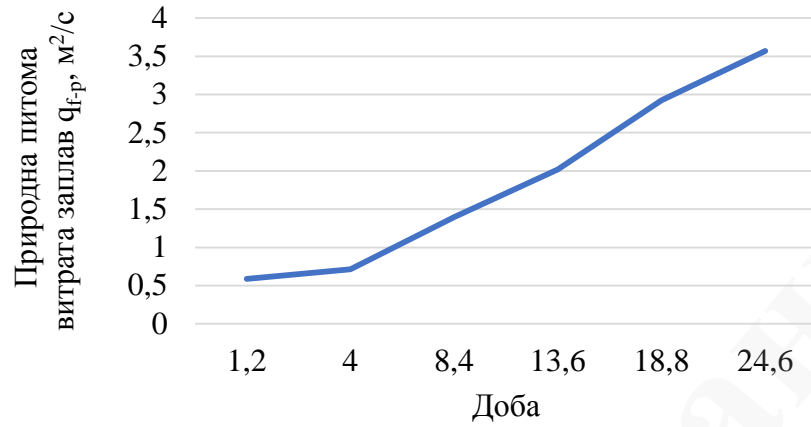
Розрахунок зони впливу мостового переходу було проведено на р. Сіверський Донець біля с. Брусівка на автомобільній дорозі Т-05-14, км 83+575, Донецька область (Україна). Щорічно в період весняної повені та дощових паводків заплава затоплюється на глибину від 0,5 до 3,3 м на 1–2 тижні, на пониженнях вода тримається на протязі 1–3 місяців. Вихідні дані розрахунку наведені в табл. 1.

Вихідні параметри розрахункової області представлені на графіках (рис. 1).

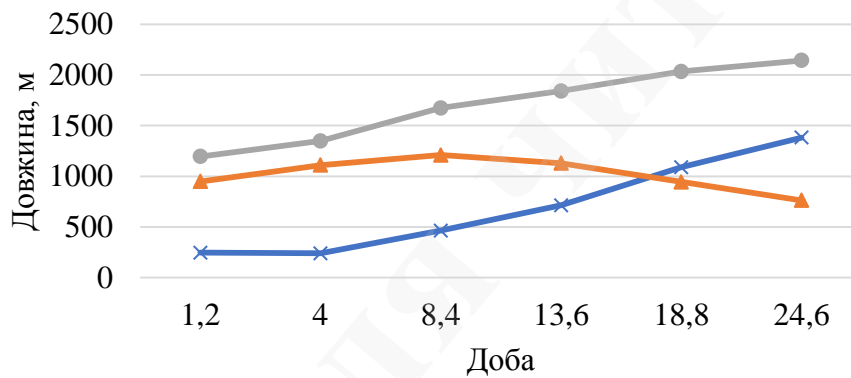


**Рис. 1.** Вихідні параметри розрахункової області р. Сіверський Донець:  
*а* – загальна  $Q_{riv}$  та руслова  $Q_r$  витрати річки; *б* – рівень поверхні річки,  $H$ ;  
*в* – розподіл глибин русла  $h_r$  та заплави  $h_{f-p}$

Результати розрахунку щодо зони впливу мостового переходу представлені на рис. 2, 3.

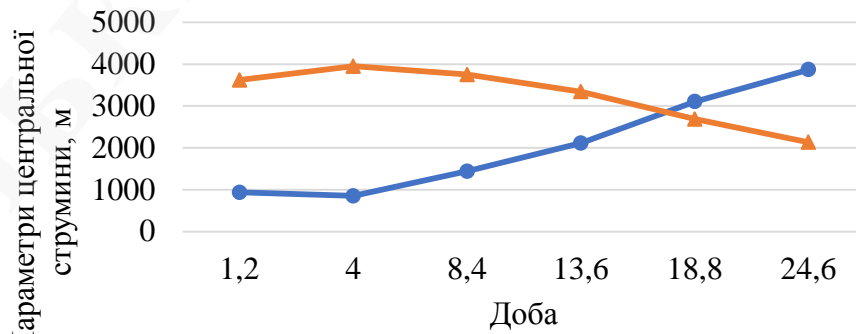


*a*



- ×— Довжина зони стиснення  $l_{z\_c}$
- ▲— Довжина зони розтікання  $l_{z\_s}$
- Довжина впливу мостового переходу  $l_{z\_br}$

*б*

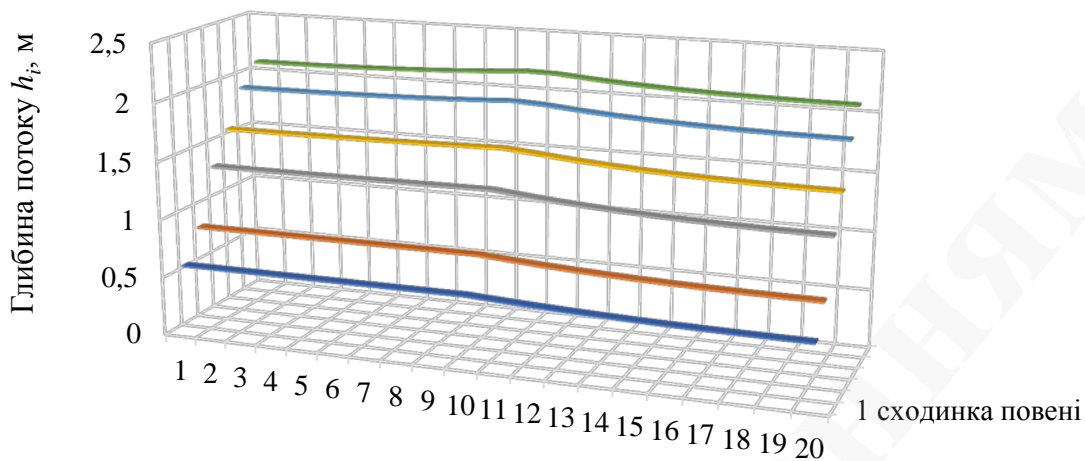


- Параметри центральної струмини в зоні стиснення  $R_{z\_c}$
- ▲— Параметри центральної струмини в зоні розтікання  $R_{z\_s}$

*в*

**Рис. 2.** Обчислені параметри розрахункової області р. Сіверський Донець: *a* – природна питома витрата заплав; *б* – довжина зони впливу мостового переходу, довжина зон стиснення та розтікання; *в* – параметри центральної струмини в зонах стиснення та розтікання

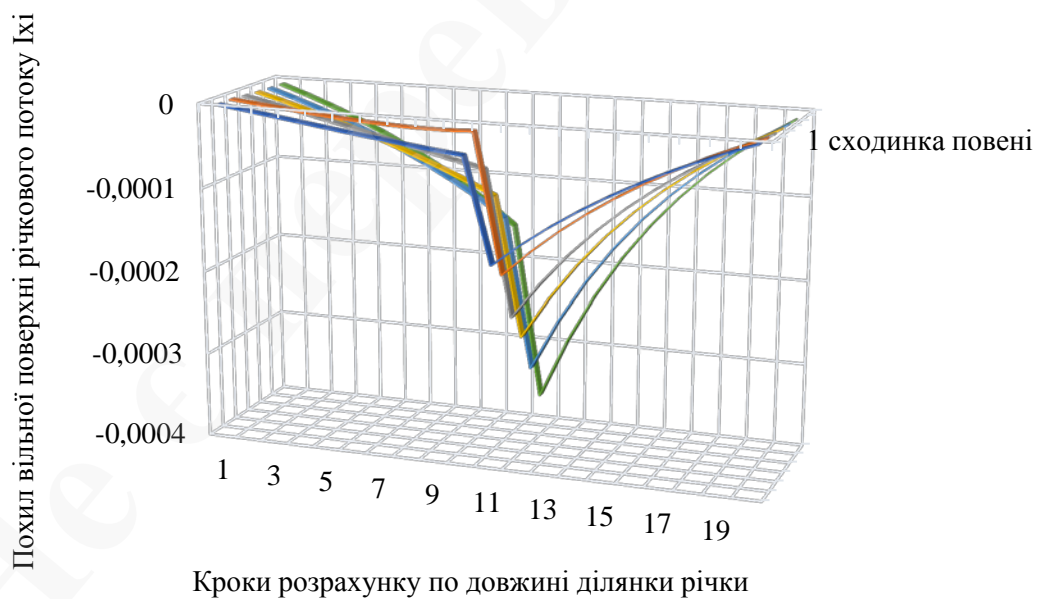




Кроки розрахунку по довжині ділянки річки

■ 1 сходи́нка повені ■ 2 сходи́нка повені ■ 3 сходи́нка повені  
 ■ 4 сходи́нка повені ■ 5 сходи́нка повені ■ 6 сходи́нка повені

*a*



■ 1 сходи́нка повені ■ 2 сходи́нка повені ■ 3 сходи́нка повені  
 ■ 4 сходи́нка повені ■ 5 сходи́нка повені ■ 6 сходи́нка повені

*б*

**Рис. 3.** Обчислені параметри розрахункової області р. Сіверський Донець на кожній гілці повені, на певну добу: *a* – похил вільної поверхні річкового потоку; *б* – глибина потоку

На рис. 2 наведено розрахунок питомої витрати заплав згідно співвідношення (1), де за кожною наступною сходинкою повені відбувається збільшення витрати понад 24 доби. Згідно формул (3), (7), (9) отримано величини зон стиснення та розтікання річкового потоку в загальній зоні впливу мостового переходу. Тут з підвищенням витрат спостерігається загальне збільшення довжини зони впливу, також збільшення зони стиснення, збільшення, а потім зменшення, після 8-ї доби, зони розтікання. Відповідним чином спостерігається зміна параметрів центральної струмнини в зонах стиснення та розтікання, отриманих за співвідношеннями (9), (10), рис. 2, б, в.

Після проведення розрахунків величин зони стиснення та розтікання отримано розподіл глибин річкового потоку (рис. 3, а), де можна визначити зміну глибин безпосередньо в створі мостового переходу.

Більш чітко можна визначити межі зон стиснення та розтікання за зміною похилу водної поверхні, визначеною за рівнянням (13). На представленому графіку (рис. 3, б) на 10 кроці розрахунку спостерігається зміна похилу вільної поверхні в створі мостового переходу. Падіння похилу – з 10 по 12 крок, зростання – на 12 кроці на всіх сходинках повені.

## 7. SWOT-аналіз результатів досліджень

*Strengths.* Запропонований метод на основі зміни ширини розливу та глибини річкового потоку дозволяє визначити параметри зони впливу мостового переходу, в яких межах проводити розрахунок загальних та місцевих деформацій в руслі та на заплаві під час повенів або паводків.

*Weaknesses.* Достатньо трудомісткий процес обчислення, вимагає велику кількість вихідних даних, які необхідно та складно отримувати в натурних умовах.

*Opportunities.* Проведені дослідження є початковими умовами для прогнозування деформацій або розмивних процесів, як в руслі, так і на заплавах ділянках рівнинних річок.

*Threats.* Залежить від точності та достовірності вихідних даних, які можливо отримати під час тривалих натурних спостережень спеціалістами відповідної кваліфікації.

## 8. Висновки

1. На основі врахування гідравлічних явищ на мостовому переході розроблений метод визначення параметрів зони його впливу. Запропонований метод дозволяє отримати довжини зони стиснення та розтікання, зміну глибини та похилу вільної поверхні річкового потоку. Числові дослідження необхідно проводити відповідно на кожній гілці повені або паводку, на певну добу та починати зі створу повного розтікання, де всі гідравлічні характеристики потоку мають природні значення.

2. Визначено зону впливу мостового переходу на р. Сіверський Донець, де відбувається розвиток загальних руслових деформацій та розмивів в руслі та на заплавах, яка змінюється від 1195 м до 2144 м. Зі збільшенням витрати від першої сходинки повені до шостої параметри зони стиснення також збільшуються від 246 м до 1382 м, на відміну від зони розтікання, яка за ходом

повені, відповідно, зменшується від 949 м до 762 м. Параметри центральної струмини змінюються відповідно до розподілу зон стиснення та розтікання. Ґрунтуючись на рівнянні усталеного нерівномірного руху в відкритих руслах, отримано зміну глибини потоку, яка в створі мостового переходу збільшується від 0,58 м до 2,17 м. Похил вільної поверхні річкового потоку безпосередньо в створі мосту при переході з зони стиснення в зону розтікання різко змінюється на першій сходинці повені від  $-0,00016$  до  $-0,00018$ , на шостій – від  $-0,00032$  до  $-0,00037$ . Отримані результати є підґрунтям для проведення досліджень щодо прогнозування розвитку деформаційних процесів в річковому потоці з урахуванням штучного стиснення, в зоні впливу мостового переходу.

### Література

1. John, S., Bridge, J. S. (1993). The interaction between channel geometry, water flow, sediment transport and deposition in braided rivers. *Geological Society, London, Special Publications*, 75 (1), 13–71. doi: <http://doi.org/10.1144/gsl.sp.1993.075.01.02>
2. Grenfell, S. E., Ellery, W. N., Grenfell, M. C. (2009). Geomorphology and dynamics of the Mfolozi River floodplain, KwaZulu-Natal, South Africa. *Geomorphology*, 107 (3-4), 226–240. doi: <http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.12.011>
3. Larsen, E. W., Greco, S. E. (2002). Modeling Channel Management Impacts on River Migration: A Case Study of Woodson Bridge State Recreation Area, Sacramento River, California, USA. *Environmental Management*, 30 (2), 209–224. doi: <http://doi.org/10.1007/s00267-002-2663-1>
4. Larsen, R. J., Ting, F. C. K., Jones, A. L. (2011). Flow Velocity and Pier Scour Prediction in a Compound Channel: Big Sioux River Bridge at Flandreau, South Dakota. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137 (5), 595–605. doi: [http://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0000334](http://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000334)
5. Okamoto, T., Takebayashi, H., Sanjou, M., Suzuki, R., Toda, K. (2019). Log jam formation at bridges and the effect on floodplain flow: A flume experiment. *Journal of Flood Risk Management*, 13 (S1). doi: <http://doi.org/10.1111/jfr3.12562>
6. Cardoso, A. H., Bettess, R. (1999). Effects of Time and Channel Geometry on Scour at Bridge Abutments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125 (4), 388–399. doi: [http://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(1999\)125:4\(388\)](http://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(1999)125:4(388))
7. Gautam, M. R., Watanabe, K., Ohno, H. (2004). Effect of bridge construction on floodplain hydrology—assessment by using monitored data and artificial neural network models. *Journal of Hydrology*, 292 (1-4), 182–197. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.12.026>
8. Fewtrell, T. J., Neal, J. C., Bates, P. D., Harrison, P. J. (2011). Geometric and structural river channel complexity and the prediction of urban inundation. *Hydrological Processes*, 25 (20), 3173–3186. doi: <http://doi.org/10.1002/hyp.8035>
9. Arefev, N. V., Mikhalev, M. A., Skvortsova, O. S. (2008). Obschii razmyv rusla i ponizhenie urovnia vody v nizhnem befe vodokhranilischnykh gidrouzlov. *Prirodoobustroistvo*, 1, 83–87. Available at: <http://www.ecca-water.net/file/Arefev-N.V.-Obschii-razmyv-rusla.pdf>

10. Neilands, R., Gjunsburgs, B., Neilands, R. R. *Theoretical analysis of the method of scour development in time during the flood*. Available at: <https://ortus.rtu.lv/science/lv/publications/4859/fulltext>

11. Slavinska, O. S., Kozarchuk, I. A. (2011). Doslidzhennia protsesu zahalnoho rozmyvu v zonakh vplyvu mostovykh perekhodiv z hrupovymy otvoramy. *Avtomobilni dorohy i dorozhnie budivnytstvo*, 82, 164–172. Available at: [http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi\\_i\\_stroitelstvo/82/164-172.pdf](http://publications.ntu.edu.ua/avtodorogi_i_stroitelstvo/82/164-172.pdf)

12. Tkachuk, S. H. (2004). *Prohnozuvannia ruslovykh deformatsii na mostovykh perekhodakh. Chastyny 3 i 4*. Kyiv: NTU, 98.