

УДК 624.2

ВИЗНАЧЕННЯ ЗАГАЛЬНОГО РОЗМИВУ У НИЖНЬОМУ Б`ЄФІ ГРЕБЛІ ЗА УМОВИ ЇЇ РУЙНУВАННЯ

Ткачук С.Г., д-р техн. наук, професор

Матвєєва К.Ю., аспірант

Національний транспортний університет (НТУ)

При руйнуванні гребель та спорожненні водосховищ формується хвиля прориву, яка має значну руйнівну силу. Рух великих мас води з високою швидкістю призводить до утворення значних розмивів, що викликає необхідність прогнозу руслових деформацій під мостом за умов руйнування і прориву греблі.

Потоки в річках з деформувальним руслом складаються з двох фаз: рідкої і твердої. Тому для їх математичного опису необхідно, як мінімум, чотири рівняння: для кожної фази рівняння нерозривності та руху. Для всіх без винятку математичних моделей руслових деформацій домінуючим рівнянням є рівняння балансу наносів. З фізичної точки зору воно являє фундаментальний закон збереження речовини, який в руслових прогнозах втілюється в закон збереження загальної кількості наносів.

Для русел з нерозмивними берегами рівняння балансу наносів можна записати в розгорнутому вигляді, який надає йому зручності в аналітичних перетвореннях, і такий опис набув поширеного застосування в практиці інженерних прогнозів руслових деформацій. Незважаючи на те, що при його виведенні використано приклад стиснення ріки мостовим переходом, він має загальний характер.

$$\frac{\partial G}{\partial l} + B \frac{\partial h}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

де G – повна витрата наносів в живому перерізі;

h – середня глибина живого перерізу;

B – ширина русла між урізами.

Рівняння балансу наносів (1) придатне як для визначення руслових переформувальних в природних умовах, так і для прогнозів деформацій дна при будь-якому стисненні ріки гідротехнічними або транспортними спорудами.

Динамічне рівняння для рухливих наносів представляється інтегральною залежністю, що пов'язує осереднену по ширині русла витрату наносів з гідравлічними характеристиками течії.

В залежності від співвідношення стоку води і наносів ріка вибирає той чи інший спосіб їх транспортування, що і визначає тип руслового процесу.

Транспортування руслоформуєчих донних наносів відбувається на структурному рівні дискретних мезоформ, що являють собою скупчення наносів у вигляді пасм, боковиків, осередків. Їх характерні розміри співставні з глибиною русла і корелюють з розмірами крупномірильних когерентних вихрових структур руслового потоку. Переміщення наносних формувань у вигляді руслових мезоформ відбувається під дією осереднених швидкостей в природній області. Імпульси турбулентних пульсацій надто слабкі, щоб зрушити всю мезоформу, тому вони стають активними чинниками тільки на рівні окремої частинки наносів або на рівні руслових мікроформ – рифелів.

ШТУЧНІ СПОРУДИ

Формулу транспортуючої спроможності можна записати у такому вигляді:

$$G = A \times B_p \times V^4, \quad (2)$$

в якому V — середня швидкість руслового потоку;
функція A може визначатися наближено за табл.1.

Таблиця 1.

Ґрунт	Різновид ґрунту	d, мм	A
Пісок	Дрібний	0,05-0,25	$18 \cdot 10^{-4}$ - $7,2 \cdot 10^{-4}$
	Середній	0,25-1,0	$7,2 \cdot 10^{-4}$ - $3,4 \cdot 10^{-4}$
	Крупний	1,0-2,5	$3,4 \cdot 10^{-4}$ - $2,6 \cdot 10^{-4}$
Ґравій	Дрібний	2,5-5,0	$2,6 \cdot 10^{-4}$ - $2,0 \cdot 10^{-4}$

Вираз (2) встановлює залежність між середньою швидкістю потоку V і його транспортуючою спроможністю G – величинами, які за своєю фізичною сутністю є динамічними. Отже, в математичній моделі загального розмиву цей вираз входить як динамічне рівняння для твердої фази потоку.

Рівняння нерозривності для водного потоку описує дотримання залежності кожної миті в кожному живому перерізі

$$Q = B \times h \times V. \quad (3)$$

При цьому сама витрата води в загальному випадку може змінюватись як за часом, так і за довжиною.

При руйнуванні греблі виникає хвиля прориву, що рухається за законами неусталеного руху. Просування по руслам річок різноманітних хвиль завжди супроводжується явищами їх трансформації, які створюють тенденцію до зменшення максимальної витрати води по довжині річки. Отже, динамічне рівняння для рідкої фази потоку повинно описувати зміну витрати води при проходженні хвилі прориву.

Хвиля прориву або раптового попуску рухається в нижньому б'єфі по природному руслу водотоку, безперервно деформуючись внаслідок опору руху, який чинить русло, причому довжина хвилі безперервно збільшується, а її висота безперервно зменшується. Відбувається розпластування хвилі, яке схематично зображено на рис.1.

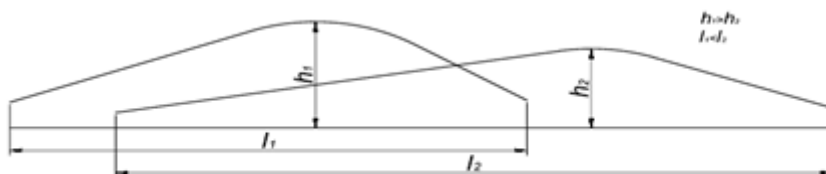


Рисунок 1 – Схема розпластування хвилі

Питання про врахування зміни величини максимальної витрати повеневих вод, паводків або хвиль прориву в процесі просування їх річкою виникає при вирішенні багатьох гідрологічних та гідравлічних задач.

У випадку прориву греблі максимальна витрата буде значно збільшена, а отже значно збільшаться і деформації русла, що відіб'ється на режимі експлуатації пропускних транспортних споруд.

Розрахункові умови максимального скидання води через водоскидні пристрої греблі зазвичай відомі, і їх можна легко отримати при вишукуванні мостового переходу. Розрахункові умови при прориві некапітальної греблі невідомі, оскільки розміри та характер прориву є факторами випадковими.

Раніше в практиці проектування витрата потоку від прориву греблі визначалася за емпіричними формулами Шокліча та Ю.В. Енгельгардта. Формула Шокліча дає змогу визначити значення максимальної витрати в момент прориву тільки для створу самої греблі. При визначенні максимальної миттєвої витрати у створах, які розташовані вище або нижче створу греблі, необхідно враховувати: в першому випадку режим спорожнення водосховища, а в другому випадку – розпластування (загасання) хвилі прориву або попуску на довжині шлях L .

Формула, запропонована Ю.В. Енгельгардтом (яка дає значення витрати тільки для створів, які розташовуються нижче греблі), має вигляд:

$$Q_n' = w_n \times C \times \sqrt{R_n \times \frac{h}{l}}, \quad (4)$$

де Q_n' – додаткова витрата від прориву греблі, м³/с;

w_n – додаткова площа живого перерізу в місці прориву за греблею, м²;

C – коефіцієнт Шезі;

R_n – гідравлічний радіус, який відповідає живому перерізу, м;

h – підпір греблі над горизонтом води в нижньому б'єфі в момент прориву, м;

l – відстань від греблі до мостового переходу, м.

При прориві греблі відбувається два явища: витікання води із водосховища за законом незатопленого водозливу з широким порогом та рух по нижчерозташованому руслу хвилі прориву за законами неусталеного руху води, які можуть бути виражені одним рівнянням.

Формула Шезі, яка лежить в основі формули Ю.В. Енгельгардта, може застосовуватись тільки у випадку рівномірного усталеного руху, не кажучи про фіктивність похилу $i = h/l$ та про те, що величину w_n досить складно визначити. Тому формула Ю.В. Енгельгардта не може бути рекомендованою для користування.

Формула Шокліча зазвичай подається у наступному вигляді:

$$Q_n = 0,9 \times \sqrt{\frac{B}{b}} \times H \times \sqrt{H}, \quad (5)$$

де Q_n – максимальна миттєва витрата у створі греблі при її прориві, м³/с;

B – довжина греблі по урізу води у верхньому б'єфі, м;

b – середня довжина прориву, м;

H – напір (різниця позначок верхнього та нижнього б'єфів в момент прориву), м.

Якщо ввести у формулу (5) позначення $b = p > B$, отримаємо:

$$Q_n = 0,9 \times p^{\frac{3}{4}} \times B \times H^{\frac{3}{2}}. \quad (6)$$

У формулі (6) невизначеною є величина p . Оскільки аварії водозатримувальних гребель являють собою випадкові явища, розміри яких передбачити неможливо, то коефіцієнт p можна визначити тільки статистичним шляхом.

Для некапітальних земляних гребель Л.Л. Ліштвану вдалося встановити величину коефіцієнта p лише для 15 об'єктів, причому виявилось, що ця величина коливається у межах від 0,06 до 0,50. Статистичне опрацювання вказаного ряду випадків дає значення для коефіцієнта $p \approx 0,8$, із 1% забезпеченістю. Враховуючи значну умовність застосування методу математичної статистики до такого невеликого ряду випадків, генетичну однорідність яких не видається можливим встановити точно, отримана величина $p \approx 0,8$ все ж може бути прийнята в якості розрахункової, як така, що використовується із достатнім запасом ($>1,5$) порівняно із зареєстрованим максимальним значенням.

Підставляючи $p = 0,8$ у вираз (6), отримуємо:

$$Q_n = 0,75 \times B \times H^{3/2}. \quad (7)$$

За формулою (7) рекомендується виконувати розрахунки можливої максимальної витрати від прориву некапітальної греблі у всіх випадках, коли величина b невідома.

Залежність між максимальною витратою води та відстанню від початкового перерізу до того, який аналізується, була отримана Л.Л. Ліштваном [2] та має такий вигляд:

$$Q_{mn} = \frac{W_0 \times Q_n}{W_0 + Q_n \times L \times t}, \quad (8)$$

де W_0 – об'єм водосховища, який розраховується за формулою: $W = \frac{1}{4} \times B \times H \times L$;

t – коефіцієнт, який характеризує умови проходження хвилі прориву у побутовому руслі, він дорівнює $0,5 \times (1/V_2 - 1/V_1)$;

V_1 – швидкість руху лобової частини хвилі, яка спричинена проривом греблі;

V_2 – швидкість течії в хвості хвилі (при межені).

Коефіцієнт t було визначено на підставі наявних натурних даних про швидкості течії для різних типів річок.

Таблиця 1 – Значення коефіцієнта t для різних типів річок

Типи річок	Похили	Швидкості, м/с		Коефіцієнт t , м ⁻¹ ·с
		V_2	V_1	
Малі низинні	0,0001-0,0005	0,25	1,00	1,50
Середні низинні	0,00005-0,0001	0,30	1,25	1,25
Малі рівнинні	0,0005-0,005	0,40	1,60	1,00
Середні рівнинні	0,0001-0,0005	0,50	2,00	0,80
Малі напівгірські	0,005-0,05	0,60	2,50	0,65
Середні напівгірські	0,0005-0,005	0,75	3,00	0,50
Малі гірські	0,05-0,5	0,95	3,75	0,40
Середні гірські	0,005-0,05	1,10	4,50	0,35

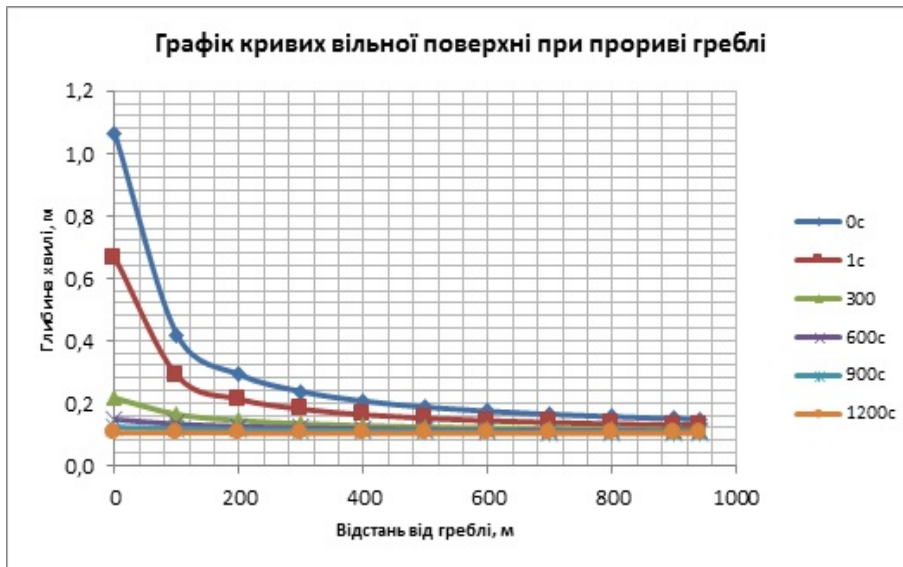


Рисунок 2 – Графік кривих вільної поверхні у нижньому б'єфі при прориві греблі

Отже, можемо записати систему рівнянь, що складає математичну модель загального розмиву при прориві греблі:

$$\begin{cases} \frac{dG}{dt} + B \frac{dh}{dt} = 0; \\ G = A \times B_p \times h^4; \\ Q = B \times h \times V; \\ Q_l = \frac{W_0 \times Q_n}{W_0 + Q_n \times X}. \end{cases} \quad (9)$$

Для аналітичної реалізації даної математичної моделі спершу слід визначити градієнт витрати наносів (похідну по довжині). З цією метою, використовуючи рівняння нерозривності для потоку, витрата наносів записується в такий спосіб:

$$G = A \times B_p \times \frac{Q^4}{h^4}. \quad (10)$$

Поділивши чисельник і знаменник динамічного рівняння для водної фази потоку і зробивши заміну $\frac{W_0}{Q_n} + l \times X = l$ для спрощення розрахунків, виразу (10) надаємо вигляду:

$$G = A \times \frac{W_0^4}{B_p^3 \times h^4 \times X^4}. \quad (11)$$

Похідна від функції (11) буде такою:

$$\frac{dG}{dl} = \frac{A \times W_0^4}{B_p^3} \times \frac{4 \times h^3 \times l^4 \times \frac{dh}{dl} + 4 \times h^4 \times l^3 \times \frac{dl}{dl}}{h^8 \times l^8} \quad (12)$$

З метою спрощення виразу знаходимо похідну:

$$\frac{dl}{dl} = \frac{d}{dl} \times \frac{W_0}{Q_n} + l \times \frac{\ddot{}}{\emptyset} = t;$$

$$dl = t \cdot dl.$$

Отже, тепер похідна (12) набуває такого вигляду:

$$\frac{dG}{dl} = - \frac{4 \times A \times W_0^4}{B_p^3 \times h^5 \times l^4} \times \frac{dh}{dl} - \frac{4 \times A \times W_0^4 \times l}{B_p^3 \times h^4 \times l^5}. \quad (13)$$

Квазілінійне рівняння руслових деформацій виводиться з рівняння балансу наносів після заміни в ньому похідної $\frac{dG}{dl}$ її виразом (13).

Поділивши всі члени на ширину русла B_p , остаточно будемо мати:

$$\frac{4 \times A \times W_0^4}{B_p^4 \times h^5 \times l^4} \times \frac{1}{dl} - \frac{1}{dt} = - \frac{4 \times A \times W_0^4 \times l}{B_p^4 \times h^4 \times l^5} \times \frac{1}{dh}.$$

Далі здійснюється заміна квазілінійного рівняння руслових деформацій еквівалентною йому системою звичайних диференціальних рівнянь

$$\frac{dl}{\frac{4 \times A \times W_0^4}{B_p^4 \times h^5 \times l^4}} = dt = - \frac{dh}{\frac{4 \times A \times W_0^4 \times l}{B_p^4 \times h^4 \times l^5}}. \quad (14)$$

Для складання двох звичайних рівнянь треба згуртувати їх попарно в будь-якому порядку. Перше з них утворюється внаслідок комбінації крайніх членів системи (14):

$$\frac{4 \times A \times W_0^4}{B_p^4 \times h^5 \times l^4} \times dh = - \frac{4 \times A \times W_0^4 \times l}{B_p^4 \times h^4 \times l^5} \times dl.$$

Після скорочення подібних членів це рівняння зводиться до звичайного диференціального з відокремленими змінними:

$$\frac{dh}{h} = - \frac{dl}{l}.$$

Проінтегрувавши ліву і праву частини, отримуємо його загальний розв'язок:

$$h \times l = y_1. \quad (15)$$

Друге рівняння доцільно утворити, поєднавши перший і другий члени системи (14):

$$\frac{4 \times A \times W_0^4}{B_p^4 \times h^5} \times dt = dl.$$

Воно теж дозволяє відокремити змінні, і його інтеграл набуває виду:

$$\frac{4 \times A \times W_0^4}{B_p^4 \times h^5} - \frac{l^5}{t} = y^2. \quad (16)$$

Загальний розв'язок диференціальних рівнянь з частинними похідними являє собою невизначену функцію Φ від інтегралів (15) та (16):

$$\frac{\partial \Phi}{\partial h} \times \frac{4 \times A \times W_0^4}{B_p^4 \times h^5} - \frac{\partial \Phi}{\partial t} \times \frac{l^5}{t} = 0. \quad (17)$$

Вид функції Φ визначається шляхом врахування початкових умов, тобто розв'язанням задачі Коші.

Оскільки розмив починається безпосередньо вже після руйнування греблі, то приймемо $t = 1$, а водна поверхня набуває форми хвилі, висоту якої можна знайти наступним чином [3]:

$$h = \frac{Q}{B_p} + 0,1.$$

Розв'язавши задачу Коші для даних початкових умов, отримаємо таку залежність для визначення розмиву при прориві греблі:

$$h = \frac{Q}{B_p} + 0,1 + \frac{20 \times A \times W_0^4}{B_p^4 \times h^5} \times (1 - t)^{\frac{1}{5}}. \quad (18)$$

Для здійснення розрахунків стосовно визначення загального розмиву треба знати вихідні гідравлічні параметри водотоку і хвилі прориву, такі як водомірний графік, гідрограф, інтегральну функцію гідрографу.

Водомірний графік у випадку прориву греблі повинен показувати зміну рівня води водосховища при її виливі в залежності від часу $H = f(t)$ [4]:

$$H = \frac{2 \times W \times H_{np}^{0,5}}{k_{np} \times B_r \times H_{np}^{0,5} + 2 \times W} \quad (19)$$

де k_{np} – коефіцієнт, що враховує відношення можливої ширини прориву до довжини греблі, який приймається: для нових земляних гребель V класу, що знаходяться в задовільних умовах експлуатації, $k_{np} = 0,50$; для старих земляних гребель, що не мають класу (при млинах тощо), а також гребель V класу в незадовільному стані, $k_{np} = 0,75$;

W – осереднена за довжиною площа дзеркала водосховища.



Рисунок 3 – Водомірний графік у створі греблі при її прориві

Гідрограф хвилі прориву обчислюється так:

$$Q_{np} = k_{np} \times B_r \times \frac{2 \times W \times H_{np}^{0,5}}{k_{np} \times B_r \times H_{np}^{0,5} \times \alpha + 2 \times W \times \frac{\sigma^3}{\delta}} + Q_{pn}, \quad (20)$$

де Q_{pn} – руслова природна паводкова витрата.



Рисунок 4 – Гідрограф загальної витрати при прориві греблі

Водомірний графік (рис. 3), гідрограф загальної витрати (рис. 4), графік кривих вільної поверхні (рис. 2) та графік кривої розмиву дна у нижньому б'єфі при прориві греблі (рис. 5) було побудовано на прикладі річки Сукіль, що протікає у Івано-Франківській області.

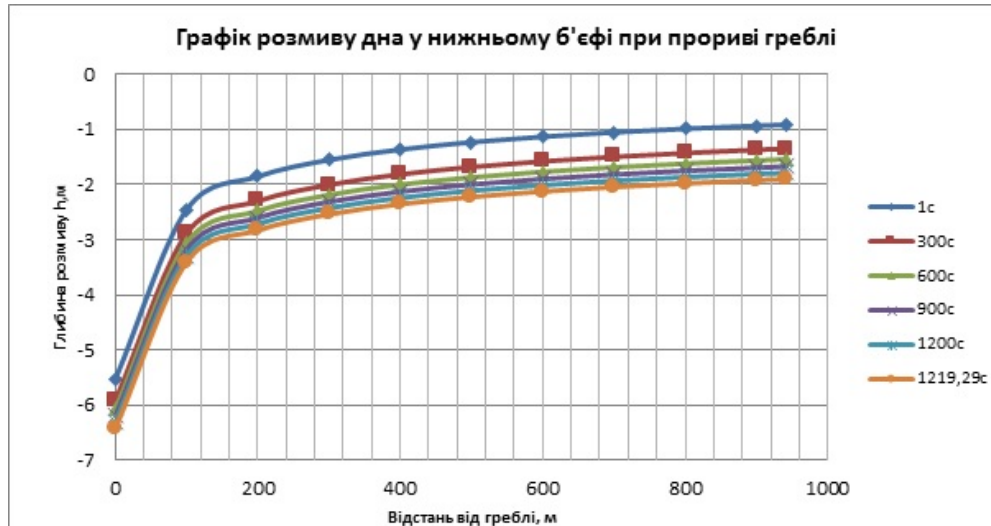


Рисунок 5 – Графік розмиву дна у нижньому б'єфі при прориві греблі

Висновки

Математична модель для розрахунку загального розмиву при прориві греблі являє собою систему рівнянь, які описують дві фази потоку: рідку і тверду. В якості динамічного рівняння для рідкої фази потоку задля врахування швидкої зміни його параметрів запропоновано використання рівняння додаткової витрати при проходженні хвилі прориву та наведено результати застосування даної математичної моделі.

Література

1. Ткачук С.Г. Теорія розмивів на мостових переходах. – Донецьк: АТЗТ «Видавництво «Донеччина», 2009. - 200 с.
2. Лиштван Л.Л. К вопросу о проектировании мостовых переходов в районе водохранилищ. – Сб. «Техника железных дорог». – М.: 1-я типография Трансжелдориздата МПС, 1949. – Вып. 7.
3. Ткачук С.Г. Гідравліка. Гідрологія. Гідрометрія: підручник. – К.: Кафедра, 2013. - 392 с.
4. Ткачук С.Г., Матвєєва К.Ю. Види хвиль і побудова кривої вільної поверхні при прориві греблі. Зб. «Автомобільні дороги і дорожнє будівництво». – К.: НТУ, 2013. Вип. 87.