

**Коцюруба Володимир Іванович** (доктор технічних наук, професор, заслужений винахідник України)<sup>1</sup>  
**Прошин Ігор Вікторович**<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Командування Сил підтримки Збройних Сил України, Київ, Україна

<sup>2</sup> Національний університет оборони України, Київ, Україна

## УДОСКОНАЛЕНА МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ ХВИЛІ ПРОРИВУ ТА ЗАТОПЛЕНЬ ПІД ЧАС ЗРУЙНУВАННЯ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД

Метою статті є висвітлення основних положень удосконаленої методики визначення параметрів руху хвилі прориву та затоплень під час виникнення надзвичайних ситуацій, що пов'язані з природним або штучним зруйнуванням гідротехнічної споруди, а також наведення прикладу верифікації запропонованої методики. В основу удосконаленої методики покладено використання графоаналітичного методу прогнозування площинних характеристик затоплень території місцевості, що дало змогу підвищити достовірність прогнозних оцінок обсягу надзвичайних ситуацій із врахуванням наявної інформації щодо середніх витрат побутового потоку води у розрахункових створах. В статті представлено удосконалену методику, що, на відміну від існуючих, додатково враховує динаміку зміни витрати води. Це дає змогу зняти існуючі обмеження стосовно залежності впливу форми русла та долин на часові параметри руху хвилі прориву. Крім того, запропоновано об'ємну модель послідовної витрати напірного потоку води на розрахункових ділянках. Це дасть змогу спростити процедуру прогнозного оцінювання наслідків активного затоплення місцевості. Науковою новизною є те, що у статті вперше досліджено динаміку зміни витрати води, яка раніше не приймалася до уваги у науковому середовищі. Це дало змогу зняти обмеження стосовно впливу форми русла та долин на часові параметри руху хвилі прориву і розробити об'ємну модель послідовної витрати напірного потоку води на розрахункових ділянках. Наведений матеріал має теоретичну та практичну значущість у процесі прогнозування надзвичайних ситуацій для галузі «Цивільний захист». Отримані результати можуть бути використані для подальших досліджень за спеціальністю 263 – цивільна безпека.

**Ключові слова:** надзвичайні ситуації, екологічна безпека, техногенна безпека, гідротехнічна споруда, гідротехнічні аварії, хвиля прориву, пасивні та активні затоплення.

### Вступ

**Постановка проблеми.** На початку ХХІ століття в результаті масштабного технічного регулювання річкових стоків за допомогою гребель було створено величезну кількість штучних водойм. За оцінками, у світі налічується понад 30 тисяч таких водосховищ загальним об'ємом близько 1 млн м<sup>3</sup>. Це призвело до затоплення приблизно 0,25% площі суходолу планети. Більшість водосховищ будувалися з метою розвитку гідроенергетики, зрошення сільськогосподарських угідь, забезпечення технічного та питного водопостачання, а також для покращення умов роботи водного транспорту. Протягом ХХ століття було зведено колосальну кількість великих гребель – близько 46 тисяч споруд висотою понад 15 м [7; 8].

Актуальність піднятого питання підсилюється глобальними змінами клімату і викликаними ними катастрофічними паводками на річках Дунай, Ельба, Рейн, Вісла, Дністер та на інших річках за останні 5 років. Для України, як європейської країни із досить розвинутою гідрографічною мережею [15; 1], особливої уваги заслуговує та викликає занепокоєння стан гідротехнічних споруд на річці Дніпро [16].

Проблема виникнення надзвичайних ситуацій на гідротехнічних спорудах (далі – ГТС) в Україні значно загострилася з моменту початку збройної

агресії російської федерації. Противник, внаслідок активного вогневого впливу по об'єктах критичної інфраструктури, до яких належать ГТС, спричинив виникнення великої кількості надзвичайних ситуацій і катастроф на території України. Це мало негативні наслідки як для цивільного населення, так і на результативність ведення воєнних дій діючими угрупованнями військ (сил) [13].

Водночас, гідродинамічна небезпека може бути спричинена технічним станом наявних ГТС. Вони є потенційно можливими чинниками створення небезпеки життєво важливим інтересам нашої країни. Це постійно потрібно мати на увазі для забезпечення техногенної безпеки, запобігання виникненню негативних наслідків під час будівництва або реконструкції ГТС, для прийняття правильних рішень у процесі використання водно-земельних ресурсів та виконання робіт із природо-водоохоронних заходів.

Враховуючи актуальність піднятого проблемного питання у теорії та практиці цивільної безпеки, виникає нагальна потреба прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій на ГТС, що, в свою чергу, вимагає наявності адекватного науково-методичного апарату для проведення розрахунків та моделювання процесів розвитку гідротехнічних аварій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

засвідчив наявність значної кількості аспектів як наукової, так і практичної спрямованості. Зокрема, розглядаються наслідки гідродинамічних аварій (далі – ГДА) на стані екологічних систем, гідрологічна складова з прогнозування паводкового стоку, математична модель з моніторингу стану ГТС стосовно захисту польдерних систем від затоплення та підтоплення [6]. Серед відкритих джерел можна виділити публікації, які присвячені прогнозуванню пасивних затоплень, що виникають в наслідок ГДА під час повеней [14; 11]. У [8; 10] наведено можливий вплив активних та пасивних затоплень, що виникають у результаті ведення бойових дій. Водночас, у [9] закладено обмеження, що не дає змогу враховувати вплив форми русла та долин на часові параметри руху хвилі прориву.

Проблематика моделювання із використанням середовища ArcGIS для конкретної часткової ситуації руйнування ГТС досліджувалася у [10]. Крім того, у [8] розглянуті основні аспекти моделювання затоплення місцевості та її наслідків залежно від тривалості впливу та ґрунтового насичення водним прошарком. Методика, що наведена у [4] недостатньо повно враховує вплив рельєфу русла на параметри руху прориву, що також накладає певні обмеження та неточності під час прогнозування наслідків надзвичайних

ситуацій на ГТС. У [2] вказується про потребу врахування зміни тактичних властивостей місцевості внаслідок зруйнування ГТС у ході ведення бойових дій. Однак, порядок визначення площинних параметрів затоплень не наводиться.

Зважаючи на вищевикладене, за основу взято методика [9] та основні положення, наведені у [8], які потребують певного удосконалення. Для розв'язання вказаних невідповідностей у предметній галузі прогнозування надзвичайних ситуацій потрібно удосконалити існуючу методика шляхом комплексного використання аналітичного та графоаналітичних методів проведення розрахунків щодо вказаних процесів.

**Метою статті** є висвітлення основних положень удосконаленої методики визначення параметрів руху хвилі прориву та затоплень під час виникнення надзвичайних ситуацій, що пов'язані з природним або штучним зруйнуванням гідротехнічних споруд, а також наведення прикладу верифікації запропонованої методики.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Основні терміни та визначення щодо ГТС та наслідків ГДА розглянуті у [12]. Причини виникнення ГДА наведені на рисунку 1.

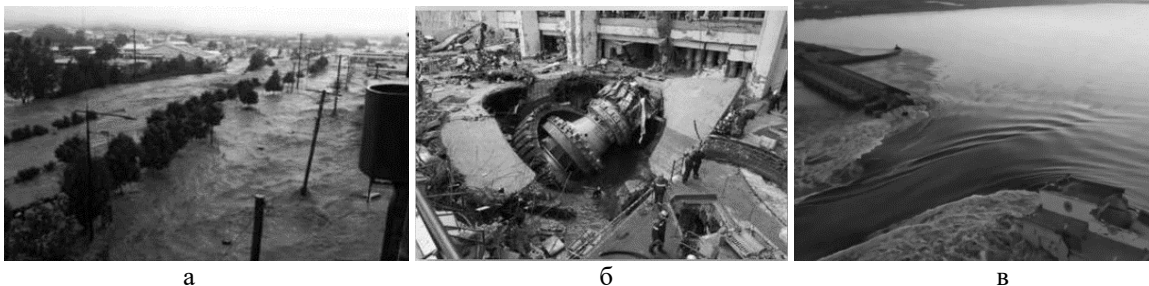


Рисунок 1 – Причини виникнення гідродинамічних аварій [12]: а – природні явища або стихійні лиха; б – техногенні фактори; в – надзвичайні ситуації воєнного характеру і терористичні акти

Прорив греблі є початковою фазою ГДА, коли стається проран та відбувається некерований потік води від верхнього б'єфа до нижнього б'єфа, який з великою швидкістю і напором прямує вниз за течією річки. Висота хвилі складає від 2 до 12 м і швидкість рухів від 3 до 25 км/год (в гірських районах може сягати до 100 км/год).

На швидкість поширення і висоту хвилі прориву також істотно впливає характер місцевості, якою вона рухається. На рівнинах швидкість руху хвилі зазвичай не перевищує 25 км/год, а в горах може становити близько 100 км/год. Лісові масиви, височини, яри та інші елементи рельєфу знижують швидкість руху і висоту хвилі прориву.

Схематично подовжній перетин прориву ГТС та параметрів хвилі прориву можна візуалізувати таким способом (рис. 2).

Методика визначення параметрів руху хвилі прориву та затоплень під час виникнення надзвичайних ситуацій, що пов'язані з природним або штучним зруйнуванням ГТС призначена для прогнозування можливих наслідків дії хвилі прориву на навколишнє середовище.

Відними даними для проведення розрахунків є: об'єм водосховища  $W_B$ , млн  $m^3$ ; ширина водосховища перед греблею  $B$ , м; глибина водосховища перед гідровузлом  $H$ , м; глибина річки нижче греблі  $h$ , м; форма долини у створі гідровузла; інші характеристики річки.

Послідовність та формули для проведення розрахунків і моделювання такі. На основі відомостей великомасштабних карт складають поздовжній профіль ділянки річки (рис. 3), за яким можливе поширення хвилі прориву. Отриманий профіль річки розбивають на розрахункові ділянки, довжина яких залежить від однакових характеристик річки і берегів (ухилів дна річки, глибини, ширини, характеру залісеності долини). Межі ділянок приймаються як розрахункові створи. За таких умов, зруйнована дамба вважається першим створом, межа між 1-ю та 2-ю ділянками – другим, а між 2-ю та 3-ю – третім тощо. Всі параметри хвилі, що належать до розрахункових створів, позначають римськими індексами I, II, III, а розрахункові ділянки – арабськими індексами 1, 2, 3 тощо (рис. 3).

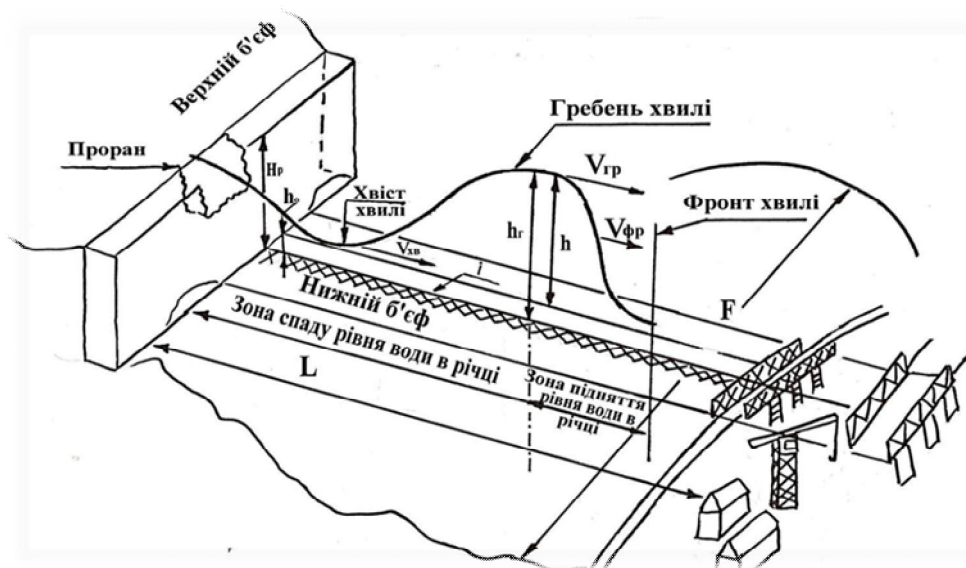


Рисунок 2 – Об'ємна модель поздовжнього перетину прориву гідротехнічної споруди та параметрів хвилі прориву [19]

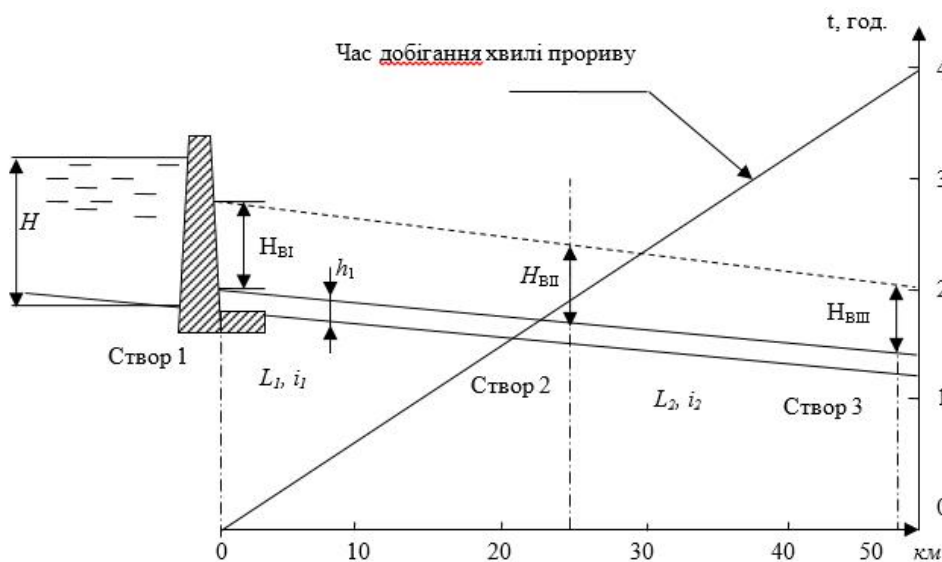


Рисунок 3 – Поздовжній профіль та параметри хвилі прориву (приклад) [12]

Під час проведення розрахунків визначають параметри хвилі прориву у створі зруйнованої дамби ГТС (висота хвилі прориву –  $H_p$  та час її проходження –  $T_p$ , потім знаходять основні дані руху хвилі прориву по першій ділянці та наступних, середня швидкість руху –  $V$  і час її добігання до розрахункового створу –  $t$ ). Надалі визначають параметри хвилі прориву у всіх розрахункових створах. Результатом розрахунків є графік руху хвилі прориву та нанесення на карту можливої зони затоплення.

Порядок визначення параметрів хвилі прориву у створі ГТС такий. Під час руйнування підпірних споруд дамби висоту хвилі прориву у першому створі руйнування визначають за формулою:

$$H_{вп} = 0,6H \cdot h_1 \quad (\text{м}), \quad (1)$$

де  $H$  – глибина води перед дамбою в момент її зруйнування, м;  $h_1$  – глибина води у річці після дамби, м.

Час проходження хвилі ( $T_1$ ) через створ зруйнованої дамби (I створ) рівний часу спорожнення водосховища, на відміну від [13], пропонується визначати за формулою:

$$T_1 = \frac{W_v A}{3600 \mu V H \sqrt{H}} \quad (\text{год.}), \quad (2)$$

де  $W_v$  – повний обсяг водосховища за нормального підпертого рівня, м<sup>3</sup>;  $A$  – допоміжний коефіцієнт, який залежить від форми кривизни водосховища (його величина перебуває у межах від 1 до 8 та для розрахунків у середніх умовах приймається рівною 3);  $\mu$  – коефіцієнт витрати води, який враховує форму русла та долини (таблиця 1);  $V$  – ширина водосховища по зрізу води у створі дамби у момент її руйнування, м;  $H$  – глибина води перед дамбою в момент її зруйнування, м.

Значення коефіцієнта  $\mu$  [8]

Тип рельєфу місцевості	Форма русла		
	Трикутна	Параболічна	Прямокутна
Рівнинна	0,6	0,75	0,9
Пагорбиста	0,5	0,6	0,8
Низькогірний	0,4	0,55	0,7
Високогірний	0,2	0,3	0,45

Порядок розрахунків руху хвилі прориву на першій ділянці та визначення її параметрів у другому створі такий. Спочатку визначають час ( $t_1$ ) добігання гребня хвилі від першого (I) до другого (II) створу. Потім визначають висоту хвилі прориву ( $H_{вп}$ ) у другому (II) створі та визначається тривалість проходження хвилі прориву через другий (II) створ.

Час добігання гребня хвилі від першого (I) до другого (II) створу визначають за формулою:

$$t_1 = \frac{L_1}{V_1}, \text{ год.} \quad (3)$$

де  $L_1$  – довжина першої розрахункової ділянки, км (визначається для відносно однакових ухилів (i) та заплави річки);  $V_1$  – середня швидкість руху хвилі прориву на розрахунковій ділянці, км/год (таблиця 2). Середня швидкість руху хвилі прориву на розрахунковій ділянці залежить від характеру водної перешкоди: ухилу (i) річки, ширини заплави річки, наявності рослинності.

Таблиця 2

Значення середньої швидкості руху гребня хвилі прориву [8]

Тип річки за шириною заплави та ухилами берегів	Середня швидкість руху гребня хвилі прориву ( $V_{ср}$ )		
	за ухилу dna (i) на розрахунковій ділянці річки		
	0,01	0,001	0,0001
На річках із широкою затоплюваною заплавою	4–8 (середнє 6)	1–3 (середнє 2)	0,5–1 (середнє 0,75)
На звивистих річках	8–14 (середнє 10)	3–8 (середнє 6)	1–2 (середнє 1,5)
На річках із добре розробленим руслом (пойми середні без великого опору)	14–20 (середнє 17)	8–12 (середнє 10)	2–5 (середнє 3,5)
На слабозвинених річках (заплави вузькі, береги круті)	–	12–16 (середнє 14)	5–10 (середнє 7,5)

Висоту хвилі прориву ( $H_{вп}$ ) у другому розрахунковому створі та тривалість проходження хвилі прориву ( $T_{п}$ ) через розрахунковий створ визначають залежно від відносного коефіцієнта:

$$K_t = \frac{t_1}{T_1}, \text{ год.} \quad (4)$$

де  $t_1$  – час добігання гребня хвилі прориву від зруйнованої дамби до другого (II) створу, год (формула (3));  $T_1$  – час проходження хвилі прориву через другий (I) створ, рівний часу спорожнення водосховища, год (формула (2)).

Значення коефіцієнтів ( $K_H$ ) відношень висоти хвилі прориву та тривалості ( $K_T$ ) її проходження через розрахунковий створ наведено у таблиці 3. Висоту хвилі прориву визначають за формулою:

$$H_{вп} = K_H H_{в1} \quad (м), \quad (5)$$

де  $K_H$  – коефіцієнт співвідношення висоти хвилі у розрахункових створах (таблиця 3);  $H_{в1}$  – висота хвилі прориву у першому (I) створі, м (формула (1)).

Таблиця 3

Значення відношень висоти хвилі прориву та тривалості її проходження через розрахунковий створ [8]

$K_t$	$K_H$	$K_T$
0,0	1	1
0,1	0,9	1,1
0,25	0,8	1,3
0,4	0,7	1,5
0,55	0,6	1,6
0,7	0,5	1,7
0,95	0,4	1,9
1,25	0,3	2,2
1,5	0,3	2,6

Тривалість проходження хвилі прориву через другий (II) створ визначають за формулою:

$$T_{п} = K_T T_1 \quad (\text{год.}), \quad (6)$$

де  $K_T$  – коефіцієнт співвідношення тривалості

проходження хвилі прориву через розрахункові створи (таблиця 3);  $T_1$  – час проходження хвилі прориву через другий (II) створ (формула (2)).

Порядок визначення руху хвилі прориву та її параметрів на другому та наступних ділянках і

створах такий. Розрахунки руху хвилі прориву та її параметрів на другому та наступних ділянках і створах виконують таким же способом, як і під час проведення розрахунків руху хвилі прориву та її параметрів на першій ділянці. За таких умов, час добігання хвилі прориву до третього та наступних створів визначають за формулою:

$$t_{2(i)} = \frac{L_{2(i)}}{V_{2(i)}}, \text{ год.} \quad (7)$$

де  $L_{2(i)}$  – довжина другої або наступної розрахункової ділянки, км (визначається для відносно однакових ухилів (i) та запливи річки);  $V_{2(i)}$  – середня швидкість руху хвилі прориву на розрахунковій ділянці, км/год (таблиця 2).

Висота хвилі прориву ( $H_{вп(i)}$ ) у третьому розрахунковому і наступних створах та тривалість проходження хвилі прориву ( $T_{п(i)}$ ) через розрахунковий створ визначають залежно від відносного коефіцієнта, який, на відміну від першої ділянки та другого створу визначають за формулою

$$K_t = \frac{t_{2(n)}}{T_{п(j)} + \sum_{i=1}^{n-1} t_i}, \text{ год.}, \quad (8)$$

де  $t_{2(n)}$  – час добігання гребня хвилі прориву від попереднього до наступного створу, год (формула (7));  $T_{п(j)}$  – час проходження хвилі прориву через попередній розрахунковий створ, год (формула (6));  $\sum_{i=1}^{n-1} t_i$  – сума часу добігання хвилі прориву до попередніх створів, год.

Висоту хвилі прориву у наступному створі визначають за формулою:

$$H_{вп(j)} = K_H H_{вп(j-1)} \text{ (м)}, \quad (9)$$

де  $K_H$  – коефіцієнт співвідношення висот хвилі у розрахункових створах (таблиця 3);  $H_{вп(j-1)}$  – висота хвилі прориву у попередньому створі, м.

Тривалість проходження хвилі прориву через розрахунковий створ визначається за формулою:

$$T_{п(j)} = K_T T_{п(j-1)} \text{ (год.)}, \quad (10)$$

де  $K_T$  – коефіцієнт співвідношення тривалості проходження хвилі прориву через розрахункові створи;  $T_{п(j-1)}$  – час проходження хвилі прориву через попередній створ, год.

Порядок визначення параметрів зони затоплення місцевості. До параметрів зони затоплення місцевості належать: максимальна відмітка рівня гребня побутового потоку води в i-му створі; середня відмітка рівня води затоплюваної j-ї ділянки місцевості i-го створу; середня ширина затоплюваної j-ї ділянки місцевості; витрата побутового потоку води в i-му створі; загальна довжина зони затоплення місцевості; сумарна площа зони затоплення місцевості під час руйнування підпірної дамби ГТС.

Максимальну відмітку рівня гребня хвилі прориву визначають за формулами:

$$\text{у першому створі:} \quad H_{гп1} = H_{h1} + H_{в1} \text{ (м)}, \quad (11)$$

де  $H_{h1}$  – відмітка побутового рівню води у річці, м;  $H_{в1}$  – висота хвилі прориву у першому

розрахунковому створі, м (формула (1)); у наступних розрахункових створах:

$$H_{гп(i)} = K_H H_{гп(i-1)} \text{ (м)}, \quad (12)$$

де  $K_H$  – коефіцієнт співвідношення висоти хвилі у розрахункових створах;  $H_{гп(i-1)}$  – максимальна відмітка рівня гребня хвилі прориву в i-1 розрахунковому створі, м (формула (9)).

Відмітку рівня води затоплюваної ділянки місцевості розрахункового створу визначають за формулою

$$H_{сер(i)} = H_{гп(i)} m \text{ (м)}, \quad (13)$$

де  $H_{гп(i)}$  – максимальна відмітка рівня гребня хвилі прориву у розрахунковому створі (формула (12));  $m$  – коефіцієнт розходу води, який враховує форму русла й долини, визначають з бази даних річок (таблиця 1).

Ширину затоплюваної розрахункової ділянки місцевості ( $B_{pi}$ ) у кожному із розрахункових створів визначають графічним способом нанесенням поперечного розтину створу між відмітками рівня затоплюваної водою ділянки місцевості із подальшим їх вимірюванням. Середню ширину зони затоплень на розрахунковій ділянці руху хвилі прориву визначають за формулою

$$B_{сер(j)} = \frac{B_{p(i)} + B_{p(i-1)}}{2} \text{ (м)}, \quad (14)$$

де  $B_{p(i)}$ ,  $B_{p(i-1)}$  – ширина зон затоплення у сусідніх створах руху хвилі прориву, м (рисунок 4).

Середнє значення відмітки рівня води на розрахунковій затоплюваній ділянці руху хвилі прориву визначають за формулою

$$H_{сер(j)} = \frac{H_{сер(i)} + H_{сер(i-1)}}{2} \text{ (м)}, \quad (15)$$

де  $H_{p(i)}$ ,  $H_{p(i-1)}$  – середні значення відмітки рівня води у сусідніх створах руху хвилі прориву, м (рисунок 4).

Витрату побутового потоку води у розрахунковому створі визначають за формулою

$$W_{в(j)} = B_{сер(j)} H_{сер(j)} L_j \text{ (м}^3\text{)}, \quad (16)$$

де  $B_{сер(j)}$  – середня ширина зони затоплень на розрахунковій ділянці руху хвилі прориву, м (формула (14));  $H_{сер(j)}$  – середнє значення відмітки рівня води на розрахунковій затоплюваній ділянці руху хвилі прориву, м (формула (15));  $L_j$  – ширина розрахункової ділянки руху хвилі прориву, м.

Сумарну площу зони затоплення місцевості під час руйнування підпірної дамби ГТС визначають за формулою

$$S_{зар} = \frac{\sum_{j=1}^J B_{сер(j)} H_{сер(j)} L_j}{\frac{1}{J} \sum_{j=1}^J H_{сер(j)}} \text{ м}^2 \quad (17)$$

Введемо умову, виконання якої є кінцевою для визначення параметрів зони затоплення

$$\sum_{j=1}^J B_{сер(j)} H_{сер(j)} \times L_j \leq W_v, \quad (18)$$

де  $B_{сер(j)}$  – середня ширина зони затоплень на розрахунковій ділянці руху хвилі прориву, м (формула (14));  $H_{сер(j)}$  – середнє значення відмітки рівня води на розрахунковій затоплюваній ділянці руху хвилі прориву, м (формула (15));  $L_j$  – ширина розрахункової ділянки руху хвилі прориву, м (визначають по карті);  $J$  – кількість розрахункових

створів.

Загальну довжину зони затоплення місцевості визначають за формулою:

$$L_{33} = \sum_{j=1}^J L_j \text{ (м)}, \quad (19)$$

де  $L_j$  – ширина розрахункової ділянки руху хвилі прориву, м.

Загальну тривалість (розрахунковий час) затоплення місцевості після прориву дамби до відновлення до побутового рівня води визначають за формулою

$$T_{\text{заг}} = \sum_{j=1}^J T_j \text{ (год.)}. \quad (20)$$

Отже, існуюча послідовність розрахунків відповідно до методики щодо площинних параметрів затоплення місцевості внаслідок зруйнування ГТС додатково враховує умову (18) для прогнозування можливих загальних площинних та часових параметрів затоплення місцевості після прориву дамби ГТС до відновлення побутового рівня води.

*Верифікація запропонованої методики на основі результатів проведення розрахунків.* За приклад візьмемо ситуацію, згідно з якою, внаслідок терористичного акту, підпірні споруди гідровузла повністю зруйновані. Вихідні дані для проведення розрахунків: об'єм водосховища  $W_b=72$  млн  $m^3$ ; ширина водосховища перед греблею  $B=110$  м; глибина водосховища перед гідровузлом  $H=42$  м; глибина річки нижче греблі  $h=3,2$ ; форма долини у створі гідровузла – параболічна; річка рівнинна з добре розробленим руслом, заплави річки вузькі, місцями середні, без великих опорів. Потрібно обчислити основні параметри хвилі прориву на ділянці завдовжки 45 км від гідровузла.

Розв'язання задачі здійснено із використанням формул (1)–(19). На основі вивчення карти великого масштабу ділянку довжиною 45 км розбивають на дві розрахункових ділянки та три створи. У цьому прикладі приймаємо довжину першої розрахункової ділянки  $L_1=25$  км ( $i=0,0012$ ), а другої –  $L_2=20$  км ( $i=0,001$ ). Перший створ – створ зруйнованої греблі, другий створ між 1-ю та 2-ю ділянкою і третій – у кінці 3-ї ділянки (рисунки 3, 4).

1. Обчислюємо параметри хвилі прориву у створі повного руйнування підпірних споруд гідровузла (I створ):

за формулою (1) визначаємо висоту хвилі прориву  $H_{вI}$  у першому створі

$$H_{вI} = 0,6 \times 42 - 3,2 = 22 \text{ м};$$

визначимо час проходження хвилі прориву через створ зруйнованої греблі (час повного спорожнення водосховища). Для орієнтовних розрахунків часу повного спорожнення водосховища за умови повного зруйнування споруд гідровузла у формулі (2) коефіцієнт  $A$  приймаємо рівним 2. За параболічної формули русла і заплави у створі зруйнованого гідровузла коефіцієнт  $\mu = 0,6$ , тоді:

$$T_I = \frac{72000000 \times 2}{3600 \times 0,6 \times 10 \times 42 \times \sqrt{42}} = 2,22 \text{ год}$$

2. Визначаємо основні дані руху хвилі прориву на першій ділянці і параметри, що характеризують її, у другому створі:

час добігання гребня хвилі до другого створу розраховуємо за формулою (3). У нашому прикладі для річки з добре розробленим руслом та з вузькими заплавами без великих опорів за нахилу дна  $i=0,0012$  середня швидкість руху хвилі на першій ділянці становить  $V_1=10$  км/год. Відповідно до даних, за нахилу  $i=0,0012$  ( $i \approx 0,001$ ) швидкість руху хвилі коливається у межах 8–12 км/год, а середня швидкість руху хвилі може бути прийнята рівною 10 км/год. Довжина першої ділянки  $L_1=25$  км. За наведених характеристик першої ділянки, час добігання хвилі прориву до другого створу становитиме

$$t_1 = \frac{25}{10} = 2,5 \text{ год};$$

визначаємо висоту хвилі прориву у другому створі. Для цього спочатку визначаємо значення відношення часу добігання хвилі до другого створу  $t_1$  за часу повного спорожнення водосховища  $T$ . Це відношення дорівнює:

$$\frac{t_1}{T_I} = \frac{2,5}{2,22} \approx 1,1.$$

Після чого за таблицею 3 визначаємо значення  $\frac{H_{вII}}{H_{вI}}$  та  $\frac{T_{вII}}{T_{вI}}$ , що відповідає

співвідношенню  $\frac{t_1}{T_I} = 1,1$ . Разом із тим, у таблиці

значення відношення  $\frac{t_1}{T_I} = 1,1$  відсутнє. У подібних

випадках значення відношення висоти хвилі прориву  $H_{вII}/H_{вI}$  та часу проходження хвилі  $T_{вII}/T_{вI}$  визначається інтерполяцією. У

розглянутому прикладі відношення  $\frac{t_1}{T_I} = 1,1$

перебуває між 0,95 та 1,25, а це означає, що відповідне відношення  $H_{вII}/H_{вI}$  – між 0,4 та 0,3 та

приймається  $\frac{H_{вII}}{H_{вI}} = 0,35$ . Отже, висота хвилі прориву

у другому створі рівна:

$$H_{вII} = 0,35 \times H_{вI} = 0,35 \times 22 = 7,7 \text{ м};$$

обчислюємо час проходження хвилі прориву через другий створ. Задля цього в таблиці 3 інтерполяцією визначаємо значення відношення

$\frac{T_{II}}{T_I}$ ; воно дорівнює 2,05, а потім визначаємо час

затоплення у другому створі

$$T_{II} = 2,05 \times T_I = 2,05 \times 2,22 = 4,55.$$

Визначаємо параметри хвилі прориву під час руху її другою розрахунковою ділянкою та у третьому створі:

згідно із формулою (3) обчислюємо час добігання хвилі прориву до третього створу. Довжина другої розрахункової ділянки 20 км (нахил дна річки  $i=0,001$ ). На річках із середніми заплавами без великих опорів середню швидкість руху хвилі приймаємо 8 км/год. Враховуючи зазначені дані, час добігання хвилі прориву до третього створу буде дорівнювати:

$$t_2 = \frac{20}{8} = 2,5 \text{ год};$$

для визначення висоти хвилі прориву у третьому створі визначасмо значення відношення  $\frac{t_2}{T_{II} + t_1}$

воно дорівнює:

$$\frac{t_2}{T_{II} + t_1} = \frac{2,5}{4,55 + 2,5} = 0,355.$$

З таблиці 3 інтерполяцією визначасмо відношення  $\frac{H_{вIII}}{H_{вII}} = 0,75$  З чого виходить, що висота хвилі прориву у третьому створі дорівнює:

$$H_{вIII} = 0,73 \times 7,7 = 5,6;$$

термін проходження хвилі прориву через третій створ визначасмо з відношення  $\frac{T_{III}}{T_{II}} = 1,43$

(таблиця 3):

$$T_{III} = 1,43 \times T_{II} = 1,43 \times 4,55 = 6,5 \text{ год.}$$

Як результат розрахунку, встановлені параметри хвилі прориву у створі зруйнованого гідровузла: висота хвилі прориву  $H_{вI} = 22$  м; час повного спорожнення водосховища  $T_I = 2,22$  год. Дані руху хвилі прориву на першій розрахунковій ділянці  $L_1$  та параметри її у другому створі: час добігання хвилі прориву до другого створу  $t_1 = 2,5$  год; висота хвилі прориву  $H_{вII} = 7,7$  м; час проходження хвилі через другий створ  $T_{II} = 4,55$  год. Дані руху хвилі прориву на другій ділянці ( $L_2$ ) та параметри її у третьому створі: час добігання хвилі прориву до третього створу  $t_2 = 2,5$  год; висота хвилі прориву  $H_{вIII} = 5,6$  м; час проходження хвилі через третій створ  $T_{III} = 6,5$  год. За даними, що отримані на основі розрахунків, будують графік проходження хвилі прориву

(приклад див. рис. 3), який, враховуючи вимоги щодо обсягу статті, окремо для розглянутого прикладу не наводиться.

### Висновки й перспективи подальших досліджень

Насамкінець слід зазначити, що в статті розглянута удосконалена методика визначення параметрів руху хвилі прориву та затоплень під час виникнення надзвичайних ситуацій, які пов'язані з природним або штучним зруйнуванням гідротехнічних споруд. Запропонована методика, на відміну від існуючих, додатково враховує динаміку зміни витрати води, що дає змогу зняти обмеження щодо впливу форми русла та долин на часові параметри руху хвилі прориву. Крім того, запропоновано об'ємну модель послідовної витрати напірного потоку води на розрахункових ділянках, що дає змогу спростити процедуру прогнозного оцінювання наслідків активного затоплення місцевості.

Наведені результати верифікації (розрахунки) із використанням вихідних даних підтвердили практичне значення застосування запропонованої методики для предметної галузі. Водночас, наведене у статті має теоретичну та практичну цінність для галузі «Цивільний захист». Зокрема, отримані результати можуть бути використані для майбутніх досліджень за спеціальністю 263 – цивільна безпека.

Як напрям для подальших наукових напрацювань, може бути обрано дослідження шляхів захисту споруд низьководних мостів в умовах загрози їх руйнування противником, а також захисту подібних споруд від льодоходів.

### Список бібліографічних посилань

1. Вишневський В. І. Річки і водойми України, стан і використання. Київ : Віпол, 2000. 376 с.  
2. Іваньков П. А., Захаров Г. В. Местность и её влияние на боевые действия войск. Москва : Воениздат, 1969. 207 с.  
3. Каганер М. С. Каскад днепровских водохранилищ. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1976. 348 с.  
4. Лысухин И. Ф. Методика инженерно-тактических расчетов. Москва : Воениздат, 1974. 240 с.  
5. Окснюк О. П., Тимченко В. М., Дубняк С. С. Состояние экосистемы Киевского участка Каневского водохранилища и пути его регулирования. Київ : Институт гидробиологии НАНУ, 1999. 60 с.  
6. Окснюк О. П., Тимченко В. М., Давыдов О. А. Экологические попуски Киевской ГЭС. Київ : Институт гидробиологии НАНУ, 2003. 72 с.  
7. Дослідження Дністра: 10 років громадської екологічної експедиції «Дністер» / Редактор М. І. Жарких. Львів-Київ, 1998. 216 с.  
8. Коцюрба В. І., Михайловський Д. В., Черевко Р. М., Камалов С. В., Процин І. В. Моделювання затоплення місцевості в наслідок зруйнування гідротехнічних споруд. Опір матеріалів і теорія споруд/Strength of Materials and Theory of Structures. 2023. № 111 DOI: 10.32347/2410-2547.2023.111.87-101.  
9. Мурасов Р., Тергишний Б. Методика розрахунку наслідків при проривах (руйнування) гідротехнічних споруд критичної

інфраструктури. *Journal of Scientific Papers «Social Development and Security»*. 2022. Vol. 12. № 6. С. 140–152. DOI: 10.33445/sds.2022.12.6.12.  
10. Стародуб Ю., Багнюк В. Моделювання та методика оцінки небезпеки інженерної обстановки при прориві греблі Середньодніпровської ГЭС. *Вісник ЛДУБЖД*. 2019. № 20. С. 96–100. DOI: 10.32447/20784643.20.2019.14.  
11. Оцінка обстановки при руйнуванні гідротехнічних споруд : презентація. Миколаїв: НУК, 2016. URL: <https://ppt-online.org/111728>. (дата звернення 21.03.2024).  
12. Прогнозування повеней: загальнонаціональна комплексна система. URL: [https://www.nas.gov.ua/text/pdfNews/poveni\\_prognoz.pdf](https://www.nas.gov.ua/text/pdfNews/poveni_prognoz.pdf). 3 с. (дата звернення 21.03.2024).  
13. Тарасовський Ю., Прасад А. Російські військові підірвали греблю Каховської ГЭС. *Forbes.ua*. 2023. URL: <https://forbes.ua/news/rosiyski-viyska-pidirvali-kakhovskuges-pochalas-evakuatsiya-naselennya-zelenskiy-sklikav-rnbo-onovlyuetsya-06062023-14022> (дата звернення 20.03.2024).  
14. Determination of Threshold Runoff for Flood Early Warning in Nepalese Rivers. Dilip Kumar Gautam, Khadananda Dulal, IDRiM 2012 Conference, Regular Articles. Special Issue. 2013. Vol. 3. № 1. P. 126-136.  
15. Денисова А. И., Тимченко В. М. и др. Гидрология и гидрохимия Днепра и его водохранилищ. Київ : Наукова думка, 1989. 212 с.

### IMPROVED METHOD OF DETERMINING THE PARAMETERS OF BREAK WAVE MOVEMENT AND FLOODING IN THE DESTRUCTION OF HYDROTECHNICAL STRUCTURES

Kotsyuruba Volodymyr (Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Inventor of Ukraine)<sup>1</sup>  
Proshchyn Igor<sup>2</sup>



<sup>1</sup> *Command of the Support Forces of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine*<sup>2</sup> *National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

**Formulation of the problem in general.** The purpose of the article is to highlight the main provisions of the improved methodology for determining the parameters of the movement of the breakthrough wave and flooding during emergency situations associated with the natural or artificial destruction of hydrotechnical structures.

**Research methods.** The basis of the improved methodology is the use of a graph-analytical method of forecasting the planar characteristics of flooding of the local area, which made it possible to increase the reliability of predictive estimates of the volume of emergency situations, taking into account the available information on the average consumption of domestic water flow in the calculation structures.

**Analysis of recent researches and publications.** Methodological approaches analyzed in the article, highlighted in scientific sources, need some improvement. In order to solve this problem in the subject field of emergency forecasting, it is necessary to improve the existing methodology through the comprehensive use of analytical and grapho-analytical methods of calculations regarding the processes of the movement of the breakthrough wave and flooding during the destruction of hydrotechnical structures.

**Presenting the main material.** The article presents an improved methodology, which, unlike the existing ones, additionally takes into account the dynamics of changes in water flow, which made it possible to remove restrictions regarding the dependence of the influence of the shape of the channel and valleys on the time parameters of the movement of the breakthrough wave, and a volumetric model of the sequential flow of pressure water flow in the calculated areas, which made it possible to simplify the procedure of predictive assessment of the consequences of active flooding of the area.

**Elements of scientific novelty.** In the article, for the first time, the dynamics of changes in water flow, which were previously not taken into account in the scientific environment, were investigated, which made it possible to remove restrictions regarding the influence of the shape of the channel and valleys on the time parameters of the movement of the breakthrough wave, and developed a volumetric model of the sequential flow of the pressure flow of water on the calculated sections.

**Theoretical and practical significance of the article.** The given material has theoretical and practical significance in the process of forecasting emergency situations for the field of "Civil Defense", especially in the conditions of the threat of destruction of hydrotechnical structures by the enemy, as well as their protection from ice tunnels. The obtained results can be used for further research in specialty civil security.

**Conclusion and the perspectives of future researches.** The improved method of determining the parameters of the movement of the breakthrough wave and flooding during emergency situations associated with the natural or artificial destruction of hydrotechnical structures is considered. The proposed technique additionally takes into account the dynamics of changes in water flow. This will make it possible to remove restrictions on the influence of the shape of the channel and valleys on the time parameters of the movement of the breakthrough wave. A three-dimensional model of the sequential flow of the pressure flow of water on the calculated sections is proposed, which allows to simplify the procedure of predictive assessment of the consequences of active flooding of the area. The given results of verification (calculations) using the initial data confirmed the practical significance of the application of the proposed methodology for the subject area. Research into ways to protect low-water bridge structures from ice drifts can be chosen as a direction for further research.

**Keywords:** emergency situations, environmental safety, man-made safety, hydrotechnical construction, hydrotechnical accidents, breakthrough wave, passive and active flooding.

#### References

1. Vyshnevskiy, V. I., (2000). Rivers and reservoirs of Ukraine, state and use. Kyiv : Vipol, 376.
2. Yvankov, P. A., Zakharov, H. V., (1969). Rivers and reservoirs of Ukraine, state and use. Moskva: Voenyzdat, 207.
3. Kahaner, M. S., (1976). Rivers and reservoirs of Ukraine, state and use. Lenynhrad : Hydrometeorozdat, 348.
4. Lisukhyn, Y. F., (1974). Methodology of engineering and tactical calculations. Moskva.: Voenyzdat, 240.
5. Oksyiuk, O. P., Tymchenko, V. M., Dubniak, S. S., (1999). The state of the ecosystem of the Kyiv section of the Kanevsky reservoir and ways of its regulation. Kyiv: Yn – t hydrobyolohyy NANU, 60.
6. Oksyiuk, O. P., Tymchenko, V. M., Davudov, O. A., (2003). Ecological releases of the Kyiv HPP. Kyiv: Yn–t hydrobyolohyy NANU, 72.
7. Dniester research: 10 rokov hromadskoi ekolohichnoi ekspedytsii «Dnister», (1998). Redaktor M. I. Zharkyykh. Lviv-Kyiv, 216.
8. Kotsiuruba, V., Mykhailovskiy, D., Cherevko, R., Kamalov, Ye., Proshchyn, I., (2023). Modeling of flooding of the area as a result of the destruction of hydraulic structures. 111, DOI: 10.32347/2410-2547.2023.111.87-101.
9. Murasov, R., Tertysnyi, B. (2022). Methodology for calculating the consequences of breaches (destruction) of hydrotechnical structures of critical infrastructure. *Journal of Scientific Papers "Social Development and Security"*, 12, 6, 140-152. DOI: 10.33445/sds.2022.12.6.12.
10. Starodub, Yu., Bahniuk, V., (2019). Modeling and method of assessing the danger of the engineering situation in the event of a dam breach of the Serednyodniprovska HPP. *Visnyk LDUBZhd*. 20, 96-100. DOI: 10.32447/20784643.20.2019.14.
11. Modeling and method of assessing the danger of the engineering situation in the event of a dam breach of the Serednyodniprovska HPP: prezentatsiia. (2016). Mykolaiv : NUK [online]. Available at: <https://ppt-online.org/111728> [Accessed: 21 April 2024].
12. Flood forecasting: a nationwide comprehensive system [online]. Available at: [https://www.nas.gov.ua/text/pdfNews/poveni\\_prognoz.pdf](https://www.nas.gov.ua/text/pdfNews/poveni_prognoz.pdf) [Accessed: 21 April 2024].
13. Tarasovskiy, Yu., Prasad, A., (2023). Russian military blew up the Kakhovskaya HPP [online]. Available at: <https://forbes.ua/news/rosiyski-viyska-pidirvali-kakhovskuges-pochalas-evakuatsiya-naseleennya-zelenskiy-sklivak-rnbo-onovlyuetsya-06062023-14022> [Accessed: 20 April 2024].
14. Determination of Threshold Runoff for Flood Early Warning in Nepalese Rivers, (2013). Dilip Kumar Gautam, Khadananda Dulal, IDRiM 2012 Conference, Regular Articles, Special Issue, 3, 1, 126-136.
15. Denysova, A. Y., Tymchenko, V. M. y dr., (1989). Hydrology and hydrochemistry of the Dnieper and its reservoirs. Kyiv : Naukova dumka., 212.