

УДК 626.627

Дем'янюк А.В., асистент, Герасенко Д.О., ст. 5 курсу ФГТБ та ГЕ  
(Національний університет водного господарства та природокористування,  
м. Рівне)

### ЙМОВІРНІСНА ОЦІНКА СТІЙКОСТІ ВОДОЗЛИВНОЇ ГРЕБЛІ КРЕМЕНЧУЦЬКОГО ГІДРОВУЗЛА

Представлено ймовірнісну оцінку стійкості водозливної греблі Кременчуцького гідровузла, отриману на основі результатів розрахунків за методом граничних станів.

Представлена вероятностная оценка устойчивости водосливной плотины Кременчугского гидроузла, полученную на основе результатов расчетов по методу предельных состояний.

The probability assessment of spillway dam stability (Kremenchuk hydroelectric power plant complex) based on results of calculation by ultimate limit states method is presented.

В практиці інженерних розрахунків при оцінці стійкості споруд використовується метод граничних станів, згідно якого споруда вважається стійкою, якщо для неї виконується умова [1]

$$\gamma_{lc} \cdot N \cdot \gamma_f \leq R \left( \frac{1}{\gamma_{m,g}} \right) \frac{\gamma_c}{\gamma_n}$$

або

$$k_{p,s} \geq [k_s], \quad (1)$$

де  $[k_s]$  – допустиме значення коефіцієнта стійкості, значення якого задається залежно від класу споруди, виду навантажень та граничних станів;

$k_{p,s}$  – розрахункове значення коефіцієнта стійкості; визначається як співвідношення узагальнених сил опору  $R$  до узагальненого силового впливу  $N$

$$k_{p,s} = \frac{R \left( \frac{1}{\gamma_{m,g}} \right)}{N \cdot \gamma_f}; \quad (2)$$

$\gamma_f, \gamma_{m,g}, \gamma_{lc}, \gamma_c, \gamma_n$  – коефіцієнти відповідно надійності за навантажен-

нями, надійності за матеріалами (грунтами), поєднання навантажень, умов роботи і надійності.

**Сили визначаються** на основі даних про показники властивостей матеріалів та ґрунтів, значення яких приблизні і характеризуються стохастичною (імовірнісною) невизначеністю, тобто ці характеристики і визначені на їх основі коефіцієнт стійкості  $k_s$  є величинами випадковими.

Розрахунковим значенням узагальнених силових впливів та узагальненої несучій здатності приписуються певні ймовірності: для навантажень – ймовірності того, що дійсні значення будуть не більшими, для несучої здатності – не меншими за розрахункові. Для першої групи граничних станів ці ймовірності, незалежно від класу споруди, становлять 0,95 [2]. Таке ж значення ймовірності може бути приписане і розрахунковому значенню  $k_{p,s}$ , отриманому за формулою (2), тобто

$$P(k_s \geq k_{p,s}) = 0,95, \quad (4)$$

де  $k_s$  – дійсне значення коефіцієнта стійкості.

Відповідно, ймовірність реалізації граничного стану

$$P(k_s < 1) = 1 - P(k_s \geq k_{p,s}) = 0,05. \quad (5)$$

Така оцінка надійності справедлива для випадку, коли споруда знаходиться власне у граничному стані, тобто

$$R\left(\frac{1}{\gamma_{m,g}}\right) = N \cdot \gamma_f \quad (6)$$

або за формулою (2)

$$k_{p,s} = 1.$$

Проте, згідно ДБН [1] допустиме значення коефіцієнта стійкості для всіх розрахункових випадків  $[k_s] > 1$ . При цьому ймовірність того, що умова стійкості не буде виконана, тобто  $P(k_s < 1)$  буде меншою за 0,05.

Задачею ставиться ймовірнісна оцінка стійкості водозливної греблі Кременчуцького гідровузла, м. Світловодськ. Висота споруди – 12,0 м, ґрунт основи – граніти. Клас капітальності – I.

Визначення коефіцієнту стійкості проводилось для чотирьох експлуатаційних випадків: основного (I-й) і трьох особливих – стояння рівня ФПР у верхньому б'єфі (II-й), порушення роботи протифільтраційного обладнання (III-й) і дії сейсмічного навантаження (IV-й). Для гребель на скельній основі розрахунок стійкості може проводитися за декількома схемами [1, 3], зокрема за схемою зсуву по плоскій поверхні та схемою поперечного зсуву. Значення коефіцієнта стійкості для всіх випадків, отримані розрахунком за обома згаданими схемами, наведено в табл. 1.

Ймовірність випадкової величини визначають за відомим законом її розподілу та його параметрами: математичним сподіванням  $E(k_s)$  та стандартаром  $\sigma(k_s)$ .

Припускаючи, що випадкова величина  $k_s$  підпорядковується нормальному

закону розподілу, його параметри можуть бути визначені за формулами:

$$E(k_s) = k_{p,s} - u_p \cdot \sigma(k_s), \quad (7)$$

$$\sigma(k_s) = \frac{k_{p,s}}{u_p + 1/C_v(k_s)}, \quad (8)$$

Таблиця 1

Параметри нормального закону розподілу для  $k_s$

Найменування величини	Розрахункові випадки			
	I-й (осн.)	II-й (особл.)	III-й (особл.)	IV-й (особл.)
$C_v(R)$	0,15	0,15	0,15	0,16
$C_v(N)$	0,07	0,09	0,01	0,01
$C_v(k_s)$	0,16	0,17	0,15	0,16
$k_{s,p}$ плоск.зсуб	1,40	2,04	1,48	1,27
$\sigma(k_s)$	0,31	0,49	0,29	0,28
$E(k_s)$ плоск.зсуб	1,91	2,84	1,96	1,74
$k_{s,p}$ попер.зсуб	1,83	2,30	1,91	1,81
$\sigma(k_s)$	0,41	0,55	0,38	0,40
$E(k_s)$ попер.зсуб	2,51	3,21	2,53	2,48
Зважена оцінка $E(k_s)$	2,09	2,95	2,13	1,96
Допустиме значення $[k_s]$	1,39	1,125	1,125	1,02

$$C_v(k_s) = \sqrt{C_v^2(R) + C_v^2(N)}, \quad (9)$$

де  $u_p$  – квантиль нормального розподілу довірчої ймовірності  $p$ ; для  $p = 0,95$   $u_p = -1,645$ ;

$C_v(k_s)$ ,  $C_v(R)$ ,  $C_v(N)$  – коефіцієнти варіації випадкових величин  $k_s$ ,  $R$  та  $N$ .

Коефіцієнти варіації узагальненої несучої здатності  $R$  та узагальненого силового впливу  $N$  можна оцінити за формулами [2]:

$$C_v(R) = \sqrt{\sum_i w^2(\xi_{i,R}) C_v^2(\xi_{i,R})}, \quad (10)$$

$$C_v(N) = \sqrt{\sum_j w^2(\xi_{j,N}) C_v^2(\xi_{j,N})}, \quad (11)$$

де  $C_v(\xi_{i,R})$ ,  $C_v(\xi_{j,N})$  – коефіцієнти варіації, відповідно,  $i$ -х показників властивостей матеріалів та ґрунтів  $\xi_{i,R}$ , що визначають узагальнену несучу здат-

ність  $R$ , та  $j$ -х параметрів навантажень  $\xi_{j,N}$ , що визначають узагальнений силовий вплив  $N$ ;

$w(\xi_{i,R})$ ,  $w(\xi_{j,N})$  – “вагові” коефіцієнти, що враховують відносний вплив  $\xi_{i,R}$ ,  $\xi_{j,N}$  на  $R$  і  $N$  відповідно

$$w(\xi_{i,R}) = \frac{1}{k_S} \cdot \frac{\partial k_S}{\partial \xi_{i,R}}, \quad (12)$$

$$w(\xi_{j,N}) = \frac{1}{k_S} \cdot \frac{\partial k_S}{\partial \xi_{j,N}}. \quad (13)$$

Так, для схеми плоского зсуву розрахункова несуча здатність визначається за залежністю [1]

$$R = (G + P_{nan} + W - P_n) \cdot tg\phi + cA, \quad (14)$$

де  $G, P_{nan}, W, P_n$  – сили, відповідно, ваги (конструкцій, затворів), вертикального тиску наносів, вертикального гідростатичного тиску, повного протитиску;

$tg\phi, c$  – коефіцієнт тертя та питоме зчеплення ґрунту основи;

$A$  – площа розрахункової поверхні зсуву.

Після підстановки (12) в (10), з урахуванням переліку діючих сил та характеристик ґрунту, що входять до залежності (14), коефіцієнт варіації узагальненої несучої здатності  $R$

$$C_v(R) = \frac{1}{k_S} \sqrt{\left(\frac{\partial k_S}{\partial \xi_G}\right)^2 \cdot C_v^2(G) + \left(\frac{\partial k_S}{\partial \xi_{P_{nan}}}\right)^2 \cdot C_v^2(P_{nan}) + \left(\frac{\partial k_S}{\partial \xi_W}\right)^2 \cdot C_v^2(W) + \left(\frac{\partial k_S}{\partial \xi_P}\right)^2 \cdot C_v^2(P) + \dots + \left(\frac{\partial k_S}{\partial \xi_\phi}\right)^2 (\xi_\phi) \cdot C_v^2(\phi) + \left(\frac{\partial k_S}{\partial \xi_c}\right)^2 \cdot C_v^2(c)}. \quad (15)$$

Узагальнений силовий вплив

$$N = W_1 + E_{nan} + W_{xe} + S, \quad (16)$$

де  $W_1, E_{nan}, W_{xe}, S$  – сили відповідно горизонтального гідростатичного тиску, горизонтального тиску наносів, хвильового тиску, сейсмічна сила.

Після підстановки (13) в (11), з урахуванням переліку діючих сил, що входять до залежності (16), коефіцієнт варіації узагальненого силового впливу  $N$

$$C_v(N) = \frac{1}{k_S} \sqrt{\left(\frac{\partial k_S}{\partial \xi_{W_1}}\right)^2 \cdot C_v^2(W_1) + \left(\frac{\partial k_S}{\partial \xi_{E_{nan}}}\right)^2 \cdot C_v^2(E_{nan}) + \left(\frac{\partial k_S}{\partial \xi_{W_{xe}}}\right)^2 \cdot C_v^2(W_{xe}) + \left(\frac{\partial k_S}{\partial \xi_S}\right)^2 \cdot C_v^2(S)}. \quad (17)$$

Значення  $C_v(\xi_{i,R})$ ,  $C_v(\xi_{j,N})$  параметрів, що входять до формул (15), (17) призначені з урахуванням експертних оцінок [4] (табл. 2).

При розрахунку стійкості за різними схемами відзначається варіація

значень  $k_{p,s}$ . Оскільки значення  $k_{p,s}$ , отримані розрахунком за схемою поперечного зсуву, суттєво перевищують отримані за схемою плоского зсуву, для визначення  $k_{p,s}$  за результатами розрахунків за обома схемами використовувалось не середнє їх значення, а зважена оцінка.

Таблиця 2

Прийняті значення коефіцієнтів варіації  $C_V$

Показники	Коефіцієнт варіації $C_V$	Показники	Коефіцієнт варіації $C_V$
Коефіцієнт тертя	0,07	Протитиск	0,25
Питоме зчеплення	0,25	Параметри вітрових хвиль	0,3
Гідростатичний тиск	0,02	Сейсмічні прискорення	0,35
Власна вага	0,05	Тиск наносів	0,3
Фільтраційний тиск	0,25		

Кожному із значень була приписана вага залежно від того, більш чи менш ймовірною вважається розрахункова схема зсуву

$$E(k_s) = 0,7 \cdot E(k_{s_{\text{плоск. зсув}}}) + 0,3 \cdot E(k_{s_{\text{попер. зсув}}}) \quad (18)$$

Всі отримані значення наведено в табл. 1.

Ймовірність того, що дійсне значення  $k_s$  виявиться меншим 1 (тобто, умова стійкості не виконається) знайдеться як ордината інтегральної функції нормального розподілу при  $k_s=1$

$$P(k_s < 1) = \Phi(k_s = 1; E(k_s); \sigma(k_s)), \quad (19)$$

де  $\Phi(*)$  – інтегральна функція ймовірності нормального закону.

Крім того, кожному із розрахункових випадків поєднання навантажень може бути приписана ймовірність перевищення розрахункових величин.

Наприклад, для основного розрахункового випадку при пропуску повені дійсне значення коефіцієнта стійкості виявиться меншим за розрахункове значення  $k_{p,s}$ , якщо забезпеченість повені виявиться меншою за прийняте розрахункове значення 0,1%, що призведе до підвищення рівня води у водосховищі понад НПР. Ймовірність реалізації граничного стану в такому випадку

$$P_1 = P(Q > Q_{0,1\%}) \cdot P(k_s < 1).$$

Аналогічно, для решти розрахункових випадків:

II-го – пропуску повені забезпеченістю 0,01%

$$P_2 = P(Q > Q_{0,01\%}) \cdot P(k_s < 1);$$

III-го – порушення роботи протифільтраційного обладнання

$$P_3 = P(h_3 > h_{3,p}) \cdot P(k_s < 1),$$

де  $h_3, h_{3,p}$  – дійсне та розрахункове значення фільтраційних напорів;

IV-го – розрахункового землетрусу

$$P_4 = P(3) \cdot P(k_s < 1),$$

де  $P(3)$  – ймовірність землетрусу.

За статистичними даними, порушення роботи протифільтраційного обладнання відмічається після 20-25 років експлуатації у 30%, а періодичність повторення розрахункового землетрусу в 6 балів – 1 раз на 100 років.

Отримані значення ймовірності реалізації граничного стану для всіх випадків наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Ймовірність реалізації граничного стану

Найменування величини	Розрахункові випадки			
	I-й (осн.)	II-й (особл.)	III-й (особл.)	IV-й (особл.)
Зважена оцінка $k_s$	2,09	2,06	2,13	1,96
$P(k_s < 1)$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
Ймовірність перевищення розрахункових величин	$P(Q > Q_{0.1\%}) = 10^{-3}$	$P(Q > Q_{0.01\%}) = 10^{-4}$	$P(h_3 > h_{3,p}) = \frac{1}{25} \cdot 0,3$	$P(3) = 10^{-2}$
Ймовірність реалізації граничного стану	$1 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$

Розглянуті розрахункові випадки поєднання навантажень є несумісними і складають повну групу подій, ймовірність якої

$$P = \sum_{i=1}^n P_i, \quad (20)$$

$$P = 1,8 \cdot 10^{-5}.$$

Отримане значення ймовірності виникнення аварії менше за допустиме для споруд I класу капітальності  $5 \cdot 10^{-5}$  [5].

Надійність споруди по стійкості

$$V = 1 - P, \quad (21)$$

$$V = 0,99998.$$

Отримане значення є загальною сукупною оцінкою надійності споруди за стійкістю, зробленою за різними розрахунковими випадками поєднання навантажень та різними розрахунковими схемами.

- СНиП 2.02.02 – 85 Основания гидротехнических сооружений. – М.: Стройиздат, 1987. – 60 с.
- Стефанишин Д.В. Методика оцінки ймовірностей аварій на гідроспорудах на основі рандомізації результатів розрахунків споруд за методом граничних станів // Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво. – 2009. – Вип. 34. 3. П 13-83
- Проектирование оснований гидротехнических сооружений. Пособие к СНиП II-16-76. – Л.: Изд-во ВНИИГ. – 1984. – 403 с.
- Беллендир Е.Н., Ивашинцов Д.А., Стефанишин Д.В. и др. Вероятностные методы оценки надежности грунтовых гидротехнических сооружений. В 2-х томах. – СПб.: ОАО ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2003, 2004. – Т. 1. 5. ДБН В.2.4-3:2010. Гідротехнічні споруди. Основні положення – К., 2010. – 40 с.

Рецензент: д. т. н., проф. Хлапук М.М. (НУВГП)