

УДК 631.6:627.417.4

Гурин В. А., д.т.н., проф., Нестерук Й. П., к.т.н., доцент,  
Радчук М. І., аспірант (Національний університет водного  
господарства та природокористування, м. Рівне)

## ІНДЕКС НАДІЙНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОНИХ ПЛИТ КРІПЛЕНЬ УКОСУ ВОДОГОСПОДАРСЬКИХ ОБ'ЄКТІВ

**Викладені основні показники, що впливають на надійність гідротехнічних споруд та виконаний імовірнісний аналіз надійності залізобетонних плит облицювання на основі індексу надійності спираючись на натурні обстеження.**

**Ключові слова:** надійність гідротехнічних споруд, індекс надійності, залізобетонні плити, функція ефективності, обстеження.

**Бетонне облицювання берегів** водних об'єктів є універсальним кріпленням, що забезпечує водонепроникність, захищає від розмивання, збільшує пропускну спроможність. Залізобетонне облицювання укосу відноситься до гідротехнічних споруд, застосовується для захисту укосу від деформації ґрунтів. Розрахунковий строк служби такого облицювання на торф'яних ґрунтах складає 40 років [1].

Для визначення працездатності гідротехнічних споруд розрахунковою умовою реалізації відмови в узагальненому вигляді [2] записуються у виді функції ефективності  $g$ , яка враховує параметри  $\tilde{x}_i$ , що характеризують всі випадкові значення впливів  $\tilde{A}$ , міцнісних характеристик  $\tilde{R}$ , геометричних характеристик, та інші фактори:

$$g(\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_n) < 0. \quad (1)$$

Основним показником надійності є імовірність відмови  $P_f$ , яка може виражатися через функцію ефективності

$$P_f = P_{rob} \{g(\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_n) < 0\}, \quad (2)$$

де символ  $Prob\{A\}$  визначає імовірність реалізації випадкової події  $A$ .

Різні наявні методи калібрування розрахункових формул для часткового коефіцієнта (граничні стани) та співвідношення між ними зводяться до імовірнісних калібрувальних процедур для часткових коефіцієнтів [3], які можуть бути розподіленими на два головних класи:

- повністю імовірнісні методи;
- методи надійності першого порядку.

Повністю імовірнісні методи надають, в принципі, вірні відповіді

на поставлені питання стосовно надійності. Методи надійності першого порядку використовуються не часто при калібруванні норм проєктування, оскільки зазвичай просто недостатньо статистичних даних.

Повністю імовірнісні методи використовують добре вивчені апроксимації та надають результати, які при використанні в більшості конструкторських прикладних задач розглядаються достатньо точно.

В обох методах слід ідентифікувати міру надійності з імовірністю:

$$P_s = (1 - P_f), \quad (3)$$

де  $P_f$  – імовірність руйнування стосовно розглянутої формули (2) руйнування в межах відповідного базового періоду. Якщо підрахована імовірність руйнування є більшою ніж попередньо задана величина  $P_0$ , то конструкція повинна розглядатися як ненадійна.

Імовірність руйнування та відповідний індекс надійності є тільки номінальними значеннями, які необов'язково представляють дійсні оцінки руйнування, але використовуються як робочі величини для цілей калібрування та порівняння рівнів надійності конструкцій [4].

**Об'єктом дослідження** є залізобетонні плит кріплення укосів регульованого русла р. Устя в межах м. Рівного.

Всі залізобетонні плит, що досліджувалися [1], були розбиті з інтервалом  $X_i$ , де в кожному інтервалі визначені плити, що мають пошкодження  $N_i$  дані значення мають імовірнісний характер.

**Нанесення точок емпіричної функції** розподілу на імовірнісну сітку показав, що найкращим варіантом, в нашому випадку, є нормальний розподіл (див. рис. 1).

Значення емпіричної функції розподілу випадкової величини відмов в точках визначається за формулою [3]:

$$F_e(N_i) = \frac{r_i}{N + 1}, \quad (4)$$

де  $N$  – загальна кількість відмов;  $r_i$  – частота появи відмов.

Розрахунковим рівнянням прямої для побудови графіка функції розподілу використовується залежність:

$$U_F = \frac{1}{\sigma_x}(x - a), \quad (5)$$

де  $\sigma_x$  і  $a$  – параметри нормального розподілу;  $U_F$  – квантиль функції  $F(x)$  у точці  $x$ .

З рівняння (2) бачимо, що функція  $y = U_F$  є лінійною відносно  $x$ , тобто

$$y = U_F = \frac{1}{\sigma_x} (x - a) = f(x) \cdot \quad (6)$$

Таблиця 1

Результати розрахунку за нормальним законом розподілу

№ з/п	Інтервал $X_i$	Число пошкоджених плит $N_i$	Пошкодження, що відповідають числу плит $A_i$	Емпірична функція $F_e(x)$	Теоретична функція $F_m(x)$
1	10,00	5	5	0,029	0,055
2	20,00	6	11	0,063	0,067
3	30,00	5	16	0,091	0,081
4	40,00	5	21	0,120	0,097
5	50,00	4	25	0,143	0,115
6	60,00	4	29	0,166	0,136
7	70,00	5	34	0,194	0,159
8	80,00	5	39	0,223	0,184
9	90,00	5	44	0,251	0,212
10	100,0	4	48	0,274	0,242
11	110,0	5	53	0,303	0,274
12	120,0	4	57	0,326	0,308
13	130,0	5	62	0,354	0,344
14	140,0	5	67	0,383	0,382
15	150,0	5	72	0,411	0,421
16	160,0	6	78	0,446	0,460
17	170,0	5	83	0,474	0,500
18	180,0	6	89	0,509	0,540
19	190,0	4	93	0,531	0,579
20	200,0	7	100	0,571	0,618
21	210,0	7	107	0,611	0,655
22	220,0	5	112	0,640	0,691
23	230,0	5	117	0,669	0,726
24	240,0	7	124	0,709	0,758
25	250,0	5	129	0,737	0,788
26	260,0	5	134	0,766	0,816
27	270,0	6	140	0,800	0,841
28	280,0	5	145	0,829	0,864
29	290,0	6	151	0,863	0,885
30	300,0	4	155	0,886	0,903
31	310,0	5	160	0,914	0,919

продовження табл. 1

32	320,0	4	164	0,937	0,933
33	330,0	5	169	0,966	0,945
34	338,0	5	174	0,994	0,954

Для шкали  $F(x) = U_F$  приймаємо значення  $F_{\min}=0.001$  і  $F_{\max}=0.999$ .

Квантілі функції  $U_F$  визначаються за допомогою таблиць [3].

Нанесення точок емпіричної функції показало, що функція апроксимується нормальним розподілом так, що емпіричні точки розміщуються біля прямої теоретичної функції з кутовим відхиленням  $1/\sigma_x$ .

Пряма  $Fm(x)$  перетне вісь абсцис у точці  $x=a$ . Точніше параметри  $a$  і  $\sigma_x$  визначаються за формулами:

$$a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i, \quad (7)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (N_i - a)^2}. \quad (8)$$

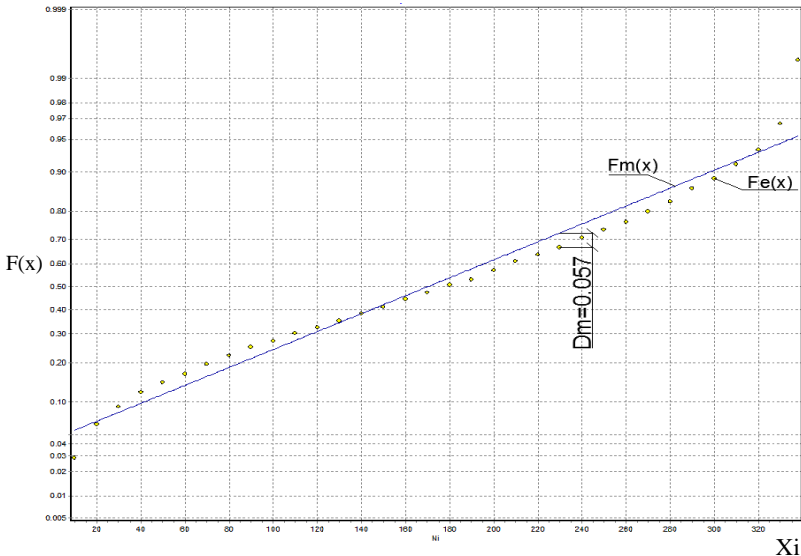


Рис. 1. Графік розподілу емпіричної і теоретичної функцій надійності залізобетонних плит кріплення укусу

В нашому випадку (рис. 1) оцінка здійснюється за критерієм Колмогорова

$$Dm = \max |Fe(x) - Fm(x)| \leq Pq / N^{0.5}, \quad (9)$$

де  $Fe(x)$  і  $Fm(x)$  – відповідно величини емпіричної і теоретичної функції розподілу в точці максимальної різниці між ними;  $Pq$  – параметр критичних значень, при рівні значущості  $q=0.05$ ,  $Pq=1.358$ ;  $N$  – кількість випадкових величин (пошкоджених плит).

$$Dm = \max |Fe(230) - Fm(230)| = |0.669 - 0.724| = 0.057 ;$$

$$Pq / N^{0.5} = 1.358 / 174^{0.5} = 0.103 .$$

Отже, закон розподілу випадкової величини задовольняє умову (9) і має наступні параметри: математичне сподівання випадкової величини  $Ax = 170.0$ ; середнє квадратичне відхилення випадкової величини  $Gx = 99.98$ ;

Індекс надійності, який пов'язаний з імовірністю руйнування  $P_f$  (10) і є альтернативною мірою надійності [2], визначається за формулою (12)

$$P_f = \Phi(-\beta), \quad (10)$$

де  $\Phi$  – кумулятивна функція стандартного нормального розподілення.

Зв'язок між  $P_f$  та  $\beta$  наведений у таблиці 2.

Таблиця 2

Зв'язок між  $\beta$  та  $P_f$

$P_f$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$
$\beta$	13	2,32	3,09	3,72	4,27	4,75	5,20

Імовірність руйнування  $P_f$  може виражатись через функцію ефективності  $g$ . Вважається, що конструкція витримає негативні впливи без руйнування, якщо  $g > 0$ , і буде зруйнована, якщо  $g \leq 0$  тоді:

$$P_f = P_{rob}(g \leq 0). \quad (11)$$

Якщо функція має нормальне розподілення, індекс надійності  $\beta$  визначається, за формулою[2]

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g}, \quad (12)$$

де  $\mu_g$  – середнє значення функції ефективності та  $\sigma_g$  – відхилення, так що

$$\mu_g - \beta\sigma_g = 0. \quad (13)$$

Використовуючи дану умову, отримаємо:

$$P_f = P_{rob}(g \leq 0) = P_{rob}(g \leq \mu_g - \beta\sigma_g) = 0. \quad (14)$$

Надійність залежно від імовірності руйнування визначається за фо-

рмулою

$$P_s = (1 - P_f). \quad (15)$$

Для знаходження середнього значення функції ефективності для залізобетонних плит облицювання укосу використовуємо формулу:

$$\mu_g = A_x / \left( \frac{\sum_{i=1}^n N_i - A_i}{n} \right) = 170.0 / \left( \frac{164}{34} \right) = 35.24. \quad (16)$$

Стандартне відхилення визначається як квадратний корінь з значення квадратичного відхилення випадкової величини  $G_x$

$$\sigma_g = \sqrt{G_x} = \sqrt{99.98} = 9.999. \quad (17)$$

Визначаємо індекс надійності за формулою (5)

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} = \frac{35.24}{9.999} = 3.52.$$

Порівнюємо фактичні значення індексу надійності з мінімальними рекомендованими величини для індексу надійності, який є пов'язаним з класами надійності та для об'єктів СС1 та розрахункового періоду у 40 років  $\beta_i^{ex} = 3.48$

$$\beta = 3.52 \geq \beta_i^{ex} = 3.48. \quad (18)$$

За таблицею 2 визначаємо значення надійності  $P_f=0,00015$ , тоді надійність залізобетонних плит кріплення укосу

$$P_s = (1 - P_f) = 1 - 0,00015 = 0,99985.$$

### Висновки.

Індекс надійності залізобетонних плит кріплення укосу дозволяє встановити точкову надійність за даними натурних обстежень, для об'єкта, який апроксимується нормальним розподілом.

Розрахунок надійності залізобетонних плит після 40 років експлуатації показує, що матеріали та технологія виготовлення даних плит, дозволяє віднести їх до високонадійних елементів.

Порівнявши значення індексу надійності з рекомендованими величинами у нормативних документах свідчать, що залізобетонні плити задовольняють встановлене значення та задовольняють норми надійності для розрахункового періоду у 40 років.

1. Гурин В. А. Оцінка надійності ребристих плит кріплення укосу водогосподарських об'єктів / Гурин В. А., Радчук М. І. // Вісник НУВГП. – Вип. 1(61). – Рівне, 2013. – 210 с. 2. ДСТУ-Н Б В.1.2-13:2008 (EN 1990:2002, IDN) «ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ» – Київ : Мінрегіонбуд України 2009.

3. Науменко И. И. Надежность сооружений гидромелиоративных систем / И. И. Науменко. – Киев, 1994. – 424 с. 4. ДБН В.1.2-14-2009 «Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ» – Київ : Мінрегіонбуд. – України 2009 р. 5. ГОСТ Р 54523-2011 «Портовые гидротехнические сооружения правила обследования и мониторинга технического состояния». – М. : Стандартиформ 2012. 6. ДБН В.2.4-3:2010 «Гідротехнічні споруди. Основні положення». – К. : Мінрегіонбуд України, 2010.

Рецензент: д.т.н., професор Ткачук М. М. (НУВГП)

---

**Huryn V. A., Doctor of Engineering, Professor, Nesteruk Y. P., Candidate of Engineering, Associate Professor, Radchuk M. I., Post-graduate Student** (National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne)

### **RELIABILITY INDEX OF REINFORCED SLOPES PLATES MOUNTING WATER MANAGEMENT FACILITIES**

**The basic parameters that influence the reliability of hydraulic structures and performed a probabilistic reliability analysis of reinforced concrete slabs lining based on full-scale test. Probabilistic analysis is made based on the reliability index is governed by regulations.**

**Keywords:** reliability of hydraulic structures, code reliability, concrete slabs, function performance.

---

**Гурин В. А., д.т.н., проф., Нестерук И. П., к.т.н., доцент, Радчук М. И., аспирант** (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

### **ИНДЕКС НАДЕЖНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ КРЕПЛЕНИЙ ОТКОСОВ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ**

**Изложены основные показатели, влияющие на надежность гидротехнических сооружений, а также выполнен вероятностный анализ надежности железобетонных плит облицовки опираясь на натурные обследования. Вероятностный анализ выполнен на основе индекса надежности, который регламентируется нормативными документами.**

**Ключевые слова:** надежность гидротехнических сооружений, индекс надежности, железобетонные плиты, функция эффективности.

---