УДК 626/627 DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.174.2017.127595

ІМОВІРНІСНА ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ШЛЮЗІВ НА СКЕЛЬОВІЙ ОСНОВІ ЗА КРИТЕРІЯМИ СТІЙКОСТІ ПРОТИ ЗСУВУ, ПЕРЕКИДАННЯ І СПЛИВАННЯ КАМЕР ШЛЮЗІВ НА ПРИКЛАДІ ГІДРОВУЗЛІВ ДНІПРОВСЬКОГО КАСКАДУ

Канд. техн. наук А. О. Мозговий (ХНУБА)

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ КАМЕР ШЛЮЗОВ НА СКАЛЬНОМ ОСНОВАНИИ ПО КРИТЕРИЯМ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОТИВ СДВИГА, ОПРОКИДЫВАНИЯ И ВСПЛЫТИЯ НА ПРИМЕРЕ ГИДРОУЗЛОВ ДНЕПРОВСКОГО КАСКАДА

Канд. техн. наук А. А. Мозговой (ХНУСА)

PROBABILISTIC RELIABILITY ASSESSMENT OF GATE CHAMBERS ON ROCK FOUNDATION BY THE CRITERIA OF STRENGTH, OVERTURNING AND STABILITY AGAINST DISPLACEMENT OF THE GATE CHAMBERS ON THE EXAMPLE OF HYDRO SCHEMES OF THE DNIEPER CASCADE

Cand. of techn. sciences A. Mozgovuy

У даній роботі набув подальшого розвитку метод оцінки надійності камер шлюзів за критеріями втрати стійкості проти зсуву, перекидання, а також спливання. При цьому враховано випадковий характер зовнішніх навантажень і впливів, які під час експлуатації сприймають камери шлюзів, а також кореляційні залежності між ними. Також ураховано випадковий характер механічних властивостей грунту основи і кореляційні залежності між

ними. Виконано чисельну імовірнісну оцінку ризику досягнення граничного стану камер шлюзів на скельовій основі гідровузлів Дніпровського каскаду. Метод може застосовуватись при імовірнісних розрахунках надійності каскадів гідровузлів.

Ключові слова: *камера шлюзу, природні фактори, імовірнісна оцінка надійності, каскад гідровузлів.*

В данной работе получил дальнейшее развитие метод оценки надежности камер шлюзов по критериям потери устойчивости против сдвига, опрокидывания, а также всплытия. При этом учтен случайный характер внешних нагрузок и воздействий, которые в процессе эксплуатации воспринимают камеры шлюзов, а также корреляционные зависимости между ними. Также учтен случайный характер механических свойств грунтов основания и корреляционные зависимости между ними. Выполнена численная вероятностная оценка риска достижения предельного состояния камер шлюзов на скальном основании гидроузлов Днепровского каскада. Метод может использоваться при вероятностных расчетах надежности каскадов гидроузлов.

Ключевые слова: *камера шлюза, природные факторы, вероятностная оценка надежности, каскад гидроузлов.*

This work further develops the method for assessing reliability of gate chambers by the criteria of stability loss against displacement and overturning, as well as floating up. The work considers the random nature of the external loads and impacts, which the gate chambers bear during operation, as well as correlations between them. It also considers the random nature of mechanical properties of the foundation soils and correlations between them.

For solving this problem, the method of statistical tests (Monte Carlo method) was applied, which is widely used for assessing probabilistic reliability of complex technical systems. A numerical probabilistic assessment of the risk when the gate chambers on rock foundation at hydro schemes of the Dnieper Cascade reach the boundary conditions has been performed.

In the future, the proposed method could be used in probabilistic reliability analyses of hydraulic structures and cascades of hydro schemes, taking into account the correlations between natural factors: hydrological characteristics, ice, and wind, as well as temperature loads and impacts.

Key words: *gate chamber, natural factors, probabilistic reliability assessment, cascade of hydro schemes.*

Вступ. Розрахунок і проектування сучасних гідротехнічних споруд потребують оцінки їх безпеки і надійності на основі імовірнісних методів [1-2]. Судноплавні шлюзи на скельовій основі належать до найбільш поширених спеціальних типів споруд гідровузлів комплексного призначення як в Україні, так і у світі. Функціональним призначенням шлюзів є пропуск суден через створ гідровузла. Основними конструктивними елементами шлюзів є голови, камери і ворота.

Дана робота спрямована на оцінку надійності камер шлюзів на скельовій основі, які входять до складу споруд водопідпірного фронту на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. Надійність судноплавних шлюзів впливає на надійність гідровузла і каскаду гідровузлів у цілому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні методи оцінки експлуатаційної надійності гідротехнічних споруд, статистичні методи аналізу їх стану, розробку критеріїв їх надійності розглянуто у роботах О. І. Вайнберга [3],

О. М. Фінагенова [4], С. Г. Шульмана [4], Є. М. Дзюбанова [5], Н. Ю. Дмитрієва [5], М. П. Лєвіної [5], В. Б. Штільмана [5], Л. Д. Лєнтяєва [6], Л. В. Смирнова [6], Ц. Є. Мірцхулави [7], Д. В. Стефанішина [8]. Аналіз ризику у гідротехніці, прогнозування аварійності споруд розглянуто у роботах А. Б. Векслера [9], Д. А. Івашинцова [9], Д. В. Стефанішина [9], N.S. Arunraj [10], S. Mandal [10], J. Maiti [10], L. Altarejos-García [11], I. Escuder-Bueno [11], A. Serrano-Lombillo [11], A. Gaspar [12], F. Lopez-Caballero [12], A. Modaressi-Farahmand-Razavi [12], A. Lupoi [13], C. Callari [13], O. Morales-Nápoles [14], D. J. Delgado-Hernández [14], D. De-León-Escobedo [14], H. Z. Su [15], J. Hu [15], Z. P. Wen [15], L. Peyras [16], C. Carvajal [16], H. Felix [16], Z. Y. Wu [17], Y. L. Li [17], J. K. Chen [17], Y. Li [18], Y. Sun [18], B. Li [18], S. E. Cho [19], M. Calamak [20], A. M. Yanmaz [20], M. Alembagheri [21], M. Seyedkazemi [21].

Не розв’язаною раніше частиною проблеми є те, що існуючі методи оцінки надійності гідротехнічних споруд, зокрема судноплавних шлюзів на скельовій основі, не ураховують певні кореляційні залежності [22], які існують між природними факторами, котрі є визначальними при оцінці надійності каскадів гідровузлів [23–24].

Визначення мети та завдання дослідження. Метою роботи є апробація запропонованого алгоритму на камерах шлюзів гідровузлів Дніпровського каскаду із отриманням чисельного значення імовірності виникнення аварії на зазначених гідротехнічних спорудах.

Завданням роботи є розробка алгоритму імовірнісної оцінки надійності камер судноплавних шлюзів на скельовій основі з урахуванням кореляційних залежностей, які існують між природними факторами, а саме – кореляційні залежності між гідрологічними характеристиками водотоку, температурою і амплітудою коливань температур зовнішнього повітря, кореляційні залежності між характеристиками ґрунту основи.

Основна частина дослідження. Нижче наведено характеристики шлюзів на скельовій основі гідровузлів Дніпровського каскаду.

Трикамерний шлюз Дніпровського гідровузла. Верхня голова шлюзу примикає до глухих прольотів водозливної греблі. Камери шлюзу врізані в скельну основу, верхні третини стінок за висотою знаходяться у відсипках з гірської маси. Висота стінок першої камери 20.8 м, другої камери – 20.3 м, третьої камери – 18.8 м. Дно камер шлюзу врізане в скелю. Стіни камер – прямокутного профілю із консолями, а також – трапецієподібного профілю (див. рис. 1). Клас наслідків споруд гідровузла ССЗ.

Однокамерний шлюз Дніпровського гідровузла. Ширина камери – 18 м, довжина – 283 м, висота – 44,9 м. В основі залягають слабкотріщинуваті граніти. Стіни камери виконані у вигляді тонких бетонних облицювань, заанкерених у скельний масив, у вигляді масивних бетонних облицювань і кутикових залізобетонних підпірних стінок (див. рис. 2). Клас наслідків споруд гідровузла ССЗ.

Шлюз Кременчуцького гідровузла. Шлюз розташовано у верхньому б′єфі, обсипано грунтом до позн. +82.35 м і спряжено із будівлею гідроелектростанції за допомогою земляної вставки. Корисні габарити камери шлюзу 269.10×18 м. Мінімальна глибина в камері – 3.65 м. Споруди шлюзу врізані у скельний масив на глибину від 11 до 21 м. Стіни камери у межах скелі виконані у вигляді бетонних облицювань, а вище – у вигляді залізобетонних стін кутикового профілю (див. рис. 3). Дно камери шлюзу рамної конструкції. Клас наслідків споруд гідровузла ССЗ.

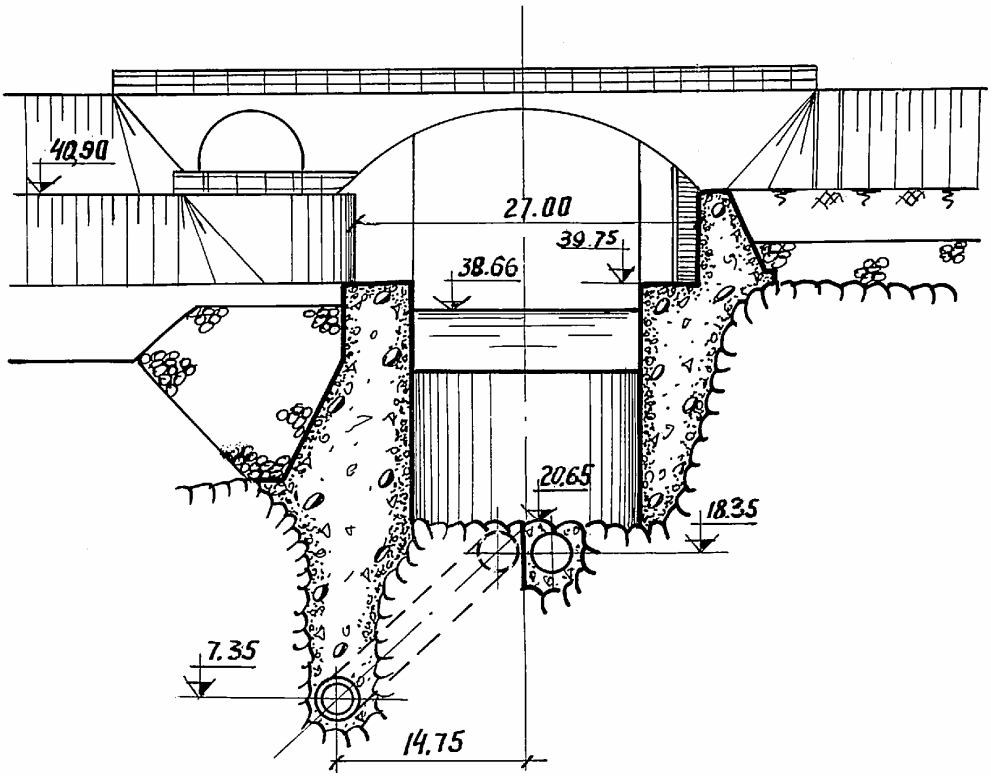

Рис. 1. Друга камера трикамерного Дніпровського шлюзу (розміри у метрах)

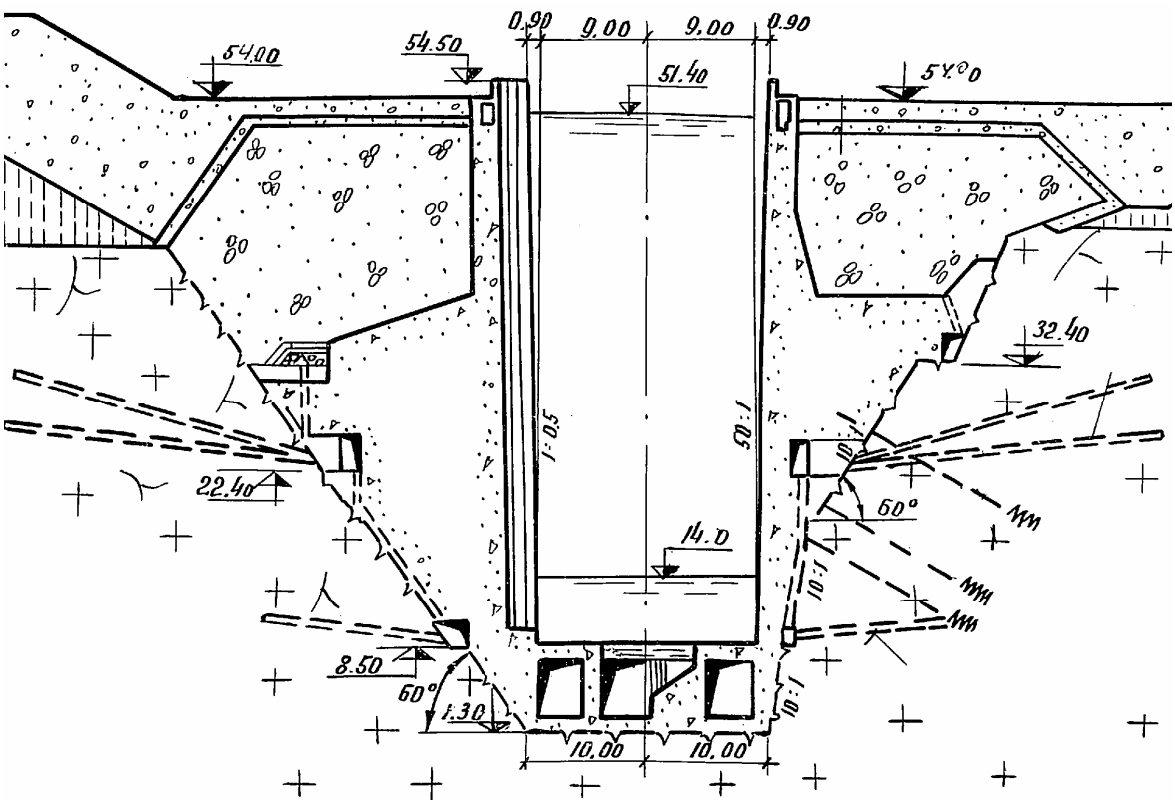

Рис. 2. Камера однокамерного Дніпровського шлюзу (розміри у метрах)

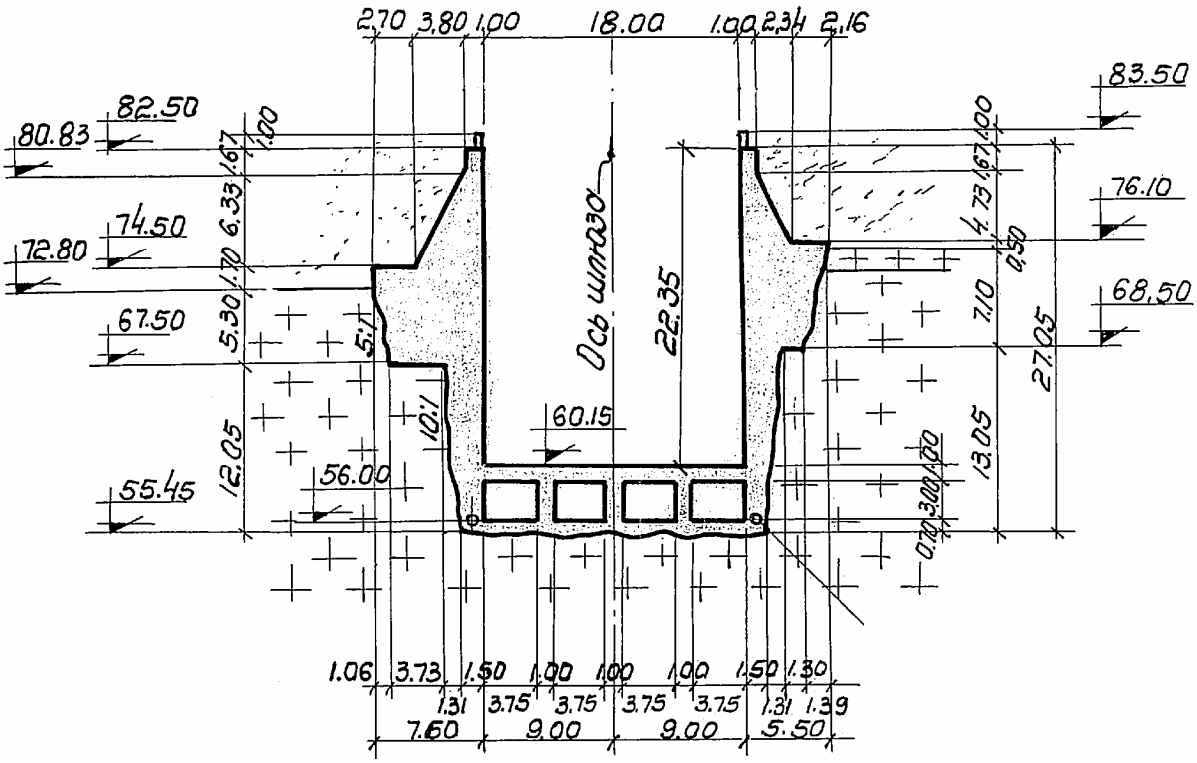

Рис. 3. Камера Кременчуцького шлюзу (розміри у метрах)

Перевірка надійності камер шлюзів за критеріями стійкості проти зсуву і спливання. Розрахунки за детерміністичною методикою виконуються для основного і особливого сполучення навантажень згідно з умовою [1]

$$\gamma_n \times \gamma_{lc} \times F \le \gamma_c \times R\,, \qquad (1)$$

де F – розрахункове значення узагальненого силового впливу з урахуванням коефіцієнта надійності за навантаженням γ_f;

R – узагальнена несівна здатність споруди чи основи;

γ_{lc} – коефіцієнт сполучення навантажень, приймається для основного сполучення навантажень γ_{lc}=1.0; для особливого сполучення навантажень γ_{lc}=0.9;

γ_c – коефіцієнт умов роботи приймається γ_c = 1.1;

γ_n – коефіцієнт надійності, приймається γ_n = 1.25 для споруд класу наслідків ССЗ.

При виконанні розрахунків розглядаються такі навантаження і впливи:

1. Власна вага споруди, у тому числі вага постійного технологічного обладнання, місце розташування якого не змінюється у процесі експлуатації.

2. Силовий вплив води з боку верхнього і нижнього б′єфів: гідростатичний тиск води з боку обернених засипок; гідростатичний тиск води в камері шлюзу; силовий вплив води, що фільтрується.

3. Температурні впливи.

4. Вага постійного технологічного обладнання, підйомних, транспортних пристроїв та інших конструкцій і механізмів.

5. Власна вага і тиск грунту обернених засипок.

6. Сейсмічні впливи.

Для оцінки ризику втрати міцності, стійкості на зсув і спливання за методом граничних станів формулу (1) доцільно подати у вигляді

$$k = \frac{R}{F} \geq k_n = \frac{\gamma_n \times \gamma_c}{\gamma_{lc}}, \qquad (2)$$

де k – розрахункове значення коефіцієнта запасу стійкості;

k_n – нормативне значення коефіцієнта запасу стійкості.

Отримано такі значення нормативних коефіцієнтів запасу стійкості при різних розрахункових випадках: для основного сполучення навантажень k_n = 1,14; для особливого сполучення навантажень k_n = 1,02.

За детерміністичною методикою на основі методу граничних станів отримано такі значення нормативних коефіцієнтів запасу стійкості при різних розрахункових випадках:

- однокамерний шлюз Дніпровського гідровузла: для основного сполучення навантажень k_c = 1.54 (коефіцієнт запасу стійкості проти зсуву), k_n = 2.26 (коефіцієнт запасу стійкості проти перекидання), $k_в$ = 3.12 (коефіцієнт запасу стійкості проти спливання); для особливого сполучення навантажень k_c = 1.47, k_n = 2.18, $k_в$ = 3.05;
- трикамерний шлюз Дніпровського гідровузла: для основного сполучення навантажень k_c = 1.45, k_n = 2.21, $k_в$ = 3.11; для особливого сполучення навантажень k_c = 1.39, k_n = 2.07, $k_в$ = 2.95;
- шлюз Кременчуцького гідровузла: для основного сполучення навантажень k_c = 1.49, k_n = 2.24, $k_в$ = 3.24; для особливого сполучення навантажень k_c = 1.42, k_n = 2.09, $k_в$ = 3.14.

Імовірнісний метод визначення ризику втрати стійкості проти зсуву, перекидання і спливання камери шлюзу. Розв'язання передбачає побудову рівняння зв'язку між вхідними і вихідними параметрами, визначення їх імовірнісних характеристик, а також визначення імовірності втрати стійкості проти зсуву, перекидання і спливання камери шлюзу.

Зазначені вище критерії настання граничного стану є статистично залежними, тому що їх виникнення обумовлене позначками рівнів води у верхньому б′єфі.

При розгляданні схеми плоского поступального зсуву по горизонтальній поверхні рівняння зв'язку має вигляд

$$k = \frac{(V - W)tg\varphi + c \cdot A_n}{F}, \qquad (3)$$

де k – коефіцієнт стійкості проти зсуву;

V – підсумок вертикальних сил, спрямованих униз;

W – підсумок вертикальних сил, спрямованих догори;

$tg\varphi$ – коефіцієнт внутрішнього тертя;

c – питоме зчеплення;

A_n – площа підошви споруди;

F – узагальнена сила зсуву.

При розрахунку на перекидання використовується рівняння зв'язку

$$k = \frac{M_{ут}}{M_{пер}}, \qquad (4)$$

де k – коефіцієнт стійкості проти перекидання;

$M_{ут}$ – момент утримуючих сил;

$M_{пер}$ – момент сил, що перекидають.

При розрахунку на спливання використовується рівняння зв'язку

$$k = \frac{V}{W}, \qquad (5)$$

де k – коефіцієнт стійкості проти спливання.

Розглядається типова камера шлюзу. Вхідними детерміністичними параметрами прийнято: площу основи камери шлюзу A_n, м^2, інші геометричні розміри, вагу допоміжного обладнання.

Випадковими вхідними величинами прийнято: щільність бетону за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації $C_{\gamma b}$ = 0.02; щільність грунту оберненої засипки за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації $C_{\gamma gr}$ = 0.06; міцність бетону на

стискання за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації C_{Rb} = 0.135.

Задається випадкова, розподілена від 0 до 1, імовірність pZ позначки рівня води Z, м, перед шлюзом. Статичний рівень води обумовлений максимальними паводковими витратами з урахуванням кореляційних залежностей між паводковими витратами по гідровузлах Дніпровського каскаду. Статистичні дані щодо забезпеченості максимальних витрат р. Дніпро у створах гідровузлів Дніпровського каскаду наведено у роботах [22, 25].

За значенням pZ визначається квантиль - позначка рівня води Z, м, перед шлюзом. Між максимальними паводковими витратами р. Дніпро у створах гідровузлів каскаду, згідно з [22], існує функціональна залежність. Тому при виконанні кожного статистичного випробовування випадкова величина імовірності pZ для шлюзів кожного гідровузла Дніпровського каскаду задається однаковою.

Задається залежність між рівнями верхнього Z_i, м, і нижнього б′єфів $Z_{НБ}$, м.

В інтервалі від 0 до 1 задається випадкова величина імовірності зважуючого протитиску в основі шлюзу pW_f. За значенням імовірності визначається квантиль – величина сили вертикального протитиску W_f, кН.

За значеннями рівнів верхнього Z_i, м, і нижнього б′єфів $Z_{НБ}$, м, визначається випадкова величина сили гідростатичного тиску з боку оберненої засипки $W_{ГЗ}$, кН.

Задається випадкова рівномірно розподілена від 0 до 1 імовірність щільності грунту оберненої засипки $p_{\rho gr}$, за якою визначається квантиль – значення щільності грунту ρ_{gr}.

Задається випадкова рівномірно розподілена від 0 до 1 імовірність коефіцієнта внутрішнього тертя $p_{tg\varphi g}$, за якою визначається квантиль – значення коефіцієнта внутрішнього тертя $tg\varphi_g$.

За значеннями ρ_g і $tg\varphi_g$ визначається сила бічного тиску грунту оберненої засипки на стінку камери шлюзу.

За імовірнісними залежностями щорічних максимально низьких середньомісячних температур за нормальним розподілом, а також щорічних максимальних амплітуд середньомісячних температур зовнішнього повітря за нормальним розподілом у місцях розташування гідровузлів визначається реактивний тиск грунту оберненої засипки [26].

В інтервалі від 0 до 1 задається випадкова величина імовірності зважуючого протитиску в основі шлюзу pW_f. За значенням імовірності визначається квантиль – величина сили вертикального протитиску W_f, кН.

На території України землетруси відбуваються унаслідок сейсмічної активності Карпат, Вранча, Криму. Для гідровузлів Дніпровського каскаду вони є статистично незалежними осередками землетрусів. Статистичні дані про їх сейсмічну активність опрацьовано у роботі [27]. За інтенсивністю землетрусу в його осередку можна визначити його інтенсивність у районі розташування гідровузла за аналітичними виразами згідно з [28].

Під час виконання одного статистичного випробовування, враховуючи статистичну незалежність осередків землетрусів, задаються випадкові щорічні імовірності сейсмічних впливів pJr, розподілені від 0 до 1, у Карпатах, Вранчі, Криму. За значенням pJr визначаються квантилі – бальність землетрусів Jr, бали. Здійснюється перерахунок бальності землетрусів у районі розташування гідровузла і обирається найбільше значення для даного гідровузла. Виконується уточнення бальності землетрусу з урахуванням мікрорайонування місця розташування шлюзу [29].

Виконується перерахунок ординат кривої розподілу щорічного максимального сейсмічного впливу Jr у криву розподілу максимального сейсмічного впливу J за призначений строк служби. Будується імовірнісна крива розподілу розрахункової

амплітуди прискорення основи (у частках g) від максимальної бальності землетрусів J, бали за призначений строк служби. Сейсмічний вплив на шлюз задається у вигляді сукупностей таких навантажень: інерційні сили, сейсмічний гідродинамічний тиск води в обернених засипках, сейсмічний тиск грунту обернених засипок. Інерційні сейсмічні навантаження відповідно до [30] визначено лінійно-спектральним методом. Будується імовірнісна крива розподілу горизонтального інерційного сейсмічного навантаження S, кН, від розрахункової амплітуди прискорення основи (у частках g) камери шлюзу. Визначається сейсмічний гідродинамічний тиск води. Будується імовірнісна крива розподілу горизонтальної проекції сейсмічної гідродинамічної сили тиску води E_{psg}, кН, від розрахункової амплітуди прискорення основи (у частках g) камери шлюзу.

Визначаються рівнодіючі вертикальних сил V і W, і горизонтальних сил F, що діють на камеру шлюзу. При цьому ураховуються як випадкові, так і детерміністичні навантаження.

Характеристики ґрунту основи задані випадковими величинами відповідно до норм проектування основ гідротехнічних споруд [31-32]. Коефіцієнт внутрішнього тертя $tg\varphi$ і питоме зчеплення c задані за нормальним законом, як випадкові корельовані величини. Такі корельовані величини підкоряються нормальному закону, який визначається п′ятьма параметрами: математичні очікування $m_{tg\varphi}$, m_c, середньоквадратичні відхилення $\sigma_{tg\varphi}$, σ_c, коефіцієнт кореляції $r_{tg\varphi\, c}$. Визначається кореляційний момент $K_{tg\varphi\ c}$. Коефіцієнт варіації прийнято C_v= 0,122.

Задається випадкова імовірність величини кута внутрішнього тертя $ptg\varphi$, розподілена від 0 до 1. За нормальним законом розподілу із наведеними вище параметрами $m_{tg\varphi}$, $\sigma_{tg\varphi}$ визначається квантиль – значення кута внутрішнього тертя $tg\varphi$. Визначаються параметри умовного закону розподілу $m_{tg\varphi\, c}$, $\sigma_{tg\varphi\, c}$. За відомою імовірністю величини питомого зчеплення pc, із використанням умовного закону розподілу визначається квантиль – значення величини питомого зчеплення c, кПа.

Розглядається схема плоского поступального зсуву по нахиленій поверхні. Обчислюється значення коефіцієнта стійкості на зсув, перекидання і спливання за формулами (3-5).

При кожному випробовуванні камера шлюзу вважається ненадійною при досягненні хоча б одного граничного стану. Розрахунок виконується методом статистичних випробовувань N разів. Кількість випробовувань, при яких $k < 1$, віднесена до загальної кількості випробовувань N і визначає величину ризику настання граничного стану камери шлюзу за весь строк служби.

Значення щорічної імовірності ризику руйнування камери шлюзу обчислюється за формулою

$$p = 1 - (1 - pr)^{\frac{1}{T}}, \qquad (6)$$

де p – щорічна імовірність настання граничного стану;

pr – імовірність настання граничного стану за призначений строк служби;

T – призначений строк служби, рр.,

і виконується порівняння із допустимою величиною.

Результати розрахунків ризику виникнення аварій шлюзів гідровузлів Дніпровського каскаду наведені в таблиці.

Необхідна кількість статистичних випробовувань знаходиться у межах довірчого інтервалу. Межі довірчого інтервалу обчислені за формулами [33].

Таблиця

Результати комплексної оцінки імовірності вичерпання міцності, втрати стійкості, спливання камер шлюзів на скельовій основі гідровузлів Дніпровського каскаду

Клас спору-ди	Кількість статисти-чних випробо-вувань	Розрахункове значення імовірності настання граничного стану за призначений строк служби Т, р.	Розрахункове значення щорічної імовірності настання граничного стану, $р.^{-1}$	Допустиме значення імовірності настання граничного стану, $р.^{-1}$
Камера трикамерного шлюзу Дніпровського гідровузла				
СС-3	$6{,}88\times10^{5}$	$2{,}23\times10^{-3}$	$2{,}23\times10^{-5}$	5×10^{-5}
Камера однокамерного шлюзу Дніпровського гідровузла				
СС-3	$8{,}76\times10^{5}$	$1{,}75\times10^{-3}$	$1{,}75\times10^{-5}$	5×10^{-5}
Камера шлюзу Кременчуцького гідровузла				
СС-3	$8{,}03\times10^{5}$	$1{,}91\times10^{-3}$	$1{,}91\times10^{-5}$	5×10^{-5}

Висновки. Удосконалено методику оцінки надійності камер шлюзів на скельовій основі за критеріями втрати стійкості проти зсуву, перекидання і всплиття. Ураховано імовірнісний характер навантажень і впливів, механічних властивостей основи, кореляційні залежності між природними факторами. Методика апробована на прикладі камер щлюзів гідровузлів Дніпровського каскаду. Результати можуть застосовуватись при імовірносних розрахунках надійності гідротехнічних споруд і каскадів гідровузлів.

Список використаних джерел

1. Гідротехнічні споруди. Основні положення [Текст] : ДБН В.2.4–3:2010. — К. : Мінрегіонбуд України, Державне підприємство “Укрархбудінформ”, 2010. — 37 с.

2. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ [Текст] : ДБН В.1.2–14–2009. — К. : Мінрегіонбуд України, Державне підприємство “Укрархбудінформ”, 2009. — 37 с.

3. Вайнберг, А. И. Надежность и безопасность гидротехнических сооружений [Текст] / А. И. Вайнберг. — Харьков: Тяжпромавтоматика, 2008. — 304 с.

4. Финагенов, О. М. К вопросу оценки эксплуатационной надежности гидротехнических сооружений [Текст] / О. М. Финагенов, С. Г. Шульман // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. — 1999. — Т. 234. — С. 7—15.

5. Системный анализ надежности водопроводящих трактов ГЭС [Текст] / Е. М. Дзюбанов, Н. Ю. Дмитриев, М. П. Левина [и др.] // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. — 1997. — Т. 233. — С. 47—54.

6. Лентяев, Л. Д. Обеспечение надежности водосбросных и водопропускных сооружений крупных гидроузлов [Текст] / Л. Д. Лентяев, Л. В. Смирнов // Гидротехническое строительство. — 1983. — №8. — С. 40—42.

7. Мирцхулава, Ц. Е. Анализ безопасности и надежности водопропускных сооружений [Текст] / Ц. Е. Мирцхулава // Материалы конференций и совещаний по гидротехнике. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. — 1985. — С. 81—84.

8. Стефанишин, Д. В. К оценке надежности водопропускных сооружений гидроузлов [Текст] / Д. В. Стефанишин // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2000. – Т. 236. – С. 77–82.

9. Векслер, А. Б. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений [Текст] / А. Б. Векслер, Д. А. Ивашинцов, Д. В. Стефанишин. — СПб.: Изд-во ОАО ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2002. — 589 с.

10. Arunraj N.S., Mandal S., Maiti J. Modeling uncertainty in risk assessment: An integrated approach with fuzzy set theory and Monte Carlo simulation [Text] / N.S. Arunraj, S. Mandal, J. Maiti / Accident Analysis & Prevention. — 2013. — Vol. 55. — P. 242—255.

11. Methodology for estimating the probability of failure by sliding in concrete gravity dams in the context of risk analysis [Text] / L. Altarejos-García, I. Escuder-Bueno, A. Serrano-Lombillo [and others] // Structural Safety. — 2012. — Vol. 36–37. — P. 1—13.

12. Methodology for a probabilistic analysis of an RCC gravity dam construction. Modelling of temperature, hydration degree and ageing degree fields [Text] / A. Gaspar, F. Lopez-Caballero, A. Modaressi-Farahmand-Razavi [and others] // Engineering Structures. – 2014. – Vol. 65. – P. 99–110.

13. Alessio Lupoi. A probabilistic method for the seismic assessment of existing concrete gravity dams [Text] / Alessio Lupoi, Carlo Callari // Structure and Infrastructure Engineering. — 2012. — Vol. 8. — Issue 10. — P. 985—998.

14. A continuous Bayesian network for earth dams' risk assessment: methodology and quantification [Text] / O. Morales-Nápoles, D. J. Delgado-Hernández, D. De-León-Escobedo [and others] // Structure and Infrastructure Engineering. — 2014. — Vol. 10. — Issue 5. — P. 589–603.

15. Su H. Z. Optimization of reinforcement strategies for dangerous dams considering time-average system failure probability and benefit–cost ratio using a life quality index [Text] / H. Z. Su, J. Hu, Z. P. Wen // Natural hazards. — 2013. — Vol. 65. — Issue 1. — P. 799–817.

16. Probability-based assessment of dam safety using combined risk analysis andreliability methods–application to hazards studies [Text] / L. Peyras, C. Carvajal, H. Felix [and others] // European Journal of Environmental and Civil Engineering. — 2012. — Vol. 16. — Issue 7. — P. 795—817.

17. A reliability-based approach to evaluating the stability of high rockfill dams using a nonlinear shear strength criterion [Text] / Z. Y. Wu, Y. L. Li, J. K. Chen [and others] // Computers and Geotechnics. — 2013. — Vol. 51. — P. 42—49.

18. Penalty function-based method for obtaining a reliability indicator of gravity dam stability [Text] / Y. Li, Y. Sun, B. Li [and others] // Computers and Geotechnics. – 2016. – Vol. 81. – P. 19–25.

19. Cho S. E. Probabilistic analysis of seepage that considers the spatial variability of permeability for an embankment on soil foundation [Text] / S. E. Cho // Engineering Geology. — 2012. — Vol. 133–134(0). — P. 30—39.

20. Calamak M. Probabilistic assessment of slope stability for earth-fill dams having random soil parameters [Text] / M. Calamak, A.M. Yanmaz // 11th National Conference on Hydraulics in Civil Engineering & 5th International Symposium on Hydraulic Structures: Hydraulic Structures and Society-Engineering Challenges and Extremes. — Engineers Australia: 2014. — P. 34.

21. Alembagheri M. Seismic performance sensitivity and uncertainty analysis of gravity dams [Text] / M. Alembagheri, M. Seyedkazemi // Earthquake Engineering & Structural Dynamics. — 2015. — Vol. 44. — Issue 1. — P. 41—58.

22. Мозговий, А. О. Дослідження кореляційної залежності максимальних витрат р. Дніпро за статистичними даними спостережень у створах гідровузлів Дніпровського каскаду [Текст] / А. О. Мозговий // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, 2011. — Вип. 65. — С. 364–370.

23. Мозговий, А. О. Основні передумови оцінки безпечності і надійності каскадів гідровузлів [Текст] / А. О. Мозговий // Науковий вісник будівництва. — Харків: ХДТУБА, 2009. – Вип. 54. — С.272–277.

24. Мозговий, А. О. Загальні підходи щодо керування ризиком втрати надійності каскаду гідровузлів під час проходження катастрофічного паводку [Текст] : матеріали VI Міжнар. наук. конф. ″Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель і споруд″ / А. О. Мозговий // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА, 2013. — Вип. 73. — С. 531–536.

25. Правила експлуатації водосховищ Дніпровського каскаду [Текст] / А. В. Яцик, А. І. Томільцева, М. Г. Томільцев [та ін.]; за ред. А. В. Яцика. – К. : Ґенеза, 2003. – 176 с.

26. Мозговий, А. О. Аналіз статистичних даних температурних впливів по гідровузлах Дніпровського каскаду. Вибір параметрів функції розподілу температурних впливів за статистичними даними [Текст] / А. О. Мозговий // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування: зб. наук. праць. – Рівне: Вид-во НУВГП, 2011. – Вип. 39. – С. 98–102.

27. Мозговий, А. О. Аналіз статистичних даних сейсмічної активності на території України. Вибір параметрів функції розподілу інтенсивності землетрусів за статистичними даними [Текст] / А. О. Мозговий // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, 2010. – Вип. 58. — С. 264–270.

28. Idriss, I. M. Evaluating Seismic Risk In Engineering Practice [Text] / I. M. Idriss // Proc. Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. — San Fransisco, 1985. — Vol. 1. — P. 255-320.

29. Будівництво у сейсмічних районах України [Текст] : ДБН В.1.1-12:2014. – К. : Мінрегіон України, Державне підприємство “Укрархбудінформ”, 2014. — 110 с.

30. Учет сейсмических воздействий при проектировании гидротехнических сооружений [Текст] : пособие к разд. 5: Гидротехнические сооружения СНиП II-7-81. П 17-85. — Л. : Типография ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1986. — 310 с.

31. Основания гидротехнических сооружений [Текст] : СНиП 2.02.02-85. – М. : Госстрой СССР, ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 48 с.

32. Проектирование оснований гидротехнических сооружений [Текст] : пособие к СНиП II-16-76. П 13-83. – Л. : ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, Типография ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1984. – 402 с.

33. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей [Текст] : учеб. для вузов / Е. С. Вентцель. — 5-е изд., стер. — М. : Высшая школа, 1998. — 576 с.

Мозговий Андрій Олексійович, канд. техн. наук, доцент кафедри гідротехнічного будівництва Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел.: (057)706-18-99. E-mail: mozgovoyandrey@i.ua.

Andriy O. Mozgovuy, Ph.D, Associate Professor, Department of Hydro Construction Kharkiv National University of Construction and Architecture. Tel.: (057)706-18-99. E-mail: mozgovoyandrey@i.ua.

Стаття прийнята 19.12.2017 р.