

УДК 626/627

ІМОВІРНІСНА ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ШЛЮЗІВ НА НЕСКЕЛЬОВІЙ ОСНОВІ ЗА КРИТЕРІЯМИ МІЦНОСТІ І СТІЙКОСТІ ПРОТИ ЗСУВУ КАМЕР ШЛЮЗІВ НА ПРИКЛАДІ ГІДРОВУЗЛІВ ДНІПРОВСЬКОГО КАСКАДУ

Канд. техн. наук А. О. Мозговий

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ КАМЕР ШЛЮЗОВ НА НЕСКАЛЬНОМ ОСНОВАНИИ ПО КРИТЕРИЯМ ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ПРОТИВ СДВИГА НА ПРИМЕРЕ ГИДРОУЗЛОВ ДНЕПРОВСКОГО КАСКАДА

Канд. техн. наук А. А. Мозговой

PROBABILISTIC RELIABILITY ASSESSMENT OF GATE CHAMBERS ON NON-ROCK FOUNDATION BY THE CRITERIA OF STRENGTH 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 отримав подальший розвиток метод оцінки надійності камер шлюзів за критеріями вичерпання міцності і втрати стійкості проти зсуву, а також впливання. При цьому враховано випадковий характер зовнішніх навантажень і впливів, яких під час експлуатації зазнають камери шлюзів, а також кореляційні залежності між ними. Також враховано випадковий характер механічних властивостей ґрунту основи і кореляційні залежності між ними. Виконано чисельну імовірнісну оцінку ризику досягнення граничного стану камер шлюзів на нескельовій 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 исчерпания прочности и потери устойчивости против сдвига, а также всплывания. 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 не 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 strength exhaustion and stability loss against displacement, 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 non-rock foundation at hydro schemes of the Diaper 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.

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

Вступ. Розрахунок і проектування сучасних гідротехнічних споруд потребують оцінки їх надійності і безпеки на основі імовірнісних методів [1-2]. Одним із найбільш поширених типів споруд гідровузлів комплексного призначення як в Україні, так і у світі є судноплавні шлюзи. Функціональним призначенням шлюзів є пропускання суден через створ гідровузла. Основними конструктивними елементами шлюзів є верхня і нижня голови, камери. За конструкцією камери шлюзів бувають із розрізним і нерозрізним днищем.

Дана робота спрямована на оцінку надійності камер шлюзів на нескельовій 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 водопропускних гідротехнічних споруд, підходи щодо оцінки надійності бетонних гідротехнічних споруд, статистичні методи аналізу їх стану, розроблення критеріїв їх надійності розглянуто в роботах О. І. Вайнберга [3], О. М. Фінагенова і С. Г. Шульмана [4], Є. М. Дзюбанова і Н. Ю. Дмитрієва [5], М. П. Левіної і В. Б. Штільмана [5], Л. Д. Ленцяєва і Л. В. Смирнова [6], Ц. Є. Мірцхулаві [7], Д. В. Стефанішина [8] та ін. Удосконалення методів

забезпечення надійності складних природно-технічних систем, аналіз ризику в гідротехніці, прогнозування аварійності гідротехнічних об'єктів розглянуто в роботах А. Б. Векслера, Д. А. Івашинцова і Д. В. Стефанішина [9], N.S. Arunraj, S. Mandal і J. Maiti [10], L. Altarejos-García, I. Escuder-Bueno і A. Serrano-Lombillo [11], A. Gaspar, F. Lopez-Caballero і A. Modaressi-Farahmand-Razavi [12], A. Lupoi і C. Callari [13], O. Morales-Nápoles, D. J. Delgado-Hernández і D. De-León-Escobedo [14], H. Z. Su, J. Hu і Z. P. Wen [15], L. Peyras, C. Carvajal і H. Felix [16], Z. Y. Wu, Y. L. Li і J. K. Chen [17], Y. Li, Y. Sun і B. Li [18], S. E. Cho [19], M. Calamak і A.M. Yanmaz [20], M. Alembagheri і M. Seyedkazemi [21] та ін.

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

Визначення мети та задачі дослідження. Узагальнення вітчизняного і закордонного досвіду оцінки надійності об'єктів гідротехнічного будівництва свідчить про актуальність подальшого удосконалення існуючих методів оцінки надійності гідротехнічних споруд і каскадів гідровузлів. Дана робота спрямована на оцінку надійності камер судноплавних

шлюзів, які входять до складу споруд водопідпільного фронту гідровузлів Дніпровського каскаду, з урахуванням кореляційних залежностей, які існують між природними факторами, що є визначальними при оцінці надійності каскадів гідровузлів.

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

Шлюзи Київського і Канівського гідровузлів. Голови шлюзів докової конструкції з нерозрізним днищем. Камери з розрізним днищем по осі (див. рис. 1). Стіни камер кутового профілю з консолями. Шлюз розташований у верхньому б'єфі в обсіпках. Наповнення

камери головне – із-під воріт верхньої голови. Опорожнення камери через обхідні водопровідні галереї нижньої голови в низовий підхід. Ґрунти – нескельові. Клас наслідків споруд гідровузла СС2-1.

Шлюз Дніпродзержинського гідровузла. Шлюз розташований у верхньому б'єфі з підводною частковою обсіпкою. Система живлення – головна – з-під робочих воріт через камеру гасіння. Опорожнення – через обхідні галереї, розташовані у стоянах нижньої голови. Стіни камери – у вигляді двоконсольних упорних стін. Верхня голова – із нерозрізним залізобетонним днищем. Нижня голова – із стоянів із розрізним армобетонним днищем. Клас наслідків споруд гідровузла СС2-1.

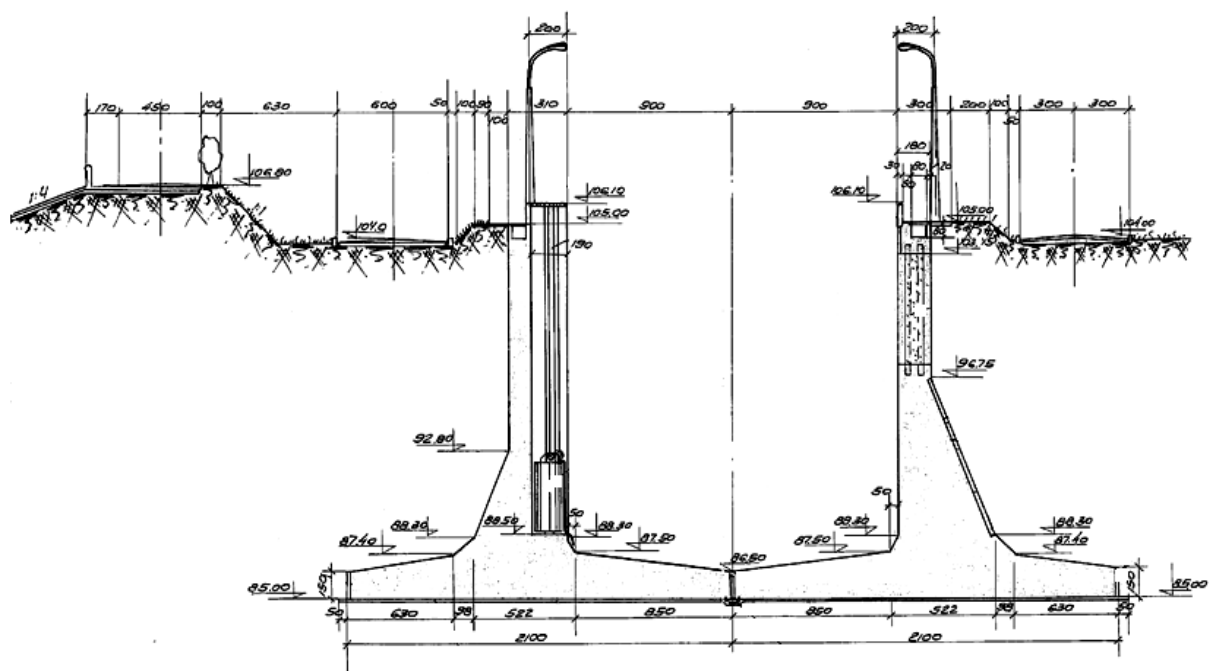


Рис. 1. Камера Київського шлюзу (розміри в сантиметрах)

Шлюз Каховського гідровузла. Розташований у верхньому б'єфі між будівлею ГЕС і лівим берегом. Система живлення розподільча – за допомогою поздовжніх галерей, розташованих у днищі камери. Опорожнення камери здійснюється донними водоводами, які розташовані у

стоянах нижньої голови. Шлюз використовується для пропускання паводку. Верхня голова – нерозрізна конструкція з розмірами у плані 43,0×30,0 м. Товщина днища 9,5 м. Голова обладнана плоскими робочими і аварійно-ремонтними затворами. Нижня голова має

розмір у плані 98,5×35,64 м (із стоянами). Товщина днища 10,0 м. Голова обладнана двостулковими робочими і ремонтними затворами. Камера шлюзу докового типу з армованого бетону з попередньо напруженим армуванням елементів днища (див. рис. 2). Голова і камера з боку водосховища і рейду обсіпані земляними дамбами з шириною майданчиків по верху 30,0 м. Клас наслідків споруд гідровузла СС3.

Перевірка надійності камер шлюзів за критеріями міцності, стійкості проти зсуву, спливання.

Розрахунки за детерміністичною методикою виконуються для основного і особливого сполучення навантажень за умовою [1]

$$\gamma_n \times \gamma_{lc} \times F \leq \gamma_c \times R, \quad (1)$$

де F – розрахункове значення узагальненого силового впливу з урахуванням коефіцієнта надійності за навантаженням γ_f ;
 R – узагальнена несуча здатність споруди чи основи;

γ_{lc} – коефіцієнт сполучення навантажень, приймається для основного сполучення навантажень $\gamma_{lc}=1,0$; для особливого сполучення навантажень $\gamma_{lc}=0,9$;

γ_c – коефіцієнт умов роботи, приймається $\gamma_c = 1,1$;

γ_n – коефіцієнт надійності, приймається $\gamma_n = 1,25$ для споруд класу наслідків СС3, $\gamma_n = 1,2$ для споруд класу наслідків СС2-1.

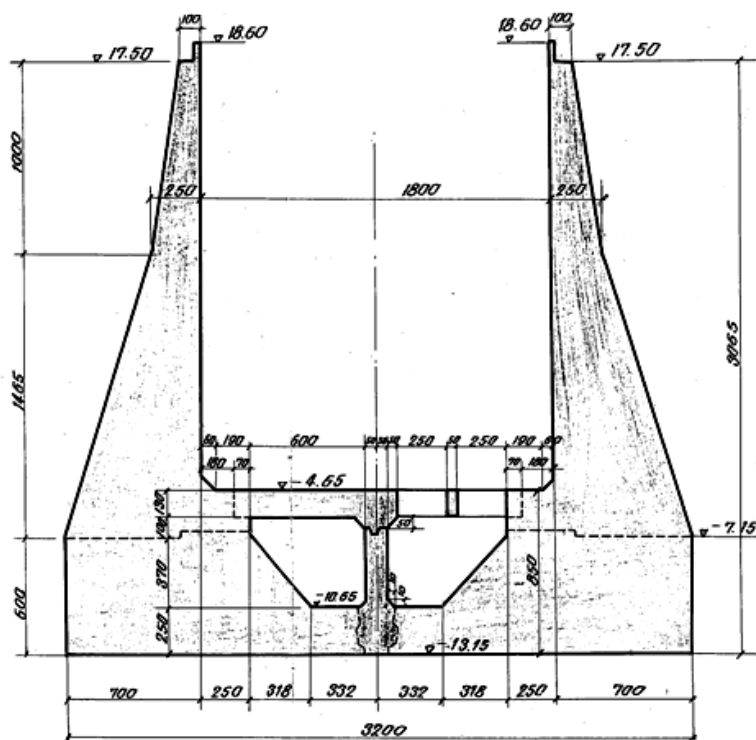


Рис. 2. Камера Каховського шлюзу (розміри в сантиметрах)

При виконанні розрахунків розглядаються такі навантаження і впливи:

1. Власна вага споруди, у тому числі вага постійного технологічного облад-

нання, 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 ґрунту обернених засипок.

6. Сейсмічні впливи.

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

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

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:

- шлюзи Київського, Канівського, Дніпродзержинського гідровузлів: для основного сполучення навантажень $k_n = 1,09$; для особливого сполучення навантажень $k_n = 0,98$;

- шлюз Каховського гідровузла: 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:

- шлюз Київського гідровузла: для основного сполучення навантажень $k_c = 1,43$ (коефіцієнт запасу стійкості проти зсуву), $k_e = 3,04$ (коефіцієнт запасу стійкості проти всплуття); для особливого сполучення навантажень $k_c = 1,59$, $k_e = 3,03$;

- шлюз Канівського гідровузла: для основного сполучення навантажень $k_c = 1,39$, $k_e = 2,98$; для особливого сполучення навантажень $k_c = 1,44$, $k_e = 2,95$;

- шлюз Дніпродзержинського гідровузла: для основного сполучення навантажень $k_c = 1,59$, $k_e = 2,68$; для особливого сполучення навантажень $k_c = 1,35$, $k_e = 2,54$;

- шлюз Каховського гідровузла: для основного сполучення навантажень $k_e = 2,90$; для особливого сполучення навантажень $k_e = 2,85$.

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

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

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

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

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 подошви споруди;

F – узагальнена сила зсуву.

При розрахунку на спливання використовується рівняння зв'язку

$$k = \frac{V}{W}, \quad (4)$$

де k – коефіцієнт стійкості проти спливання.

При розрахунку міцності використовується рівняння

$$k = \frac{A_{sf}}{A_{sp}}, \quad (5)$$

де k – коефіцієнт запасу міцності;

A_{sf} – фактична площа перерізу робочої арматури;

A_{sp} – розрахункова площа перерізу робочої арматури.

Розглядається типова камера шлюзу (див. рис. 1). Вхідними детерміністичними параметрами прийнято площу основи камери шлюзу A_n , м², інші геометричні розміри, вагу допоміжного обладнання.

Випадковими вхідними величинами прийнято щільність бетону за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації $C_{\gamma_b} = 0,02$; щільність ґрунту оберненої засипки за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації $C_{\gamma_{gr}} = 0,06$; міцність бетону на стискання за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації $C_{R_b} = 0,135$; міцність арматури на розтягання за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації $C_{R_s} = 0,08$.

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 p . Дніпро у створах гідровузлів Дніпровського каскаду наведено в роботах [22, 25].

За значенням pZ визначається квантиль-позначка рівня води Z , м, перед шлюзом. Між максимальними паводковими витратами p . Дніпро у створах гідровузлів каскаду, за роботою [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 ґрунту оберненої засипки $p\rho_{gr}$, за якою визначається квантиль-значення щільності ґрунту ρ_{gr} .

Задається випадкова рівномірно розподілена від 0 до 1 імовірність коефіцієнта внутрішнього тертя $p_{tg\phi_g}$, по якій визначається квантиль-значення коефіцієнта внутрішнього тертя $tg\phi_g$.

За значеннями ρ_g і $tg\phi_g$ визначається сила бічного тиску ґрунту 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 ґрунту 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 в роботі [27]. За інтенсивністю землетрусу в його осередку можна визначити його інтенсивність у районі розташування гідровузла за аналітичними виразами роботи [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 , бал. 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 в 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 ґрунту обернених засипок. Інерційні сейсмічні навантаження відповідно до роботи [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 враховуються 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 підкорюються 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 $p_{tg\varphi}$, розподілена від 0 до 1. За нормальним законом розподілу з 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 горизонтальній поверхні. Обчислюється значення коефіцієнта стійкості на зсув, спливання, коефіцієнта міцності 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

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

де p – щорічна імовірність настання граничного стану;

pr – імовірність настання граничного стану за призначений строк служби;

T – призначений строк служби, р.,

і виконується порівняння з допустимою величиною.

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

Таблиця 1

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

Клас споруди	Кількість статистичних випробовувань	Розрахункове значення імовірності настання граничного стану за призначений строк служби T , р.	Розрахункове значення щорічної імовірності настання граничного стану, p . ⁻¹	Допустиме значення імовірності настання граничного стану, p . ⁻¹
Камера шлюзу Київського гідровузла				
СС2-1	$1,53 \times 10^5$	$9,95 \times 10^{-3}$	$2,0 \times 10^{-4}$	5×10^{-4}
Камера шлюзу Канівського гідровузла				
СС2-1	$1,56 \times 10^5$	$1,01 \times 10^{-2}$	$2,1 \times 10^{-4}$	5×10^{-4}
Камера шлюзу Дніпродзержинського гідровузла				
СС2-1	$2,84 \times 10^5$	$5,20 \times 10^{-3}$	$1,05 \times 10^{-4}$	5×10^{-4}
Камера шлюзу Каховського гідровузла				
СС-3	$5,40 \times 10^5$	$2,5 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-5}$	5×10^{-5}

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

Висновок з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку. Удосконалено методику оцінки надійності камер шлюзів на нескельовій основі за критеріями втрати стійкості

проти зсуву, міцності і спливання. Ураховано імовірнісний характер навантажень і впливів, механічних властивостей основи. Методика апробована на прикладі камер шлюзів гідровузлів Дніпровського каскаду. Результати можуть застосовуватись при імовірнісних розрахунках надійності гідротехнічних споруд і каскадів гідровузлів.

Список використаних джерел

1. ДБН В.2.4–3:2010. Гідротехнічні споруди. Основні положення [Текст]. – К.: Мінрегіонбуд України, Державне підприємство “Укрархбудінформ”, 2010. – 37 с.
2. ДБН В.1.2–14–2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ [Текст]. – 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. Дзюбанов, Е. М. 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. 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. Modaresi-Farahmand-Razavi [and others] // Engineering Structures. — 2014. — Vol. 65. — P. 99-110.
13. Lupoi, Alessio A probabilistic method for the seismic assessment of existing concrete gravity dams [Text] / Alessio Lupoi, Carlo Callari // Structure and Infrastructure Engineering. — 2012. — Vol. 8. — Is. 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. — Is. 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. — Is. 1. — P. 799-817.

16. Probability-based assessment of dam safety using combined risk analysis and reliability methods—application to hazards studies [Text] / L. Peyras, C. Carvajal, H. Felix [and others] // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. — 2012. — Vol. 16. — Is. 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. — Is. 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] / А. О. Мозговий // *Науковий вісник будівництва: матеріали VI Міжнар. наук. конф. "Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель і споруд"*. — 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.: Генеза, 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. ДБН В.1.1-12:2014. Будівництво у сейсмічних районах України [Текст]. — К.: Мінрегіон України, Державне підприємство "Укранрхбудінформ", 2014. — 110 с.
30. СНиП II-7-81. П 17-85. Учет сейсмических воздействий при проектировании гидротехнических сооружений. Пособие к разд. 5: Гидротехнические сооружения [Текст]. — Л.: Типография ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 1986. — 310 с.

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

32. Проектирование оснований гидротехнических сооружений. Пособие к СНиП II-16-76. П 13-83 [Текст]. – 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 Олександрович, канд. техн. наук, доцент кафедри гідротехнічного будівництва, Харківський національний університет 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 05.10.2016 р.