

УДК 626/627

ІМОВІРНІСНА ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ГРАВІТАЦІЙНИХ СТОЯНІВ НА СКЕЛЬОВІЙ І НЕСКЕЛЬОВІЙ ОСНОВАХ ЗА КРИТЕРІЄМ СТІЙКОСТІ ПРОТИ ЗСУВУ НА ПРИКЛАДІ ГІДРОВУЗЛІВ ДНІПРОВСЬКОГО КАСКАДУ

Канд. техн. наук А. О. Мозговий

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ГРАВИТАЦИОННЫХ УСТОЕВ НА СКАЛЬНОМ И НЕСКАЛЬНОМ ОСНОВАНИЯХ ПО КРИТЕРИЮ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОТИВ СДВИГА НА ПРИМЕРЕ ГИДРОУЗЛОВ ДНЕПРОВСКОГО КАСКАДА

Канд. техн. наук А. А. Мозговой

PROBABILISTIC RELIABILITY ASSESSMENT OF GRAVITY ABUTMENTS ON ROCK AND NON-ROCK FOUNDATIONS BY THE CRITERIA OF STABILITY AGAINST DISPLACEMENT OF THE GRAVITY ABUTMENTS ON THE EXAMPLE OF HYDRO SCHEMES OF THE DNIEPER CASCADE

PhD (Tech.) A. O. Mozgovuy

У даній роботі отримав подальший розвиток метод оцінки надійності гравітаційних стоянів за критерієм втрати стійкості проти зсуву. При цьому ураховано випадковий характер зовнішніх навантажень і впливів, які під час експлуатації сприймають стояни, а також кореляційні залежності між ними. Крім того, ураховано випадковий характер механічних властивостей ґрунту основи і кореляційні залежності між ними. Виконано чисельну імовірнісну оцінку ризику досягнення граничного стану гравітаційних стоянів на скельній і нескельній основах гідровузлів Дніпровського каскаду. Метод може застосовуватись при імовірнісних розрахунках надійності каскадів гідровузлів.

Ключові слова: гравітаційний стоян, природні фактори, імовірнісна оцінка надійності, каскад гідровузлів.

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

Ключевые слова: гравитационный устой, природные факторы, вероятностная оценка надежности, каскад гидроузлов.

When calculating and designing modern hydraulic structures, it becomes necessary to assess their reliability and safety based on probabilistic methods.

This work further develops the method for assessing reliability of gravity abutments by the criteria of stability loss against displacement. The work considers the random nature of the external

loads and impacts, which the gravity abutments 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. In applying the method of statistical tests to assess the reliability of a complex technical system, it is necessary to perform a significant number of statistical tests. This implies determination of internal parameters of the system during each statistical test.

A numerical probabilistic assessment of the risk when the gravity abutments on rock and non-rock foundations at hydro schemes of the Dnieper Cascade reach the boundary conditions has been performed. Confidence limits of the probability of losing stability of the gravity abutments against displacement are determined; a number of statistical tests required to achieve confident accuracy is determined.

Correctness of the obtained results is confirmed by their correspondence with the reliability assessment of the gravity abutments of the Dnieper cascade by deterministic analyses using the method of boundary conditions.

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: wind, ice, and hydrological characteristics, as well as temperature loads and impacts.

Keywords: gravity abutment, natural factors, probabilistic reliability assessment, cascade of hydro schemes.

Вступ. Оцінка безпеки і надійності сучасних гідротехнічних споруд під час їхнього розрахунку і проектування на основі імовірнісних методів регламентована нормативними документами [1–2]. Гравітаційні стояни на скельовій і нескельовій основах є достатньо поширеними серед спеціальних типів споруд гідровузлів як в Україні, так і у світі.

Актуальність даної роботи обумовлена тим, що надійність гравітаційних стоянів впливає на надійність гідровузла і каскаду гідровузлів у цілому, тому постає проблема дослідження надійності гравітаційних стоянів на скельовій і нескельовій основах, які входять до складу споруд водопідпільного фронту, на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підходи щодо імовірнісної оцінки надійності і безпеки гідротехнічних споруд з урахуванням мінливості природно-кліматичних впливів, гідрологічних, сейсмічних впливів, а також

недопущенням виникнення надзвичайних ситуацій на гідротехнічних спорудах і гідровузлах наведено в закордонних роботах [3–10]. Зазначені джерела регламентують урахування кореляційного зв'язку, який існує між природними факторами під час визначення надійності гідротехнічних споруд.

Питання імовірнісної оцінки експлуатаційної надійності гідротехнічних споруд і каскадів гідровузлів, розроблення критеріїв їхньої надійності, статистичні методи аналізу їхнього стану з урахуванням мінливості природних факторів, прогнозування аварійності гідротехнічних споруд, статистичне опрацювання природно-кліматичних впливів на території України, дослідження ризику досягнення граничного стану на основі імовірнісних методів гідротехнічних споруд Дніпровського каскаду розглянуто в роботах [11–27].

Не вирішеною раніше частиною проблеми є те, що існуючі методи оцінки надійності гідротехнічних споруд, зокрема

гравітаційних стоянів на скельовій і нескельовій основах, не враховують певні кореляційні залежності [20], які існують між природними факторами, що є визначальними при оцінці надійності каскадів гідровузлів [21–27].

Визначення мети та завдання дослідження. Завданням роботи є розроблення алгоритму імовірнісної оцінки надійності стоянів на скельовій і нескельовій основах з урахуванням кореляційних залежностей між природними факторами – кореляційні залежності між гідрологічними характеристиками водотоку, температурою і амплітудою коливань температур зовнішнього повітря, кореляційні залежності між характеристиками ґрунту основи.

Метою роботи є розроблення і апробація алгоритму на гравітаційних стоянах гідровузлів Дніпровського каскаду з отриманням чисельного значення імовірності виникнення аварії на зазначених гідротехнічних спорудах.

Основна частина дослідження. Нижче наведено характеристики стоянів на скельовій і нескельовій основах гідровузлів Дніпровського каскаду, які є найбільш

небезпечними з точки зору досягнення граничних станів.

Київський гідровузол. Стояни збірно-монолітні залізобетонні коміркового типу. Порожнини комірок засипані піском. Позначка підшви стояна +74.500 м, позначка верху стояна +106.000 м, ширина стояна по основі 22.20 м (рис. 1). Основа – дрібнозернисті піски. Клас наслідків споруд гідровузла СС2–1.

Канівський гідровузол. Стояни збірно-монолітні залізобетонні коміркового типу зі шпунтовою діафрагмою в основі. Порожнини комірок засипані піском. Позначка підшви стояна +62.500 м, позначка верху стояна +88.800 м, ширина стояна по основі 21.40 м (рис. 2). Основою слугують піски. Клас наслідків споруд гідровузла СС2–1.

Кременчуцький гідровузол. Стояни залізобетонні кутикового профілю. Пазухи стоянів засипані інертними матеріалами. Позначка підшви стояна +54.500 м, позначка верху стояна +85.000 м, ширина стояна по основі 20.00 м (рис. 3). Основою слугують граніти. Клас наслідків споруд гідровузла СС3.

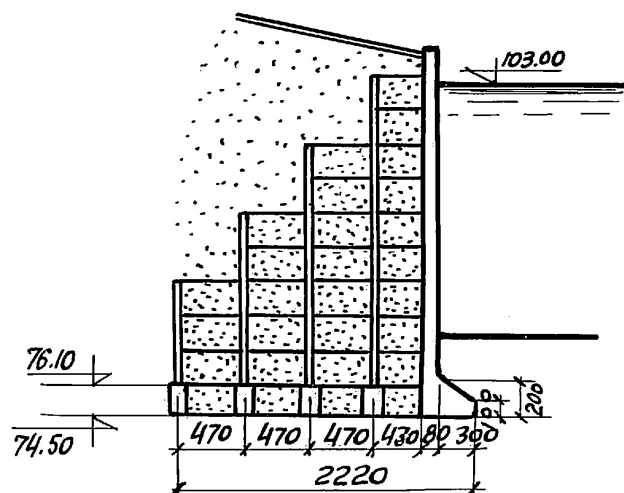


Рис. 1. Схема низового лівобережного стояна греблі з ґрунтових матеріалів Київського гідровузла (розміри в сантиметрах)

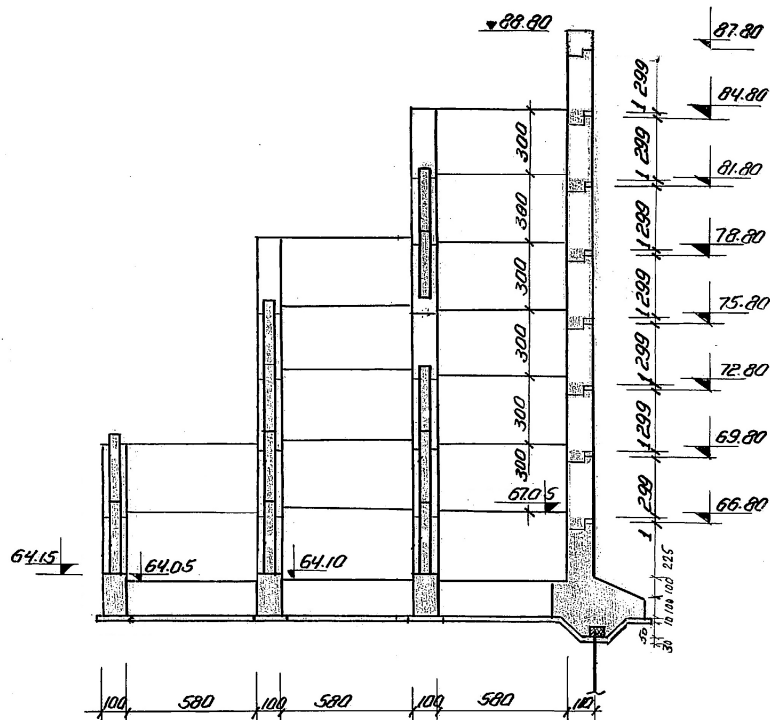


Рис. 2. Схема низового стояна, що спряжує будівлі гідроелектричної станції Канівського гідровузла (розміри в сантиметрах)

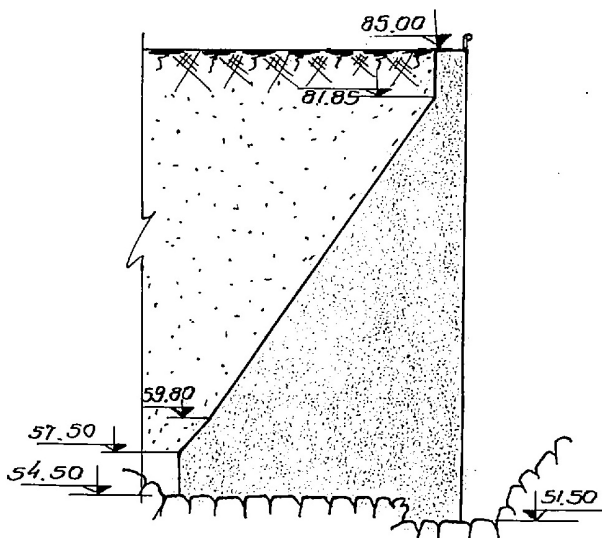


Рис. 3. Схема низового лівобережного стояна греблі з ґрунтових матеріалів Кременчуцького гідровузла

Дніпродзержинський гідровузл.
Стояни збірно-монолітні залізобетонні
коміркового типу. Порожнини комірок
засипані інертними матеріалами. Позначка

підшови стояна +37.500 м, позначка верху
стояна +63.500 м, ширина стояна по основі
25.60 м. Основою слугують граніти. Клас
наслідків споруд гідровузла СС2-1.

Каховський гідровузл. Стояни залізобетонні кутикового профілю. Пазухи стоянів засипані інертними матеріалами. Позначка підшви стояна -16.050 м, позначка верху стояна $+8.500$ м, ширина стояна по основі 25.70 м. Основною слугують дрібнозерністі піски. Клас наслідків споруд гідровузла СС3.

У роботах [22, 27] досліджено імовірнісну надійність залізобетонних конструкцій стін камер шлюзів гідровузлів Дніпровського каскаду за критеріями втрати міцності, стійкості проти зсуву і спливання за детерміністичною методикою за методом граничних станів, які засвідчили, що вказані споруди за критеріями втрати міцності і спливання мають значний запас надійності, наприклад шлюз Канівського гідровузла: розрахунковий коефіцієнт запасу стійкості проти спливання для основного сполучення навантажень $k_e=2.98$ (нормативний $k_n=1.09$); для особливого сполучення навантажень $k_e=2.95$ ($k_n=0.98$), тому в даному дослідженні за критерій настання граничного стану стоянів прийнято критерій стійкості проти зсуву.

Перевірка надійності гравітаційних стоянів за критерієм стійкості проти зсуву. Розрахунки за детерміністичною методикою виконуються для основного і особливого сполучення навантажень згідно з 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 – $\gamma_{lc}=0.9$;

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.

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; 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: стояни Кременчуцького, Каховського гідровузлів: для основного сполучення навантажень $k_n=1.14$; для особливого сполучення навантажень $k_n=1.02$; стояни Київського, Канівського, Дніпродзержинського гідровузлів: для основного сполучення навантажень $k_n=1.09$; для особливого сполучення навантажень $k_n=0.98$.

За детерміністичною методикою на основі методу граничних станів отримано такі значення нормативних коефіцієнтів запасу стійкості при різних розрахункових випадках: стоян Київського гідровузла: для основного сполучення навантажень $k_c=1.48$ (коефіцієнт запасу стійкості проти зсуву), для особливого сполучення навантажень $k_c=1.55$; стоян Канівського гідровузла: для основного сполучення навантажень $k_c=1.44$, для особливого сполучення навантажень $k_c=1.49$; стоян Кременчуцького гідровузла: для основного сполучення навантажень $k_c=1.53$; для особливого сполучення навантажень $k_c=1.41$; стоян Дніпродзержинського гідровузла: для основного сполучення навантажень $k_c=1.56$, для особливого сполучення навантажень $k_c=1.39$; стоян Каховського гідровузла: для основного сполучення навантажень $k_c=1.54$; для особливого сполучення навантажень $k_c=1.47$.

Розрахункові коефіцієнти запасу стійкості на зсув не перевищують нормативних, тому отримані результати свідчать, що за детерміністичною методикою стійкість стоянів гідровузлів Дніпровського каскаду забезпечена.

Імовірнісний метод визначення ризику втрати стійкості проти зсуву гравітаційних стоянів передбачає побудову рівняння зв'язку між вхідними і вихідними параметрами, визначення їхніх імовірнісних характеристик, а також визначення імовірності втрати стійкості проти зсуву гравітаційного стояня.

Критерій настання граничного стану стоянів на гідровузлах Дніпровського каскаду є статистично залежним, тому що його виникнення обумовлено позначками рівнів води у верхніх б'єфах гідровузлів.

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

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

де k – коефіцієнт стійкості проти зсуву;

V – підсумок вертикальних сил, спрямованих униз;

W – підсумок вертикальних сил, спрямованих догори;

$\operatorname{tg} \phi$ – коефіцієнт внутрішнього тертя;

c – питоме зчеплення;

A_n – площа подошви споруди;

F – узагальнена сила зсуву.

При нескельовій основі доданком $c \cdot A_n$ у формулі (3) можна знехтувати.

Вхідними детерміністичними параметрами прийнято: площу основи стояня 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 $C_{\gamma r}=0.06$.

Задається випадкова, розподілена від 0 до 1, імовірність pZ позначки рівня води Z , м, перед стояном. Статичний рівень води обумовлений максимальними паводковими витратами з урахуванням кореляційних залежностей між ними по гідровузлах Дніпровського каскаду. Статистичні дані щодо забезпеченості максимальних витрат р. Дніпро по гідровузлах каскаду наведено в роботі [20]. За значенням pZ визначається квантиль – позначка рівня води Z , м, перед стояном. Між максимальними паводковими витратами р. Дніпро у створах гідровузлів каскаду існує функціональна залежність [20], тому при виконанні кожного статистичного випробовування випадкова величина імовірності pZ для стоянів кожного гідровузла Дніпровського каскаду задається однаковою. Будується 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 стояня pW_f . За значенням імовірності визначається

квантиль – величина сили вертикального протитиску W_f , кН.

За значеннями рівнів Z_i , м, і $Z_{НБ}$, 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 ρ_{gr} , за якою визначається квантиль – значення щільності ґрунту ρ_{gr} .

Задається випадкова рівномірно розподілена від 0 до 1 імовірність коефіцієнта внутрішнього тертя $\rho_{tg\phi_g}$, за якою 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 стояна.

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

На території України землетруси відбуваються унаслідок сейсмічної активності Карпат, району Вранча і Криму. Для гідровузлів Дніпровського каскаду вони є статистично незалежними осередками землетрусів. Статистичні дані про їхню сейсмічну активність опрацьовано в роботі [28]. За інтенсивністю землетрусу в його осередку можна визначити його інтенсивність у районі розташування гідровузла за аналітичними виразами згідно з роботою [29].

Під час виконання одного статистичного випробування, враховуючи статистичну незалежність осередків землетрусів, задаються випадкові щорічні імовірності сейсмічних впливів pJr , розподілені від 0 до 1 у Карпатах, районі Вранча, Криму. За значеннями 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 стояна [30].

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 стоян 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 [31] визначено лінійно-спектральним методом. Будується імовірнісна крива розподілу горизонтального інерційного сейсмічного навантаження S , кН, від розрахункової амплітуди прискорення основи (у частках g) стояна. 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) стояна.

Визначаються рівнодівні вертикальних сил V і W і горизонтальних сил F , що діють на гравітаційний стоян. При цьому ураховуються як випадкові, так і детерміністичні навантаження.

Характеристики ґрунту основи $tg\phi$ і c задані випадковими величинами відповідно до норм проектування основ гідротехнічних споруд [30, 31] за нормальним законом розподілу, як випадкові корельовані величини, які підкорюються нормальному закону, що визначається п'ятьма параметрами: математичні очікування $m_{tg\phi}$, m_c , середньоквадратичні відхилення $\sigma_{tg\phi}$, σ_c , коефіцієнт кореляції $r_{tg\phi c}$. Визначається

кореляційний момент $K_{tg\phi c}$. Коефіцієнт варіації прийнято $C_v=0.122$.

Задається випадкова імовірність величини кута внутрішнього тертя $ptg\phi$, розподілена від 0 до 1. За нормальним законом розподілу з наведеними вище параметрами $m_{tg\phi}$, $\sigma_{tg\phi}$ визначається квантиль – значення кута внутрішнього тертя $tg\phi$. Визначаються параметри умовного закону розподілу $m_{tg\phi c}$, $\sigma_{tg\phi c}$. 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 за формулою (3). Розрахунок виконується методом статистичних випробувань N разів. Кількість випробувань, при яких $k < 1$, віднесена до загальної кількості

випробувань N і визначає величину ризику настання граничного стану гравітаційного стояна за весь строк служби. Значення щорічної імовірності ризику досягнення граничного стану стояна обчислюється за формулою

$$p = 1 - (1 - pr)^{\frac{1}{T}}, \quad (4)$$

де p – щорічна імовірність настання граничного стану;

pr – імовірність настання граничного стану за призначений строк служби;

T – призначений строк служби, роки,

і виконується порівняння з допустимою величиною.

Результати розрахунків ризику настання граничного стану гравітаційних стоянів гідровузлів Дніпровського каскаду наведені в таблиці.

Таблиця

Результати оцінки імовірності втрати стійкості проти зсуву стоянів

Кількість статистичних випробувань	Розрахункове значення імовірності настання граничного стану за призначений строк служби T , рік	Розрахункове значення щорічної імовірності настання граничного стану, рік ⁻¹	Допустиме значення імовірності настання граничного стану, рік ⁻¹
Стоян Київського гідровузла (клас наслідків СС2-1)			
1.52×10^5	9.98×10^{-3}	2.00×10^{-4}	5×10^{-4}
Стоян Канівського гідровузла (клас наслідків СС2-1)			
2.92×10^5	5.24×10^{-3}	1.05×10^{-4}	5×10^{-4}
Стоян Кременчуцького гідровузла (клас наслідків СС3)			
2.26×10^7	6.80×10^{-5}	6.80×10^{-7}	5×10^{-5}
Стоян Дніпродзержинського гідровузла (клас наслідків СС2-1)			
3.84×10^7	4.01×10^{-5}	8.00×10^{-7}	5×10^{-4}
Стоян Каховського гідровузла (клас наслідків СС3)			
5.57×10^5	2.75×10^{-3}	2.76×10^{-5}	5×10^{-5}

Необхідна кількість статистичних випробовувань знаходиться в межах довірчого інтервалу. Межі довірчого інтервалу обчислені за формулами роботи [32].

Висновки. Удосконалено методику оцінки надійності гравітаційних стоянів на скельовій і нескельовій основах за критеріями втрати стійкості проти зсуву. Ураховано імовірнісний характер

навантажень і впливів, механічних властивостей основи, кореляційні залежності між природними факторами. Методика апробована на прикладі гравітаційних стоянів гідровузлів Дніпровського каскаду. Результати можуть застосовуватись при імовірнісних розрахунках надійності гідротехнічних споруд і каскадів гідровузлів.

Список використаних джерел

1. Гідротехнічні споруди. Основні положення: ДБН В.2.4–3:2010. – [Чинний від 2011–01–01]. – К. : ДП «Укрархбудінформ», 2010. – 37 с. – (Державні будівельні норми України).
2. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ: ДБН В.1.2–14–2009. – [Чинний від 2009–12–01]. – К. : ДП «Укрархбудінформ», 2009. – 30 с. – (Державні будівельні норми України).
3. Federal Guidelines for Dam Safety Risk Management [Text] / FEMA P–1025 : Catalog №14353–1. – Dewberry : RAMPP, URS Corporation, 2015. – 49 p.
4. Engineering guidelines for the evaluation of hydropower [Text] : Chapter 1. – Washington : FERC, – 2016. – 77 p. – (Federal energy regulatory commission, Division of dam safety and inspections).
5. Probabilistic Seismic Hazard Analysis [Text]: Chapter R20. – Washington : DRAFT, – 2014. – 84 p. – (Engineering guidelines).
6. Arbeitshilfe zur DIN 19700 für hochwasserrückhaltebecken [Text] / Landesanstalt für umwelt, messungen und naturschutz. – Baden–Württemberg : JVA Mannheim @ Druckerei. – 2007. – 143 p. – (Fließgewässer, Integrierter Gewässerschutz).
7. Guide to interpretive documents for essential requirements, to EN 1990 and to application and use of Eurocodes [Text]: Handbook 1. – UK Watford : Garston, 2004. – 155 p. – (Basis of structural design).
8. Guide to the basis of structural reliability and risk engineering related to Eurocodes, supplemented by practical examples 1990 and to application and use of Eurocodes [Text] : Handbook 2. – Prague, 2005. – 254 p. – (Reliability backgrounds).
9. Probabilistic model code [Text]. Part 1 – Basis of design. JCSS working materials [Електронний ресурс] // JCSS. – 2000. – 62 p. – Режим доступу: <http://www.jcss.ethz.ch>.
10. Design regulations of Swedish board of housing, building and planning [Text] / Swedish Board of housing, building and planning. – Sweden, Karlskrona : Boverket, 2000. – 187 p. – (Mandatory provisions and general recommendations). ISBN: 91–7147–616–4, ISSN: 1100 0856.
11. Westberg, M. Sannolikhetsbaserad bedömning av betongdammars stabilitet. Bakgrundsbeskrivning till framtagande av ”Probabilistic model code for concrete dams” [Text] / M. Westberg, F. Johansson. – Sweden : Energiforsk, 2016. – 50 p. ISBN 978–91–7673–291–5
12. Altarejos-García, L. 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.
13. Gaspar, A. 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.

14. 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. – Issue 10. – P. 985–998.

15. Morales-Nápoles, O. 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.

16. Peyras, L. 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. – Issue 7. – P. 795–817.

17. 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.

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

19. Романчук, К. Г. Сценарний підхід та метод Байєса для оцінювання ризиків системних аварій на гідровузлах [Текст] / К. Г. Романчук, Д. В. Стефанишин // *Системні дослідження та інформаційні технології*. – 2016. – № 2. – С. 116–123.

20. 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.

21. Мозговий, А. О. Імовірнісна оцінка надійності монтажних майданчиків будівель гідроелектростанцій за критеріями втрати стійкості проти зсуву і спливання на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду [Текст] / А. О. Мозговий // *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* – Харків : УкрДУЗТ, 2016. – Вип. 161. – С. 90–101.

22. Мозговий, А. О. Імовірнісна оцінка надійності шлюзів на нескельовій основі за критеріями міцності і стійкості проти зсуву камер шлюзів на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду [Текст] / А. О. Мозговий // *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* – Харків : УкрДУЗТ, 2016. – Вип. 165. – С. 99–109.

23. Мозговий, А. О. Імовірнісна оцінка надійності греблі із ґрунтових матеріалів гідровузла ГЕС Тхакмо у В'єтнамі за критерієм переливу води через гребінь греблі [Текст] / А. О. Мозговий // *Науковий вісник будівництва*. – 2016. – Т. 86, № 4. – С. 122–127.

24. Мозговий, А. О. Комплексна ймовірнісна оцінка ризику виникнення аварій на прикладі бетонної греблі Дніпровської ГЕС [Текст] / А. О. Мозговий, О. Балабай // *Східно-Європейський науковий журнал*. – 2017. – Т. 1 (17), Ч. 1. – С. 117–126.

25. Мозговий, А. О. Імовірнісна оцінка ризику втрати стійкості проти зсуву будівель гідроелектростанцій за критерієм втрати стійкості проти зсуву на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду [Текст] / А. О. Мозговий // *Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп.* – Харків : УкрДУЗТ, 2017. – Вип. 167. – С. 102–114.

26. Мозговий, А. О. Метод розв'язку задач статистичної динаміки по оцінці надійності складних технічних систем при обмеженні внутрішніх параметрів системи [Текст] /

А. О. Мозговий // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – 2017. – Вип. 66. – С. 162–168.

27. Мозговий, А. О. Імовірнісна оцінка надійності шлюзів на скельовій основі за критеріями стійкості проти зсуву, перекидання і спливання камер шлюзів на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду [Текст] / А. О. Мозговий // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків : УкрДУЗТ, 2017. – Вип. 174. – С. 70–80.

28. 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.

29. 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.

30. Будівництво у сейсмічних районах України [Текст] : ДБН В.1.1–12:2014. – [Чинний від 2014–10–01]. – К. : Мінрегіон України, Державне підприємство «Укрархбудінформ», 2014. – 110 с. – (Державні будівельні норми України).

31. 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.

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

Мозговий Андрій Олексійович, канд. техн. наук, доцент кафедри гідротехнічного будівництва Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел.: (050)749-03-04. E-mail: mozgovoyandrey@ukr.net.

Мозговой Андрей Алексеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры гидротехнического строительства Харьковского национального университета строительства и архитектуры. Тел.: (050)749-03-04. E-mail: mozgovoyandrey@ukr.net.

Mozgovuy Andrii Oleksiiiovych, PhD (Tech.), associate professor, Department of Hydraulic Engineering, Kharkivskiyi natsionalnyi universytet budivnytvstva ta arkhitektury. Tel.: (050)749-03-04. E-mail: mozgovoyandrey@ukr.net.

Статтю прийнято 27.11.2018 р.