

УДК 626/627

ІМОВІРНІСНА ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ МОНТАЖНИХ МАЙДАНЧИКІВ БУДІВЕЛЬ ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ЗА КРИТЕРІЯМИ ВТРАТИ СТІЙКОСТІ ПРОТИ ЗСУВУ І СПЛИВАННЯ НА ПРИКЛАДІ ГІДРОВУЗЛІВ ДНІПРОВСЬКОГО КАСКАДУ

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

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ МОНТАЖНЫХ ПЛОЩАДОК ЗДАНИЙ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПО КРИТЕРИЯМ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОТИВ СДВИГА И ВСПЛЫТИЯ НА ПРИМЕРЕ ГИДРОУЗЛОВ ДНЕПРОВСКОГО КАСКАДА

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

PROBABILISTIC RELIABILITY ASSESSMENT OF ERECTION BAYS AT POWERHOUSES BY THE CRITERIA OF STABILITY LOSS AGAINST DISPLACEMENT AND FLOATING UP ON THE EXAMPLE OF HYDRO SCHEMES OF THE DNIEPER CASCADE

Cand. of techn. sciences A. Mozgovuy

Набув подальшого розвитку метод оцінки надійності монтажних майданчиків будівель гідроелектростанцій за критеріями втрати стійкості проти зсуву по плоских і нахилених поверхнях при поступальному і косому зсувах, а також спливання. Ураховано випадковий характер зовнішніх навантажень і впливів, які під час експлуатації сприймають монтажні майданчики, а також кореляційні залежності між ними. Ураховано випадковий характер механічних властивостей ґрунтів основи і кореляційні залежності між ними. Метод апробований на монтажних майданчиках будівель гідроелектростанцій гідровузлів Дніпровського каскаду.

Ключові слова: оцінка надійності, втрата стійкості, кореляційна залежність, монтажний майданчик, Дніпровський каскад.

Получил дальнейшее развитие метод оценки надежности монтажных площадок зданий гидроэлектростанций по критериям потери устойчивости против сдвига по плоским и наклонным поверхностям сдвига при поступательном и косом сдвигах, а также всплытия. Учтен случайный характер внешних нагрузок и воздействий, которые во время эксплуатации воспринимают монтажные площадки, а также корреляционные зависимости между ними. Учтен случайный характер механических свойств грунтов основания и корреляционные зависимости между ними. Метод апробирован на монтажных площадках зданий гидроэлектростанций гидроузлов Днепровского каскада.

Ключевые слова: оценка надежности, потеря устойчивости, корреляционная зависимость, монтажная площадка, Днепровский каскад.

The most common types of hydro schemes for power generation are powerhouses, which include erection bays assigned for assembly or repair of the units.

This work further develops the method for assessing reliability of erection bays at powerhouses by the criteria of stability loss against forward and slanting displacement along flat and inclined surfaces as well as floating up. The work also considers the random nature of the

external loads and impacts, which erection bays at powerhouses bear during operation, as well as correlations between natural factors. It also considers the random nature of mechanical properties of the soil in the foundation 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 order to approbate the proposed method, a numerical probabilistic assessment of the risk of losing stability against displacement and floating up erection bays at the powerhouses of the Dnieper cascade of hydro schemes was performed. Correctness of the obtained results is confirmed by their correspondence with the reliability assessment of the powerhouses 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: hydrological characteristics, ice, and wind, as well as temperature loads and impacts.

Keywords: *reliability assessment, stability loss, correlation, erection bay, Dnieper cascade.*

Вступ. Проектування і розрахунок гідротехнічних споруд потребують оцінки їх надійності і безпеки на основі ймовірнісних методів [1, 2]. Одним із найбільш поширених типів споруд водопідпірного фронту гідровузлів енергетичного призначення є будівлі гідроелектричних станцій (ГЕС), до складу яких входять монтажні майданчики, призначені для укрупнювального складання і ремонту агрегатів. Надійність монтажних майданчиків будівель ГЕС впливає на надійність гідровузла і каскаду гідровузлів у цілому.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими і практичними завданнями. Існуючі методи оцінки надійності гідротехнічних споруд, зокрема будівель гідроелектростанцій, не ураховують певні кореляційні залежності [3], які існують між природними факторами: гідрологічними характеристиками, льодовими, вітровими, температурними навантаженнями і впливами, які є визначальними при оцінці надійності каскадів гідровузлів [4, 5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Методи оцінки експлуатаційної надійності водопропускних споруд і гідроелектростанцій, підходи до оцінки надійності бетонних гідротехнічних споруд, статистичні методи аналізу їх стану

з урахуванням натурних даних, розроблення критеріїв їх надійності розглянуто у роботах О. І. Вайнберга [6], О. М. Фінагенова [7], С. Г. Шульмана [7], Є. М. Дзюбанова [8], Н. Ю. Дмитрієва [8], М. П. Левіної [8], В. Б. Штільмана [8], Л. Д. Лентяєва [9], Л. В. Смирнова [9], Ц. Є. Мірцхулави [10], Д. В. Стефанішина [11] та ін. Удосконалення методів забезпечення надійності складних природно-технічних систем, аналіз ризику у гідротехніці, прогнозування аварійності гідротехнічних об'єктів розглянуто у роботах А. Б. Векслера [12], Д. А. Івашинцова [12], Д. В. Стефанішина [12], Р. Boccotti [13], R. Rosso [13], D. S. Bowles [14], K. V. Bury [15, 16], H. Kreuzer [15, 16], R. N. Chowdhary [17], D. Grivas [17], K. Douglas [18], M. Spannagle [18], R. Fell [18], F. Lemperiere [19], L. A. McDonald [20] та ін.

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. Ця робота спрямована на оцінку надійності монтажних майданчиків будівель ГЕС, які входять до складу споруд

водопідпільного фронту гідровузлів Дніпровського каскаду, з урахуванням кореляційних залежностей, які існують між природними факторами, які є визначальними при оцінці надійності каскадів гідровузлів.

Основна частина дослідження. Нижче наведено характеристики монтажних майданчиків гідроелектростанцій гідровузлів Дніпровського каскаду.

Монтажний майданчик гідроелектростанції Київського гідровузла закритого типу із розмірами у плані 50,6×29,93 м. Навкруги будівлі монтажного майданчика з боку шлюзу, верхнього і нижнього б'єфів виконано обернені засипки від позначки +82,40 м до позначки +107,00 м. З лівого боку до будівлі монтажного майданчика примикає будівля ГЕС. Фундамент виконаний у вигляді суцільної залізобетонної фундаментної плити товщиною від 4,7 м до 2,6 м. Монтажний майданчик розрахований на монтаж одного агрегата і обслуговується мостовим краном в. п. 75 т. Основою монтажного майданчика служать алювіальні дрібнозернисті піски потужністю 10-20 м. Клас наслідків споруд СС2-1.

Монтажний майданчик гідроелектростанції Канівського гідровузла закритого типу із розмірами у плані 52,4×50,7 м. Навкруги будівлі монтажного майданчика з боку шлюзу, верхнього і нижнього б'єфів виконано обернені засипки від позначки +73,40 м до позначки +98,00 м. З лівого боку до будівлі монтажного майданчика примикає будівля ГЕС. Фундамент виконаний у вигляді суцільної залізобетонної фундаментної плити. Товщина плити 3,0 м. Монтажний майданчик розрахований на монтаж одного агрегата і обслуговується мостовим краном в. п. 100/20 т. Основою монтажного майданчика служать піски різної крупності із прошарками супісків і суглинків. Клас наслідків споруд СС2-1.

Монтажний майданчик гідроелектростанції Кременчуцького гідро-

вузла закритого типу із розмірами у плані з урахуванням розмірів пристанційного майданчика 68,5×36,3 м. Навкруги будівлі монтажного майданчика з боку шлюзу і верхнього б'єфа виконано обернені засипки від позначки +60,0 м до позначки +86,00 м. З лівого боку до будівлі монтажного майданчика примикає будівля ГЕС. Фундамент виконаний у вигляді суцільної залізобетонної фундаментної плити, заанкереної в основу. Товщина плити 1,20 м. Стіни підземної частини будівлі виконано із монолітного залізобетону. Товщина зовнішніх стін 4,0 м, 3,80 м. Основою монтажного майданчика служать граніти. Клас наслідків споруд СС3.

Монтажний майданчик гідроелектростанції Дніпродзержинського гідровузла закритого типу із розмірами у плані з урахуванням розмірів пристанційного майданчика 71,0×44,0 м. Навкруги будівлі монтажного майданчика з боку шлюзу і верхнього б'єфа виконано обернені засипки від позначки +49,40 м до позначки +59,25 м. З лівого боку до будівлі монтажного майданчика примикає будівля ГЕС. Фундамент рамної конструкції виконаний із монолітного залізобетону. Порожнини у тілі фундаменту заповнені ущільненою піщаною засипкою. Стіни підземної частини будівлі виконано із монолітного залізобетону. Товщина зовнішніх стін 2,5 м, 1,50 м. Основою монтажного майданчика служать скельні породи.

Монтажний майданчик гідроелектростанції Каховського гідровузла закритого типу із розмірами у плані 63,0×30,0 м. Навкруги будівлі монтажного майданчика з боку шлюзу, верхнього і нижнього б'єфів виконано обернені засипки від позначки -12,50 м до позначок +21,20 м, +16,150 м. З лівого боку до будівлі монтажного майданчика примикає будівля ГЕС. Фундамент виконаний у вигляді суцільної залізобетонної фундаментної плити. Товщина плити 3,150 м. Порожнини у підземній частині будівлі заповнені

ущільненою піщаною засипкою. Стіни підземної частини будівлі виконано із монолітного залізобетону. Товщина зовнішніх стін 3,7 м, 2,85 м. Монтажник майданчик обслуговується мостовим краном в. п. 250/30 т і козловим краном в. п. 2×50/25 т. В основі монтажного майданчика залягають алювіальні дрібнозернисті піски, потужність шарів 7÷8 м. Нижче залягають вапняки потужністю 1÷3,5 м, ще нижче – дрібнозернисті глинисті піски потужністю 26-28 м. Клас наслідків споруд СС3.

Нормативна методика оцінки надійності монтажних майданчиків за критерієм втрати стійкості проти зсуву і спливання. Оцінка надійності монтажних майданчиків виконується для основного й особливого сполучення навантажень. У відповідності до [1, 2] стійкість на зсув і спливання монтажних майданчиків будівель гідроелектростанцій забезпечена при виконанні умови

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

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

R – узагальнена несівна здатність споруди чи основи;

γ_{lc} – коефіцієнт сполучення навантажень, приймається для основного сполучення навантажень у період експлуатації $\gamma_{lc} = 1,0$; для особливого (аварійного) сполучення навантажень $\gamma_{lc} = 0,9$;

γ_c – коефіцієнт умов роботи приймається згідно з [1], $\gamma_c = 1,1$;

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

При виконанні розрахунків стійкості монтажних майданчиків розглядаються такі навантаження і впливи [21]:

- постійні навантаження: власна вага споруди, силовий вплив води при нормальному підпірному рівні верхнього б'єфа, рівні нижнього б'єфа;

- тимчасові тривалі навантаження: тиск наносів, які відкладаються перед спорудою;

- короткочасні навантаження: силовий вплив води при рівнях у верхньому і нижньому б'єфах: тиск води на верхову і низову грані споруди, силовий вплив води, що фільтрується, динамічні навантаження;

- тиск вітрових хвиль, який визначається при середній багаторічній швидкості вітру;

- навантаження від підйомних, перевантажувальних і транспортних пристроїв та інших конструкцій і механізмів (мостових і підвісних кранів);

- особливі навантаження;

- силовий вплив води, обумовлений порушенням одного із дренажних або одного із протифільтраційних пристроїв, при нормальному підпірному рівні у верхньому б'єфі і рівні нижнього б'єфа, який відповідає пропуску через споруду мінімального за технологічними й екологічними вимогами витрат води;

- сейсмічні впливи.

Перераховані навантаження і впливи приймаються в основному або в особливому сполученнях. При розрахунках стійкості монтажних майданчиків на основне сполучення навантажень і впливів ураховуються постійні, тимчасові тривалі і короткочасні навантаження. Розрахунок стійкості монтажних майданчиків на особливе сполучення навантажень і впливів виконується на дію навантажень основного сполучення і одного з особливих. Навантаження і впливи повинні прийматись у найменш сприятливих можливих сполученнях.

Для оцінки ризику втрати стійкості на зсув і спливання за методом граничних станів формулу (1) доцільно подати у вигляді [6]

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

де k – розрахункове значення коефіцієнта запасу стійкості на зсув або спливання;

k_n – нормативне значення коефіцієнта запасу стійкості.

Виконано оцінку надійності монтажних майданчиків на зсув і спливання за нормативною методикою. Отримано такі значення розрахункових і нормативних коефіцієнтів запасу стійкості на зсув $k_{p,u}$ і спливання $k_{p,v}$ при різних розрахункових випадках:

- монтажний майданчик будівлі ГЕС Київського гідровузла: для основного сполучення навантажень $k_n = 1,09$; $k_{p,u} = 1,14$; $k_{p,v} = 1,66$; для особливого сполучення навантажень $k_n = 0,98$; $k_{p,u} = 1,07$; $k_{p,v} = 1,44$;

- монтажний майданчик будівлі ГЕС Канівського гідровузла: для основного сполучення навантажень $k_n = 1,09$; $k_{p,u} = 1,51$; $k_{p,v} = 2,32$; для особливого сполучення навантажень $k_n = 0,98$; $k_{p,u} = 1,08$; $k_{p,v} = 1,58$;

- монтажний майданчик будівлі ГЕС Кременчуцького гідровузла: для основного сполучення навантажень $k_n = 1,14$; $k_{p,u} = 1,83$; $k_{p,v} = 3,17$; для особливого сполучення навантажень $k_n = 1,02$; $k_{p,u} = 1,29$; $k_{p,v} = 1,54$;

- монтажний майданчик будівлі ГЕС Дніпродзержинського гідровузла: для основного сполучення навантажень $k_n = 1,09$; $k_{p,u} = 6,63$; $k_{p,v} = 3,49$; для особливого сполучення навантажень $k_n = 0,98$; $k_{p,u} = 5,79$; $k_{p,v} = 1,71$;

- монтажний майданчик будівлі ГЕС Каховського гідровузла: для основного сполучення навантажень $k_n = 1,14$; $k_{p,u} = 1,83$; $k_{p,v} = 3,18$; для особливого сполучення навантажень $k_n = 1,02$; $k_{p,u} = 1,61$; $k_{p,v} = 2,98$.

Таким чином, надійність споруд будівель монтажних майданчиків гідровузлів Дніпровського каскаду за умовою стійкості проти зсуву і спливання за нормативною методикою забезпечена.

Для розв'язання задач системної теорії надійності широко використовуються методи: числового інтегрування, статистичної лінеаризації, статистичної параболізації, однак у роботі [6] доведено, що у випадку існування між елементами системи кореляційних зв'язків найбільш зручним є метод статистичних випробовувань (метод Монте-Карло).

Розв'язання передбачає побудову рівняння зв'язку між вхідними і вихідними параметрами, визначення їх імовірнісних характеристик, а також визначення ймовірності ризику втрати стійкості монтажного майданчика будівлі ГЕС проти зсуву і спливання.

При розгляданні схеми плоского поступального зсуву по горизонтальній чи нахиленій поверхнях рівняння зв'язку має вигляд

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

де k – коефіцієнт стійкості;

V – підсумок вертикальних сил, спрямованих униз;

W – підсумок вертикальних сил, спрямованих догори;

A_n – площа подошви споруди;

F – узагальнена сила зсуву.

У випадку піщаних ґрунтів доданком $c \cdot A_n$ можна знехтувати.

Розрахунок коефіцієнта стійкості на спливання виконується за формулою

$$k_v = \frac{V}{W}. \quad (4)$$

Вхідними параметрами є геометричні характеристики будівлі ГЕС, характеристики активних сил зсуву, а також пасивних сил, що опираються зсуву. Вихідними параметрами є результати розрахунку – коефіцієнти стійкості проти зсуву або спливання.

Імовірнісний метод визначення ризику втрати стійкості монтажного майданчика будівлі ГЕС проти зсуву (або спливання) за методом статистичних випробувань передбачає виконання N випробувань. При кожному випробуванні реалізується такий підхід:

1. Задається випадкова ймовірність P_V , розподілена рівномірно від 0 до 1, підсумку вертикальних сил V , що діють на монтажний майданчик, спрямованих униз. За значенням P_V визначається квантиль – значення вертикальних сил V .

2. Задається випадкова ймовірність P_W , розподілена рівномірно від 0 до 1, підсумку вертикальних сил протитиску W , що діють по підшві монтажного майданчика, спрямованих догори. За значенням P_W визначається квантиль – значення вертикальних сил W .

3. Задається випадкова ймовірність P_F , розподілена рівномірно від 0 до 1, узагальненої сили зсуву F . За значенням P_F визначається квантиль – значення сили зсуву F .

4. Задаються випадкові ймовірності $P_{tg\varphi}$ і P_c , розподілені рівномірно від 0 до 1, тангенса кута внутрішнього тертя $tg\varphi$ і питомого зчеплення c ґрунту основи. За значеннями $P_{tg\varphi}$ і P_c визначаються квантилі – значення тангенса кута внутрішнього тертя $tg\varphi$ і питомого зчеплення c .

5. Використовуючи рівняння зв'язку (3), (4), обчислюються значення коефіцієнтів стійкості проти зсуву k_u і спливання k_v .

6. Перевіряється виконання умови $k_u \geq 1$ (або спливання $k_v \geq 1$).

7. Після завершення N випробувань обчислюється величина ризику (імовірності) виникнення аварії за критерієм втрати стійкості проти зсуву (або спливання) P_T упродовж призначеного строку служби, як відношення кількості випробувань N_I , коли виконуються умови $k_u < 1$ (або $k_v < 1$), до загальної кількості випробувань N .

8. Щорічний ризик виникнення аварії P за критерієм втрати стійкості проти зсуву (або спливання) обчислюється за формулою [22]

$$P = 1 - (1 - P_T)^{\frac{1}{T}}, \quad (5)$$

де T – призначений строк служби, рр.

9. Значення щорічної ймовірності ризику втрати стійкості будівлі монтажного майданчика порівнюється із нормативною величиною [1].

Запропонований метод визначення ризику втрати стійкості проти зсуву і спливання реалізовано на прикладі монтажного майданчика Кременчуцького гідровузла Дніпровського каскаду.

Схема будівлі монтажного майданчика Кременчуцького гідровузла подана на рисунку.

Площа основи монтажного майданчика $A_n = 2351 \text{ м}^2$. Довжина секції 68,50 м, ширина 36,30 м. Власна вага секції $G_b = 560,0 \text{ МН}$.

Задається випадкова щорічна ймовірність швидкості вітру pV_r , розподілена від 0 до 1. За даними [23] імовірності щорічних максимальних швидкостей вітру у містах Київ, Канів, Дніпродзержинськ, Запоріжжя можуть бути подані нормальним розподілом, у містах Канів, Кременчук, Каховка – логарифмічно-нормальним розподілом.

За значенням pV_r визначається квантиль – швидкість вітру V_r , м/с. У відповідності до ймовірнісної методики розрахунку бетонних і залізобетонних конструкцій необхідне знання розподілів випадкових величин, які відповідають розрахунковому строку служби споруди. Для монтажного майданчика будівлі ГЕС Кременчуцького гідровузла класу відповідальності СС3 розрахунковий строк служби становить $T = 100$ рр. Ординати функції розподілу максимальної швидкості вітру V , м/с, за розрахунковий строк служби T у географічному місці

розрахунку Кременчуцького гідровузла за розрахунковий строк служби отримані

піднесенням до степеня T ординат розподілів щорічної швидкості вітру V_r , м/с.

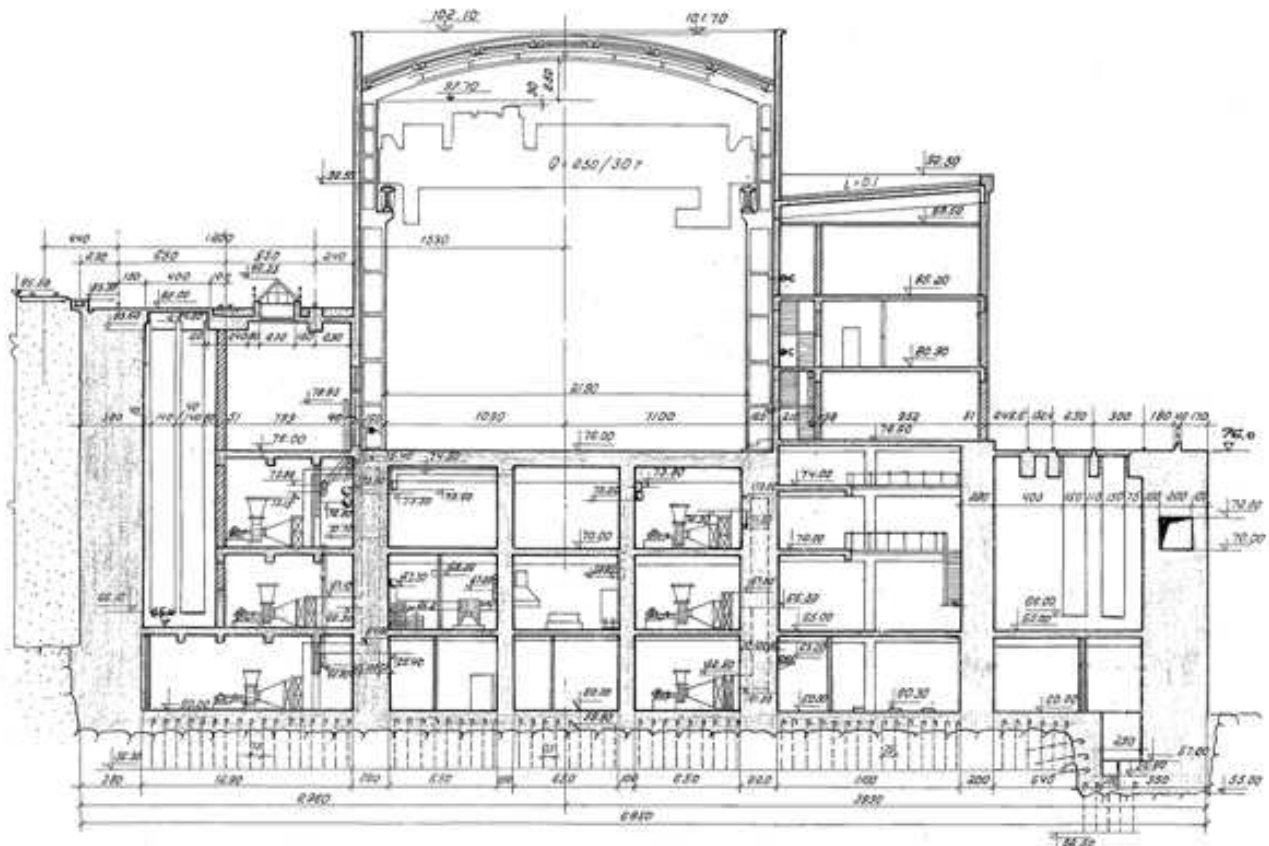


Рис. Переріз будівлі монтажних майданчиків Кременчуцького гідровузла

Задається випадкова, розподілена від 0 до 1, ймовірність pZ позначки рівня води Z , м, перед монтажним майданчиком.

При цьому статичний рівень води обумовлений максимальними паводковими витратами. Статистичні дані щодо забезпеченості максимальних витрат p . Дніпро у створах гідровузлів Дніпровського каскаду наведено у роботах [3, 6].

За значенням pZ визначається квантиль – позначка рівня води Z , м, перед будівлею монтажних майданчиків.

У залежності від статичного рівня води Z , м, визначається середнє значення глибини води у водосховищі H , м, і глибина води у водосховищі H_c , м, перед монтажним майданчиком будівлі ГЕС.

Необхідні дані щодо характеристик водосховищ Дніпровського каскаду містяться у [24].

У залежності від середньої глибини води у водосховищі H , м, визначається довжина розгону хвилі L , м, за відомою методикою, наведеною у [25, 26], а також топографічними характеристиками водосховища.

У залежності від довжини розгону хвилі L , м, глибини води у водосховищі H_c , м, перед греблею і швидкості вітру V , м/с, визначається висота вітрового нагону dh , м, середня висота хвилі h_{cp} , м, висота хвилі 1% забезпеченості у системі хвиль $h_{1\%}$, м.

Визначається хвильовий тиск при максимальному значенні горизонтального

хвильового навантаження, а також максимальне значення горизонтального хвильового навантаження.

Визначається підвищення вільної поверхні хвилі і будується епюра хвильового тиску при максимальному значенні горизонтального хвильового навантаження.

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

Визначаються випадкові величини: сила тиску води з боку верхнього $W_{ВБ}$, кН, і з боку нижнього б'єфів $W_{НБ}$, кН, з боку шлюзу $W_{Ш}$, кН, і будівлі ГЕС $W_{ГЕС}$, кН, а також сила повного протитиску води $G_W = 298,92$ МН.

Визначаються сила тиску ґрунту засипки з боку верхнього і нижнього б'єфів, з боку шлюзу, як тиск ґрунту у стані спокою.

Задається випадкова рівномірно розподілена від 0 до 1 ймовірність щільності ґрунту засипок ρ_g , що примикають до монтажного майданчика будівлі ГЕС, за якою визначається квантиль – значення щільності ґрунту ρ_g .

Задається випадкова рівномірно розподілена від 0 до 1 ймовірність коефіцієнта внутрішнього тертя $\rho_{tg\phi_g}$, за якою обчислюється квантиль – значення коефіцієнта внутрішнього тертя $tg\phi_g$.

За значеннями ρ_g і $tg\phi_g$ визначається сила бічного тиску ґрунту засипок на будівлю монтажного майданчика ГЕС.

Визначаються навантаження (детерміністичні величини) на будівлю монтажного майданчика від ваги механізмів, ваги мосту, корисного навантаження.

На території України землетруси відбуваються внаслідок сейсмічної активності у зонах осередків землетрусів 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, поданими у роботі [28].

Під час виконання кожного статистичного випробовування, ураховуючи статистичну незалежність осередків землетрусів, задаються випадкові щорічні ймовірності сейсмічних впливів pJr , розподілені від 0 до 1 у зонах осередків землетрусів Карпат, Вранча, Криму. За значенням pJr визначаються квантилі – бальність землетрусів Jr , бали. Здійснюється перерахунок бальності землетрусів для району розташування гідровузла й обирається найбільше значення для цього гідровузла. Виконується уточнення бальності землетрусу з урахуванням мікрорайонування місця розташування будівлі ГЕС за рекомендаціями [29].

Виконується перерахунок ординат кривої розподілу щорічного максимального сейсмічного впливу Jr у криву розподілу максимального сейсмічного впливу J за розрахунковий термін експлуатації.

Будується імовірнісна крива розподілу розрахункової амплітуди прискорення основи α_0 (у частках g) від максимальної бальності землетрусів J , бали за призначений термін експлуатації.

Сейсмічний вплив на будівлю ГЕС визначається у вигляді сукупностей таких навантажень: інерційні сили, розподілені по об'єму споруди, сейсмічний гідродинамічний тиск води на поверхню споруди, гідродинамічний тиск від сейсмічних хвиль, які виникають на поверхні водосховища при землетрусах.

Інерційні сейсмічні навантаження у відповідності до [30] визначено за статичною теорією сейсмостійкості, згідно з якою споруда вважається такою, що не деформується, а під час землетрусу коливається із тими ж параметрами, що і ґрунт основи. Коефіцієнт динамічності прийнято 1,5.

Імовірнісна крива розподілу горизонтального інерційного сейсмічного навантаження S , кН, будується в залежності від розрахункової амплітуди прискорення основи α_0 (у частках g) будівлі ГЕС Кременчуцького гідровузла.

Імовірнісна крива розподілу горизонтальної проекції сейсмічної гідродинамічної сили тиску води E_{psg} , кН, будується в залежності від розрахункової амплітуди прискорення основи α_0 (у частках g) будівлі ГЕС Кременчуцького гідровузла і визначається сейсмічний гідродинамічний тиск води.

У відповідності 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 $m_{tg\varphi} = 0,7$, $m_c = 100$ кПа, середньоквадратичні відхилення $\sigma_{tg\varphi} = 0,0854$, $\sigma_c = 12,2$ кПа, коефіцієнт кореляції $r_{tg\varphi c} = 0,937$.

Також визначено кореляційний момент $K_{tg\varphi c} = 0,975$. Коефіцієнт варіації прийнято $C_v = 0,122$.

Задається випадкова ймовірність 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 $tg\varphi$ за формулами:

$$m_{tg\varphi c} = m_c + r_{tg\varphi c} \cdot \frac{\sigma_c}{\sigma_{tg\varphi}} \cdot (tg\varphi - m_{tg\varphi}) \quad (6)$$

$$\sigma_{tg\varphi c} = \sigma_c \cdot \sqrt{1 - r_{tg\varphi c}^2} \quad (7)$$

Визначаються параметри умовного закону розподілу $m_{tg\varphi c}$ $\sigma_{tg\varphi c}$. За відомою

ймовірністю 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. Визначаються рівнодіючі вертикальних сил V і W , горизонтальних сил F , що діють на монтажні майданчики будівлі ГЕС. При цьому враховуються як випадкові, так і детерміністичні навантаження. Отримані вище величини підставляються у рівняння зв'язку (3), (4).

За п. 7-9 наведеного методу визначається ризик виникнення аварії впродовж призначеного строку служби і за формулою (5) щорічний ризик виникнення аварії.

Результати розрахунків ризику втрати стійкості будівель монтажних майданчиків гідровузлів Дніпровського каскаду наведені в таблиці.

Необхідна кількість статистичних випробувань перебуває у межах довірчого інтервалу, межі інтервалу обчислюються за формулами [33].

Висновок з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку. Удосконалено методику оцінки надійності монтажних майданчиків за критерієм втрати стійкості проти зсуву і спливання. Ураховано ймовірнісний характер навантажень і вплив з урахуванням кореляційних залежностей між ними, ймовірнісний характер механічних властивостей основи. Методика апробована на будівлях монтажних майданчиків гідровузлів Дніпровського каскаду. Результати можуть застосовуватись при ймовірнісних розрахунках надійності гідротехнічних споруд і каскадів гідровузлів.

Таблиця

Результати розрахунків ризику втрати стійкості на зсув і спливання монтажних майданчиків будівель ГЕС гідровузлів Дніпровського каскаду

Клас споруди	Кількість статистичних випробовувань	Розрахункове значення ризику втрати стійкості, рік ⁻¹	Довірчий інтервал, рік ⁻¹	Допустиме значення ризику втрати стійкості, рік ⁻¹
Монтажний майданчик Київського гідровузла (на зсув)				
СС2-1	$3,63 \times 10^4$	$4,83 \times 10^{-5}$	$4,6 \times 10^{-5} - 5,07 \times 10^{-5}$	5×10^{-4}
Монтажний майданчик Київського гідровузла (на спливання)				
СС2-1	$1,4 \times 10^{11}$	$1,1 \times 10^{-8}$	$1,06 \times 10^{-8} - 1,14 \times 10^{-8}$	5×10^{-4}
Монтажний майданчик Канівського гідровузла (на зсув)				
СС2-1	$1,18 \times 10^7$	$2,52 \times 10^{-6}$	$2,39 \times 10^{-6} - 2,65 \times 10^{-6}$	5×10^{-4}
Монтажний майданчик Кременчуцького гідровузла (на зсув)				
СС3	$5,62 \times 10^5$	$2,65 \times 10^{-5}$	$2,51 \times 10^{-5} - 2,78 \times 10^{-5}$	5×10^{-5}
Монтажний майданчик Дніпродзержинського гідровузла (на зсув)				
СС2-1	$6,16 \times 10^5$	$4,84 \times 10^{-5}$	$4,6 \times 10^{-5} - 5,04 \times 10^{-5}$	5×10^{-4}
Монтажний майданчик Каховського гідровузла (на зсув)				
СС3	$8,4 \times 10^5$	$1,77 \times 10^{-5}$	$1,68 \times 10^{-5} - 1,86 \times 10^{-5}$	5×10^{-5}

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. 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.
4. 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.
5. 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 Міжнародної наукової конференції “Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель і споруд”. – Харків: ХНУБА, 2013. – Вип.73. — С. 531-536.
6. Вайнберг, А. И. Надежность и безопасность гидротехнических сооружений [Текст] / А. И. Вайнберг. — Харьков: Тяжпроматоматика, 2008. — 304 с.
7. 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.
8. 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.

9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Voccotti, P. Risk analysis of spillway design floods [Text] / P. Voccotti, R. Rosso // Proc. of the Int. Conf. on Safety of Dams. — Coimbra: 1984. — P. 85-92.
14. Bowles, D. S. A comparison of methods for integrated risk assessment of dams [Text] / D. S. Bowles // Engineering Reliability and Risk Analysis in Water Resources. — 1987. — Nijhoff Publishers, Series E, 124. — P. 147-173.
15. Bury, K. V., Kreuzer H. Assessing the failure probability of gravity dams [Text] / K. V. Bury, H. Kreuzer // Int. Water Power and Dam Construction. — 1985. — №11. — P. 34-50.
16. Bury, K. V. The assessment of risk for a gravity dams [Text] / K. V. Bury, H. Kreuzer // Int. Water Power and Dam Construction. — 1986. — No. 12. — P. 36-40.
17. Chowdhary, R. N. Probabilistic Model of Progressive Failure of Slope [Text] / R. N. Chowdhary, D. Grivas // Proc. ASCE. J. Geotechn. Engng. Div. — 1986. — Vol. 108, GT6. — P. 803-819.
18. Douglas, K. Analysis of concrete and masonry dam incidents [Text] / K. Douglas, M. Spannagle, R. Fell // Hydropower & Dams. — 1999. — Issue 4. — P. 108-115.
19. Lemperiere, F. Risk analysis: what sort should be applied and to which dams? [Text] / F. Lemperiere // Hydropower & Dams. — 1999. — Issue 4. — P. 128-132.
20. McDonald, L. A. The status of risk assessment. Australia. In: Risk-based dam safety evaluations. Workshop report. Part one [Text] / L. A. McDonald // Hydropower & Dams. — 1998. — Issue One. — P. 89-97.
21. Пособие к СНиП 2.06.01-86. П-884-91. Проектирование зданий ГЭС и ГАЭС. Расчеты и конструирование [Текст] / ГПИО "ЭНЕРГОПРОЕКТ" Минэнерго и электрификации СССР. — М.: ВНИИО "ГИДРОПРОЕКТ" им. С.Я. Жука, 1991. — 146 с.
22. Ржаницын, А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность [Текст] / А. Р. Ржаницын. — М.: Стройиздат, 1978. — 239 с.
23. Мозговий, А.О. Аналіз статистичних даних вітрових впливів по гідровузлах Дніпровського каскаду. Вибір параметрів функції розподілу вітрових впливів за статистичними даними [Текст] / А.О. Мозговий // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. — Харків: УкрДАЗТ, 2011. — Вип. 127, ч. 1. — С. 171-175.
24. Правила експлуатації водосховищ Дніпровського каскаду [Текст] / А.В. Яцик, А.І. Томільцева, М.Г. Томільцев та ін. — К.: Генеза, 2003. — 176 с.
25. СНиП 2.06.04-82*. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов) [Текст]. — М.: Госстрой СССР, 1989. — 71 с.
26. Руководство по определению нагрузок и воздействий на гидротехнические сооружения (волновых, ледовых и от судов) [Текст] / ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. — Л.: Типография ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1977. — 316 с.
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., (1985), "Evaluating Seismic Risk In Engineering Practice", Proc., Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Fransisco, Vol. 1, pp. 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. Пособие к разд. 5 [Текст]: 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. : ЦИТП Госстроя СССР, 1988. — 48 с.

32. Проектирование оснований гидротехнических сооружений [Текст]: пособие к СНиП II-16-76. П 13-83. — Л. : 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.: Высш. шк., 1998. – 576 с.

Рецензент д-р техн. наук, професор О.І. Вайнберг

Мозговий Андрій Олександрович, канд. техн. наук, доцент кафедри гідротехнічного будівництва Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел.: (057)706-18-99. +380507490304. 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 16.05.2016 р.