

**БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)**

---

УДК 626/627

**ІМОВІРНІСНА ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ГОЛІВ ШЛЮЗІВ ЗА КРИТЕРІЄМ  
СТІЙКОСТІ ПРОТИ ЗСУВУ НА ПРИКЛАДІ ГІДРОВУЗЛІВ ДНІПРОВСЬКОГО  
КАСКАДУ**

Канд. техн. наук А. О. Мозговий

**ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ГОЛОВ ШЛЮЗОВ ПО КРИТЕРИЮ  
УСТОЙЧИВОСТИ ПРОТИВ СДВИГА НА ПРИМЕРЕ ГИДРОУЗЛОВ  
ДНЕПРОВСКОГО КАСКАДА**

Канд. техн. наук А. А. Мозговой

**PROBABILISTIC RELIABILITY ASSESSMENT OF GATEWAY HEADS BY THE  
CRITERIA OF STABILITY AGAINST DISPLACEMENT ON THE EXAMPLE OF  
HYDRO SCHEMES OF THE DNIEPER CASCADE**

PhD (Tech.) A. O. Mozgovyy

*Отримав подальший розвиток метод оцінювання надійності голів шлюзів за критерієм втрати стійкості проти зсуву. Під час виконання дослідження ураховано випадковий характер впливів і зовнішніх навантажень, під дію яких потрапляють голови шлюзів, а також кореляційні залежності між ними. Крім того, ураховано випадковий характер механічних властивостей ґрунту основи і кореляційні залежності між ними. Проведено чисельну імовірнісну оцінку ризику досягнення граничного стану голів шлюзів на скельовій і нескельовій основах гідровузлів Дніпровського каскаду. Метод може застосовуватись при імовірнісних розрахунках надійності каскадів гідровузлів.*

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

*Получил дальнейшее развитие метод оценки надежности голов шлюзов по критерию потери устойчивости против сдвига. При выполнении исследования учтен случайный характер воздействий и внешних нагрузок, действие которых в процессе эксплуатации воспринимают головы шлюзов, а также корреляционные зависимости между ними. Кроме того, учтен случайный характер механических свойств грунтов основания и корреляционные зависимости между ними. Проведена численная вероятностная оценка риска достижения предельного состояния голов шлюзов на скальном и нескальном основаниях гидроузлов Днепровского каскада. Метод может использоваться при вероятностных расчетах надежности каскадов гидроузлов.*

**Ключевые слова:** голова шлюза, природные факторы, корреляция, 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 gateway heads by the criteria of stability loss against displacement and overturning.

The work considers the random nature of the external loads and impacts, which the gateway heads 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. The suggested method allows assessing reliability by the criterion of stability loss against displacement of the gateway heads located both on rock and non-rock foundations. 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 gateway heads 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 gateway heads 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 gateway heads 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, wind, and ice, as well as temperature loads and impacts.

**Keywords:** gateway head, natural factors, correlation, probabilistic reliability assessment, cascade of hydro schemes.

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

Дана робота спрямована на оцінювання надійності голів шлюзів на скельовій і нескельовій основах, які входять до складу споруд водопідпільного фронту на прикладі гідровузлів Дніпровського каскаду. Надійність судноплавних шлюзів впливає на надійність гідровузла і каскаду гідровузлів у цілому.

**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 недопущення виникнення надзвичайних ситуацій на гідротехнічних спорудах і гідровузлах наведено в закордонних роботах [3–11]. 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 [12–27].

Не вирішеною раніше частиною проблеми є те, що існуючі методи оцінювання надійності гідротехнічних споруд, зокрема голів шлюзів на скельовій і нескельовій основах, не ураховують певні кореляційні залежності [24], які існують між природними факторами, що є визначальними при оцінюванні надійності каскадів гідровузлів [25–26, 28–29].

**Визначення мети та завдання дослідження.** Завданням роботи є розроблення алгоритму імовірнісної оцінки надійності голів судноплавних шлюзів на скельовій і нескельовій основах з урахуванням кореляційних залежностей, які існують між природними факторами, а саме кореляційні залежності між гідрологічними характеристиками водотоку, температурою і амплітудою коливань температур зовнішнього повітря, кореляційні залежності між характеристиками ґрунту основи. Метою роботи є апробація запропонованого алгоритму на головах шлюзів гідровузлів Дніпровського каскаду з отриманням чисельного значення імовірності виникнення аварії на зазначених гідротехнічних спорудах.

**Основна частина дослідження.** Нижче наведено характеристики голів шлюзів гідровузлів Дніпровського каскаду.

*Голови шлюзів Київського і Канівського гідровузлів.* Верхні і нижні голови шлюзів докової конструкції з нерозрізним днищем. Голови шлюзів розташовані у верхніх б'єфах в обсіпках. Ширина голів 38 м, 44 м, висота голів 24 м, 35 м (див. рис. 1–2). Ґрунти – нескельові. Клас наслідків споруд – СС2-1.

*Голови шлюзу Кременчуцького гідровузла.* Верхня і нижня голови шлюзу розташовані у верхньому б'єфі, обсіпані ґрунтом і спряжені з будівлею гідроелектростанції за допомогою земляної вставки. Ширина голів 44 м, 52.4 м. Голови шлюзу врізані у скельний масив на глибину до 30 м. Клас наслідків споруд гідровузла – СС3.

*Голови шлюзу Середньодніпровського (колишнього Дніпродзержинського) гідро-*

*вузла.* Верхня і нижня голови шлюзу розташовані у верхньому б'єфі з підводною частковою обсіпкою. Верхня голова – з нерозрізним залізобетонним днищем. Нижня голова – зі стоянів із розрізним армобетонним днищем. Ширина голів 36 м, 50 м, висота голів ~28 м. Клас наслідків споруд гідровузла – СС2-1.

*Голови трикамерного шлюзу Дніпровського гідровузла.* Верхня (перша) голова шлюзу примикає до глухих прогонів водозливної греблі. Верхня (перша) і нижня (четверта) голови шлюзу врізані в скельну основу на глибину до 20 м. Ширина голів ~40 м (див. рис. 3–4). Клас наслідків споруд – СС3.

*Голови однокамерного шлюзу Дніпровського гідровузла.* Верхня і нижня голови шлюзу врізані в скельну основу на глибину до 54 м. Ширина голів 43 м, 52 м. В основі залягають слаботрищівуваті граніти. Клас наслідків споруд гідровузла – СС3.

*Голови шлюзу Каховського гідровузла.* Верхня і нижня голови шлюзу розташовані у верхньому б'єфі між будівлею ГЕС і лівим берегом. Верхня голова – нерозрізна конструкція з розмірами у плані 43.0×30.0 м. Товщина днища 9.5 м. Висота підземної частини 32 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 двостворчатими робочими і ремонтними затворами. Верхня голова з боку водосховища і рейду обсіпана земляними дамбами з шириною майданчиків по верху 30 м. Клас наслідків споруд гідровузла – СС3.

У попередніх роботах [28–29] 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, тому в даному дослідженні за критерій настання граничного стану голів шлюзів прийнято критерій стійкості проти зсуву. Конструктивні особливості голів

трикамерного шлюзу Дніпровського гідровузла потребують перевірки надійності голів шлюзу за критерієм стійкості проти перекидання.

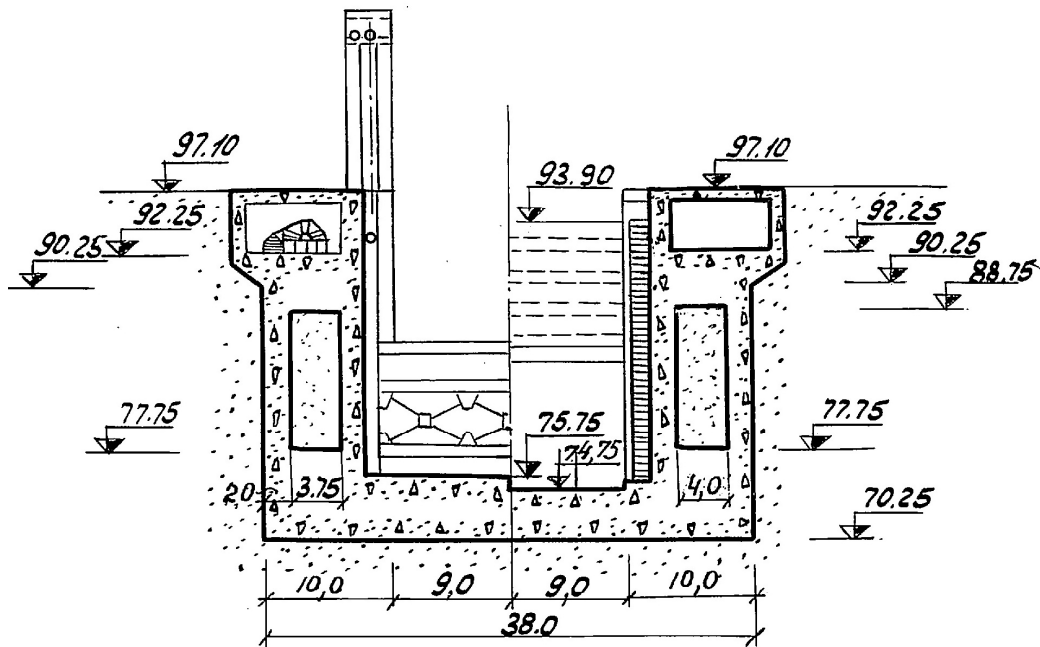


Рис. 1. Верхня голова шлюзу Канівського гідровузла (розміри в метрах)

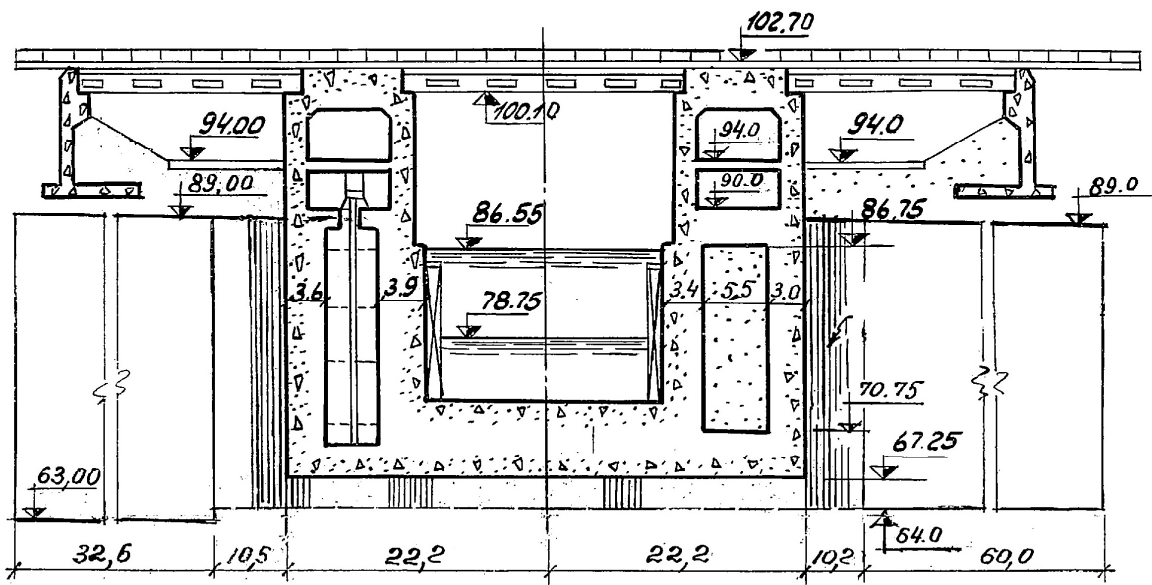


Рис. 2. Нижня голова шлюзу Канівського гідровузла (розміри в метрах)

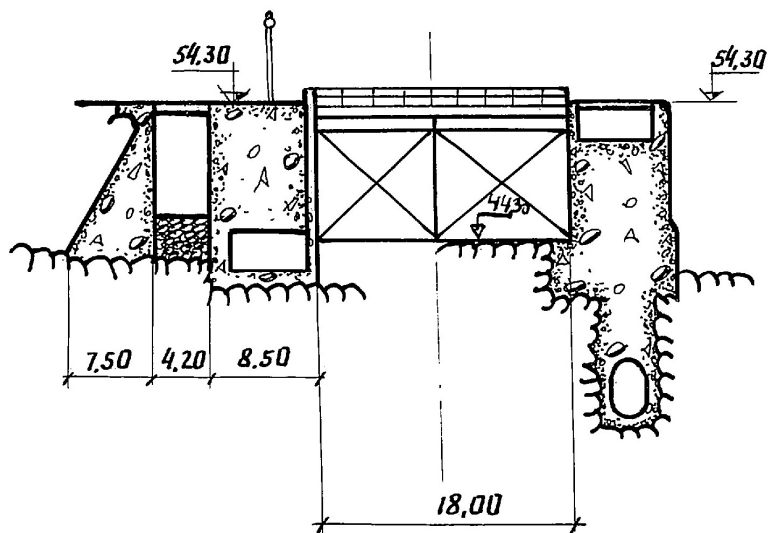


Рис. 3. Перша голова трикамерного шлюзу Дніпровського гідровузла (розміри в метрах)

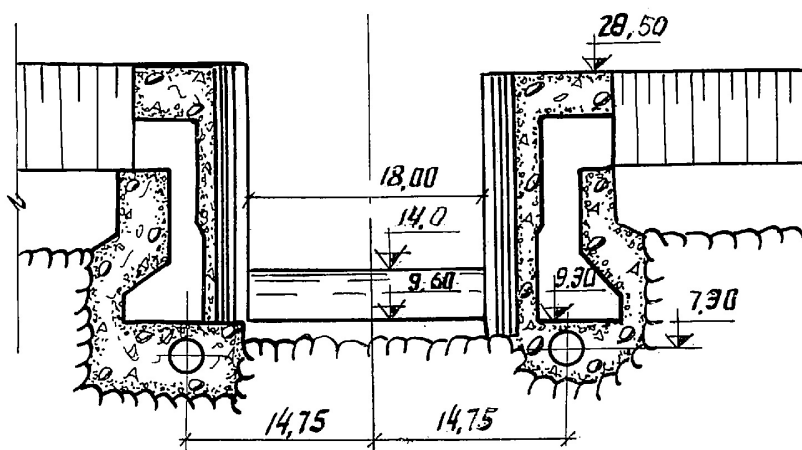


Рис. 4. Четверта голова трикамерного шлюзу Дніпровського гідровузла (розміри в метрах)

*Перевірка надійності голів шлюзів за критеріями стійкості проти зсуву і перекидання*

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  $\gamma_f$ ;

$R$  – узагальнена несуча здатність споруди чи основи;

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

$\gamma_c$  – коефіцієнт умов роботи, приймається  $\gamma_c=1.1$ ;

$\gamma_n$  – 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: власна вага споруди, у тому числі вага постійного технологічного обладнання; силовий вплив води з боку верхнього і нижнього б'єфів; гідростатичний тиск води з боку обернених засипок; гідростатичний тиск води з боку камери шлюзу; силовий вплив води, що фільтрується; температурні впливи; вага постійного технологічного обладнання, підйомних, транспортних пристроїв; власна вага і тиск ґрунту обернених засипок; сейсмічні впливи.

Для оцінювання ризику втрати стійкості проти зсуву і перекидання 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 (проти зсуву чи перекидання);

$k_n$  – нормативне значення коефіцієнта запасу стійкості.

Отримано такі значення нормативних коефіцієнтів запасу стійкості при різних розрахункових випадках: голови шлюзів Кременчуцького, Дніпровського, Каховського гідровузлів: для основного сполучення навантажень (осн. с. н.)  $k_n = 1.14$ ; для особливого сполучення навантажень (особ. с. н.)  $k_n = 1.02$ ; голови шлюзів Київського, Канівського, Середньодніпровського гідровузлів: для осн. с. н.  $k_n = 1.09$ ; для особ. с. н.  $k_n = 0.98$ .

За детерміністичною методикою на основі методу граничних станів отримано такі значення розрахункових коефіцієнтів запасу стійкості проти зсуву  $k_c$  і стійкості проти перекидання  $k_{пер}$  при різних розрахункових випадках:

– верхня голова шлюзу Київського гідровузла: для осн. с. н.  $k_c = 1.64$ ; для особ. с. н.  $k_c = 1.53$ ; нижня голова шлюзу Київського гідровузла: для осн. с. н.

$k_c = 1.41$ ; для особ. с. н.  $k_c = 1.27$ ; верхня голова шлюзу Канівського гідровузла: для осн. с. н.  $k_c = 1.47$ ; для особ. с. н.  $k_c = 1.34$ ; нижня голова шлюзу Канівського гідровузла: для осн. с. н.  $k_c = 1.36$ ; для особ. с. н.  $k_c = 1.25$ ; верхня голова шлюзу Кременчуцького гідровузла: для осн. с. н.  $k_c = 2.63$ ; для особ. с. н.  $k_c = 2.50$ ; нижня голова шлюзу Кременчуцького гідровузла: для осн. с. н.  $k_c = 2.89$ ; для особ. с. н.  $k_c = 2.72$ ; верхня голова шлюзу Середньодніпровського гідровузла: для осн. с. н.  $k_c = 2.59$ ; для особ. с. н.  $k_c = 2.45$ ; нижня голова шлюзу Середньодніпровського гідровузла: для осн. с. н.  $k_c = 2.92$ ; для особ. с. н.  $k_c = 2.83$ ; перша (верхня) голова трикамерного шлюзу Дніпровського гідровузла: для осн. с. н.  $k_c = 1.64$ ,  $k_{пер} = 2.02$ ; для особ. с. н.  $k_c = 1.55$ ,  $k_{пер} = 1.93$ ; четверта (нижня) голова трикамерного шлюзу Дніпровського гідровузла: для осн. с. н.  $k_c = 2.27$ ,  $k_{пер} = 2.34$ ; для особ. с. н.  $k_c = 2.14$ ,  $k_{пер} = 2.26$ ; верхня голова однокамерного шлюзу Дніпровського гідровузла: для осн. с. н.  $k_c = 2.12$ ; для особ. с. н.  $k_c = 2.03$ ; нижня голова однокамерного шлюзу Дніпровського гідровузла: для осн. с. н.  $k_c = 1.48$ ; для особ. с. н.  $k_c = 1.38$ ; верхня голова шлюзу Каховського гідровузла: для осн. с. н.  $k_c = 1.46$ ; для особ. с. н.  $k_c = 1.36$ ; нижня голова шлюзу Каховського гідровузла: для осн. с. н.  $k_c = 1.57$ ; для особ. с. н.  $k_c = 1.47$ .

*Імовірнісний метод визначення ризику втрати стійкості проти зсуву і перекидання голів шлюзів*

Розв'язання передбачає побудову рівняння зв'язку між вхідними і вихідними параметрами, визначення їхніх імовірнісних характеристик, а також визначення імовірності втрати стійкості проти зсуву і перекидання голови шлюзу.

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

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

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

де  $k_c$  – коефіцієнт стійкості проти зсуву;

$V$  – підсумок вертикальних сил, спрямованих униз;

$W$  – підсумок вертикальних сил, спрямованих догори;

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

$c$  – питоме зчеплення;

$A_n$  – площа підшви споруди;

$F$  – узагальнена сила зсуву.

У випадку нескельової основи доданком  $c \cdot A_n$  у формулі (3) можна знехтувати.

При розрахунку на перекидання використовується рівняння зв'язку

$$k_{nep} = \frac{M_{ym}}{M_{nep}}, \quad (4)$$

де  $k_{nep}$  – коефіцієнт стійкості проти перекидання;

$M_{ym}$  – момент утримуючих сил;

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

Вхідними детерміністичними параметрами прийнято площу основи голови шлюзу  $A_n$ , м<sup>2</sup>, інші геометричні розміри, вагу допоміжного обладнання.

Випадковими вхідними величинами прийнято щільність бетону за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації  $C_{\beta} = 0.02$ ; щільність ґрунту оберненої засипки за нормальним розподілом, коефіцієнт варіації  $C_{\gamma gr} = 0.06$ .

Задається випадкова, розподілена від 0 до 1, імовірність  $pZ$  позначки рівня води  $Z$ , м, перед головою шлюзу. Статичний рівень води обумовлений максимальними паводковими витратами з урахуванням кореляційних залежностей між паводковими витратами по гідровузлах Дніпровського каскаду. Статистичні дані щодо забезпеченості максимальних витрат р. Дніпро у створах гідровузлів Дніпровського каскаду наведено в роботах [24, 30].

За значенням  $pZ$  визначається квантиль – позначка рівня води  $Z$ , м, перед головою шлюзу. Між максимальними паводковими витратами р. Дніпро у створах гідровузлів каскаду згідно з роботою [24] існує функціональна залежність. Тому при виконанні кожного статистичного випробовування випадкова величина імовірності  $pZ$  для шлюзів кожного гідровузла 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 голови шлюзу  $pW_f$ . За значенням імовірності визначається квантиль – величина сили вертикального протитиску  $W_f$ .

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

Задається випадкова рівномірно розподілена від 0 до 1 імовірність щільності ґрунту оберненої засипки  $p\rho_{gr}$ , за якою визначається квантиль – значення щільності ґрунту  $\rho_{gr}$ . Задається випадкова рівномірно розподілена від 0 до 1 імовірність коефіцієнта внутрішнього тертя  $p\operatorname{tg} \varphi_g$ , за якою визначається квантиль – значення коефіцієнта внутрішнього тертя  $\operatorname{tg} \varphi_g$ . За значеннями  $\rho_g$  і  $\operatorname{tg} \varphi_g$  визначається сила бічного тиску ґрунту оберненої засипки.

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 [31].

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

На території України землетруси відбуваються унаслідок сейсмічної активності Карпат, Вранча, Криму. Для гідровузлів Дніпровського каскаду вони є статистично незалежними осередками землетрусів. Статистичні дані про їхню сейсмічну активність опрацьовано в роботі [32]. За інтенсивністю землетрусу в його осередку можна визначити його інтенсивність у районі розташування гідровузла за аналітичними виразами згідно з роботою [33].

Під час виконання одного статистичного випробовування, враховуючи статистичну незалежність осередків землетрусів, задаються випадкові щорічні імовірності сейсмічних впливів  $pJ_r$ , розподілені від 0 до 1 у Карпатах, районі Вранча і Криму. За значенням  $pJ_r$  визначаються квантилі – бальність землетрусів  $J_r$ , бали. Здійснюється перерахунок бальності землетрусів у районі розташування гідровузла і обирається найбільше значення для даного гідровузла. Виконується уточнення бальності землетрусу з урахуванням мікрорайонування місця розташування шлюзу [34]. Виконується перерахунок ординат кривої розподілу щорічного максимального сейсмічного впливу  $J_r$  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 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 [35] визначено лінійно-спектральним методом. Будується імовірнісна крива розподілу горизонтального інерційного сейсмічного навантаження  $S$ , кН, від розрахункової амплітуди прискорення основи (у частках  $g$ ) голови

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  $g$ ) голови шлюзу.

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

Характеристики ґрунту основи задані випадковими величинами [36–37]. Коефіцієнт внутрішнього тертя  $tg\varphi$  і питоме зчеплення  $c$  задані за нормальним законом як випадкові корельовані величини. Такі корельовані величини підкоряються нормальному закону, який визначається п'ятьма параметрами: математичні очікування  $m_{tg\varphi}$ ,  $m_c$ , середньоквадратичні відхилення  $\sigma_{tg\varphi}$ ,  $\sigma_c$ , коефіцієнт кореляції  $r_{tg\varphi c}$ . Визначається кореляційний момент  $K'_{tg\varphi c}$ . Коефіцієнт варіації прийнято  $C_v = 0.122$ . Задається випадкова імовірність величини кута внутрішнього тертя  $ptg\varphi$ , розподілена від 0 до 1. За нормальним законом розподілу 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  $c$ .

Розглядається схема плоского поступального зсуву по горизонтальній або похилій поверхні. Обчислюється значення коефіцієнта стійкості проти зсуву і перекидання за формулами (3, 4). При кожному випробовуванні голова 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 голови шлюзу за весь строк служби.

Значення щорічної імовірності ризику настання граничного стану голови шлюзу обчислюється за формулою

$$p = 1 - (1 - pr)^T, \quad (5)$$

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 виникнення аварій голів шлюзів гідровузлів Дніпровського каскаду наведені в таблиці.

Таблиця

Результати оцінки імовірності втрати стійкості і перекидання голів шлюзів

Клас споруди	Кількість статистичних випробовувань	Розрахункове значення імовірності настання граничного стану за призначений строк служби $T, p$ .	Розрахункове значення щорічної імовірності настання граничного стану, $p^{-1}$	Допустиме значення імовірності настання граничного стану, $p^{-1}$
Верхня/нижня голова шлюзу Київського гідровузла				
СС2-1	$3.62 \times 10^5$	$4.22 \times 10^{-3}$	$8.47 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-4}$
	$2.43 \times 10^5$	$6.36 \times 10^{-3}$	$1.28 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$
Верхня/нижня голова шлюзу Канівського гідровузла				
СС2-1	$2.71 \times 10^5$	$5.64 \times 10^{-3}$	$1.13 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$
	$1.60 \times 10^5$	$9.37 \times 10^{-3}$	$1.88 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$
Верхня/нижня голова шлюзу Кременчуцького гідровузла				
СС3	$8.12 \times 10^7$	$1.91 \times 10^{-5}$	$1.91 \times 10^{-7}$	$5 \times 10^{-5}$
	$2.23 \times 10^8$	$7.0 \times 10^{-6}$	$7.0 \times 10^{-8}$	$5 \times 10^{-5}$
Верхня/нижня голова шлюзу Середньодніпровського гідровузла				
СС2-1	$1.54 \times 10^8$	$1.02 \times 10^{-5}$	$2.01 \times 10^{-7}$	$5 \times 10^{-4}$
	$5.11 \times 10^8$	$3.05 \times 10^{-6}$	$6.03 \times 10^{-8}$	$5 \times 10^{-4}$
Верхня/нижня голова трикамерного шлюзу Дніпровського гідровузла				
СС3	$8.34 \times 10^6$	$1.85 \times 10^{-4}$	$1.85 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$
	$1.63 \times 10^7$	$9.72 \times 10^{-5}$	$9.72 \times 10^{-7}$	$5 \times 10^{-5}$
Верхня/нижня голова однокамерного шлюзу Дніпровського гідровузла				
СС3	$1.55 \times 10^9$	$1.10 \times 10^{-6}$	$1.10 \times 10^{-8}$	$5 \times 10^{-5}$
	$2.82 \times 10^6$	$5.53 \times 10^{-4}$	$5.53 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$
Верхня/нижня голова шлюзу Каховського гідровузла				
СС3	$2.03 \times 10^6$	$7.73 \times 10^{-4}$	$7.73 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$
	$6.51 \times 10^6$	$2.38 \times 10^{-4}$	$2.38 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-5}$

Необхідна кількість статистичних випробовувань знаходиться в межах довірчого інтервалу [38]. Результати розрахунків ризику виникнення аварій голів шлюзів гідровузлів Дніпровського каскаду свідчать, що розрахункові значення щорічної імовірності настання граничного стану голів шлюзів не перевищують допустимих значень, тому їхня надійність за імовірнісною методикою забезпечена.

**Висновки.** Удосконалено методику оцінювання надійності голів шлюзів на

скельовій і нескельовій основах за критеріями втрати стійкості проти зсуву і перекидання. Ураховано імовірнісний характер навантажень і впливів, механічних властивостей ґрунту основи, кореляційні залежності між природними факторами. Методика апробована на прикладі голів шлюзів гідровузлів Дніпровського каскаду і може 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. 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. 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.

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

18. 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.

19. Wu, Z.Y. 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.

20. Li, Y. 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.

21. 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.

22. Mahdiyar, A. A Monte Carlo technique in safety assessment of slope under seismic condition [Text] / A. Mahdiyar, M. Hasanipanah, D. J. Armaghani [and others] // *Engineering with Computers*. – 2017. – Vol. 33. – № 4. – P. 807–817.

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

24. 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.

25. 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.

26. 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.

27. 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.

28. 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.

29. 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.

30. 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.

31. 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 : НУВГП, 2011. – Вип. 39. – С. 98-102.

32. 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.

33. 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.

34. 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).

35. 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.

36. Основания гидротехнических сооружений [Текст] : СНиП 2.02.02-85. – [Действ. с 1987–01–01]. – М. : Госстрой СССР, ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 48 с. – (СНиП).

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

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

---

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

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

Mozgovuy Andrii Oleksiiovych, PhD (Tech.), associate professor, Department of Hydraulic Engineering, Kharkiv National University of Construction and Architecture. Tel.: (050)749-03-04. E-mail: mozgovoyandrey@ukr.net.

Статтю прийнято 30.11.2018 р.