

УДК 624.196

МЕТОДИКА ЙМОВІРНІСНОГО ОЦІНЮВАННЯ МІЦНОСТІ МОНОЛІТНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ОБЛИЦЮВАНЬ НАПІРНИХ ГІДРОТЕХНІЧНИХ ТУНЕЛІВ ГЕС І ГАЕС В ЕКСПЛУАТАЦІЙНИЙ ПЕРІОД

Д-р техн. наук О. І. Вайнберг

PROCEDURE OF PROBABILISTIC STRENGTH ASSESSMENT OF MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE LININGS OF HIGH-PRESSURE HYDROTECHNICAL TUNNELS OF HPP AND PSPD DURING THE OPERATIONAL PERIOD

D. Sc. (Tech) O. Vaynberg

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.186.2019.186343>

У статті в рамках теорії надійності складних технічних систем розроблено методика ймовірнісного оцінювання міцності монолітних залізобетонних облицювань напірних гідротехнічних тунелів ГЕС і ГАЕС в експлуатаційний період. Запропоновано алгоритм розв'язання поставленої ймовірнісної задачі методом Монте-Карло. На основі запропонованого алгоритму в ПрАТ «Укргідропроєкт» розроблено комп'ютерну програму. Наведено результати розрахунку ймовірності руйнування облицювання підвідного тунелю Дністровської ГАЕС.

Ключові слова: напірний гідротехнічний тунель, залізобетонне облицювання тунелю, ймовірність руйнування, метод Монте-Карло.

In the article, a methodology for the probabilistic assessment of the strength of monolithic reinforced concrete lining of hydraulic pressure tunnels of HPPs and PSPs during the operational period has been developed within the theory of complex technical systems reliability. Based on the analysis of the available deterministic solution to the problem of stresses in the working annular reinforcement for the considered lining, the coupling equation necessary for solving the probabilistic problem is obtained. The dividing of the parameters included in the coupling equation into random and nonrandom (deterministic) is justified. Recommendations for the selection of distribution functions types, as well as the parameters of these functions for random variables included in the obtained coupling equation are given. An algorithm for solving the posed probabilistic problem by the Monte Carlo method is proposed. Recommendations on the selection of the of statistical tests number that provide sufficient accuracy of the calculation results are given. Based on the proposed algorithm, "Ukrhydroproject" PJSC developed a software As a result of this software operation, the calculated probability of the tunnel lining destruction at the end of the estimated operating life, as well as the annual probability of the tunnel lining destruction, can be obtained. The calculations of the probability of destruction of the reinforced concrete lining of the supplying high-pressure tunnel of the Dniester PSP are carried out. The following results were obtained the probability of destruction of the lining of the tunnel during the estimated service life $2.42 \cdot 10^{-4}$ and the annual probability of destruction of the tunnel lining is $0.24 \cdot 10^{-5}$ 1/year.

Keywords: pressure hydraulic tunnel, reinforced concrete lining of the tunnel, probability of destruction, Monte Carlo method.

Вступ. Згідно з діючими на сьогодні в Україні державним стандартом [1] і будівельними нормами [2, 3] для обґрунтування надійності та безпеки

будівельних конструкцій, будівель і споруд додатково до нормативних проектних розрахунків за методом граничних станів рекомендується виконувати ймовірнісні розрахунки надійності унікальних і особливо відповідальних конструкцій. Такий підхід узгоджується з чинними в Євросоюзі нормами проектування [4].

Досі нема усталених методик, які можна було б використовувати для виконання ймовірнісних розрахунків надійності та безпеки ряду складних і відповідальних конструкцій і споруд. До таких споруд належать напірні гідротехнічні тунелі, які широко застосовуються як станційні водоводи ГЕС і ГАЕС.

У наш час в Україні за проектами ПрАТ «Укргідропроєкт» будуються високонапірні гідротехнічні тунелі в складі Дністровської ГАЕС та Ташлицької ГАЕС. Передбачено монолітні залізобетонні облицювання цих тунелів. У діючих в Україні нормах проектування гідротехнічних тунелів [5] зазначено, що найбільша небезпека руйнування тунелів з такими облицюваннями пов'язана з втратою міцності облицювань в експлуатаційний період.

Враховуючи високу відповідальність тунелів цих ГАЕС, слід виконати ймовірнісні розрахунки, що обґрунтовують надійність таких тунелів. Для виконання цих розрахунків необхідно створити методику ймовірнісного оцінювання міцності монолітних залізобетонних облицювань напірних гідротехнічних тунелів в експлуатаційний період. У даній статті викладено основні положення методики, розробленої в ПрАТ «Укргідропроєкт».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У наш час є велика кількість робіт, присвячених ймовірнісному оцінюванню надійності та безпеки гідротехнічних споруд [6-9 та ін.]. У цих роботах у рамках теорії надійності складних технічних систем наведено обґрунтування підходів, які дозволяють виконувати ймовірнісні розрахунки

міцності і стійкості таких гідротехнічних споруд, як бетонні греблі, ґрунтові греблі, будівлі ГЕС, судноплавні шлюзи, стояни та інші підпірні споруди.

Однак до цього часу приділялося недостатньо уваги питанням ймовірнісних розрахунків надійності та безпеки таких важливих і широко поширених споруд, як гідротехнічні тунелі. Існує порівняно невелика кількість робіт, присвячених розгляду даних питань [10, 11 та ін.]. Тому розроблення методики, що дозволяє виконувати ймовірнісні розрахунки надійності та безпеки гідротехнічних тунелів, є актуальним завданням.

При розробленні методики ймовірнісних розрахунків залізобетонних облицювань напірних гідротехнічних тунелів використовувалися основні принципи теорії надійності складних технічних систем, які зазвичай застосовуються в методиках розрахунків інших гідротехнічних споруд. Використовувалися також підходи, викладені в роботі [11], у якій розглядалися сталезалізобетонні облицювання напірних гідротехнічних тунелів.

Визначення мети і завдань досліджень. Метою досліджень є розроблення ймовірнісної моделі оцінювання надійності та безпеки залізобетонних облицювань напірних гідротехнічних тунелів в експлуатаційний період.

Для досягнення сформульованої мети необхідно вирішити такі завдання:

– аналіз основних факторів, що впливають на міцність розглянутих залізобетонних облицювань напірних тунелів;

– аналіз існуючих підходів, що використовуються при виконанні нормативних детерміністичних розрахунків міцності розглянутих залізобетонних облицювань напірних тунелів;

– формулювання та обґрунтування основних положень методики ймовірнісних розрахунків надійності та безпеки розглянутих залізобетонних облицювань напірних тунелів;

– розроблення алгоритму розв'язання задачі визначення ймовірності руйнування залізобетонного облицювання напірного тунелю в експлуатаційний період.

Основні фактори, які впливають на міцність залізобетонних облицювань напірних тунелів. У поперечному перерізі напірного гідротехнічного тунелю залізобетонне облицювання являє собою залізобетонне кільце, яке спирається на масив гірських порід, що вміщують тунель. У межах облицювання розміщуються робоча кільцева арматура (зазвичай дворядна) і розподільна поздовжня арматура.

Основним навантаженням на розглянуте облицювання напірного тунелю в експлуатаційний період є внутрішній тиск води. Під дією цього тиску в робочій кільцевій арматурі облицювання тунелю виникають напруження розтягу. Максимальні значення цих напружень мають місце в поздовжніх радіальних перерізах облицювання, які співпадають з тріщинами. Згідно з діючими в Україні нормами проектування [5] міцність робочої кільцевої арматури і, отже, міцність розглянутих залізобетонних облицювань напірних тунелів вважається забезпеченою, якщо максимальні значення напружень у цій арматурі не перевищують гранично допустимих значень.

На міцність залізобетонного облицювання напірного тунелю в експлуатаційний період впливає ряд таких основних факторів:

– інтенсивність внутрішнього тиску води – при збільшенні цього тиску напруження в робочій кільцевій арматурі підвищуються, а міцність облицювання тунелю знижується;

– діаметр тунелю – при збільшенні діаметра тунелю напруження в робочій кільцевій арматурі підвищуються, а міцність облицювання тунелю знижується;

– пружний опір масиву гірських порід, що вміщує тунель, – при збільшенні цього опору напруження в робочій

кільцевій арматурі знижуються, а міцність облицювання тунелю підвищується;

– площа перерізу робочої кільцевої арматури – при збільшенні площі перерізу арматури напруження в ній знижуються, а міцність облицювання тунелю підвищується;

– міцність робочої кільцевої арматури при розтягуванні – при збільшенні цього параметра міцність облицювання тунелю підвищується.

Нормативні детерміністичні підходи до оцінювання міцності залізобетонних облицювань напірних гідротехнічних тунелів. Діючі в Україні норми проектування [5] регламентують використання детерміністичних підходів при обґрунтуванні надійності і безпеки гідротехнічних тунелів. Згідно з цими нормами вважається, що міцність залізобетонного облицювання напірного гідротехнічного тунелю буде забезпечена, якщо розрахункові значення напружень у робочій кільцевій арматурі σ_s не перевищують граничного значення $\sigma_{s,u}$. Граничне значення $\sigma_{s,u}$ приймається за нормами проектування залежно від міцності робочої кільцевої арматури, класу відповідальності тунелів, розглянутих розрахункових сполучень навантажень [3, 5, 12].

У нормах проектування [5] наведено порівняно нескладний вираз, що дозволяє визначати необхідну площу перерізу робочої кільцевої арматури A_s в залізобетонному облицюванні напірного тунелю. Відзначимо, що цей вираз не враховує вплив роботи розтягнутого бетону облицювання на ділянках між тріщинами на деформації робочої кільцевої арматури. Це призводить до деякого завищення несучої здатності залізобетонного облицювання тунелю.

У роботі [13] наведено вираз для визначення необхідної площі перерізу робочої кільцевої арматури A_s , який отримано в рамках нормативного детерміністичного підходу з урахуванням впливу роботи розтягнутого бетону

облицювання на ділянках між тріщинами. При виконанні розрахунків з використанням цього, порівняно громіздкого, виразу отримують більші значення необхідної площі перерізу арматури A_s порівняно з розрахунками за нормами проектування [5]. Відзначимо також, що в роботі [13] наведено вираз для визначення розрахункових значень напружень у робочій кільцевій арматурі σ_s .

Основна частина дослідження. Як уже зазначалося, міцність залізобетонного облицювання напірного гідротехнічного тунелю визначається одним параметром – міцністю робочої кільцевої арматури, яка розміщена в такому облицюванні. Тому розрахунки ймовірності втрати міцності цього залізобетонного облицювання доцільно виконувати в межах параметричної теорії надійності. При цьому розглядаються такі стандартні етапи розв'язання ймовірнісної задачі в рамках даної теорії надійності [6-8 та ін.].

1. Складання рівняння зв'язку між вхідними (характеристики навантажень, властивостей матеріалів і ґрунтів та ін.) і

вихідними параметрами (результати розрахунку).

2. Підготовка вихідних даних для розрахунку відповідно до прийнятого рівняння зв'язку і розділення вихідних параметрів на випадкові і не випадкові (детерміністичні).

3. Визначення на основі наявної інформації ймовірнісних характеристик випадкових вихідних параметрів.

4. Визначення ймовірності досягнення граничного стану залізобетонного облицювання за умови міцності робочої кільцевої арматури на основі розв'язання відповідної задачі статистичної динаміки.

При складанні рівняння зв'язку, необхідного для розв'язання поставленої ймовірнісної задачі, використовується наведений у роботі [13] вираз для визначення розтягувальних напружень в арматурі σ_s . Цей вираз отримано з урахуванням основних факторів, що впливають на ці напруження, у тому числі з урахуванням впливу роботи розтягнутого бетону облицювання на ділянках між тріщинами. Прийняте рівняння зв'язку має вигляд

$$\sigma_s = \frac{E_s}{E_s \cdot A_s + K_0 \cdot r_s} \cdot \left[q \cdot r_i + \frac{2}{3} \cdot \frac{K_0 \cdot r_s \cdot R_{bt} \cdot (r_e - r_i)}{E_s \cdot A_s} \right] \leq R_s. \quad (1)$$

У даному рівнянні q – внутрішній тиск води в тунелі; A_s – площа перерізу робочої кільцевої арматури; r_i – внутрішній радіус облицювання; r_e – зовнішній радіус облицювання; r_s – радіус осі робочої кільцевої арматури; E_s – модуль пружності матеріалу арматури (сталі); K_0 – приведений коефіцієнт питомого пружного опору масиву гірських порід, що вміщує тунель; R_{bt} – міцність бетону облицювання при розтягуванні; R_s – міцність арматури при розтягуванні.

Внутрішній тиск води в тунелі q може розглядатися як сума статичного тиску q_{st} ,

тиску гідравлічного удару q_{wp} , тиску пульсації потоку води в тунелі q_p , сейсмічного тиску води в тунелі q_s , що виникає при землетрусах. Таким чином, можна записати

$$q = q_{st} + q_{wp} + q_p + q_s. \quad (2)$$

При визначенні величин q_{st} , q_{wp} , q_p , q_s зазвичай використовуються такі підходи [11, 13 та ін.].

Статичний тиск води q_{st} визначається за загальновідомою формулою гідростатики:

$$q_{st} = \rho_w \cdot g \cdot (Z_w - Z_0), \quad (3)$$

де Z_w – відмітка рівня води у верхньому б'єфі;

Z_0 – відмітка осі тунелю в розрахунковому перерізі;

ρ_w – густина води;

g – прискорення вільного падіння.

Тиск гідравлічного удару q_{wp} і тиск пульсації потоку води в тунелі q_p приймаються за даними розрахунків несталого режиму руху потоку води в підвідному тракті ГЕС (або ГАЕС). При визначенні величин q_{wp} і q_p враховуються дані заводу-виробника турбінного обладнання, що включають умови закриття (або відкриття) напрямного апарату турбіни, наявність зрівняльного резервуара та інші фактори.

Сейсмічний тиск води в тунелі визначається на основі спеціальних досліджень згідно з діючими нормами проектування [14]. При виконанні попередніх розрахунків значення сейсмічного тиску води в тунелі q_s може бути знайдено за формулою

$$q_s = \frac{a_s}{\pi} \rho_w \cdot C_0 \cdot T_0, \quad (4)$$

де a_s – розрахункове значення сейсмічного прискорення, яке приймається залежно від інтенсивності розрахункового землетрусу на ділянці розташування тунелю з урахуванням глибини закладення тунелю;

C_0 – швидкість звуку у воді, яка приймається $C_0 = 1300$ м/с;

T_0 – переважаючий період сейсмічних коливань ґрунту, що дорівнює $T_0 = 0.5$ с.

У загальному випадку всі параметри, що входять до рівняння зв'язку (1), є випадковими величинами. Однак деякі параметри через їхню малу мінливість можуть розглядатися як детерміністичні величини.

На основі аналізу мінливості параметрів, що входять до рівняння зв'язку (1), встановлено, що параметри r_i , r_s , A_s , E_s доцільно розглядати як детерміністичні (невипадкові) величини, а параметри q , r_e , K_0 , R_{bt} , R_s – як випадкові величини.

Випадкову величину внутрішнього тиску води в тунелі q відповідно до виразу (2) слід розглядати як суму випадкових величин статичного тиску води q_{st} , тиску гідравлічного удару q_{wp} , тиску пульсації потоку води q_p , сейсмічного тиску води q_s . Слід мати на увазі, що згідно з виразом (3) випадкова величина q_{st} є функцією випадкової величини відмітки рівня води у верхньому б'єфі Z_w , а відповідно до виразу (4) випадкова величина q_s є функцією випадкової величини сейсмічного прискорення a_s . Параметри Z_0 , ρ_w , g , C_0 , T_0 , які входять до виразів (3), (4), доцільно розглядати як детерміністичні величини.

Випадкова величина зовнішнього радіуса облицювання r_e є сумою детерміністичної величини проектного зовнішнього радіуса облицювання $r_{e,p}$ і випадкової величини перебору при проходці тунелю Δr_e , тобто $r_e = r_{e,p} + \Delta r_e$.

При виборі виду законів (функцій) розподілу випадкових величин, що входять до рівняння зв'язку (1), доцільно скористатися підходами, викладеними в роботах [6–8, 11 та ін.]. Прийнято такі види законів розподілу розглянутих випадкових величин:

– для випадкових величин K_0 , R_{bt} , R_s , Δr_e – нормальний закон розподілу;

– для випадкових величин q_{wp} і q_p – біномінальний закон розподілу;

– для випадкової величини a_s – закон розподілу Вейбулла;

– для випадкової величини Z_w – закон розподілу, якому відповідає комбінована функція розподілу згідно з рекомендаціями робіт [7 та ін.].

При визначенні параметрів функцій розподілу розглянутих випадкових величин

використовуються підходи, викладені в роботах [7, 11 та ін.].

Необхідно звернути увагу на таку обставину. Функції розподілу випадкових величин K_0 , R_{bt} , R_s , Δr_e є залежностями ймовірностей від аргументів цих функцій. У той же час функції розподілу випадкових величин Z_w , q_p , q_{wp} , a_s є залежностями щорічних імовірностей від аргументів цих функцій. Таким чином, одиниці вимірювання ймовірностей випадкових величин, що розглядаються, різні. Для подолання цієї розбіжності при виконанні ймовірнісних розрахунків міцності залізобетонного облицювання напірного тунелю доцільно скористатися таким прийомом.

Функції розподілу випадкових величин Z_w , q_p , q_{wp} , a_s зводяться до розрахункового терміну служби тунелю T . Ординати зведених функцій розподілу можуть бути отримані піднесенням до степеня T щорічних імовірностей, які є ординатами вихідних функцій розподілу. Значення T приймається за нормами проектування гідротехнічних споруд [3] залежно від класу відповідальності споруди (для споруд класів відповідальності СС3 і СС2-1 – 100 років, а для споруд класів відповідальності СС2-2 і СС1 – 50 років).

Далі, використовуючи зведені функції розподілу, виконуються розрахунки за визначенням імовірності руйнування облицювання тунелю P_T протягом розрахункового терміну служби споруди T . Після визначення значення P_T обчислюється значення щорічної ймовірності руйнування облицювання тунелю P за формулою [7 та ін.]

$$P = 1 - (1 - P_T)^{1/T}. \quad (5)$$

Для визначення ймовірності руйнування облицювання тунелю протягом розрахункового терміну служби споруди P_T в даній роботі використовується метод статистичних випробувань (Монте-Карло),

який дозволяє ефективно розв'язати поставлену задачу статистичної динаміки.

Відзначимо, що для забезпечення достовірності одержуваного, порівняно малого, значення P_T необхідна досить велика кількість статистичних випробувань N , яка може бути прийнята за рекомендаціями [7].

Послідовність розрахунків з визначення ймовірності руйнування залізобетонних облицювань напірних гідротехнічних тунелів методом Монте-Карло. Доцільно прийняти таку послідовність (алгоритм) розрахунків імовірності руйнування залізобетонного облицювання напірного гідротехнічного тунелю методом статистичних випробувань (Монте-Карло).

1. Приймається кількість статистичних випробувань N .

2. Для кожного статистичного випробування i ($i = 1, 2, \dots, N$) виконуються такі розрахунки.

2.1. Задаються рівномірно розподіленими в інтервалі від 0 до 1 випадковими ймовірностями $P_{K0,i}$, $P_{Rbt,i}$, $P_{Rs,i}$, $P_{\Delta r_e,i}$, $P_{q_{wp,i}}$, $P_{q_p,i} = P_{q_{wp,i}}$, $P_{a_s,i}$, $P_{Z_w,i}$, які відповідають випадковим величинам K_0 , R_b , R_s , Δr_e , q_{wp} , q_p , Z_w .

2.2. За значеннями $P_{K0,i}$, $P_{Rbt,i}$, $P_{Rs,i}$, $P_{\Delta r_e,i}$, $P_{q_{wp,i}}$, $P_{q_p,i}$, $P_{a_s,i}$, $P_{Z_w,i}$ з використанням функцій розподілу визначаються квантилі – значення випадкових величин $K_{0,i}$, $R_{b,i}$, $R_{s,i}$, $\Delta r_{e,i}$, $q_{wp,i}$, $q_{p,i}$, $a_{s,i}$, $Z_{w,i}$.

2.3. Обчислюються значення випадкових величин:

– статичного тиску води $q_{st,i}$ за формулою (3);

– сейсмічного тиску води $q_{s,i}$ за формулою (4);

– повного внутрішнього тиску води q_i за формулою (2);

– зовнішнього радіуса облицювання $r_{e,i}$ за формулою $r_{e,i} = r_{ep} + \Delta r_{e,i}$;

– напружень у робочій кільцевій арматурі $\sigma_{s,i}$ за формулою (1).

2.4. Перевіряється виконання умови $\sigma_{s,i} \leq R_{s,i}$.

3. Після виконання всіх N статистичних випробувань обчислюється значення ймовірності втрати міцності залізобетонного облицювання тунелю протягом розрахункового терміну служби P_T як відношення кількості випробувань n_1 , при яких $\sigma_{s,i} \geq R_{s,i}$, до кількості всіх випробувань N , тобто $P_T = n_1/N$.

4. Визначається щорічна ймовірність руйнування залізобетонного облицювання напірного тунелю P за формулою (5).

Викладений алгоритм розрахунків був реалізований у розробленій у ПрАТ «Укргідропроєкт» комп'ютерній програмі «Розрахунок ймовірності руйнування залізобетонного облицювання напірного

гідротехнічного тунелю в експлуатаційний період».

Приклад розрахунку. З використанням розробленої комп'ютерної програми виконано розрахунок ймовірності руйнування залізобетонного облицювання напірного підвідного тунелю № 5 Дністровської ГАЕС в перерізі на ПК 2+0.805, який показано на рисунку. Клас відповідальності тунелю – СС3. Статичний напір на осі тунелю в цьому перерізі складає 164.9 м. Сумарний тиск гідравлічного удару і пульсації потоку води в тунелі в період нормальної експлуатації становить 0.178 МПа, а при повному скиданні навантаження ГАЕС – 0.344 МПа.

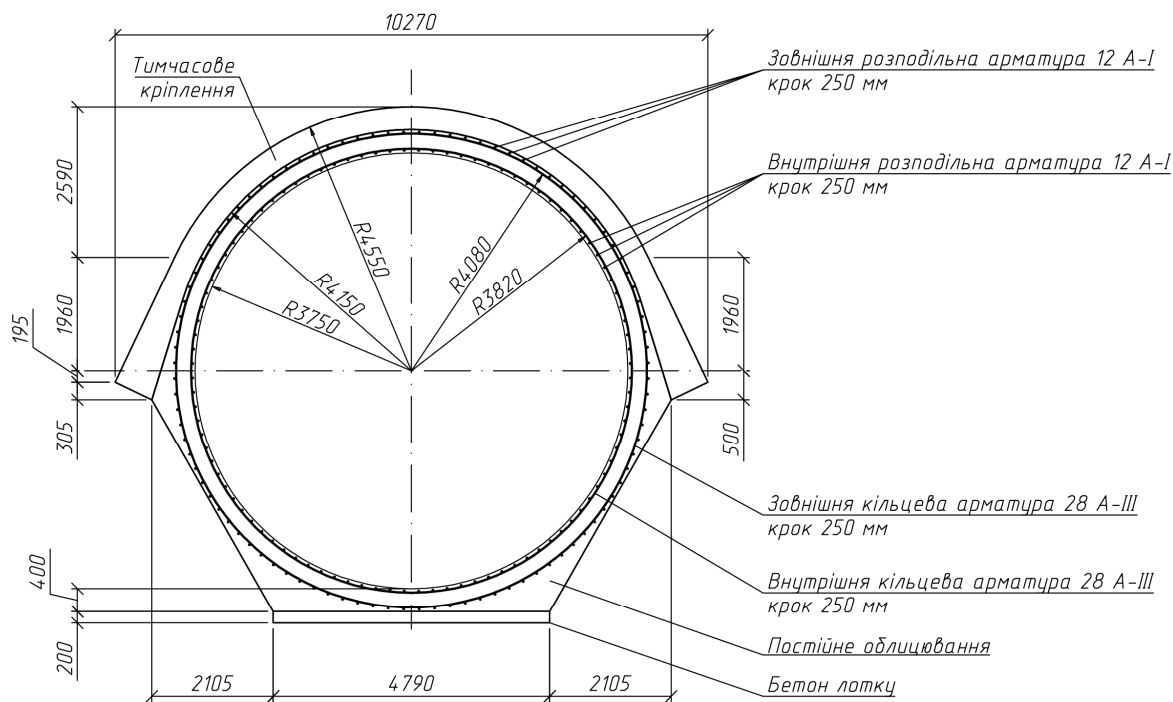


Рис. Поперечний переріз напірного підвідного тунелю № 5 Дністровської ГАЕС на ПК 2+0.805

При виконанні розрахунку була прийнята кількість статистичних випробувань $N = 2000000$. Отримано такі результати.

– ймовірність руйнування облицювання тунелю протягом розрахункового терміну служби $P_T = 2.42 \cdot 10^{-4}$.
– довірчий інтервал ймовірності руйнування облицювання тунелю протягом

розрахункового терміну служби при довірчій імовірності $a = 0.95$ ($2.64 \cdot 10^{-4} - 2.21 \cdot 10^{-4}$);

– щорічна ймовірність руйнування облицювання тунелю $P = 0.24 \cdot 10^{-5}$.

За діючими нормами проектування гідротехнічних споруд [3], допустима ймовірність виникнення аварій для споруд класу відповідальності ССЗ становить $P_n = 5 \cdot 10^{-5}$. Оскільки $P = 0.24 \cdot 10^{-5} < P_n = 5 \cdot 10^{-5}$, то можна вважати, що міцність залізобетонного облицювання підвідного тунелю № 5 Дністровської ГАЕС в перерізі на ПК 2+0.805 забезпечена.

Висновки. Обґрунтовано методику розв'язання задачі ймовірнісного

оцінювання міцності монолітних залізобетонних облицювань напірних гідротехнічних тунелів ГЕС і ГАЕС в експлуатаційний період. Розроблено алгоритм розв'язання цієї ймовірнісної задачі методом Монте-Карло. Даний алгоритм реалізовано у комп'ютерній програмі «Розрахунок імовірності руйнування залізобетонного облицювання напірного гідротехнічного тунелю в експлуатаційний період», яку складено в ПрАТ «Укргідропроєкт». Наведено приклад розрахунку ймовірності руйнування залізобетонного облицювання напірного підвідного тунелю № 5 Дністровської ГАЕС.

Список використаних джерел

1. ДСТУ-Н Б В.1.2-13:2008. Система надійності та безпеки у будівництві. Основи проектування конструкцій (EN 1990:2002, IDT). Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 81 с.
2. ДБН В.1.2-14-2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 73 с.
3. ДБН В.2.4-3:2010. Гідротехнічні, енергетичні та меліоративні системи і споруди, підземні гірничі виробітки. Гідротехнічні споруди. Основні положення. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 37 с.
4. EN 1990:2001. Eurocode: Basis of structure design. Brussels: CEN, 2002. 89 p.
5. СНиП 2.06.09-84. Тоннели гидротехнические / Госстрой СССР. Москва: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. 19 с.
6. Вероятностные методы оценки надежности грунтовых гидротехнических сооружений / Е. Н. Беллендир, Д. А. Ивашинцов, Д. В. Стефанишин, О. М. Финагенов, С. Г. Шульман. Санкт-Петербург: Изд-во «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2003. Т. 1. 554 с.; 2004. Т. 2. 524 с.
7. Вайнберг А. И. Надежность и безопасность гидротехнических сооружений. Избранные проблемы. Харьков: Изд-во «Тяжпромавтоматика», 2008. 304 с.
8. Векслер Ф. Б., Ивашинцов Д. А., Стефанишин Д. В. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений. Санкт-Петербург: Изд-во «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2002. 592 с.
9. Matos J. C., Moreira V. N., Valente I. B., Cruz P.J.S., Neves L. C., Galvão N. Probabilistic-based assessment of existing steel-concrete composite bridges – Application to Sousa River Bridge. *Engineering Structures*. 2019. Vol. 181. P. 95-110.
10. Вайнберг А. И. Оценка вероятности обрушения стены тоннельной выработки методом статистической параболлизации. *Вісник Українського державного університету водного господарства та природокористування: Зб. наук. праць. Ч. 5. Рівне, 2002. Вип. 5(18). С. 24–32.*

11. Вайнберг А. И. Алгоритм определения вероятности потери прочности сталежелезобетонной обделки высоконапорного тоннеля. *Гидроэнергетика Украины*. 2013. № 1. С. 24–32.

12. СНиП 2.06.08-87. Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений / Минэнерго СССР. Москва: ЦИТП Госстроя СССР, 1987. 32 с.

13. Вайнберг А. И. Расчет прочности железобетонной обделки напорного тоннеля с учетом работы бетона. *Вісник національного університету водного господарства та природокористування: Зб. наук. праць. Технічні науки*. Рівне, 2013. Вип. 2 (62). С. 37–46.

14. ДБН В.1.1-12:2014. Будівництво в сейсмічних районах України / Мінрегіон України. Київ: ГП «Укрархбудинформ», 2014. 110 с.

Вайнберг Олександр Ісаакович, д-р техн. наук, професор, заступник генерального директора ПрАТ «Укргідропроєкт». Тел.: +380577021513. E-mail: vaynberg@uhp.kharkov.ua.

Vaynberg Oleksandr, Dr. Sc. (Tech), Professor, Deputy General Director of Ukrhidroproject PJSC. Tel.: +380577021513. E-mail: vaynberg@uhp.kharkov.ua.

Статтю прийнято 23.09.2019 р.