

ІМОВІРНІСНА ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ БЕТОННИХ ГРАВІТАЦІЙНИХ ГРЕБЕЛЬ НА СКЕЛЬНІЙ ОСНОВІ ЗА КРИТЕРІЄМ ОБМЕЖЕННЯ ГЛИБИНИ ЗОНИ РОЗТЯГАННЯ ПО ПЕРЕРІЗУ ГРЕБЛІ З ОСНОВОЮ

В роботі розглянуто методику імовірнісної оцінки надійності бетонних гравітаційних гребель на скельній основі за критерієм обмеження глибини зони розтягання по перерізу греблі з основою. В результаті отримана кількісна імовірнісна оцінка досягнення межового стану за першою групою межових станів, пов'язаного з перевищенням межової глибини зони розтягання у перерізі по контакту греблі з основою. Запропонована методика може бути використана при розрахунках бетонних гравітаційних гребель на скельній основі.

Ключові слова: бетонні греблі, скельні основи, імовірність, надійність.

Постановка проблеми

Зараз в Україні лише з'являються норми проектування, які регламентують виконання імовірнісної оцінки гідротехнічних споруд, але більшість діючих норм базуються на основі детерміністичного за формою підходу заснованому на методі граничних станів.

Аварії на бетонних гравітаційних греблях на скельній основі можуть бути викликані при досягненні межового стану першої групи, пов'язаного з перевищенням межової глибини зони розтягання у перерізі по контакту греблі з основою P_0 .

Метою даної роботи є розробка методики імовірнісної оцінки надійності бетонних гравітаційних гребель на скельній основі класу СС2 за критерієм обмеження глибини зони розтягання по перерізу греблі з основою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Відносна глибина зони розтягання у горизонтальних перерізах тіла греблі ξ_{td} , дорівнює відношенню ширини горизонтального перерізу тіла греблі у перерізі до ширини розрахункового горизонтального перерізу. Для основних сполучень навантажень відносна глибина зони розтягу у горизонтальних перерізах дорівнює $\xi_{td0} = 0.133$, для особливих сполучень навантажень, які не враховують сейсмічні $\xi_{td1} = 0.167$, для особливих сполучень навантажень, які враховують сейсмічні на рівні максимального розрахункового землетрусу $\xi_{td3} = 0.286$ [1].

При розрахунку елементарним методом, напруження усередині тіла греблі визначаються із залежностей для плоскої задачі теорії пружності. При лінійному законі розподілу нормальних

напружень σ_y по перерізу напруження σ_x будуть змінюватися за кубічною параболою, а дотичні напруження τ – за параболою другого ступеня. Однак, приклади розрахунків свідчать, що напруження σ_x будуть змінюватися за лінійною залежністю [2].

В плоскій задачі розрахунок напружень в гравітаційній греблі виконується для частини греблі одиничної довжини, яка виділена вертикальними площинами нормальними до її осі.

Майданчики дії головних нормальних напружень розташовуються: один у площині грані, другий нормально до неї. У площині граней профілю дотичні напруження дорівнюють нулю, з цього виходить що ці майданчики є майданчиками дії одного з головних напружень.

Якщо умови, які обмежують глибину зони розтягання не виконуються, норми проектування [1] допускають оцінювати міцність греблі в цьому перерізі за формулою:

$$\sigma_y = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{I} \cdot x^{-1}, \quad (1)$$

де A – площа перерізу;

N – вертикальна осьова сила;

I – момент інерції;

M – згинальний момент;

x – координатна вісь.

Для основних сполучень навантажень відносна глибина зони розтягання в перерізі по контакту греблі з основою:

$$d_t = 0. \quad (2)$$

Для особливих сполучень навантажень, які не враховують сейсмічні впливи, відносна глибина зони розтягання в перерізі по контакту греблі з основою:

$$d_t \leq 0,083 \cdot b. \quad (3)$$

де b – ширина греблі по основі, м.

Для особливих сполучень навантажень, враховуючих сейсмічні впливи на рівні максимального розрахункового землетрусу, відносна глибина зони розтягання в перерізі по контакту греблі з основою:

$$d_t \leq 0,200 \cdot b. \quad (4)$$

Напруження на контакті греблі з основою значно залежать від пружних властивостей тіла греблі E_2 та основи E_0 , тобто від співвідношення їх модулів деформації, а також від коефіцієнту Пуасона.

Деформації основи відбуваються під дією навантажень, які основі передає гребля та зовнішні навантаження.

Гребля та основа зв'язані між собою силами зчеплення та тертя, у зв'язку з чим забезпечення монолітності їх контакту можливо лише при прикладанні додаткових напружень на контакті.

Ф. Тельке [2] для греблі класу СС2 приводить епюри напружень для різних відношень модулів пружності матеріалу греблі і основи при опорожненому і наповненому водосховищі, які наведені на рис 1.

а) $E_2/E_0=1$

б) $E_2/E_0=1$

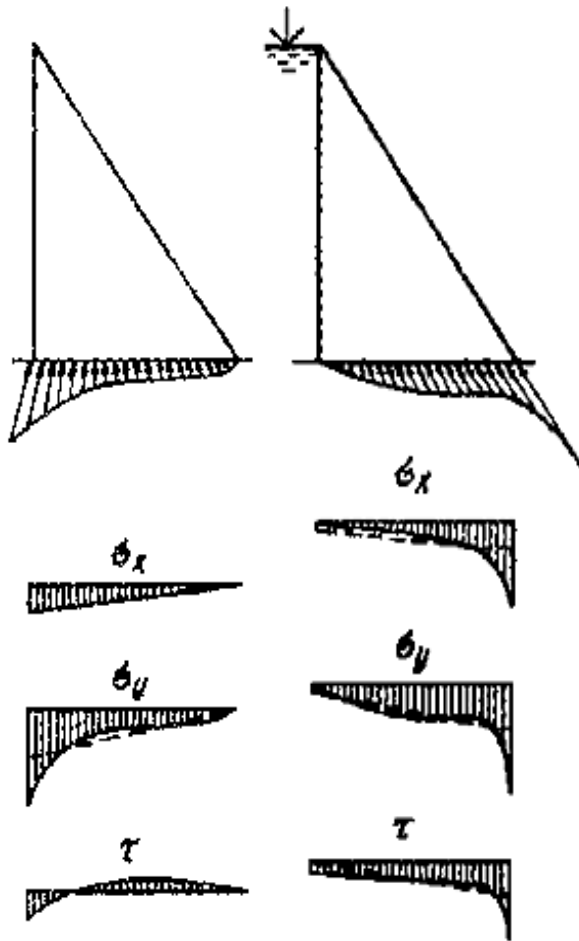


Рис. 1. Залежність напружень по підшві греблі від співвідношення модулів деформації греблі E_2 та основи E_0

а – опорожнене водосховище;

б – наповнене водосховище.

Таким чином, при наповненому водосховищі деформації основи призводять до несприятливого перерозподілу напружень у контактному перерізі.

Існують декілька видів розрахунку контактних напружень:

1. Наближені розрахунки контактних напружень виходять із вирішень для балки чи плити на пружній основі [2].

У методі І.А. Константинова враховується, що вплив контактної зони на напруження в тілі греблі поширюється вгору від основи приблизно до $0,2h$, де h - висота греблі. У частині греблі вище цієї зони напруження мають значення, що відповідають значенням, які отримані по теорії нескінченного клину. Нижню частину греблі на висоту від основи $0,2h$ можливо розраховувати як балку, нерозривно зв'язану з пружною основою, яка навантажена власною вагою та навантаженням у вигляді напружень, які передаються вищерозташованою частиною греблі, що розрахована по теорії нескінченного клину.

Для розрахунку балки використовують методи будівельної механіки. У методі І.І. Гудушаурі гребля трикутного профілю розраховується в умовах плоскої задачі як балка змінної жорсткості, яка навантажена власною вагою і тиском води.

2. Розрахунок напруженого стану греблі та її основи методом скінчених елементів.

Виклад основного матеріалу

Виникнення розтягнутої зони по контакту греблі з основою пов'язано з навантаженнями та впливами на греблю, сукупність яких може розглядатися як загальний силовий вплив.

Для оцінки міцності гравітаційних гребель класу СС2 достатнім є визначення напружень на гранях греблі, де вони є найбільшими.

Унаслідок того, що бетон не працює на розтяг, область греблі в якій з'являються розтягуючі напруження виключається із роботи. У зв'язку з чим зменшується робоча площа перерізу. Необхідно виконати перерахунок напружень зі зміненими геометричними характеристиками перерізу, моментом, ексцентриситетом.

Імовірнісна оцінка ризику виникнення аварій на бетонних гравітаційних греблях виконувалась на прикладі глухої бетонної гравітаційної греблі на скельній основі гідровузла «Велика енергетична гребля Ефіопського відродження». Всі вихідні дані надані ПАТ «УКРГІДРОПРОЕКТ» м. Харків.

Відмітка верху бетонної греблі +645,000 м, загальна довжина 1783 м. Низова грань гребель ступінчаста з закладенням 0,8.

Основою греблі служать міцні скельні корінні породи (гнейси).

Розрахунки виконуються для основного та особливого сполучення навантажень та впливів.

Для вирішення поставленої задачі застосовано метод статистичних випробувань (Монте-Карло) [3-16].

При цьому використаємо наступну методику розрахунків при кожному статистичному випробуванні j ($j=1,2,\dots,n$):

1. Для кожної з вихідних випадкових величин за номером i ($i=1,2,\dots,n$) задаються рівномірно розподіленою в інтервалі від 0 до 1 випадковою імовірністю $P_{i,j}$.

2. За отриманими значеннями $P_{i,j}$, використовуючи функції розподілу, знаходяться значення аргументів $X_{i,j}$, кожної з випадкових величин.

3. За відомими значеннями $X_{i,j}$ у відповідності з рівнянням зв'язку обчислюється значення сукупного фактору Y_j .

4. Перевіряється виконання відповідної умови досягнення граничного стану за отриманим значенням сукупного фактору.

На рис. 2 представлений розріз Великої енергетичної греблі Ефіопського відродження.

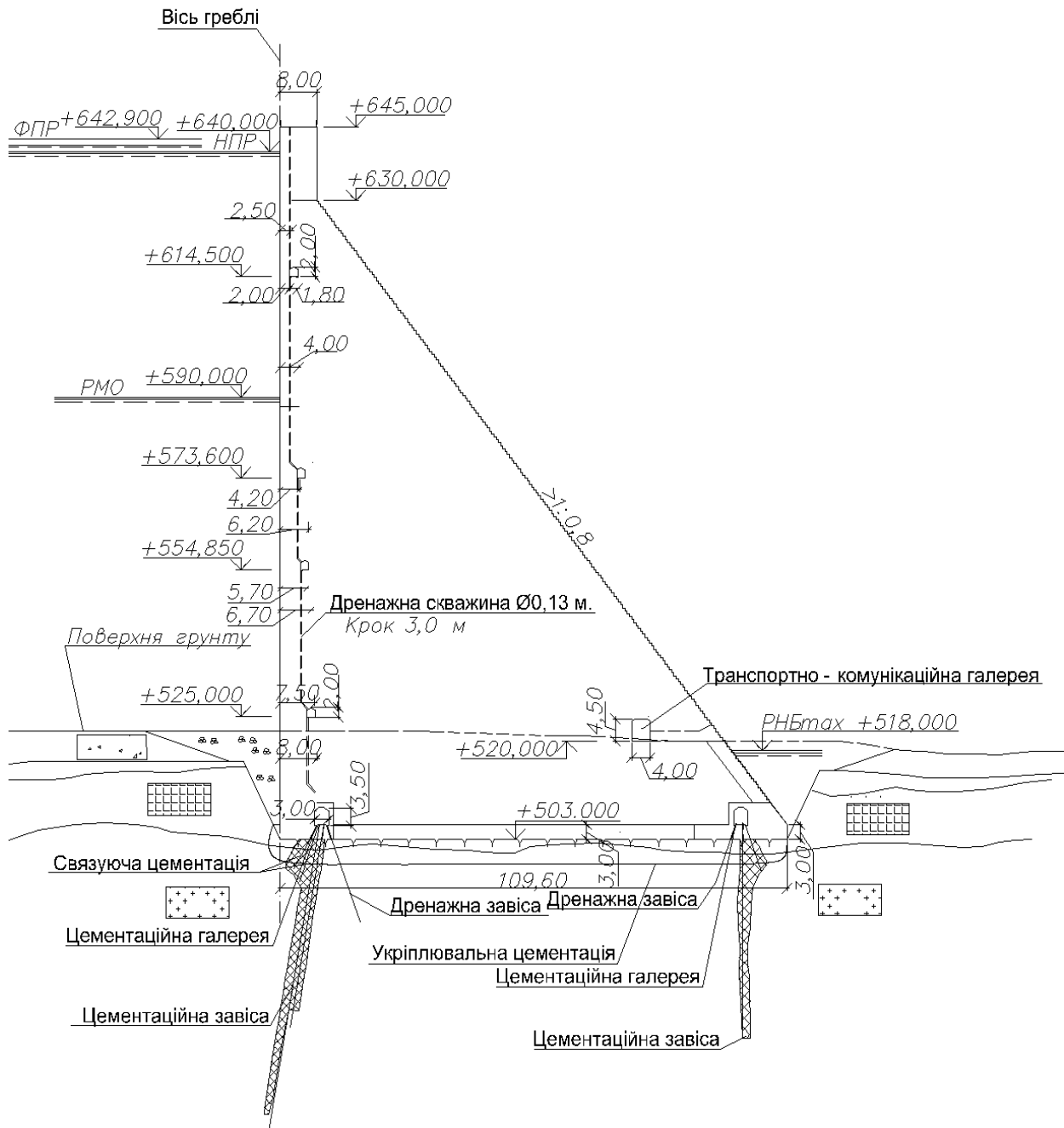


Рис. 2. Розріз глухої бетонної гравітаційної греблі Великої енергетичної греблі Ефіопського відродження

Вихідні дані, необхідні для визначення межової глибини зони розтягання у горизонтальному перерізі по контакту греблі з основою, наступні:

Детерміністичні величини: висота греблі $H'=142$ м; ширина греблі по основі $Bgo=109,6$ м; ширина греблі поперек потоку $Bo=1$ м; ширина гребня греблі $C'=8$ м; площа греблі по основі $An=Bgo \cdot Bo$ м²; закладання верхнього відкосу греблі верхнього б'єфу $m1=0$; закладання нижнього б'єфу $m2=0,8$; висота від гребню греблі до перелому з боку верхнього б'єфу $Hpg=142$ м; висота від гребню греблі до перелому з боку нижнього б'єфу $Hpn=15$ м; щільність бетону $\gamma b=24000$ Н/м³; щільність води $\gamma w=9800$ Н/м³; вага мосту $Gmt=15 \cdot 10^4$ Н; корисне навантаження $Gp=8 \cdot 10^4$ Н; відмітка гребня греблі $Zgp=645$ м; відмітка дна $Zd=503,0$ м; довжина водосховища $Lvod=3000$ м; рівень мертвого об'єму РМО $Zvbrmo=590$ м; відмітка контактної перерізу $Zc=Zd$.

Імовірнісними величинами прийнято: межа міцності масиву скельного ґрунту на одноосний стиск $Rcsm=1 \cdot 10^7$ Па; розрахункове значення характеристики міцності скельної основи на зминання $Rm:=5.5 \cdot 10^6$ Па; коефіцієнт варіації випадкової величини міцності скельної основи на зминання $Cov=0.3$; математичне очікування розрахункового значення характеристики міцності скельної основи на зминання $m_{ck}=Rm$; середньоквадратичне відхилення розрахункового значення характеристики міцності скельної основи на зминання $\sigma_{ck}=Cov \cdot Rm$; міцність бетону на стиск $Rb=8 \cdot 10^6$ Па; $Rb=10 \cdot 10^6$ Па ; $Rb=12 \cdot 10^6$ Па; коефіцієнт варіації міцності бетону на стиск $Cv=0,135$; середньоквадратичне відхилення міцності бетону на стиск $\sigma b=Cv \cdot Rb$.

Моменти від узагальненого силового впливу визначається як сума моментів від навантажень та впливів на греблю, які прийняті детермінованими та випадковими величинами.

Імовірнісними величинами прийнято: момент від інерційного сейсмічного навантаження $Ms'_{i,ut}$, сейсмічного гідродинамічного тиску води $MEpsg_{i,ut}$, сейсмічного тиску наносів $Mpsn_{i,ut}$, хвильового тиску $Mv_{i,ut}$, горизонтального гідростатичного тиску з боку верхнього б'єфу $Mhsu_{i,ut}$, тиску наносів $Mn_{i,ut}$.

Детермінованими прийнято: момент від ваги галерей Mg , власної ваги греблі Mgl , ваги мосту Mmt .

Поздовжня сила складається із власної ваги греблі Gl_{ut} , корисного навантаження Gp , ваги галерей Ggt_{ut} , та ваги мосту Gmt . Ці навантаження прийняті детермінованими величинами.

Розрахунковий срок служби, для споруди, класу ССЗ $T=100$ років.

Нормальне напруження для кожного перерізу розраховано за формулою (1), звідки знаходиться ексцентриситет:

$$e_0 = \frac{M}{N}, \quad (5)$$

де e_0 - відстань від точки прикладання сили до центру перерізу.

Якщо $e_0 \leq \frac{1}{6} \cdot b_d$, тоді

$$\sigma = \frac{N}{b_d} + \frac{6 \cdot M}{b_d^2}, \quad (6)$$

$$d_t = 3 \cdot e_0 - \frac{b_d}{2}. \quad (7)$$

Якщо $\frac{1}{6} \cdot b_d \leq e_0 < \frac{1}{2} \cdot b_d$, тоді

$$\sigma = \frac{4}{3} \cdot \frac{N}{b_d - 2 \cdot e_0}. \quad (8)$$

Якщо $e_0 \geq \frac{b_d}{2}$, тоді

$$\sigma = \infty. \quad (9)$$

Поздовжня сила обчислюється за наступною формулою:

$$N := Gl_{ut} + Gp + Ggt_{ut} + Gmt. \quad (10)$$

Згинальний момент обчислюється за наступною формулою:

$$M := Ms'_{i,ut} + MEpsg_{i,ut} + Mpsn_{i,ut} + Mv_{i,ut} + Mhsu_{i,ut} + Mn_{i,ut} + Mmt + Mgl + Mg. \quad (11)$$

Стискаюче напруження σ_3 розглядається як випадкова величина та розраховується за формулою:

$$\sigma_3 = (1 + m_2^2) \cdot \sigma_{i,t}. \quad (12)$$

Межовий опір бетону на стиск Rb розглядається як випадкова величина, розподілена за нормальним законом із математичним очікуванням m_b та коефіцієнтом варіації $Cv=0.135$. Середньоквадратичне відхилення розраховується за формулою $\sigma_b = Cv \cdot Rb$.

Імовірність руйнування бетонної гравітаційної греблі на скельній основі за умовою перевищення межової глибини зони розтягання у горизонтальних перерізах тіла греблі в перерізі по контакту греблі з основою, визначається за формулою:

$$zr_i = \frac{Rb}{\sigma_3 c_i} \quad (13)$$

де $\sigma_3 c_i$ - стискаюче напруження по контакту греблі з основою.

Знайдено за імовірнісною методикою імовірність перевищення межової глибини зони розтягання у перерізі по контакту греблі з основою $P_o = 1.06 \cdot 10^{-3}$ 1/рік.

Визначено необхідну кількість статистичних випробовувань для досягнення доволі вузького довірчого інтервалу, а саме $1,22 \cdot 10^6$.

Висновки

Наведена методика розрахунку імовірнісної оцінки надійності бетонних гравітаційних гребель на скельній основі класу СС2 за критерієм обмеження глибини зони розтягання по перерізу греблі з основою, яка враховує випадковий характер зовнішніх навантажень та впливів, випадковий характер властивостей будівельних матеріалів, випадковий характер властивостей скельних основ.

Методика апробована на прикладі високої бетонної гравітаційної греблі гідровузла «Велика енергетична гребля Ефіопського відродження» на р.Блакитний Ніл у Ефіопії», запроєктованого ПАТ «УКРГІДРОПРОЕКТ».

Запропонована методика може бути використана при розрахунках бетонних гравітаційних гребель на скельній основі.

Література

1. СНиП 2.06.08-87. Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 32 с.
2. Розанов Н.П. Гидротехнические сооружения. / Розанов Н.П., Бочкарев Я.В., Лапиенков В.С. – М.: Агропромиздат, 1985. – 432 с., ил.
3. Вайнберг А. И. Надежность и безопасность гидротехнических сооружений. Избранные проблемы / А.И. Вайнберг. – Харьков: Издательство «Тяжпромавтоматика», 2008. – 304 с.
4. Караковский М.В. К расчету устойчивости гидротехнических сооружений на скальных основаниях с учётом случайных факторов / М.В. Караковский. - Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева: сборник научных трудов, 1989. - Т. 214. - С. 71 - 76.
5. Караковский М.В. К расчету устойчивости гидротехнических сооружений на скальных основаниях с учётом случайных факторов / М.В. Караковский. - Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева: сборник научных трудов, 1989. - Т. 214. - С. 71 - 76.
6. Особенности применения метода статистических испытаний при оценке надежности и безопасности гидротехнических сооружений в рамках параметрической теории надежности / Научовий вісник будівництва. Вип. 47. Вайнберг А.И. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2008. С. 269-277.
7. Прикладная теория статистических решений / [Райфа Г., Шлейфер Р.И др.]; под ред. Ю.Н. Благовещенского. – [Пер. с англ. А.К. Звонкина, З.Г. Маймина и Б.Л. Розовского]. - М.: Статистика, 1977.
8. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надёжность / Ржаницын А.Р. - М.: Стройиздат, 1978. – 239 с.
9. Синицин А.П. Расчет конструкций на основе теории риска / А. П. Синицин. - М.: Стройиздат, 1985. - 224 с.
10. Смолич С.В., Смолич К.С. Решение горно-геологических задач методом Монте-Карло / С.В. Смолич, К.С. Смолич. - Чита: Читинский государственный университет, 2004. – 103 с.
11. Аугусти Г., Баратта А., Кашиати Ф. Вероятностные методы в строительном проектировании. — М.: Стройиздат, 1988. — 584 с.

12. Балабай Е.А. Вероятностная оценка риска возникновения аварий на бетонных гравитационных плотинах на скальном основании. / Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. Х.: 2015р, С. 110—150.

13. Болотин В. В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений / В. В. Болотин. - М.: Стройиздат, 1981.

14. Векслер А.Б. Надёжность социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений. / Векслер А.Б., Ивашинов Д.А., Стефанишин Д. В. – Спб.: Изд.-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2002. – 589 с.

15. Венцель Е.С. Теория вероятностей и её инженерные приложения / Венцель Е.С., Овчаров Л.А. – М.: Наука, 1988. – 366 с.

16. Вероятностные методы оценки надежности грунтовых гидротехнических сооружений / Беллендир Е.Н., Ивашинов Д.А., Стефанишин Д.В., Финогенов О.М., Шульман С.Г. – СПб.: Изд.-во «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева» т. 1, 2003. – 554 с.

References

1. SNIP 2.06.08-87. Concrete and reinforced concrete design of hydraulic structures. - M.: TSITP USSR State Construction Committee, 1988. - 32 p.
2. Rozanov NP Waterworks. / NP Rozanov, YV Bochkarev, VS Lapshenkov - M.: Agropromizdat, 1985. - 432 p., Ill.
3. Weinberg AI reliability and safety of hydraulic structures. Selected Problems / AI Weinberg. - Kharkov: Publishing "Tyazhpromavtomatika", 2008. - 304 p.
4. Karakovsky MV Calculation of the stability of hydraulic structures in the rock grounds taking into account the random factors / MV Karakovsky. - Proceedings VNIIG. BE Vedenev: collection of scientific papers, 1989. - T. 214. - S. 71 - 76.
5. Karakovsky MV Calculation of the stability of hydraulic structures in the rock grounds taking into account the random factors / MV Karakovsky. - Proceedings VNIIG. BE Vedenev: collection of scientific papers, 1989. - T. 214. - S. 71 - 76.
6. Features of application of the method of statistical tests for assessing the reliability and safety of hydraulic structures in the framework of the parametric reliability theory / NAUKOVO News budivnitstva. Vip. 47. A. Weinberg - Kharkiv: HDTUBA, HOTV OMB, 2008. pp 269-277.
7. Applied statistical decision theory / [Rife G. Schleifer RI et al.]; ed. JN Annunciation. - [Trans. With England. AK Zvonkin, ZG Maymina and BL Rozovsky]. - M.: Statistics, 1977.
8. Rzhantsyn AR The theory calculation of building structures on the reliability / Rzhantsyn AR - M.: Stroyizdat, 1978. - 239 p.
9. Sinityn AP Structural analysis based on the theory of risk / AP Sinityn. - M.: Stroyizdat, 1985. - 224 p.
10. Smolich SV Smolich KS The decision of geological problems by Monte Carlo / SV Smolich, KS Smolich. - Chita Chita State University, 2004. - 103 p.
11. Augusti G. Baratta A., F. Kashiati Probabilistic methods in structural design. - M.: Stroyizdat, 1988. - 584 p.
12. EA Balabai Probabilistic risk assessment of accidents on concrete gravity dam on rock foundation. / Zbirnik Naukova

Pratzen Ukrayinsky sovereign universitetu Zaliznicovo transport. H. : 2015r, pp 110-150.

13. Bolotin VV Methods of probability theory and the theory of reliability analysis of structures / VV Bolotin. - M. : Stroyizdat 1981.

14. Wexler AB Nadėzhnost social and environmental safety of hydraulic facilities: risk assessment and decision-making. / Veksler AB, Ivashnitsov DA, Stefanyshyn DV - Spb. : Izd. of JSC "VNIIG. BE Vedeneyeva", 2002. - 589 p.

15. Wentzel ES Probability theory and its engineering applications / Wentzel ES, Ovcharov LA - M. : Nauka, 1988 - 366 p.

16. Probabilistic methods for evaluating the reliability of groundwater waterworks / Bellendir EN, Ivashintsov DA, Stefanyshyn DV Finogenov OM, SG Shulman - SPb. : Publishing house "VNIIG. Vedeneyev" Vol. 1, 2003. - 554 p.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.І. Вайнберг, заступник технічного директора ПАТ «УКРГІДРОПРОЕКТ», Харків.

Автор: БАЛАБАЙ Олена Олександрівна Харківський національний університет будівництва та архітектури «ХНУБА», Харків, асистент. E-mail – balabai.olena@gmail.com

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА НАДЁЖНОСТИ БЕТОННЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ПЛОТИН НА СКАЛЬНОМ ОСНОВАНИИ ПО КРИТЕРИЮ ОГРАНИЧЕНИЯ ГЛУБИНЫ ЗОНЫ РАСТЯЖЕНИЯ ПО СЕЧЕНИЮ ПЛОТИНЫ С ОСНОВАНИЕМ

Е.А. Балабай

В работе рассмотрено методика вероятностной оценки надёжности бетонных гравитационных плотин на скальном основании по критерию ограничения глубины зоны растяжения по сечению плотины с основанием. В результате получена количественная оценка вероятности достижения граничного состояния по первой группе граничных состояний связанного с превышением граничной глубины зоны растяжения по контакту плотины с основанием. Предложенная методика может быть использована при расчётах бетонных гравитационных плотин на скальном основании.

Ключевые слова: бетон плотины, скальные основания, вероятность, надёжность.

RELIABILITY PROBABILISTIC ASSESSMENT OF CONCRETE GRAVITY DAM ON ROCK FOUNDATION ON CRITERION LIMITAD DEPTH OF STRETCH ZONE IN THE CROSS SECTION DAM WITH BASE

O.O. Balabai

The paper discusses the methodology of probabilistic reliability assessment of concrete gravity dam on bedrock criterion limits the depth of the cross section of the zone stretching from the base of the dam. The result is a quantitative assessment of the state of achievement of the boundary of the first group associated with the excess of the depth of the boundary zones stretching along the contact with the base of the dam Po. Methods approved by the example of high concrete gravity dam hydroelectric "Great Ethiopian renaissance dam power" on r.Blakytyny Nile in Ethiopia "projected PJSC" Ukrhydroproekt". Found on probabilistic methods mentioned depths exceeding boundary zones stretching in the section on contact with the base of the dam $Rho = 1.06 \cdot 10^{-3}$ 1 / year.. The proposed method can be used in calculations of concrete gravity dam on rock foundation.

Keywords: concrete dam rock foundation, the probability reliability.