

УДК 004.942 ; 519.226.3 ; 519.87 : (504.75 + 626/627)

К.Г. РОМАНЧУК, Д.В. СТЕФАНИШИН

ІМОВІРНІСНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ СЦЕНАРІЇВ ПОШИРЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ АВАРІЙ НА КАСКАДІ НАПІРНИХ ГІДРОСПОРУД

***Анотація.** В рамках сценарного підходу з використанням методу Байєса здійснено формалізацію задачі імовірнісного прогнозування гідродинамічних аварій на каскаді напірних гідроспоруд та отримано практичні рішення для оцінки ймовірностей їх поширення за різними модельними сценаріями.*

***Ключові слова:** гідродинамічна аварія, ймовірність, каскад гідроспоруд, метод Байєса, прогнозування, сценарій, сценарний підхід.*

Вступ

Каскад напірних гідроспоруд у складі кількох гідровузлів в річковому басейні, напірні гідроспоруди окремого гідровузла, що мають різне висотно-географічне положення на місцевості, утворюють природно-технічні системи, які володіють аварійним потенціалом каскаду маси й енергії. Гідродинамічна аварія (ГДА), яка виникає внаслідок руйнівної аварії на гідроспоруді, що розташовується вище за течією, поширюється на каскад і при несприятливому збігові обставин створює загрозу послідовного руйнування й інших гідроспоруд, які розташовані вниз за течією [1].

В історії гідротехнічного будівництва мали місце аварії на каскадах напірних гідроспоруд, що завершувалися їх послідовним руйнуванням, в тому числі з катастрофічними наслідками. Одна з найбільших в історії подібних катастроф була викликана руйнуванням гребель Шимантань та Баньцяо на р. Жу в Китаї в 1975 р. Під час цієї аварії, за даними [2], внаслідок потужної штучної повені, загинуло біля 26 тис. людей, майже 145 тис. осіб померло опісля від голоду й епідемій. Було зруйновано біля 6 млн будинків. Загалом внаслідок аварії постраждало майже 11 млн осіб. Аварії на каскадах напірних гідроспоруд відбувалися також в США (греблі Тетон і Лауер Ідайхо Фоллз, 1976 р.), в Бразилії (греблі Еуклідес да Кун'я та Армандо де Салес ді Олівейра, 1977 р.) та в інших країнах [3].

Численними є також приклади каскадних ГДА на напірних дамбах оголодження накопичувачів промислових відходів. Серед них особливо слід відзначити важку за наслідками аварію на двох дамбах хвостосховища Става в Італії в 1985 р., під час якої загинуло 268 людей [4].

Актуальність проблеми в Україні

Будівництво каскадів з напірних гідроспоруд – поширене явище як у світі, так і в Україні. Найбільші напірні гідроспоруди в Україні побудовані у складі каскадів гідровузлів: Дніпровського і Дністровського. Зокрема, на Дніпрі знаходиться шість найбільших гідровузлів країни: Київський, Канівський, Кременчуцький, Дніпродзержинський, Дніпровський, Каховський.

У складі Київського гідровузла різне висотно-географічне положення на місцевості мають також напірні гідроспоруди Київської ГЕС і Київської ГАЕС. Унікальний каскад напірних гідроспоруд розміщено також на Дністрі у складі Дністровської ГЕС-1, Дністровської ГАЕС і Дністровської ГЕС-2 (рис. 1). Каскади напірних гідроспоруд є на Південному Бузі, Случі, на інших ріках країни. В планах розвитку гідроенергетики України розглядається будівництво в межах Дніпровського каскаду Канівської ГАЕС, нових ГЕС в басейні Дністра в його верхній течії, каскаду ГЕС на Тисі та її притоках [5].

Загальна постановка задачі

Розміщення кількох напірних гідроспоруд в каскаді створює загрозу їх послідовного руйнування.

Визначимо гідродинамічну аварію на каскаді як аварію, в результаті якої буде зруйновано не менше двох підпірних гідроспоруд, що мають різне висотно-географічне положення в каскаді. Тоді, в залежності від кількості гідроспоруд в каскаді, їх висотно-географічного і просторового розміщення на річці або в річковому басейні (рис. 2), аварійного потенціалу окремих гідроспоруд, можливі різні сценарії поширення ГДА на каскаді. Кожен з цих сценаріїв не лише може бути обтяжений різними негативними наслідками і збитками, а й мати різну ймовірність реалізації.

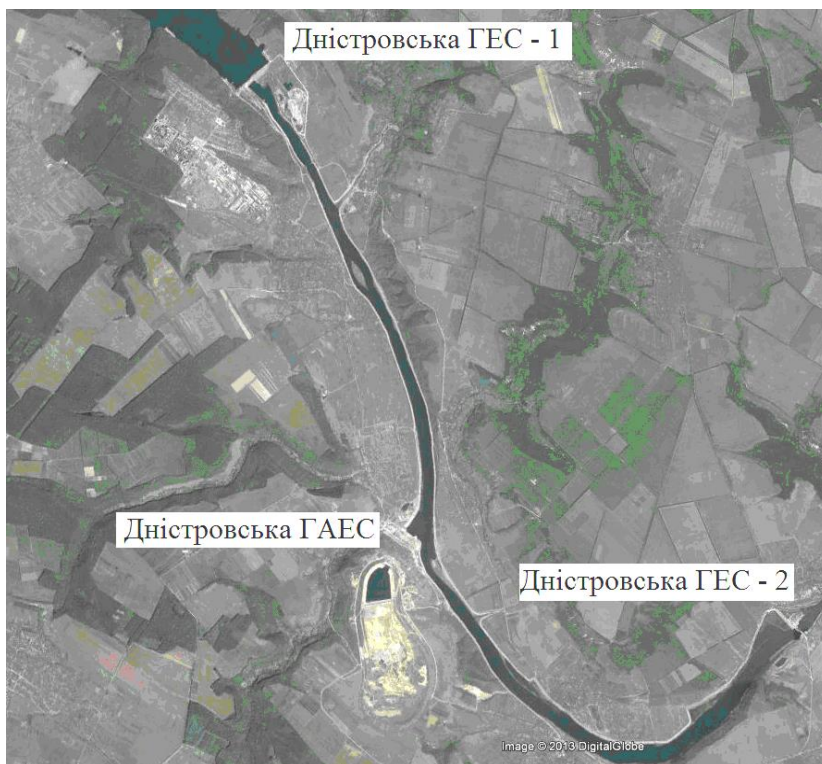


Рис. 1 – Дністровський гідроенергетичний комплекс у складі гідроспоруд трьох гідровузлів (карти Google earth)

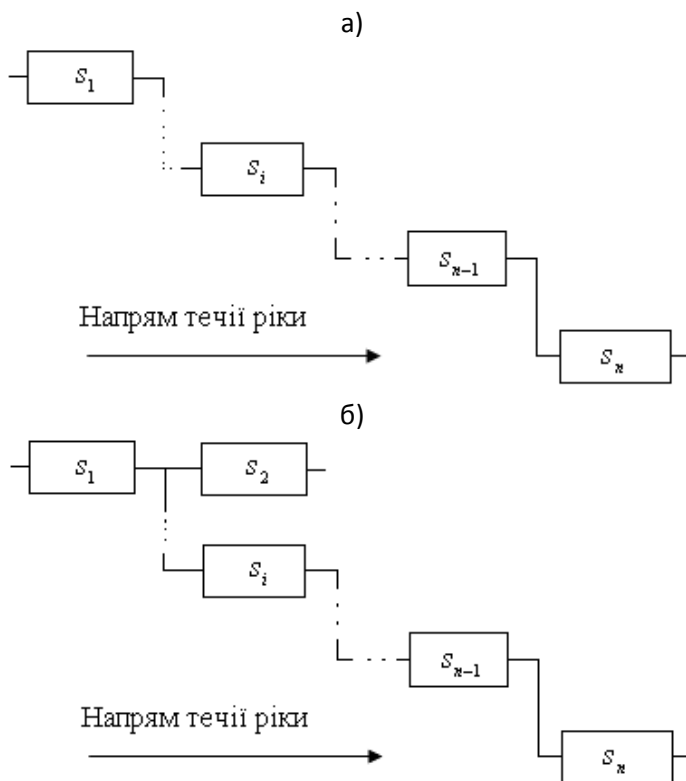


Рис. 2 – Схематичні варіанти каскадів з n гідроспоруд

Наприклад, на каскаді з двох напірних гідроспоруд можливою є реалізація одного сценарію виникнення ГДА на каскаді: руйнується напірна гідроспоруда, що розміщується вгору за течією, і далі може зруйнуватися гідроспоруда низового гідровузла. На каскаді з трьох гідроспоруд можливі два модельні сценарії розвитку ГДА на каскаді: 1) руйнується напірна гідроспоруда, що розміщується вгору за течією, далі можуть зруйнуватися гідроспоруди двох низових гідровузлів (при розміщенні всіх трьох гідровузлів в каскаді один за одним) або гідроспоруда низового гідровузла (якщо один з верхових гідровузлів розміщується на притоці головної ріки й знаходиться поза загрозою); 2) руйнується гідроспоруда, що розміщується на другій східинці каскаду (це може бути і гідровузол, що розміщується на притоці), далі – гідроспоруда, розміщена вниз за течією.

В усіх випадках для поширення ГДА на каскаді гідроспоруд існує пріоритет аварії на напірній гідроспоруді, що розміщується вгору за течією, і аварія на якій може загрожувати хоча б одній з наступних гідроспоруд каскаду. При цьому мінімальна кількість модельних сценаріїв поширення ГДА на каскаді гідровузлів може становити $n - 1$, де n – кількість гідроспоруд у каскаді.

Формальне визначення сценарію аварії

Сценарієм A_i аварії A називатимемо деяку ідеалізовану аварійну подію-припущення, несумісну з іншими визначеними відповідним чином в якості

k -х модельних сценаріїв аварії ідеалізованими аварійними подіями-припущеннями, що формують повну групу подій [6, 7]:

$$P(A_i) = P(A_i | A) \cdot P(A), \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n P(A_i) = P(A), \sum_{i=1}^n P(A | A_i) = 1; (A | A_i) \wedge (A | A_k) = \emptyset; i \neq k; i, k = \overline{1, n}, \quad (2)$$

$$P(A_i | A) = \frac{P(A | A_i) \cdot P(A_i)}{\sum_{i=1}^n P(A | A_i) \cdot P(A_i)}, \quad (3)$$

де $P(A_i)$ – повна (апостеріорна) ймовірність реалізації сценарію A_i у випадку аварії A ; $P(A_i | A)$ – умовна (байєсівська) ймовірність реалізації сценарію A_i при аварії A ; $P(A)$ – повна ймовірність виникнення аварії A ; $P(A | A_i)$ – умовна ймовірність аварії A за сценарієм A_i .

Оцінка ймовірностей модельних сценаріїв поширення ГДА на каскаді гідроспоруд

Розглянемо довільний каскад $\mathbf{S}(n) = \{s_i\}$, $i = \overline{1, n}$, з n гідроспоруд $s_i \in \mathbf{S}(n)$, що мають різне висотно-географічне та просторове положення на місцевості в річковому басейні. Задамо загальний напрямок розташування гідроспоруд в каскаді від s_1 до s_n вниз за течією ріки, від найвищої до найнижчої за висотно-географічним і просторовим положенням «сходинок» каскаду (рис. 2).

Аварії на окремих гідроспорудах, що формують каскад, до виникнення першої ГДА, що може загрожувати іншим гідроспорудам, вважатимемо сумісними й незалежними подіями:

$$P(s_i, s_j) = P(s_i) \cdot P(s_j), \quad i, j = \overline{1, n}, \quad i \neq j, \quad (4)$$

де $P(s_i, s_j)$ – ймовірність одночасного виникнення аварій на i -й і j -й гідроспорудах каскаду; $P(s_i)$, $P(s_j)$ – апіорні ймовірності аварій на i -й і j -й напірних гідроспорудах, що формують каскад, відповідно.

Для оцінки ймовірності поширення ГДА на каскаді важливо визначити підпірні гідроспоруди, аварії на яких «запускають» механізми подальшого розвитку аварії, а також встановити умови, за яких при аварії на тій чи іншій підпірній гідроспоруді відбувається «запуск». Найбільш просто умова для поширення ГДА на каскад може формулюватися в тому випадку, коли витрати води від хвилі прориву внаслідок аварії на гідроспоруді, що розташовується вище за течією, перевищуватимуть пропускну здатність водопропускних гідроспоруд гідровузла, що знаходиться нижче за течією ріки, і так далі. Коли хвиля прориву внаслідок руйнування кожної вище розташованої гідроспоруди, яка переповнюватиме кожне наступне водосховище, що знаходиться вниз за течією, здатна послідовно зруйнувати гідроспоруди кожного наступного

гідровузла в каскаді незалежно від поточного стану його напірного та водопропускного фронтів.

Виділимо одну з верхових гідроспоруд $s_i \in \mathbf{S}(n)$, $i = \overline{1, n-1}$, ГДА на якій може поширитися й на інші (хоча б одну з них) гідроспоруди каскаду $\mathbf{S}(n)$. Визначимо гідроспоруди, на які поширюватиметься ГДА, якщо аварія сталася на гідроспоруді s_i , й складемо систему $S(m_i) = \{s_j\}$, $j \geq i$, з $m_i = n + 1 - i$ гідроспоруд, для якої буде здійснюватися оцінка ймовірності поширення ГДА на каскаді за відповідним модельним сценарієм.

Випадок 1. Нехай умовні ймовірності вторинних (наведених) аварій на гідроспорудах каскаду від перевантажень, пов'язаних з проходженням ГДА в результаті аварії на гідроспоруді s_i , розташованій вище за течією, при реалізації модельного сценарію A_i поширення ГДА в системі $S(m_i)$ наближаються до одиниці. Якщо аварія на гідроспоруді s_i здатна безпосередньо призвести до вторинної гідродинамічної аварії на наступній «сходинці» каскаду $S(m_i)$, а та, у свою чергу, пошириться й на всі наступні «сходинки» $S(m_i)$ з послідовним руйнуванням всіх підпірних гідроспоруд, що розташовані нижче за течією, то ймовірність реалізації сценарію A_i згідно з (1) буде:

$$P(A_i) = P(A_i | \mathbf{S}(n)) \cdot P(\mathbf{S}(n)), \quad (5)$$

де $P(A_i | \mathbf{S}(n))$ – умовна ймовірність виникнення ГДА за сценарієм A_i , якщо аварія відбувається на каскаді $\mathbf{S}(n)$ внаслідок руйнування гідроспоруди s_i ; $P(\mathbf{S}(n))$ – повна ймовірність аварії на одній (будь-якій) з гідроспоруд, що включаються в каскад $\mathbf{S}(n) = \{s_i\}$, $i = \overline{1, n}$.

Ймовірність $P(A_i | \mathbf{S}(n))$ є байєсівською ймовірністю, яка, згідно з формулою Байєса (3), у нових позначеннях ймовірностей подій буде:

$$P(A_i | \mathbf{S}(n)) = \frac{P(\mathbf{S}(n) | s_i) \cdot P(s_i)}{\sum_{i=1}^n P(\mathbf{S}(n) | s_i) \cdot P(s_i)}, \quad (6)$$

де $P(\mathbf{S}(n) | s_i)$ – умовна ймовірність поширення ГДА на каскаді $\mathbf{S}(n)$ з врахуванням можливості виникнення ГДА на гідроспоруді s_i , яку, з врахуванням умови формування повної групи подій, згідно з [8], можна оцінити як відносну «вагу» апріорної ймовірності аварії на s_i :

$$P(\mathbf{S}(n) | s_i) = \frac{P(s_i)}{\sum_{i=1}^n P(s_i)}. \quad (7)$$

У свою чергу ймовірність $P(\mathbf{S}(n))$ згідно з умовою (4) буде [9, 10]:

$$P(\mathbf{S}(n)) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(s_i)], \quad (8)$$

де $P(s_i)$ – апіорна ймовірність виникнення аварії на i -й гідроспоруді у складі каскаду $\mathbf{S}(n)$.

В результаті маємо повну апостеріорну ймовірність i -го модельного сценарію розвитку ГДА на каскаді

$$P(A_i) = \frac{\frac{P^2(s_i)}{\sum_{i=1}^n P(s_i)}}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{P^2(s_i)}{\sum_{i=1}^n P(s_i)} \right)} \cdot \left(1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(s_i)] \right). \quad (9)$$

Приклад. Нехай у складі каскаду знаходиться шість гідроспоруд $s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6$, які розміщуються в каскаді згідно зі схемою, наведеною на рис. 2а. Апіорні ймовірності аварій на гідроспорудах каскаду складають: $P(s_1) = 6,73 \cdot 10^{-5}, \text{ рік}^{-1}$; $P(s_2) = 5,26 \cdot 10^{-5}, \text{ рік}^{-1}$; $P(s_3) = 2,42 \cdot 10^{-5}, \text{ рік}^{-1}$; $P(s_4) = 5,4 \cdot 10^{-5}, \text{ рік}^{-1}$; $P(s_5) = 3,9 \cdot 10^{-5}, \text{ рік}^{-1}$; $P(s_6) = 2,65 \cdot 10^{-5}, \text{ рік}^{-1}$.

Покладемо, що гідродинамічна аварія на одній із гідроспоруд, які розташовуються вище за течією, призводить до переповнення водосховища і аварії з проривом напірного фронту кожної наступної гідроспоруди.

В цьому випадку можливим буде один з наступних модельних сценаріїв поширення ГДА на каскаді: 1) A_1 – якщо руйнується гідроспоруда s_1 і за нею гідроспоруди s_2, s_3, s_4, s_5, s_6 (ГДА поширюється в системі $S(s_1 \div s_6)$); 2) A_2 – якщо руйнується гідроспоруда s_2 і з нею гідроспоруди s_3, s_4, s_5, s_6 (ГДА поширюється в системі $S(s_2 \div s_6)$); 3) A_3 – якщо руйнується гідроспоруда s_3 і з нею гідроспоруди s_4, s_5, s_6 (ГДА поширюється в системі $S(s_3 \div s_6)$); 4) A_4 – якщо руйнується гідроспоруда s_4 і з нею гідроспоруди s_5, s_6 (ГДА поширюється в системі $S(s_4 \div s_6)$); 5) A_5 – якщо руйнується гідроспоруда s_5 і з нею s_6 (ГДА поширюється в системі $S(s_5, s_6)$).

Використавши формулу (9), встановлюємо ймовірності модельних сценаріїв поширення гідродинамічної аварії на каскаді: $P(A_1) = 9,17 \cdot 10^{-5}, \text{ рік}^{-1}$; $P(A_2) = 5,6 \cdot 10^{-5}, \text{ рік}^{-1}$; $P(A_3) = 1,19 \cdot 10^{-5}, \text{ рік}^{-1}$; $P(A_4) = 5,9 \cdot 10^{-5}, \text{ рік}^{-1}$; $P(A_5) = 3,08 \cdot 10^{-5}, \text{ рік}^{-1}$.

З метою перевірки точності проведених нами розрахунків визначимо також апостеріорну ймовірність аварії на споруді s_6 , за умови, що ГДА на каскаді $\mathbf{S}(n)$ відбувається внаслідок її руйнування:

$$P(A_6) = P(A_6 | \mathbf{S}(n)) \cdot P(\mathbf{S}(n)). \quad (10)$$

Маємо ймовірність $P(A_6) = 1,42 \cdot 10^{-5}$, рік⁻¹. Склавши суму ймовірностей $P(A_1) \div P(A_6)$, маємо повну ймовірність $P(\mathbf{S}(n)) = 2,636 \cdot 10^{-4}$, рік⁻¹ виникнення ГДА на каскаді, яку можна отримати за формулою (8).

Випадок 2. Гідродинамічна аварія на гідроспоруді, яка розташовується в каскаді вище за течією, може спровокувати вторинні, наведені аварії на наступних гідроспорудах, що формують відповідний каскад, але з ймовірностями, що можуть бути значно меншими за одиницю.

Ймовірність вторинної аварії на гідроспоруді може встановлюватися в індивідуальному порядку, в залежності від параметрів водосховища, особливостей формування напірного і водопропускного фронтів гідровузла тощо, стійкості і живучості споруди в умовах перевантажень.

В першому наближенні, ймовірність вторинної аварії на гідровузлі в результаті прориву гідроспоруди, що розташовується вище за течією, можна оцінити як ймовірність перевищення рівня води у водосховищі через нездатність (внаслідок відмови, несправності) водопропускних споруд гідровузла пропустити сумарний приплив води, включно надлишковий приплив, сформований хвилею прориву, без додаткового форсування рівня води понад прийнятий в проєкті форсований (аварійний) підпірний рівень води у водосховищі. При цьому можуть встановлюватися додаткові модельні сценарії поширення ГДА в каскаді. Наприклад, якщо при аварії на гідроспоруді, що розташована на вершині каскаду, з ймовірністю близькою до одиниці може постраждати лише наступна в каскаді гідроспоруда, а ймовірності руйнування інших менше одиниці, то ймовірність поширення ГДА на весь каскад зменшується. Загальна ж кількість модельних сценаріїв поширення ГДА на каскаді з n гідроспоруд при врахуванні здатності окремих гідровузлів проти-

стояти техногенній повені може скласти $\sum_{m=2}^n (m-1)$.

Ймовірність реалізації додаткового k -го модельного сценарію $A_{i,k}$ поширення ГДА на каскаді з n гідроспоруд внаслідок аварії на i -й гідроспоруді з врахуванням ймовірностей виникнення вторинних (наведених) аварій на j -х гідроспорудах, $j = \overline{i+1, n}$, що розташовуються нижче за течією, буде:

$$P(A_{i,k}) = P(A_i) \cdot \prod_{j=i+1}^n P(s_{j,i}), \quad (11)$$

де $P(A_i)$ – ймовірність сценарію A_i поширення ГДА на каскаді гідроспоруд $S(m_i)$, яка встановлюється за формулою (9); $P(s_{j,i})$ – ймовірність вторинної, наведеної аварії на j -й гідроспоруді, на яку може поширюватися дія від аварії на i -й гідроспоруді та від інших гідроспоруд, що розташовуються вище за течією, у випадку їх руйнування.

Нехай для наведеного вище прикладу встановлюються наступні ймовірності вторинних, наведених аварій на гідроспорудах каскаду при аварії на

гідроспоруді s_1 : $P(s_{2,1}) = 1$; $P(s_{3,1}) = 0,003$; $P(s_{4,1}) = 1$; $P(s_{5,1}) = 0,5$; $P(s_{6,1}) = 0,5$. Тоді ймовірності: сценарію $A_{1,1}$, що гідродинамічна аварія при руйнуванні гідроспоруди s_1 пошириться також на гідроспоруду s_2 , буде $P(A_{1,1}) = P(A_1) \cdot P(s_{2,1}) = 9,17 \cdot 10^{-5}$, рік⁻¹; сценарію $A_{1,2}$, що аварія на гідро-споруді s_1 пошириться також на гідроспоруди s_2 і s_3 , буде $P(A_{1,2}) = P(A_1) \cdot P(s_{2,1}) \cdot P(s_{3,1}) = 2,75 \cdot 10^{-7}$, рік⁻¹; сценарію $A_{1,3}$, що зруйнується і гідроспоруда s_4 , буде $P(A_{1,3}) = P(A_1) \cdot P(s_{2,1}) \cdot P(s_{3,1}) \cdot P(s_{4,1}) = 2,75 \cdot 10^{-7}$, рік⁻¹; сценарію $A_{1,4}$, що зруйнується і гідроспоруда s_5 , буде $P(A_{1,4}) = P(A_1) \cdot P(s_{2,1}) \cdot P(s_{3,1}) \cdot P(s_{4,1}) \cdot P(s_{5,1}) = 1,38 \cdot 10^{-7}$, рік⁻¹; сценарію $A_{1,5}$, що ГДА виникне на s_1 й пошириться на весь каскад $S(s_1 \div s_6)$: $P(A_{1,5}) = P(A_1) \cdot P(s_{2,1}) \cdot P(s_{3,1}) \cdot P(s_{4,1}) \cdot P(s_{5,1}) \cdot P(s_{6,1}) = 6,9 \cdot 10^{-8}$, рік⁻¹.

Висновки

1. У випадку будівництва каскаду напірних гідроспоруд виникає загроза виникнення і розвитку на каскаді гідродинамічної аварії, спровокованої в тому числі і руйнуванням гідроспоруди, розташованої у верховій частині каскаду.
2. Сценарний підхід до моделювання і прогнозування аварій з використанням методу Байєса дозволяє здійснити формалізацію задачі імовірного прогнозування поширення ГДА на каскаді напірних гідроспоруд з метою оцінки ймовірностей реалізації ГДА за різними модельними сценаріями.
3. Ймовірність поширення ГДА на каскад у випадку, коли гідроспоруда, яка розташовується вище за течією, є менш надійною, ніж гідроспоруди, що розташовуються вниз за течією, і аварія на ній здатна викликати аварії на наступних спорудах каскаду, може збільшуватися в порівнянні з апіорною ймовірністю аварії на цій споруді, хоча, звичайно, буде меншою ймовірності виникнення ГДА на каскаді. У випадку, коли гідроспоруда, яка розташовується вище за течією, є більш надійною, ніж гідроспоруди, які розташовуються вниз за течією, і аварія на ній здатна викликати руйнування наступних споруд каскаду, ймовірність поширення ГДА на каскад зменшується в порівнянні з апіорною ймовірністю аварії на цій споруді.
4. Ймовірність поширення ГДА на каскад при наявності у його складі гідровузлів, які здатні протистояти хвилі прориву, акумулювати штучну повінь у водосховищах, безаварійно пропускати її через водопропускні споруди, зменшується в порівнянні з апіорними ймовірностями виникнення ГДА як на окремих гідроспорудах каскаду, так і з повною ймовірністю ГДА на каскаді.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Стефанишин Д.В. Оцінка ймовірності розвитку гідродинамічної аварії, викликаній ефектом «доміно», на каскаді напірних гідротехнічних споруд / Д.В. Стефанишин, К.Г. Романчук // Вісник НУВГП. Зб. наук. праць. – Вип. 2 (38). – Рівне: НУВГП. – 2007. – С.192–198.
2. <http://energyfuture.ru/ssg-chin>
3. Rațiu M. Comportanea construcțiilor și amenajărilor hidrotehnice. Editura Tehnică / M. Rațiu, C. Constantinescu. – București, 1989. – 664 p.

4. Гузенков С.Н. Надежность хвостовых хозяйств обогатительных фабрик / С.Н. Гузенков, Д.В. Стефанишин, О.М. Филадельфов, С.Г. Шульман. – Белгород: «Везелица», 2007. – 674 с.
5. Ландау Ю.А. Основные тенденции развития гидроэнергетики Украины / Ю.А. Ландау // Техногенна безпека. – 2012. – Том 53. Вип. 40. – С. 82–86.
6. Романчук К.Г. Про сценарний підхід при оцінці ризиків системних аварій / К.Г. Романчук, Д.В. Стефанишин // Problems of decision making under uncertainties. Abstracts of XXV International Conference. May 11–15, 2015. Skhidnytsia, Ukraine. – К.: 2015. – Р. 121–122.
7. Романчук К.Г. Про сценарний підхід при оцінці ризику системних аварій / К.Г. Романчук, Д.В. Стефанишин // Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки. Праці IV-ї міжнародної науково-практичної конференції. Тези доповідей. ЧНУ. 26–29 травня, 2015 р. – Чернівці: Видавничий дім «Родовід», 2015. – С. 65–67.
8. Stefanyshyn D.V. Use of the Bayes' approach for assessment of damage risks of system failures / D.V. Stefanyshyn, K.G. Romanchuk // Proc. of Int. Scientific School «Modelling and Analysis of Safety and Risk in Complex Systems», 2009. – S-Petersburg, Russia. – P.P. 165–169.
9. Стефанишин Д.В. Прогнозування аварій на греблях в задачах оцінки й забезпечення їх надійності та безпеки / Д.В. Стефанишин // Гідроенергетика України, № 3–4, 2011. – С. 52–60.
10. Стефанишин Д.В. Логіко-імовірнісна оцінка ризику збитків від аварійного виливу води з басейну добового регулювання Зарамагської ГЕС-1 / Д.В. Стефанишин, К.Г. Романчук // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2013. – №3. – С. 130–141.

Стаття надійшла до редакції 18.06.2015