

## АНАЛІЗ, ОЦІНКА ТА ПРОГНОЗУВАННЯ В ЕКОНОМІЦІ

УДК 004.942 ; 626/627 ; 504.05

<https://orcid.org/0000-0002-7620-1613>

**Д.В. СТЕФАНИШИН**

### ЛОГІКО-ІМОВІРНІСНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І ПРОГНОЗУВАННЯ АВАРІЙ НА НАПІРНИХ ГІДРОСПОРУДАХ ДНІСТРОВСЬКОГО ГІДРОВУЗЛА (ЧАСТИНА 2. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ)

***Анотація.** Стаття є другою частиною комплексної роботи, присвяченої моделюванню і прогнозуванню гіпотетичних аварій, з оцінюванням ймовірностей їх виникнення, на гідропорудах, що формують напірний фронт Дністровського гідровузла. В першій частині було обґрунтовано актуальність проблеми, розглянуто загальну постановку задачі досліджень, викладено методологію досліджень та сформульовано їх мету, окреслено прийняті гіпотези і припущення, дано коротку характеристику моделей, методів і підходів, що використовувалися при вирішенні поставленої задачі. В цій статті наведено результати досліджень. Розв'язання поставленої задачі здійснювалося за допомогою графоаналітичного, логіко-імовірнісного методу дерев відмов і несправностей. В результаті проведених досліджень було отримано верхні граничні оцінки ймовірностей виникнення аварій на окремих гідропорудах і узагальнену оцінку ймовірності аварії на гідровузлі в цілому. Було встановлено, що ці ймовірності не перевищують допустимого значення ймовірності аварії на напірних гідропорудах відповідного класу відповідальності за наслідками. На основі цього було зроблено висновок про достатню надійність і безпеку Дністровського гідровузла як об'єкта національної критичної інфраструктури і потенційно небезпечного об'єкта.*

***Ключові слова:** аварія, безпека, випадкова подія, дерево відмов і несправностей, Дністровський гідровузел, ймовірність аварії, моделювання, надійність, напірні гідропоруди, об'єкт критичної інфраструктури, подія-припущення, прогнозування, сценарій, форма аварії.*

**DOI: 10.35350/2409-8876-2019-16-3-82-98**

#### **Вступ**

Ця стаття є другою частиною комплексної роботи, присвяченої моделюванню та прогнозуванню гіпотетичних аварій, з оцінюванням ймовірностей їх виникнення, на напірних гідропорудах Дністровського гідровузла як об'єкта

національної критичної інфраструктури. Вона є продовженням статті [1], в якій було дано загальну характеристику гідровузла та гідропорудам, що формують напірний фронт; обґрунтовано актуальність проблеми, розглянуто загальну постановку задачі досліджень, викладено методологію досліджень та сформульовано їх мету; окреслено прийняті гіпотези та припущення; дано коротку характеристику моделей, методів та підходів, що використовувалися при вирішенні поставленої задачі.

Основну увагу в цій статті приділено розв'язанню задачі досліджень та аналізу отриманих результатів. В якості основного методу для розв'язання поставленої задачі використано графоаналітичний, логіко-імовірнісний метод дерев відмов і несправностей. Основні його положення наведено в [1-7].

## 1. Загальні зауваження

При моделюванні та прогнозуванні гіпотетичних аварій на напірних гідропорудках Дністровського гідровузла розглядалися наступні п'ять гіпотетичних аварійних подій (модельних сценаріїв аварій):  $A_1$  – аварія внаслідок переповнення Дністровського водосховища;  $A_2$  – аварія на правобережній кам'яно-земляній греблі;  $A_3$  – аварія в межах напірної секції монтажної площадки;  $A_4$  – аварія в межах водозливної будівлі ГЕС;  $A_5$  – аварія на лівобережній кам'яно-земляній греблі.

При побудові дерева відмов і несправностей, згідно з рекомендаціями Дж. Фусселя [4], використовувалися наступні евристичні прийоми аналізу (декомпозиції) аварійних подій, що гіпотетично можуть відбуватися на гідропорудках гідровузла:

- 1) заміна більш загальної події на більш конкретну подію;
- 2) «поділ» більш складної події на більш прості несумісні події;
- 3) встановлення можливих причин настання складної події, щоб використати їх в якості більш простих і конкретних подій;
- 4) заміна однієї події двома, одна з яких трактується як «заборона» («блокування», «невиконання захисних дій» тощо);
- 5) виявлення спільної дії (перетину) кількох більш простих, конкретних причин, які спільно спричинюють настання результуючої події;
- 6) уточнення події за рахунок використання умов її оцінювання тощо.

В процесі аналізу все, що стосується можливої аварії на гідропорудці, уявно розчленовувалося на окремі складові елементи – менш складні події і стани, що формують різного роду причинно-наслідкові відношення, до встановлення базових подій і станів, ймовірності виникнення яких відомі або можуть бути встановлені тим чи іншим методом. Для зручності перевірки правильності побудови й розрахунку діаграми дерева відмов і несправностей будувалися окремі фрагменти діаграми, що охоплювали частину проблемної ситуації (окремий модельний сценарій аварії). Для уникнення надмірної складності моделювання причинно-наслідкових відношень використовувався також системно-інтегруючий підхід (агрегування). Найбільш прості аварійні події й стани, якщо це було можливо, цілеспрямовано інтегрувалися у більш загальні події й стани, що надалі вже вважалися базовими. При цьому використовувався принцип найменшої взаємодії в системі, згідно з яким базові аварійні події відбиралися серед стохастично незалежних подій.

## 2. Розв'язання задачі та отримані результати

Діаграма дерева відмов і несправностей, що використовувалось при прогнозуванні аварій на напірних гідропорудах Дністровського гідровузла та оцінюванні їх ймовірностей, представлена окремими фрагментами на рис. 1-5. На рис. 1 наведено її вершинні події, з деталізацією аварії в межах напірної секції монтажної площадки (аварійна подія  $A_3$ ), де скорочення РВБ – рівень верхнього б'єфу, ФПР – форсований підпірний рівень, МРЗ – максимальний розрахунковий землетрус.

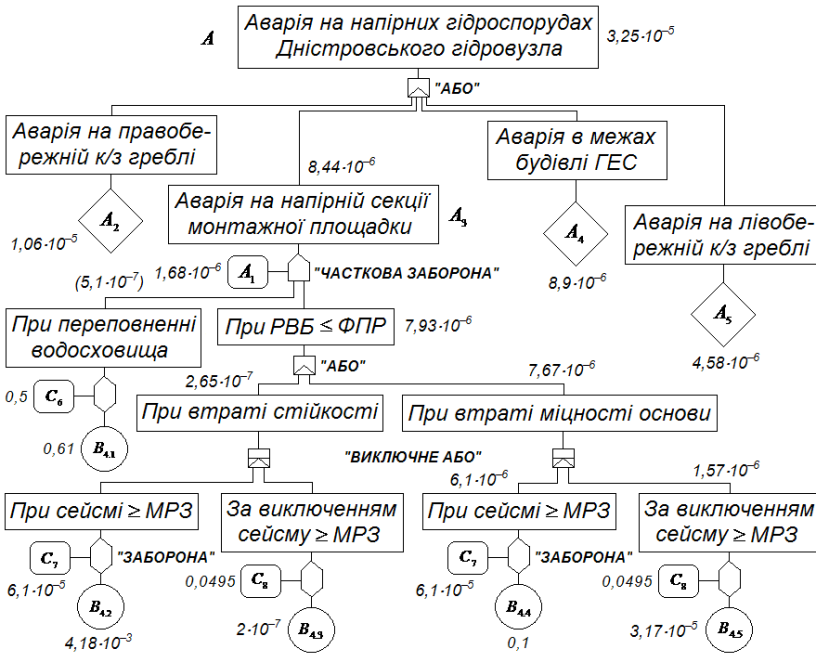


Рисунок 1 – Дерево відмов і несправностей для оцінювання ймовірності аварії на напірних гідропорудах Дністровського гідровузла (вершинні події, продовження діаграми див. на рис. 2-5)

### 2.1. Оцінювання ймовірності переповнення Дністровського водосховища

Фрагмент діаграми дерева відмов і несправностей, що стосується оцінювання ймовірності переповнення Дністровського водосховища (подія  $A_1$ ) при різних гіпотетичних аварійних ситуаціях, наведено нижче на рис. 2.

В табл. 1 описано відповідні аварійні ситуації, за яких прогнозувалося переповнення Дністровського водосховища, та представлено їх розрахункові ймовірності. Максимальні витрати води р. Дністер у створі Дністровського гідровузла при відповідних ситуаціях та ймовірності їх перевищення наведено в табл. 2. Базові аварійні події на водопропускних спорудах, при яких прогнозувалося переповнення Дністровського водосховища, та їх розрахункові ймовірності наведено в табл. 3, де ймовірність перебування механічного обладнання (МО) на суміщеній з водозливом будівлі ГЕС в несправному стані оцінювалася за формулою [2, 6]:

$$P(t + t_r) = 1 - \exp\{-\lambda \cdot t \cdot \exp(-\mu \cdot t_r)\}, \quad (1)$$

де  $\lambda$  – інтенсивність відмов об’єкта до першої відмови;  $\mu$  – інтенсивність відновлення його працездатності;  $t_r$  – додатковий час, що відпускається на відновлення працездатності об’єкта.

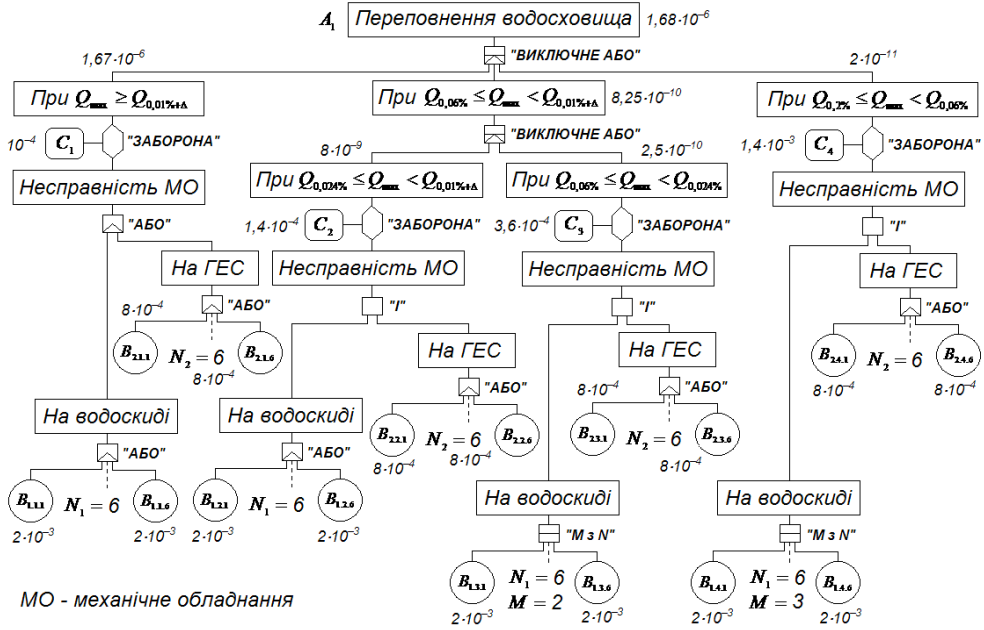


Рисунок 2 – Фрагмент діаграми дерева відмов і несправностей для оцінювання ймовірності переповнення водосховища Дністровського гідровузла

Таблиця 1 – Ситуації, за яких прогнозувалося переповнення Дністровського водосховища, та їх розрахункові ймовірності

| Ситуація       | Опис ситуації  | Ймовірність, рік <sup>-1</sup> |
|----------------|--|--------------------------------|
| C <sub>1</sub> | Максимальні витрати води р. Дністер перевищують 13260 м <sup>3</sup> /с, $Q_{\max} \geq Q_{0,01\%+\Delta}$   | 10 <sup>-4</sup>               |
| C <sub>2</sub> | Максимальні витрати води р. Дністер перевищують 11000 м <sup>3</sup> /с, але не досягають 13260 м <sup>3</sup> /с, $Q_{0,024\%} \leq Q_{\max} < Q_{0,01\%+\Delta}$ | 1,4 · 10 <sup>-4</sup>         |
| C <sub>3</sub> | Максимальні витрати води р. Дністер перевищують 9130 м <sup>3</sup> /с, але не досягають 11000 м <sup>3</sup> /с, $Q_{0,06\%} \leq Q_{\max} < Q_{0,024\%}$         | 3,6 · 10 <sup>-4</sup>         |
| C <sub>4</sub> | Максимальні витрати води р. Дністер перевищують 7260 м <sup>3</sup> /с, але не досягають 9130 м <sup>3</sup> /с, $Q_{0,2\%} \leq Q_{\max} < Q_{0,06\%}$            | 1,4 · 10 <sup>-3</sup>         |

Таблиця 2 – Розрахункові максимальні витрати  $Q_{\max}$  води р. Дністер при ймовірності перевищення  $P$

|                                 |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $P, \%$                         | 0,01  | 0,024 | 0,06 | 0,1  | 0,2  | 0,5  | 1    | 5    | 10   | 25   |
| $Q_{\max}, \text{M}^3/\text{c}$ | 13260 | 11000 | 9130 | 8320 | 7260 | 6000 | 5140 | 3400 | 2750 | 1950 |

Таблиця 3 – Базові аварійні події, при яких прогнозувалося переповнення Дністровського водосховища, та їх ймовірності

| Подія                         | Опис події  | Ймовірність, рік <sup>-1</sup> |
|-------------------------------|---|--------------------------------|
| $B_{1.1.1}, \dots, B_{1.1.6}$ | Несправність механічного обладнання водоскиду, що призводить до неможливості підйому робочих затворів, при ситуації $C_1$ | $2 \cdot 10^{-3}$              |
| $B_{1.2.1}, \dots, B_{1.2.6}$ | Несправність механічного обладнання водоскиду, що призводить до неможливості підйому робочих затворів, при ситуації $C_2$ | $2 \cdot 10^{-3}$              |
| $B_{1.3.1}, \dots, B_{1.3.6}$ | Несправність механічного обладнання водоскиду, що призводить до неможливості підйому робочих затворів, при ситуації $C_3$ | $2 \cdot 10^{-3}$              |
| $B_{1.4.1}, \dots, B_{1.4.6}$ | Несправність механічного обладнання водоскиду, що призводить до неможливості підйому робочих затворів, при ситуації $C_4$ | $2 \cdot 10^{-3}$              |
| $B_{2.1.1}, \dots, B_{2.1.6}$ | Несправність механічного обладнання ГЕС, що призводить до неможливості підйому ремонтних затворів, при ситуації $C_1$     | $8 \cdot 10^{-4}$              |
| $B_{2.2.1}, \dots, B_{2.2.6}$ | Несправність механічного обладнання ГЕС, що призводить до неможливості підйому ремонтних затворів, при ситуації $C_2$     | $8 \cdot 10^{-4}$              |
| $B_{2.3.1}, \dots, B_{2.3.6}$ | Несправність механічного обладнання ГЕС, що призводить до неможливості підйому ремонтних затворів, при ситуації $C_3$     | $8 \cdot 10^{-4}$              |
| $B_{2.4.1}, \dots, B_{2.4.6}$ | Несправність механічного обладнання ГЕС, що призводить до неможливості підйому ремонтних затворів, при ситуації $C_4$     | $8 \cdot 10^{-4}$              |

Інтенсивність відмов системи «затвор-підйомний механізм»  $\lambda$  приймалася за статистичними даними (див., наприклад, [2]): для системи «робочий затвор-козловий кран» на водозливі  $\lambda = 2 \cdot 10^{-3}, \text{рік}^{-1}$ ; для системи «ремонтний затвор-мостовий кран» на ГЕС  $\lambda = 10^{-3}, \text{рік}^{-1}$ . З запасом ризику для всіх випадків пропуску паводків на гідровузлі додатковий час, що

відпускається на відновлення працездатності систем «затвор-підйомний механізм», приймався рівним  $t_r = 0$ . Час служби механічного обладнання, протягом якого очікується хоча б одна робоча операція, для водоскидних споруд приймався рівним 1 року,  $t = 1$  рік; для ГЕС  $t = 0,7945$  рік.

## 2.2. Врахування живучості гідроспоруд при аварійних ситуаціях

При моделюванні аварійних ситуацій на напірних гідроспорудах гідровузла, зокрема при переповненні водосховища, враховувалася їх живучість при аварійних перевантаженнях (див. коефіцієнти живучості в [8] в залежності від типу гідроспоруд). При цьому умовні ймовірності розвитку аварійних подій на напірних гідроспорудах оцінювалися як доповнення коефіцієнта живучості  $\kappa_v$  до одиниці.

Для кам'яно-земляних гребель  $\kappa_v = 0,77$  і, відповідно, умовна ймовірність розвитку аварії буде 0,23. Для бетонних гідроспоруд (монтажна площадка, будівля ГЕС суміщена з водозливом) коефіцієнт живучості  $\kappa_v = 0,39$ . Умовна ймовірність розвитку аварії відповідно буде 0,61.

Серед подій-умов, за яких можуть втратити живучість напірні гідроспоруди Дністровського гідровузла, також розглядалися (див. табл. 4): для кам'яно-земляних гребель – дія вітрових хвиль 50% ймовірності перевищення (подія-умова  $C_5$ ); для бетонних гідроспоруд – дія навантаження від льоду 50% ймовірності перевищення (подія-умова  $C_6$ ).

Таблиця 4 – Ситуації, за яких прогнозувалася втрата живучості напірних гідроспоруд Дністровського гідровузла, та їх ймовірності

| Ситуація | Опис ситуації  | Ймовірність, рік <sup>-1</sup> |
|----------|--|--------------------------------|
| $C_5$    | Дія вітрових хвиль 50% ймовірності перевищення         | 0,5                            |
| $C_6$    | Дія навантаження від льоду 50% ймовірності перевищення | 0,5                            |

## 2.3. Врахування сейсмічного фактору

Згідно з новими картами сейсмічного районування (карти ЗСР-2004 [9]) територія розміщення напірних гідроспоруд Дністровського гідровузла віднесена до зони, де можливе виникнення землетрусів: з інтенсивністю сейсмічних струшувань 6 балів за шкалою MSK-64 для середніх ґрунтів з періодом повторюваності 1 раз в 500 років (карта ЗСР-2004-А) або щорічною ймовірністю перевищення відповідної сейсмічної події  $2 \cdot 10^{-3}$ , рік<sup>-1</sup>; з інтенсивністю сейсмічних струшувань 7 балів за шкалою MSK-64 для середніх ґрунтів з періодом повторюваності 1 раз в 5000 років (карта ЗСР-2004-С) або щорічною ймовірністю перевищення відповідної сейсмічної події  $2 \cdot 10^{-4}$ , рік<sup>-1</sup>. Розрахункове сейсмічне прискорення (для напірних гідроспоруд гідровузла – землетрусу інтенсивністю 7 балів) приймалось рівним  $0,1 \cdot g$ , де  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup> – прискорення вільного падіння.

Забезпеченість (ймовірність перевищення) цього прискорення при максимальному розрахунковому землетрусі (МРЗ) інтенсивністю 7 балів (див., наприклад, [10]) складає 80%, а забезпеченість цього ж прискорення при землетрусі інтенсивністю 6 балів оцінюється в 25%.

Для землетрусів інтенсивністю 7 балів за шкалою MSK-64 ймовірність  $P(I_7)$  приймалась рівною ймовірності перевищення відповідної сейсмічної події з інтенсивністю сейсмічних струшувань 7 балів:  $P(I_7) = 2 \cdot 10^{-4}$ , рік<sup>-1</sup>. Відповідно, для землетрусів інтенсивністю 6 балів, з врахуванням умови формування повної групи подій,  $P(I_6) = 1,8 \cdot 10^{-3}$ , рік<sup>-1</sup>. Тоді, повна ймовірність перевищення сейсмічного прискорення величиною  $0,1 \cdot g$  максимального розрахункового землетрусу (МРЗ) з врахуванням сейсмічних подій інтенсивністю сейсмічних струшувань в 6 і 7 балів на площадці розміщення гідропоруд Дністровського гідровузла буде:

$$P(a_{\max} \geq 0,1g) = \sum_{k=6,7} P(a_{\max} \geq 0,1g | I_k) \cdot P(I_k), \quad (2)$$

де  $P(a_{\max} \geq 0,1g | I_k)$  – ймовірність перевищення сейсмічного прискорення  $a_{\max} = 0,1 \cdot g$  при землетрусі інтенсивністю  $k$  балів;  $P(I_k)$  – щорічна ймовірність сейсмічної події інтенсивністю сейсмічних струшувань в  $k$  балів. Маємо  $P(a_{\max} \geq 0,1g) = 6,1 \cdot 10^{-4}$ , рік<sup>-1</sup>.

Верхню граничну (sup) оцінку ймовірності настання граничного стану першої групи, пов'язаного з порушенням загальної міцності або стійкості гідропоруди при МРЗ, з врахуванням коефіцієнта сполучення навантажень  $\gamma_{ic} = 0,9$  [11], приймемо (з запасом ризику) рівною 0,1.

Результати оцінювання ймовірностей реалізації подій-умов (ситуацій)  $C_7$ ,  $C_8$ , пов'язаних з врахуванням сейсмічного фактору, наведено в табл. 5.

Розрахунки гідропоруд на сейсміку зазвичай проводяться при рівнях води у верхньому б'єфі близьких до нормального підпірного рівня (НПР). Оскільки перевищення НПР для гідропоруд класу СС-3 протягом призначеного строку служби в 100 років очікується не більше ніж один раз в 10 років (при розрахунковому паводку щорічною ймовірністю перевищення 0,1%), то повна ймовірність аварійного сполучення навантажень при сейсмічних впливах (події-умови  $C_7$ ) буде:  $P(C_7) = 6,1 \cdot 10^{-5}$ , рік<sup>-1</sup>.

Таблиця 5 – Ситуації, пов'язані з врахуванням сейсмічного фактору, при яких прогнозувалися аварії на напірних гідропорудах Дністровського гідровузла, та їх ймовірності (ФПР – форсований підпірний рівень)

| Ситуація | Опис ситуації   | Ймовірність, рік <sup>-1</sup> |
|----------|---|--------------------------------|
| $C_7$    | Навантаження при РВБ ≤ ФПР і землетрусі інтенсивністю ≥ МРЗ                 | $6,1 \cdot 10^{-5}$            |
| $C_8$    | Навантаження при РВБ ≤ ФПР та за виключенням землетрусу інтенсивністю ≥ МРЗ | 0,0495                         |

Для визначення щорічної ймовірності реалізації події-умови (ситуації)  $C_8$  формувалася повна група у складі події  $C_8$  та подій  $A_1$  і  $C_7$ . Покладалося, що протягом призначеного строку служби гідроспоруди  $T_p = 100$  років (встановленого для гідроспоруд класу СС-3 згідно з чинними нормами [2]) повна ймовірність реалізації однієї з подій  $A_1, C_7$  буде:

$$P(A_1, C_7, T_p) = 1 - [1 - P(A_1) - P(C_7)]^{T_p}. \quad (3)$$

Повна ймовірність реалізації події-умови  $C_8$  в розрізі  $T_p = 100$  років:

$$P(C_8, T_p) = 1 - P(C_1, T_p). \quad (4)$$

Щорічна ймовірність події-умови  $C_8$ , що доповнює події  $A_1$  і  $C_7$ :

$$P(C_8) = 1 - [1 - P(C_8, T_p)]^{\frac{1}{T_p}}. \quad (5)$$

#### 2.4. Прогнозування аварій на напірних гідроспорудах гідровузла

Базові події, за яких прогнозувалася аварія в межах монтажної площадки (подія  $A_3$ , див. рис. 1), та їх розрахункові ймовірності, наведено в табл. 6.

Таблиця 6 – Базові аварійні події, за яких прогнозувалася аварія в межах монтажної площадки, та їх ймовірності

| Подія     | Опис події   | Ймовірність, рік <sup>-1</sup> |
|-----------|--|--------------------------------|
| $B_{4.1}$ | Втрата живучості конструкції напірної секції монтажної площадки при переповненні водосховища       | 0,61                           |
| $B_{4.2}$ | Втрата стійкості напірної секції монтажної площадки при РВБ ≤ ФПР і сейсміці інтенсивністю ≥ МРЗ   | $4,18 \cdot 10^{-3}$           |
| $B_{4.3}$ | Втрата стійкості напірної секції монтажної площадки при РВБ ≤ ФПР та за виключенням сейсміки ≥ МРЗ | $2 \cdot 10^{-7}$              |
| $B_{4.4}$ | Втрата міцності напірної секції монтажної площадки при РВБ ≤ ФПР і сейсміці інтенсивністю ≥ МРЗ    | 0,1                            |
| $B_{4.5}$ | Втрата міцності напірної секції монтажної площадки при РВБ ≤ ФПР та за виключенням сейсміки ≥ МРЗ  | $3,17 \cdot 10^{-5}$           |

При оцінці ймовірності порушення міцності бетонної споруди на скельній основі, приймалося, що така подія можлива на контакт з боку верхової грані внаслідок напружень розтягу. З запасом ризику допустиме



значення напруження приймалося рівним нулю. Встановлювався критерій порушення міцності основи на контакті у вигляді  $\sigma_1 \leq 0$ , і, в залежності від ситуації  $C$ , оцінювалася умовна ймовірність порушення міцності основи на контакті в припущенні нормального закону розподілу напружень  $\sigma_1$ :

$$P(\sigma_1 \leq 0 | C) = \Phi\langle \sigma_1 = 0, m(\sigma_1), s(\sigma_1) \rangle, \quad (6)$$

де  $\Phi\langle \sigma_1 = 0, m(\sigma_1), s(\sigma_1) \rangle$  – інтегральна функція ймовірності нормального закону розподілу при  $\sigma_1 = 0$ , математичному сподіванні  $m(\sigma_1)$  та середньому квадратичному відхиленні  $s(\sigma_1)$  напруження  $\sigma_1$ , визначених за умови  $C$ .

В табл. 7 наведено базові події, за яких прогнозувалася аварія на правобережній кам'яно-земляній греблі (аварійна подія  $A_2$ ), та їх ймовірності. Фрагмент діаграми дерева відмов і несправностей для оцінювання ймовірності виникнення аварій на цій греблі показано на рис. 3.

Таблиця 7 – Базові аварійні події, за яких прогнозувалася аварія на правобережній кам'яно-земляній греблі, та їх ймовірності

| Подія     | Опис події   | Ймовірність, рік <sup>-1</sup> |
|-----------|--|--------------------------------|
| $B_{3.1}$ | Втрата живучості конструкції правобережної кам'яно-земляної греблі при переповненні водосховища          | 0,23                           |
| $B_{3.2}$ | Зсув верхового укосу греблі при РВБ ≤ ФПР і сейсмічних впливах інтенсивністю ≥ МРЗ                       | $2,1 \cdot 10^{-2}$            |
| $B_{3.3}$ | Зсув низового укосу греблі при РВБ ≤ ФПР і сейсмічних впливах інтенсивністю ≥ МРЗ                        | $1,2 \cdot 10^{-2}$            |
| $B_{3.4}$ | Зсув верхового укосу греблі при РВБ ≤ ФПР та за виключенням сейсмічних впливів ≥ МРЗ                     | $1,5 \cdot 10^{-4}$            |
| $B_{3.5}$ | Зсув низового укосу греблі при РВБ ≤ ФПР та за виключенням сейсмічних впливів ≥ МРЗ                      | $5,4 \cdot 10^{-6}$            |
| $B_{3.6}$ | Руйнування греблі внаслідок суфозії в ядрі при РВБ ≤ ФПР і сейсмічних впливах ≥ МРЗ                      | $10^{-2}$                      |
| $B_{3.7}$ | Руйнування греблі внаслідок суфозії в основі при РВБ ≤ ФПР і сейсмічних впливах ≥ МРЗ                    | $3,5 \cdot 10^{-3}$            |
| $B_{3.8}$ | Руйнування греблі внаслідок суфозії в ядрі при РВБ ≤ ФПР та за виключенням сейсміки інтенсивністю ≥ МРЗ  | $2 \cdot 10^{-6}$              |
| $B_{3.9}$ | Руйнування греблі внаслідок суфозії в основі при РВБ ≤ ФПР і за виключенням сейсміки інтенсивністю ≥ МРЗ | $10^{-7}$                      |

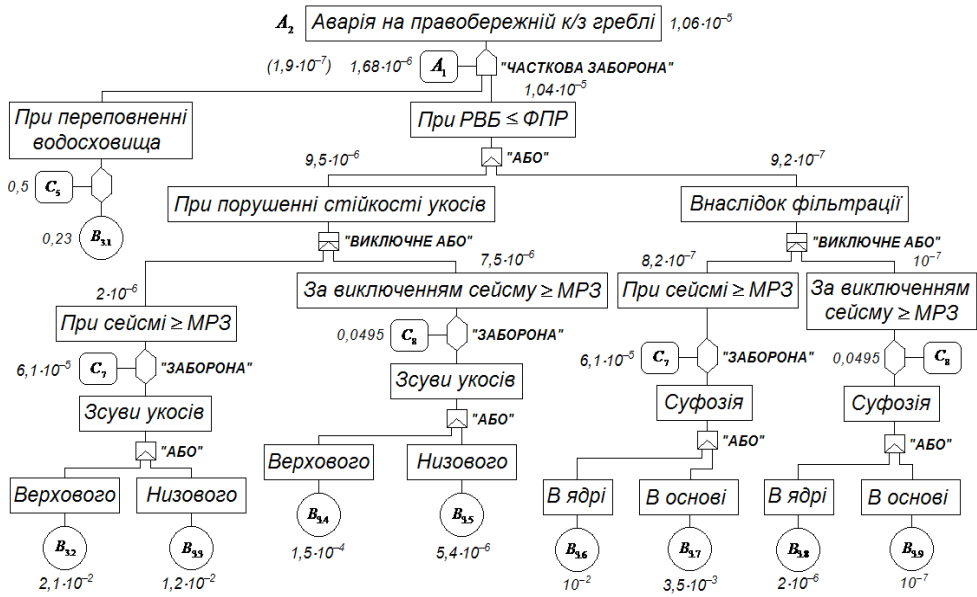


Рисунок 3 – Фрагмент дерева відмов і несправностей для оцінювання ймовірності аварії на правобережній кам’яно-земляній греблі

В табл. 8 наведено базові події, за яких прогнозувалася аварія в межах суміщеної з водозливом будівлі ГЕС (аварійна подія  $A_4$ ), та їх ймовірності. В табл. 9 описано ситуації, при яких прогнозувалися аварії, пов’язані з порушенням загальної стійкості і міцності будівлі ГЕС при  $РВБ \leq ФПР$  і за виключенням сейсміки  $\geq МРЗ$ , та представлено їх розрахункові ймовірності.

Таблиця 8 – Базові аварійні події, за яких прогнозувалася аварія в межах суміщеної з водозливом будівлі ГЕС, та їх ймовірності

| Подія     | Опис події   | Ймовірність, рік <sup>-1</sup> |
|-----------|--|--------------------------------|
| 1         | 2  | 3                              |
| $B_{5.1}$ | Втрата живучості споруди при переповненні б’єфу  | 0,61                           |
| $B_{5.2}$ | Втрата стійкості секції будівлі ГЕС при $РВБ \leq ФПР$ і сейсмічних впливах інтенсивністю $\geq МРЗ$   | $6,28 \cdot 10^{-3}$           |
| $B_{5.3}$ | Втрата стійкості секції будівлі ГЕС при $РВБ \leq ФПР$ та за виключенням сейсмічних впливів інтенсивністю $\geq МРЗ$ при аварійному розрахунковому випадку           | $3,3 \cdot 10^{-6}$            |
| $B_{5.4}$ | Втрата стійкості секції будівлі ГЕС при $РВБ \leq ФПР$ та за виключенням сейсміки $\geq МРЗ$ при основному розрахунковому випадку ( $РВБ = 123,0$ м; $РНБ = 74,2$ м) | $4,7 \cdot 10^{-6}$            |
| $B_{5.5}$ | Втрата стійкості секції будівлі ГЕС при $РВБ \leq ФПР$ та за виключенням сейсміки $\geq МРЗ$ при основному розрахунковому випадку ( $РВБ = 121,0$ м; $РНБ = 68,0$ м) | $6,4 \cdot 10^{-7}$            |
| $B_{5.6}$ | Втрата стійкості секції будівлі ГЕС при $РВБ \leq ФПР$ та за виключенням сейсмічних впливів інтенсивністю $\geq МРЗ$ при ремонтному розрахунковому випадку           | $1,1 \cdot 10^{-5}$            |

Продовження таблиці 8

| 1          | 2  | 3                    |
|------------|--|----------------------|
| $B_{5.7}$  | Втрата міцності секції будівлі ГЕС при РВБ $\leq$ ФПР і сейсмічних впливах інтенсивністю $\geq$ МРЗ  | 0,1                  |
| $B_{5.8}$  | Втрата міцності секції будівлі ГЕС при РВБ $\leq$ ФПР та за виключенням сейсмічних впливів інтенсивністю $\geq$ МРЗ при аварійному розрахунковому випадку                | $3,17 \cdot 10^{-5}$ |
| $B_{5.9}$  | Втрата міцності секції будівлі ГЕС при РВБ $\leq$ ФПР та за виключенням сейсмічних впливів $\geq$ МРЗ при основному розрахунковому випадку (РВБ = 123,0 м; РНБ = 74,2 м) | $4,29 \cdot 10^{-4}$ |
| $B_{5.10}$ | Втрата міцності секції будівлі ГЕС при РВБ $\leq$ ФПР та за виключенням сейсмічних впливів $\geq$ МРЗ при основному розрахунковому випадку (РВБ = 121,0 м; РНБ = 68,0 м) | $3,17 \cdot 10^{-5}$ |
| $B_{5.11}$ | Втрата стійкості секції будівлі ГЕС при РВБ $\leq$ ФПР та за виключенням сейсмічних впливів інтенсивністю $\geq$ МРЗ при ремонтному розрахунковому випадку               | $2,74 \cdot 10^{-6}$ |

Таблиця 9 – Ситуації, при яких прогнозувалися аварії, пов'язані з порушенням загальної стійкості і міцності будівлі ГЕС, та їх ймовірності

| Ситуація | Опис ситуації                                       | Ймовірність, рік <sup>-1</sup> |
|----------|---|--------------------------------|
| $C_9$    | Розрахунковий паводок 0,1% забезпеченості           | $10^{-3}$                      |
| $C_{10}$ | Ремонт гідроагрегату                                | 0,015                          |
| $C_{11}$ | РВБ = 123,0 м; рівень нижнього б'єфу (РНБ) = 68,0 м | $1,4 \cdot 10^{-3}$            |
| $C_{12}$ | РВБ = 121,0 м; РНБ = 68,0 м                         | 0,0321                         |

Ймовірність виникнення ситуації  $C_9$  приймалася рівною ймовірності перевищення розрахункового паводку 0,1% забезпеченості. При цьому приймалася до уваги можливість виходу з ладу частини механічного обладнання на водоскиді і ГЕС і необхідність форсування РВБ до ФПР.

Ймовірність виникнення ситуації  $C_{10}$  встановлювалася за даними статистики відмов гідроагрегатів, що потребують ремонту з осушенням проточного тракту [12]. З запасом ризику ймовірність  $P(C_{10}) = 0,015, \text{ рік}^{-1}$ .

Ймовірність виникнення ситуації  $C_{11}$  приймалася рівною ймовірності ситуації  $C_4$ , при якій максимальні витрати води р. Дністер можуть перевищити  $7260 \text{ м}^3/\text{с}$ , але не перевищують  $9130 \text{ м}^3/\text{с}$ :  $P(C_{11}) = 1,4 \cdot 10^{-3}, \text{ рік}^{-1}$ . При цьому приймалася до уваги можливість виходу з ладу частини механічного обладнання на водоскиді і ГЕС і необхідність форсування РВБ до РВБ = 123,0 м. Нарешті, ймовірність виникнення ситуації  $C_{12}$  встановлювалася з врахуванням того, що ситуації  $C_9$ ,  $C_{10}$ ,  $C_{11}$  і  $C_{12}$ , разом, в повній групі подій, складають ситуацію  $C_8$ . Тоді  $P(C_{12}) = 1,4 \cdot 10^{-3}, \text{ рік}^{-1}$ .

Фрагмент діаграми дерева відмов і несправностей для оцінювання ймовірності виникнення аварій в межах будівлі ГЕС показано на рис. 4.

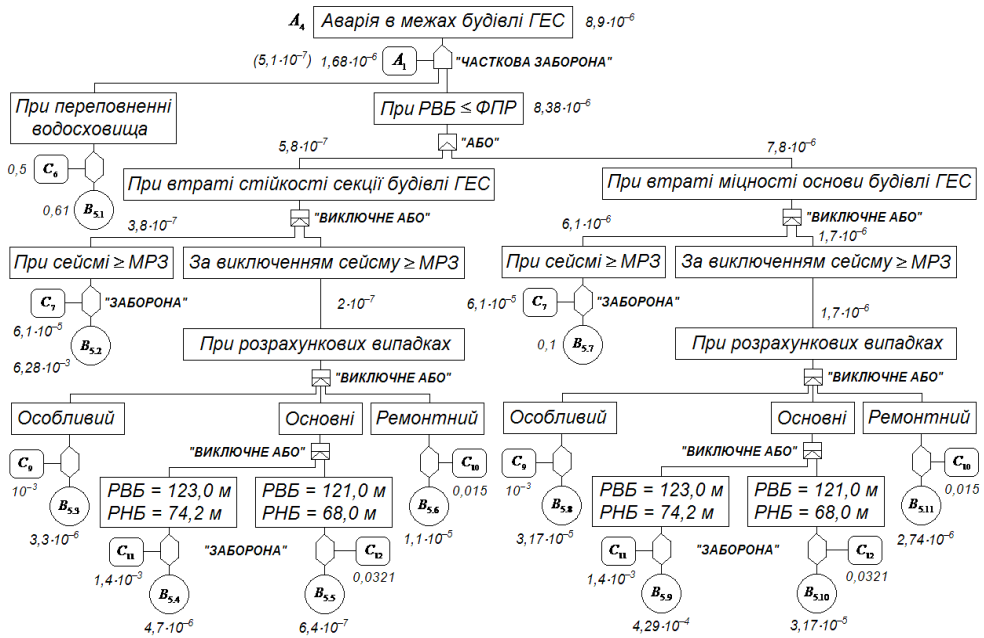


Рисунок 4 – Фрагмент дерева відмов і несправностей для оцінювання ймовірності аварії в межах суміщеної з водозливом будівлі ГЕС

В табл. 10 наведено базові події, за яких прогнозувалася аварія на лівобережній кам'яно-земляній греблі (аварійна подія  $A_5$ ), та їх ймовірності. Фрагмент діаграми дерева відмов і несправностей для оцінювання ймовірності виникнення аварій на цій греблі показано на рис. 5.

Таблиця 10 – Базові аварійні події, за яких прогнозувалася аварія на правобережній кам'яно-земляній греблі, та їх ймовірності

| Подія     | Опис події  | Ймовірність, рік <sup>-1</sup> |
|-----------|---|--------------------------------|
| 1         | 2   | 3                              |
| $B_{6.1}$ | Втрата живучості конструкції лівобережної кам'яно-земляної греблі при переповерхненні водосховища | 0,23                           |
| $B_{6.2}$ | Зсув верхового укосу греблі при РВБ ≤ ФПР і сейсмічних впливах інтенсивністю ≥ МРЗ                | $1,75 \cdot 10^{-2}$           |
| $B_{6.3}$ | Зсув низового укосу греблі при РВБ ≤ ФПР і сейсмічних впливах інтенсивністю ≥ МРЗ                 | $1,2 \cdot 10^{-2}$            |
| $B_{6.4}$ | Зсув верхового укосу греблі при РВБ ≤ ФПР та за виключенням сейсмічних впливів ≥ МРЗ              | $1,5 \cdot 10^{-4}$            |
| $B_{6.5}$ | Зсув низового укосу греблі при РВБ ≤ ФПР та за виключенням сейсмічних впливів ≥ МРЗ               | $5,4 \cdot 10^{-6}$            |
| $B_{6.6}$ | Руйнування греблі внаслідок суфозії в ядрі при РВБ ≤ ФПР і сейсмічних впливах ≥ МРЗ               | $10^{-2}$                      |

Продовження таблиці 10

| 1         | 2   | 3                 |
|-----------|---|-------------------|
| $B_{6.7}$ | Руйнування греблі внаслідок суфозії в основі при РВБ $\leq$ ФПР і сейсмічних впливах $\geq$ МРЗ                   | $5 \cdot 10^{-3}$ |
| $B_{6.8}$ | Руйнування греблі внаслідок суфозії в ядрі при РВБ $\leq$ ФПР та за виключенням сейсміки інтенсивністю $\geq$ МРЗ | $10^{-5}$         |
| $B_{6.9}$ | Руйнування греблі внаслідок суфозії в основі при РВБ $\leq$ ФПР та за виключенням сейсміки $\geq$ МРЗ             | $10^{-7}$         |

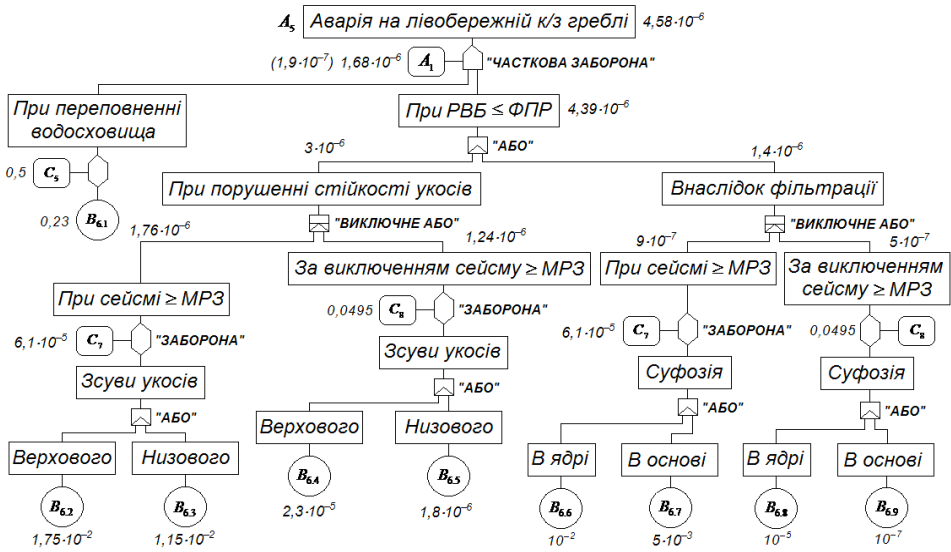


Рисунок 5 – Фрагмент дерева відмов і несправностей для оцінювання ймовірності аварії на лівобережній кам'яно-земляній греблі

### 3. Аналіз отриманих результатів

Результати моделювання і прогнозування аварій на напірних гідропорудах Дністровського гідровузла з оцінюванням їх ймовірностей представлено на діаграмах дерева відмов і несправностей (див. рис. 1-5) та зведено в табл. 11.

Таблиця 11 – Результати оцінювання ймовірностей аварій на напірних гідропорудах Дністровського гідровузла

| Гідропоруда                         | $P(A)$ , рік <sup>-1</sup> | $[P(A)]$ , рік <sup>-1</sup> | Висновок про надійність |
|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------|
| Правобережна кам'яно-земляна гребля | $1,06 \cdot 10^{-5}$       | $5 \cdot 10^{-5}$            | надійна                 |
| Напірна секція монтажної площадки   | $8,44 \cdot 10^{-6}$       | $5 \cdot 10^{-5}$            | надійна                 |
| Суміщена з водозливом будівля ГЕС   | $8,9 \cdot 10^{-6}$        | $5 \cdot 10^{-5}$            | надійна                 |
| Лівобережна кам'яно-земляна гребля  | $4,58 \cdot 10^{-6}$       | $5 \cdot 10^{-5}$            | надійна                 |
| Гідровузол в цілому                 | $3,25 \cdot 10^{-5}$       | $5 \cdot 10^{-5}$            | надійний                |

Згідно з отриманими результатами верхня гранична (sup) оцінка ймовірності аварії на напірних гідропорадах гідровузла, узагальнена за різними її формами, сценаріями та спорудами, склала  $3,25 \cdot 10^{-5}$ , рік<sup>-1</sup>.

В табл. 11 виконано порівняння розрахункових значень ймовірностей аварій на напірних гідропорадах гідровузла з допустимими значеннями щорічної ймовірності виникнення аварій на напірних гідропорадах (див. ДБН В.2.4-3:2010 [11]). Як можна бачити, узагальнені за різними подіями ймовірності аварій на кожній з напірних гідропоруд Дністровського гідровузла, що формують його напірний фронт, а також і узагальнена за різними гідропорадами ймовірність аварії на гідровузлі в цілому, не перевищують допустимих значень для класу за наслідками СС-3.

Отримані оцінки ймовірностей аварій на напірних гідропорадах Дністровського гідровузла є максимальними граничними оцінками (sup), перевищення яких за прийнятих режимів експлуатації гідропоруд натепер не очікується. Ймовірність аварії в залежності від гідропоруди гідровузла змінюється в межах від  $4,58 \cdot 10^{-6}$ , рік<sup>-1</sup>, на лівобережній кам'яно-земляній греблі, до  $1,06 \cdot 10^{-5}$ , рік<sup>-1</sup>, на правобережній кам'яно-земляній греблі.

При подальших дослідженнях можливе уточнення отриманих оцінок ймовірностей аварій на напірних гідропорадах Дністровського гідровузла в сторону їх зменшення. Особливо це стосується правобережної кам'яно-земляної греблі. Більш високе значення ймовірності виникнення аварії на цій греблі в порівнянні з іншими напірними гідропорадами гідровузла, зокрема, з ймовірністю аварії на лівобережній кам'яно-земляній греблі, пояснюється дефіцитом інформації про реальний стан гідропоруди і, як наслідок, більш обережними оцінками ймовірностей базових аварійних подій. З тієї ж причини дещо завищеними є також значення ймовірностей виникнення аварій в межах монтажної площадки та суміщеної з водозливом будівлі ГЕС, що також пояснюється більш високим рівнем невизначеності інформації про їх реальний стан в порівнянні з лівобережною кам'яно-земляною греблею.

## Висновки

1. Виконано прогнозування аварій на напірних гідропорадах Дністровського гідровузла на основі ймовірнісного підходу. Встановлено, що узагальнені за різними аварійними подіями ймовірності аварій на кожній з напірних гідропоруд гідровузла, що формують його напірний фронт, а також узагальнена оцінка ймовірності аварії на гідровузлі в цілому, не перевищують допустимих значень, що регламентуються чинними нормами.

2. Показано, що прогнозування аварії на гідровузлі є складною, «слабо структурованою» системною задачею, обтяженою невизначеністю різної природи – стохастичною і гносеологічною, структурною і параметричною тощо. З метою структуризації задачі досліджень і подолання невизначеності інформації використано метод дерев відмов і несправностей – логіко-ймовірнісний метод прогнозування аварій, який дозволяє врахувати системний характер виникнення гіпотетичних аварій на гідровузлі, вплив різних природних і техногенних факторів на аварійність споруд, в тому числі і взаємодію різних гідропоруд, обладнання та устаткування на рівні системи.

3. Прогнозування аварій на гідровузлі в межах ймовірнісного підходу відкриває нові можливості щодо раціонального обґрунтування додаткових

досліджень та зусиль, які можуть спрямовані на підвищення рівня знань про гідроспоруди, що формують напірний фронт гідровузла, і, відповідно, рівня їх надійності та безпеки. Зокрема, в межах таких досліджень можлива реалізація на практиці концепції практично досяжного мінімального ризику, згідно з якою зусилля на зменшення ймовірності аварії на гідровузлі й підвищення таким чином його надійності і безпеки можуть узгоджуватися з економічними та технологічними можливостями.

4. Результати моделювання та прогнозування аварій на напірних гідроспорудах Дністровського гідровузла було використано при оцінюванні його надійності і безпеки за імовірнісним критерієм, а також можуть бути використані при аналізі та оцінюванні ризику аварій на гідровузлі з врахуванням як ймовірностей відповідних аварійних подій, так і їх наслідків. Це сприятиме кращому розумінню проблем забезпечення належної надійності і безпеки Дністровського гідровузла як об'єкта національної критичної інфраструктури та потенційно небезпечного об'єкта.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Стефанишин Д.В. Логіко-імовірнісне моделювання і прогнозування аварій на напірних гідроспорудах Дністровського гідровузла (Частина 1. Методологія, гіпотези та припущення). Математичне моделювання в економіці. 2019. № 2 (15). С. 69-85.
2. Векслер А.Б., Івашинцов Д.А., Стефанишин Д.В. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений. С.-Петербург : ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2002. 591 с.
3. Стефанишин Д.В. Прогнозування аварій на греблях в задачах оцінки й забезпечення їх надійності та безпеки. Гідроенергетика України. № 3-4. 2011. С. 52-60.
4. Kumamoto H., Henley E.J. Probabilistic risk assessment and management for engineers and scientists. N.Y.: IEEE Press, 1996. 597 p.
5. The use of risk analysis to support dam safety decisions and management. Trans. of the 20-th Int. Congress on Large Dams. Vol.1. Q.76. Beijing-China, 2000. 896 p.
6. Беллендир Е.Н., Івашинцов Д.А., Стефанишин Д.В. и др. Вероятностные методы оценки надежности грунтовых гидротехнических сооружений. СПб.: В 2-х томах. Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2003. 553 с. 524 с.
7. Рябинин И.А. Надёжность и безопасность структурно-сложных систем. СПб.: Издательство СПбГУ, 2007. 276 с.
8. Стефанишин Д.В. Статистичні оцінки живучості гребель. Екологічна безпека та природокористування. Зб. наук. праць. Вип. 11. Київ: КНУБА, ІТГП НАНУ, 2012. С. 53-61.
9. ДБН В.1.1-12:2006. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівництво в сейсмічних районах України. Мінбудівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України. Київ: 2006. 83 с.
10. Світовий центр даних з геоінформатики та сталого розвитку. Сейсмічна безпека. URL : <http://wdc.org.ua/uk/node/178>.
11. ДБН В.2.4-3:2010. Гідротехнічні, енергетичні та меліоративні системи і споруди, підземні гірничі виробки. Гідротехнічні споруди. Основні положення. Київ : Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2010. 37 с.
12. Стефанишин Д.В., Романчук К.Г. Логіко-імовірнісна оцінка ризику збитків від аварійного вилування води з басейну добового регулювання Зарамагської ГЕС-1. Системні дослідження та інформаційні технології. 2013. №3. С. 130-141.

## REFERENCE

1. Stefanyshyn, D.V. (2019). Lohiko-imovirnisne modeliuвання i prohozuvannya avarii na napirnykh hidrosporudakh Dnistrovskoho hidrovuzla (Chastyna 1. Metodolohiia, hipotezy ta prypushchennia). [Logic-probabilistic modeling and forecasting of accidents on water retaining hydraulic structures of the Dnistrovsky waterworks (Part 1. Methodology, hypotheses and assumptions)]. Matematychnе modeliuвання v ekonomitsi, № 2, 69-85. (In Ukrainian).
2. Veksler, A.B., Yvashyntsov, D.A., Stefanyshyn, D.V. (2002). Nadezhnost, sotsyalnaia y ekolohycheskaia bezopasnost hidrotekhnnycheskykh ob'ektov: otsenka ryska y pryniatyе reshenyi. [Reliability, social and environmental safety of hydraulic facilities: risk assessment and decision making]. S.-Peterburh, VNYIH ym. B.E. Vedeneeva. 591 s. (In Russian).
3. Stefanyshyn, D.V. (2011). Prohozuvannya avarii na hrebliakh v zadachakh otsinky y zabezpechennia yikh nadiinosti ta bezpeky. [Forecasting accidents on the dam in the tasks of assessment and ensuring their reliability and safety]. Hidroenerhetyka Ukrainy, № 3-4, 52-60. (In Ukrainian).
4. Kumamoto, H., Henley, E.J. (1996). Probabilistic risk assessment and management for engineers and scientists. N.Y., IEEE Press, 597 p.
5. The use of risk analysis to support dam safety decisions and management. (2000). Trans. of the 20-th Int. Congress on Large Dams, Vol. 1, Q. 76, Beijing-China, 2000, 896 p.
6. Bellendyr, E.N., Yvashyntsov, D.A., Stefanyshyn, D.V. y dr. (2003). Veroiatnostnye metody otsenky nadezhnosti hruntovykh hidrotekhnnycheskykh sooruzhenyi. [Probabilistic methods for assessing the reliability of earth hydrotechnical structures]. S.-Peterburh, V 2-kh tomakh, VNYIH ym. B. E. Vedeneeva, 553 s. 524 s. (In Russian).
7. Riabynyn, Y.A. (2007). Nadēzhnost y bezopasnost strukturno-slozhnykh system. [Reliability and safety of structurally complex systems]. S.-Peterburh, Yzdatelstvo SPbHU, 276 s. (In Russian).
8. Stefanyshyn, D.V. (2012). Statystychni otsinky zhyvuchosti hrebel. [Statistical estimates of the survivability of dams]. Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannya, Vyp. 11, Kyiv, KNUBA, ITHIP NANU, 53-61. (In Ukrainian).
9. DBN V.1.1-12:2006. (2006). Zakhyst vid nebezpechnykh heolohichnykh protsesiv, shkidlyvykh ekspluatatsiinykh vplyviv, vid pozhezhi. Budivnytstvo v seismichnykh raionakh Ukrainy. [DBN V.1.1-12: 2006. Protection from dangerous geological processes, harmful operational influences, from fire. Construction in seismic areas of Ukraine]. Minbudivnytstva, arkhitektury ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy, Kyiv, 83 s. (In Ukrainian).
10. Svitovyi tsentr danykh z heoinformatyky ta staloho rozvytku. Seismichna nebezpeka. [World Data Center for Geoinformatics and Sustainable Development. Seismic danger]. Retrieved from <http://wdc.org.ua/uk/node/178>. (In Ukrainian).
11. DBN V.2.4-3:2010. (2010). Hidrotekhnichni, enerhetychni ta meliorativni systemy i sporudy, pidzemni hirnychi vyrobky. Hidrotekhnichni sporudy. Osnovni polozhennia. [DBN V.2.4-3: 2010. Hydrotechnical, energy and reclamation systems and structures, underground mining. Waterworks. Substantive provisions]. Kyiv, Ministerstvo rehionalnoho rozvytku ta budivnytstva Ukrainy, 37 s. (In Ukrainian).
12. Stefanyshyn, D.V., Romanchuk, K.H. (2013). Lohiko-imovirnisna otsinka ryzyku zbytkiv vid avariinoho vylyvu vody z baseinu dobovoho rehuliuвання Zaramahskoi HES-1. [Logical-probabilistic assessment of risk of damages due to fail water pouring out the daily regulation basin of the Zaramagskaya HPP-1]. Systemni doslidzhennia ta informatsiini tekhnolohii, №3, 130-141.

*Стаття надійшла до редакції 07.07.2019*