

УДК 001.5:519.7 : 626/627.8

© К.Г. Романчук, аспірант;
Д.В. Стефанишин, д-р техн. наук

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ

ІМОВІРНІСНИЙ АНАЛІЗ ПРИЧИН АВАРІЙНОГО ПЕРЕПОВНЕННЯ ВОДОСХОВИЩА-ОХОЛОДЖУВАЧА ХМЕЛЬНИЦЬКОЇ АЕС

Проаналізовано можливі причини аварійного переповнення водосховища-охолоджувача Хмельницької атомної електростанції (ХАЕС) внаслідок паводків на р. Гнилий Ріг. Здійснено оцінку ймовірності аварійного переповнення водосховища ХАЕС та встановлено найбільш ймовірні сценарій та причину розвитку аварійної ситуації при проходженні паводків.

Ключові слова: аварійне переповнення водосховища, блокування водоскиду, дерево відмов і несправностей, ймовірність, ймовірність перевищення, прогнозування, сценарій розвитку аварійної ситуації.

Вступ. Водосховище-охолоджувач ХАЕС (рис. 1) розміщується на р. Гнилий Ріг, правій притоці р. Вілії, недалеко від місця її впадіння в р. Горинь. Водосховище, яке здатне виконувати функції багаторічного регулювання стоку р. Гнилий Ріг, утворюється криволінійною в плані земляною греблею, протяжністю до 7 км і максимальною висотою 13 м.

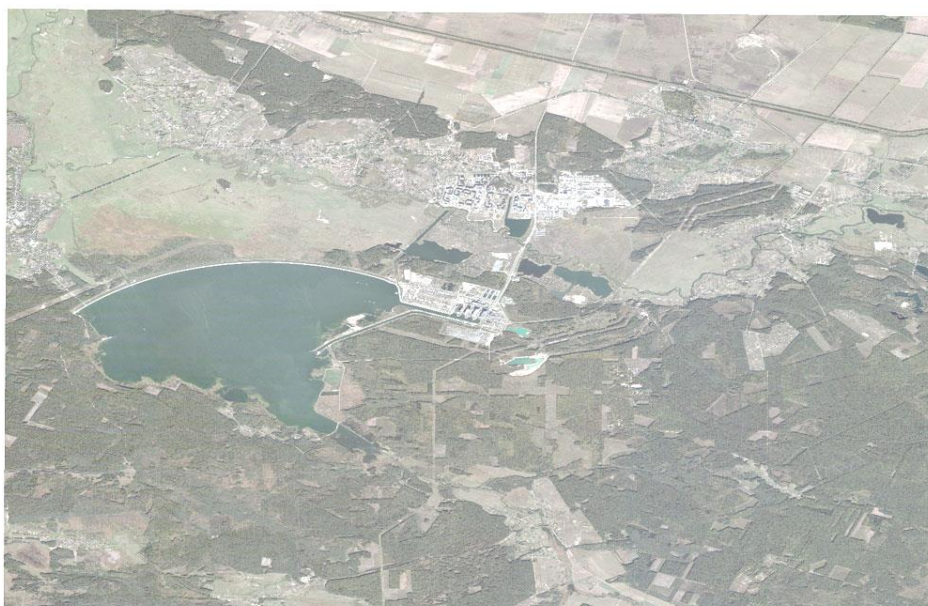


Рис. 1 – Водосховище-охолоджувач ХАЕС

Повний об'єм водосховища при нормальному підпірному рівні (НПР) (НПР = 203,0 м) складає 120 млн. м³, при форсованому підпірному рівні (ФПР = 203,7 м) ~ 132 млн. м³. Паводкові витрати води р. Гнилий Ріг різної ймовірності перевищення (забезпеченості) наведено в табл. 1. Криву ймовірностей перевищення максимальних витрат води р. Гнилий Ріг при $p = 0,01\% \div 10\%$ наведено на рис. 2.

Таблиця 1 – Паводкові витрати води р. Гнилий Ріг у створі греблі ХАЕС

Ймовірність перевищення p , %	0,01	0,1	1	2	5	10
Максимальна витрата води, м ³ /с	207	150	92,3	74,8	53,5	37

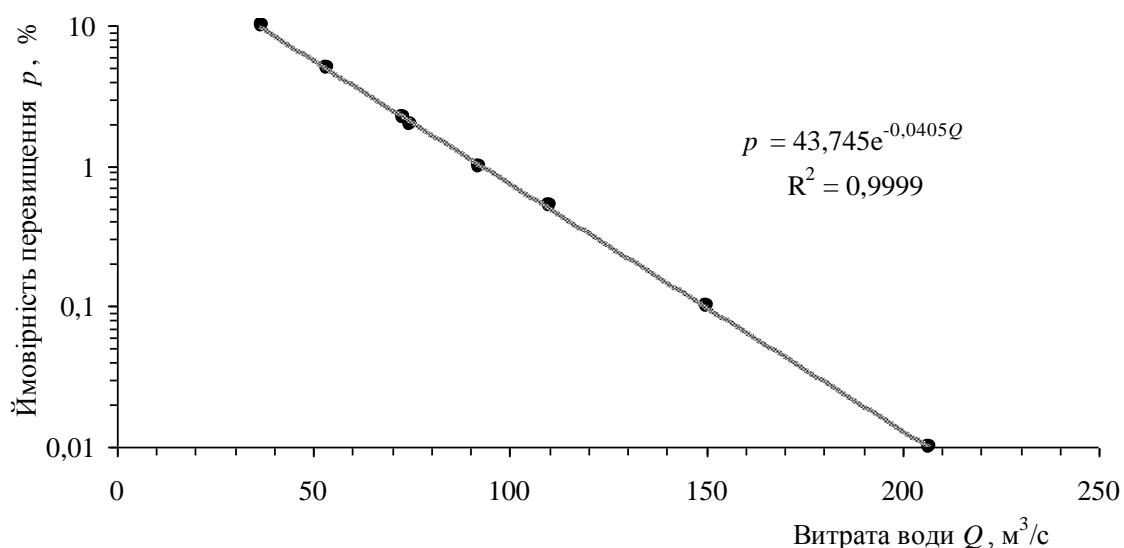


Рис. 2 – Фрагмент кривої ймовірності перевищення максимальних витрат води р. Гнилий Ріг у створі греблі водосховища-охолоджувача ХАЕС

Пропуск розрахункового паводку 0,01% ймовірності перевищення (період повторення 10000 років) передбачено здійснювати через паводковий водоскид у складі шахтного водозливу автоматичного типу, що конструктивно суміщається з донним водоспуском. Витрата води, що проходить через водозлив при ФПР, становить 110 м³/с. При форсуванні рівня вище 203,7 м пропуск надлишкової води здійснюється одночасно через автоматичний водозлив і донний водоспуск, для чого відкриваються глибинні робочі затвори.

Водозливний тунель паводкового водоскиду складається з трьох ниток водопропускних трактів, перекритих робочими затворами. У складі донного водоспуску знаходяться: сміттєзатримуючі решітки, ремонтні плоскі затвори, глибинні робочі плоскі затвори. Затвори обслуговуються електроталю ТЕ-500-92120-00 вантажопідйомністю 5 т.

Гідравлічними розрахунками було встановлено, що час переповнення водосховища до ФПР, протягом якого може бути здійснений підйом глибинного плоского затвору водоспуску, при працездатному водоскиді і витраті до 207 м³/с складе не менше 16 годин; при витраті до 150 м³/с – не менше 22 годин; при блокуванні одного з трактів і витраті 110 м³/с (ймовірність перевищення 0,52% або $5,2 \cdot 10^{-3}$, рік⁻¹) – не менше 30 годин; при блокуванні двох

трактів і витраті до $73,3 \text{ м}^3/\text{с}$ (ймовірність перевищення $\sim 2,2\%$ або $2,2 \cdot 10^{-2}$, рік $^{-1}$) – не менше 45 годин; при повному блокуванні водоскиду і витраті до $37 \text{ м}^3/\text{с}$ – не менше 90 годин.

Актуальність задачі та мета досліджень. Згідно з чинними нормами [1] земляна гребля водосховища-охолоджувача ХАЕС відноситься до найвищого (СС3) класу відповідальності за наслідками. Від її надійності значною мірою залежить безпека атомної електростанції.

Аналіз причин аварій на земляних греблях показує, що однією з найбільш ймовірних причин виникнення аварій на цих спорудах є переповнення водосховищ при паводках [2–5]. Переповнення водосховища може спричинити розвиток різних аварійних процесів на земляній греблі. В першу чергу неконтрольоване переповнення водосховища може призвести до переливу води через гребінь земляної греблі з наступним руйнуванням її тіла внаслідок поверхневої ерозії водними потоками [2–4]. Окрім того, при переповненні водосховища можуть посилюватися суфозійні процеси в тілі, основі та в межуваннях земляної греблі з берегами і бетонними спорудами, з загрозою порушення фільтраційної міцності греблі, а також знижується стійкість низового укосу, що може раптово сповзти [5].

Все це обумовлює актуальність задачі прогнозування і оцінки ймовірності переповнення водосховища-охолоджувача ХАЕС з метою встановлення найбільш ймовірних сценаріїв та причин розвитку аварійної ситуації при проходженні паводків.

Загальна постановка задачі імовірнісної ідентифікації причин аварії. Нехай $\mathbf{E} = \{E_i\}$, $i = \overline{1, n}$, – злічена множина (група) в загальному випадку сумісних елементарних аварійних подій-причин E_i , апіорні ймовірності яких $\hat{P}(E_i)$ відомі, можливої аварії A в системі \mathbf{S} із заданою структурною функцією $\Psi(\mathbf{S})$ надійності, що відображає множину елементарних аварійних подій \mathbf{E} в системну аварію A :

$$\Psi(\mathbf{S}): \mathbf{E} \rightarrow A. \quad (1)$$

Розглянемо злічену множину ідеалізованих аварійних подій A_i , $i = \overline{1, n}$, виникнення кожної з яких пов'яжемо з однією з аварійних подій-причин E_i , $i = \overline{1, n}$, структурними функціями $\Psi(\mathbf{S}_i)$ надійності (безпеки) системи \mathbf{S} :

$$\Psi(\mathbf{S}_i): E_i \rightarrow A_i, \quad i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

за допомогою яких можна оцінити апіорні ймовірності $\hat{P}(A_i)$ аварійних подій A_i , $i = \overline{1, n}$.

Назвемо події A_i , $i = \overline{1, n}$, сценаріями аварії A . Покладемо, що аварія A в системі \mathbf{S} може виникнути з будь-якої з подій-причин E_i , $i = \overline{1, n}$, але розвиватиметься лише за одним зі сценаріїв A_i з імовірністю

$$P(A_i) = P(A) \cdot P(A_i / A), \quad (3)$$

де $P(A_i / A)$ – ймовірність сценарію A_i за умови, що відбувається аварія A в системі \mathbf{S} [6]:

$$P(A_i / A) = \hat{P}(A_i) \cdot P(A / A_i) / \sum_{i=1}^n \hat{P}(A_i) \cdot P(A / A_i), \quad (4)$$

$P(A/A_i)$ – умовна ймовірність виникнення аварії A в системі за сценарієм A_i , яку представимо як нормалізовану «вагу» апріорної ймовірності $\hat{P}(A_i)$ відповідного сценарію A_i серед апріорних ймовірностей всіх сценаріїв, що враховуються [7]:

$$P(A/A_i) = \hat{P}(A_i) / \sum_{i=1}^n \hat{P}(A_i). \quad (5)$$

Використання імовірнісної міри щодо нормалізованих «ваг» (5) можна виправдати тим, що будь-яка нормалізована система ненегативних величин підкоряється аксіомам теорії ймовірностей [8]. В результаті байєсівського перетворення ймовірностей (3)÷(5) отримуємо ранжирування i -х сценаріїв на основі «внесків» («ваг») $w(A_i)$ в імовірність аварії в системі:

$$w(A_i) = \frac{P(A_i)}{P(A)}, \quad (6)$$

та здійснюємо ідентифікацію найбільш імовірних з них.

Оцінка ймовірності переповнення водосховища. При розрахунках було використано логіко-імовірнісний метод дерев відмов і несправностей [9]. Формули, за якими оцінювалися ймовірності подій-наслідків за відомими (апріорними) ймовірностями причин в залежності від логічних операторів, якими моделюється логіка причинно-наслідкових зв'язків, наведено в табл. 2. Розрахункову діаграму дерева відмов і несправностей наведено на рис. 3.

**Таблиця 2 – Формули для розрахунку ймовірностей подій-наслідків
діаграми дерев відмов і несправностей**

Логічний оператор	Розрахункові формули для оцінки ймовірності події-наслідку A
«АБО»	$P(A) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P(B_i)), \quad (7)$
«ВИКЛЮЧНЕ АБО»	$P(A) = \sum_{i=1}^n P(B_i), \quad (8)$
«І»	$P(A) = \prod_{i=1}^n P(B_i), \quad (9)$
«ЗАБОРОНА»	$P(A) = P(B) \cdot P(C), \quad (10)$
« M з N »	$P(A) = P(A)_m + P(A)_{m+1} + \dots + P(A)_n, \quad (11)$ <p>де $P(A)_m = (1 - (1 - P(B))^n) \cdot (1 - (1 - P(B))^{n-1}) \cdot (1 - (1 - P(B))^{n-m+1})$, $P(A)_{m+1} = P(A)_m \cdot (1 - (1 - P(B))^{n-m})$, , $P(A)_n = P(B)^n$, якщо $P(B_i) = P(B)$, $i = \overline{1, n}$, $m < n$.</p>

У формулах (7)÷(11) ймовірності: $P(B_i)$ – події-причини B_i ; $P(C)$ – події-умови C ; $P(A)$ – події-наслідку A ; n – загальна кількість базових аварійних подій B_i , що є «входами» логічного оператора і які можуть спричинити настання результуючої події-наслідку A .

Виділялися шість модельних ситуацій (умов) пропуску паводків на р. Гнилий Ріг, за яких очікується перепоповнення водосховища-охолоджувача ХАЕС. Оцінка ймовірностей модельних ситуацій здійснювалася в рамках формування повної групи подій.

Ситуація C_1 – витрати води р. Гнилий Ріг перевищують $207 \text{ м}^3/\text{с}$ (ситуація стає аварійною при несправності будь-якого з елементів водопропускного фронту, коли зменшується пропускна здатність водоскиду). Ймовірність реалізації C_1 : $P(C_1) = 10^{-4}, \text{ рік}^{-1}$.

Ситуація C_2 – витрати води, що надходить у водосховище, перевищують $150 \text{ м}^3/\text{с}$, але не перевищують $207 \text{ м}^3/\text{с}$ (шахтний водоскид працездатний, але заблоковано водоспуск, із запасом необхідний час для підйому глибинного плоского затвору водоспуску приймається рівним 16 годинам). Ймовірність $P(C_2) = (10^{-3} - 10^{-4}), \text{ рік}^{-1} = 9 \cdot 10^{-4}, \text{ рік}^{-1}$.

Ситуація C_3 – витрати води р. Гнилий Ріг перевищують $110 \text{ м}^3/\text{с}$, але не перевищують $150 \text{ м}^3/\text{с}$ (водоскид повністю працездатний, заблоковано водоспуск, із запасом необхідний час для підйому глибинного плоского затвору водоспуску приймається рівним 22 годинам). Ймовірність $P(C_3) = (5,2 \cdot 10^{-3} - 10^{-3}), \text{ рік}^{-1} = 4,2 \cdot 10^{-3}, \text{ рік}^{-1}$. Сума $P(C_1) + P(C_2) + P(C_3) = 5,2 \cdot 10^{-3}, \text{ рік}^{-1}$, при цьому складає ймовірність перевищення витрати $110 \text{ м}^3/\text{с}$.

Ситуація C_4 – витрати води перевищують $73,3 \text{ м}^3/\text{с}$, але не перевищують $110 \text{ м}^3/\text{с}$ (заблоковано один тракт водоскиду і заблоковано водоспуск, із запасом необхідний час для підйому глибинного плоского затвору водоспуску приймається рівним 30 годинам). Ймовірність $P(C_4) = (2,2 \cdot 10^{-2} - 5,2 \cdot 10^{-3}), \text{ рік}^{-1} = 1,68 \cdot 10^{-2}, \text{ рік}^{-1}$.

Ситуація C_5 – витрати води перевищують $37 \text{ м}^3/\text{с}$, але не перевищують $73,3 \text{ м}^3/\text{с}$ (заблоковано два тракти водоскиду і заблоковано водоспуск, із запасом необхідний час для підйому глибинного плоского затвору водоспуску приймається рівним 45 годинам). Ймовірність $P(C_5) = (10^{-1} - 1,68 \cdot 10^{-2}), \text{ рік}^{-1} = 8,32 \cdot 10^{-2}, \text{ рік}^{-1}$. Сума $P(C_4) + P(C_5) = 10^{-1}, \text{ рік}^{-1}$, при цьому складає ймовірність перевищення витрати $37 \text{ м}^3/\text{с}$.

Ситуація C_6 – витрати води досягають $37 \text{ м}^3/\text{с}$ (заблоковано три тракти водоскиду і водоспуск, необхідний час для підйому глибинного плоского затвору водоспуску приймається рівним 90 годинам). Ймовірність $P(C_6) = 10^{-1}, \text{ рік}^{-1}$.

Ситуація C_7 моделює нормальну роботу водоскиду. Ймовірність події-умови C_7 оцінювалася як ймовірність знаходження шахтного водоскиду в працездатному стані:

$$P(C_7) = 1 - (1 - P(B_{1.1})) \cdot (1 - P(B_{1.2})) \cdot (1 - P(B_{1.3})), \quad (12)$$

де $P(B_{1.1}), P(B_{1.2}), P(B_{1.3})$ – ймовірності блокування першої, другої і третьої віток тунелю водоскиду при ситуації C_1 , відповідно.

Блокування тунелю автоматичного шахтного водоскиду, як показує практика, може відбуватися внаслідок потрапляння в шахту різного роду плаваючих тіл. З врахуванням можливості виявлення плаваючих тіл ще до того, як вони будуть накопичуватися безпосередньо біля шахти, ймовірності $P(B_{1.1}), P(B_{1.2}), P(B_{1.3})$ не повинні перевищити $10^{-3}, \text{ рік}^{-1}$ [10].

Ймовірності блокування водоспуску внаслідок неможливості підйому глибинного затвору (внаслідок заклинювання в пазах, відмови підйомного механізму, в тому числі через втрату живлення) при різних ситуаціях $C_1 \div C_6$ можна оцінити за формулою [9]:

$$P(t + t_r) = 1 - \exp\{-\lambda \cdot t \cdot \exp(-\mu \cdot t_r)\}, \quad (13)$$

де t – розрахунковий час служби механічного обладнання, протягом якого очікується хоча б одна робоча операція (із запасом ризику приймався рівним одному року, $t = 1$ рік); $\lambda = 4 \cdot 10^{-3}$, рік⁻¹ [9] – інтенсивність відмов; μ – інтенсивність відновлення працездатності; t_r – додатковий час, що відпускається на відновлення працездатності системи «затвор-підйомний механізм» (приймається рівним часу переповнення водосховища).

Ймовірність блокування глибинних трактів водопропускних споруд через потрапляння в них топляка, наносів тощо за самими консервативними оцінками [10, 11] не перевищує 10% від ймовірності блокування цих споруд внаслідок відмов механічного обладнання.

Ймовірності базових аварійних подій на водоскиді, в результаті яких ініціюються процеси переповнення водосховища в ситуаціях $C_1 \div C_6$, наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Базові аварійні події на водоскиді, через які ініціюється переповнення водосховища ХАЕС при модельних ситуаціях, та їх розрахункові ймовірності

Подія	Опис базової аварійної події	Ймовірність
1	2	3
$B_{1,1}$	Блокування першої вітки тунелю водоскиду при ситуації C_1	10^{-3}
$B_{1,2}$	Блокування другої вітки тунелю водоскиду при ситуації C_1	10^{-3}
$B_{1,3}$	Блокування третьої вітки тунелю водоскиду при ситуації C_1	10^{-3}
$B_{1,4}$	Блокування водоспуску внаслідок неможливості підйому глибинного затвору при ситуації C_1	$4 \cdot 10^{-3}$
$B_{1,5}$	Блокування водоспуску внаслідок потрапляння топляка, наносів тощо при ситуації C_1	$5 \cdot 10^{-4}$
$B_{2,1}$	Блокування водоспуску внаслідок неможливості підйому глибинного затвору при ситуації C_2	$3,55 \cdot 10^{-3}$
$B_{2,2}$	Блокування водоспуску внаслідок потрапляння топляка, наносів тощо при ситуації C_2	$4 \cdot 10^{-4}$
$B_{3,1}$	Блокування водоспуску внаслідок неможливості підйому глибинного затвору при ситуації C_3	$3,39 \cdot 10^{-3}$
$B_{3,2}$	Блокування водоспуску внаслідок потрапляння топляка, наносів тощо при ситуації C_3	$3,5 \cdot 10^{-4}$
$B_{4,1}$	Блокування першої вітки тунелю водоскиду при ситуації C_4	10^{-3}
$B_{4,2}$	Блокування другої вітки тунелю водоскиду при ситуації C_4	10^{-3}
$B_{4,3}$	Блокування третьої вітки тунелю водоскиду при ситуації C_4	10^{-3}
$B_{4,4}$	Блокування водоспуску внаслідок неможливості підйому глибинного затвору при ситуації C_4	$3,2 \cdot 10^{-3}$

Продовження таблиці 3

1	2	3
$B_{4.5}$	Блокування водоспуску внаслідок потрапляння топляка, наносів тощо при ситуації C_4	$3,3 \cdot 10^{-4}$
$B_{5.1}$	Блокування першої вітки тунелю водоскиду при ситуації C_5	10^{-3}
$B_{5.2}$	Блокування другої вітки тунелю водоскиду при ситуації C_5	10^{-3}
$B_{5.3}$	Блокування третьої вітки тунелю водоскиду при ситуації C_5	10^{-3}
$B_{5.4}$	Блокування водоспуску внаслідок неможливості підйому глибинного затвору при ситуації C_5	$2,9 \cdot 10^{-3}$
$B_{5.5}$	Блокування водоспуску внаслідок потрапляння топляка, наносів тощо при ситуації C_5	$3 \cdot 10^{-4}$
$B_{6.1}$	Блокування першої вітки тунелю водоскиду при ситуації C_6	10^{-3}
$B_{6.2}$	Блокування другої вітки тунелю водоскиду при ситуації C_6	10^{-3}
$B_{6.3}$	Блокування третьої вітки тунелю водоскиду при ситуації C_6	10^{-3}
$B_{6.4}$	Блокування водоспуску внаслідок неможливості підйому глибинного затвору при ситуації C_6	$2,1 \cdot 10^{-3}$
$B_{6.5}$	Блокування водоспуску внаслідок потрапляння топляка, наносів тощо при ситуації C_6	$2,5 \cdot 10^{-4}$

У результаті розрахунку дерева відмов і несправностей було отримано повну ймовірність аварійного переповнення водосховища Хмельницької АЕС з урахуванням різних аварійних подій на водоскиді та різних ситуацій скиду надлишкової води: $P(A) = 2 \cdot 10^{-5}$, рік⁻¹. Також було встановлено, що найбільш ймовірним сценарієм аварійного переповнення водосховища-охолоджувача ХАЕС слід визнати блокування водоспуску внаслідок неможливості підйому глибинного затвору при нормальному функціонуванні шахтного водоскиду в ситуації C_3 , коли – витрати води р. Гнилий Ріг перевищують 110 м³/с, але не перевищують 150 м³/с (подія $B_{3.1}$). «Вага» цього сценарію в розвитку аварійної ситуації на водосховищі серед 24 врахованих сценаріїв (за кількістю базових аварійних подій) складає майже 78%.

Висновки та рекомендації. Проаналізовано можливі причини аварійного переповнення водосховища-охолоджувача Хмельницької атомної електростанції (ХАЕС) внаслідок паводків на р. Гнилий Ріг. Методом дерев відмов і несправностей здійснено оцінку повної ймовірності аварійного переповнення водосховища та встановлено найбільш ймовірні сценарій та причину розвитку аварійної ситуації на водосховищі при проходженні паводків. Отримано результати, які можуть бути використані при оцінці надійності земляної греблі водосховища-охолоджувача ХАЕС та оцінці надійності і безпеки експлуатації ХАЕС в цілому.

Список використаної літератури

- ДБН В.2.4-3:2010. Гідротехнічні, енергетичні та меліоративні системи і споруди, підземні гірничі виробки. Гідротехнічні споруди. Основні положення / ДБН В.2.4-3:2010. – К.: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2010. – 37 с.
- Аварии и повреждения больших плотин / Н.С. Розанов, А.И. Царев, Л.П. Михайлов и др.; Под ред. А.А. Борового. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 126 с.

3. Беллендир Е.Н. Вероятностные методы оценки надежности грунтовых гидротехнических сооружений / Е.Н. Беллендир, Д.А. Ивашинцов, Д.В. Стефанишин и др. // – СПб.: В 2-х томах. Т. 1. Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2003. – 553 с.
4. Стефанишин Д.В. Оцінка живучості гребель за результатами статистичного аналізу їх аварійності / Д.В. Стефанишин // Вісник НУВГП. Зб. наук. праць. Вип. 1 (49). Рівне: НУВГП. 2010. – С. 42–48.
5. The Aging of Embankment Dams// Prepared by the USSD Committee on Materials for Embankment Dams. United States Society on Dams (USSD). May, 2010. – 11 p.
6. Пугачев В.С. Теория вероятностей и математическая статистика / В.С. Пугачев. – М.: Наука, 1979. – 495 с.
7. Романчук К.Г. Про застосування методу Байєса в задачах ідентифікації причин аварій в складних системах / К.Г. Романчук // Problems of decision making under uncertainties. Abstracts of XXII Int. Conf. September 23-27. Foros-Yalta, Ukraine. – К.: 2013. – С. 125.
8. Райфа Г. Прикладная теория статистических решений / Г. Райфа, Р. Шлейфер. – М.: Статистика, 1977. – 360 с.
9. Векслер А.Б. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений / А.Б. Векслер, Д.А. Ивашинцов, Д.В. Стефанишин. – СПб.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2002. – 591 с.
10. Wieland M. Dam safety, emergency actions plans and water alarm systems / M. Wieland, R. Mueller // International Water Power & Dam Construction. January. 2009. – P. 34–38.
11. Lagerholm S. Safety and reliability of spillway gates / S. Lagerholm // Repair and upgrading of dams Symposium. – Stockholm: 1996. – P. 362–373.

Стаття надійшла до редакції 21.01.14 українською мовою

© Е.Г. Романчук, Д.В. Стефанишин

**ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ ПРИЧИН АВАРИЙНОГО ПЕРЕПОЛНЕНИЯ
ВОДОХРАНИЛИЩА-ОХЛАДИТЕЛЯ ХМЕЛЬНИЦКОЙ АЭС**

Проанализировано возможные причины аварийного переполнения водохранилища-охладителя Хмельницкой атомной электростанции (ХАЭС) вследствие паводков на р. Гнилой Рог. Выполнено оценку вероятности аварийного переполнения водохранилища ХАЭС и установлено наиболее вероятные сценарий и причину развития аварийной ситуации при прохождении паводков.

© K.G. Romanchuk, D.V. Stefanyshyn

**PROBABILISTIC ANALYSIS OF THE CAUSES EMERGENCY OVERFLOW
RESERVOIR-COOLER OF KHMELNITSKY NPP**

The possible causes of the emergency overflow reservoir-cooler of Khmelnytsky Nuclear Power Plant (KhNPP) due to flooding on the river Hnylyi Rig were analyzed. The estimation of the probability of accidental overflow KhNPP's reservoir was performed and the most probable scenario and the cause of an emergency during the passage of floods were set.