ГІДРОТЕХНІКА

УДК 627.132

Стефанишин Д. В., д.т.н., проф. (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне), **п.н.с.** (Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ)

ОЦІНКА ЙМОВІРНОСТІ НЕКОНТРОЛЬОВАНОГО ВИЛИВУ ВОДИ З БАСЕЙНУ ДОБОВОГО РЕГУЛЮВАННЯ ЗАРАМАГСЬКОЇ ГЕС-1

Наведені результати оцінки ймовірності неконтрольованого виливу води з басейну добового регулювання Зарамагської ГЕС-1, що будується в Росії. Оцінка проводилася в рамках декларування безпеки напірних гідроспоруд гідроелектростанції.
Ключові слова: ймовірність, басейн добового регулювання, вилив води.

Приводятся результаты оценки вероятности неконтролируемого слива воды из бассейна суточного регулирования Зарамагской ГЭС-1, строящейся в России. Оценка осуществлялась в рамках декларирования безопасности напорных гидросооружений гидроэлектростанции.
Ключевые слова: вероятность, бассейн суточного регулирования.

The results of assessment of probability of uncontrolled water pouring out the daily regulation basin of the Zaramagsk HPP-1 which being under construction in Russia are given. The assessment has been carried for declaring of safety of pressure hydraulic structures of the hydro-power plant.
Keywords: probability, daily regulation basin, water pouring.

Зарамагська ГЕС-1 будується в Північній Осетії (Російська Федерація) на ріці Ардон (притока Тереку). Будівництво гідроелектростанції було розпочате ще в 1976 році. Кілька разів станція консервувалася, мінялися замовники, підрядники, проектна організація. На разі роботи знаходяться на завершальній стадії. Закінчення будівництва заплановано на 2013 рік.

Для Росії це унікальний гідроенергетичний об’єкт. Так, розрахунковий напір на турбінах Зарамагської ГЕС-1 становитиме 619 м. Це буде перша в Росії ГЕС з вертикальними ковшовими гідроагрегатами.

Зарамагська ГЕС-1 є складовою частиною єдиного гідроенергетичного комплексу (рис. 1), що розділяється на дві групи гідроспоруд [1]: споруди головного вузла (Головна ГЕС) і споруди Зарамагської ГЕС-1. Головна ГЕС, пригреблевого типу, на якій встановлена одна поворотно-лопатева турбіна, використовує напір водосховища, утвореного насипною греблею висотою 39 м. Зарамагська ГЕС-1 використовує напір, що створюється дериваційним тунелем довжиною більше 14 км. Сумарна потужність комплексу у складі Головної ГЕС та Зарамагської ГЕС-1 складає 352 МВТ, сумарний середньо-

річний виробіток електроенергії – 812 млн кВт год. Встановлена потужність Зарамагської ГЕС-1 – 342 МВТ, середньорічний виробіток електроенергії – 789 млн кВт год.

Рис. 1. Загальна схема каскаду Зарамагських ГЕС

В останні роки оцінювання ймовірностей виникнення аварій здійснювалося нами на кількох крупних гідроенергетичних об’єктах, що експлуатуються, будуються або проектуються в Російській Федерації, в інших країнах (В’єтнам, Таджикистан), в Україні [2-7]. Серед них гідроспоруди Саратовського, Рогунського, Саяно-Шушенського, Бурейського гідровузлів, аркова гребля Нам-Чієн [2-4, 6, 7]. Серед українських об’єктів слід згадати гідроспоруди верхнього басейну Дністровської ГАЕС [5]. Отримані оцінки використовувалися при декларуванні безпеки, оцінці ризику, прийнятті рішень щодо забезпечення надійності та безпеки гідроспоруд. Про ці оцінки, а також про підходи, методи й моделі, що використовувалися при їх отриманні, мова йде у вказаних вище публікаціях та в [8-11].

Кожна зі спроб оцінювання ймовірностей виникнення аварій на напірних гідроспорудах є унікальною процедурою, навіть коли повторно розглядається один і той же об’єкт [4]. З новими даними оцінки ймовірностей аварій не тільки можуть корегуватися, що зрештою сигналізує про зміни, що відбуваються з надійністю та безпекою гідроспоруди. При цьому можуть уточнюватися розрахункові схеми, методи, моделі, ідентифікуватися нові фактори, що впливають на надійність та безпеку споруди в процесі її будівництва, при зміні режимів експлуатації, при зміні проектних рішень тощо.

В роботі, що пропонується, викладені результати оцінки ймовірності неконтрольованого виливу води з басейну добового регулювання (БДР) Зарамагської ГЕС-1. Подібна форма можливої аварії на гідроспорудах аналізувалася вперше. Приводяться основні гіпотези, що приймалися при моделюванні сценаріїв виникнення можливої аварії, та власне результати оцінювання.

Оцінка здійснювалася логіко-імовірнісним методом дерев відмов та не-

справностей. Згідно з цим методом, ймовірності аварійних подій, що є наслідками («виходи»), встановлюються за відомими ймовірностями «входів» (причин) залежно від логічних операторів, що моделюють логіку причинно-наслідкових зв'язків між «входами» та «виходами». Використовувалися наступні логічні оператори: «АБО» (логічна операція «диз'юнкція»); «І» (логічна операція «кон'юнкція»); «ВИКЛЮЧНЕ АБО» («виключна диз'юнкція»); «ЗАБОРОНА» (логічна операція «імплікація») (табл. 1).

Таблиця 1

Формули для розрахунку ймовірностей подій-наслідків дерева відмов і несправностей

Найменування оператора	Розрахункові формули для оцінки ймовірності події-наслідку A залежно від подій-причин B та C
«АБО»	$P(A) = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - P(B_i))$, (1) n – загальна кількість i-х незалежних «входів» B_i
«ВИКЛЮЧНЕ АБО»	$P(A) = \sum_{i=1}^{n} P(B_i)$, (2) n – загальна кількість i-х несумісних «входів» B_i
«І»	$P = \prod_{i=1}^{n} P(B_i)$, (3) n – загальна кількість i-х незалежних «входів» B_i
«ЗАБОРОНА»	$P(A) = P(B) \cdot P(C)$, (4)
В формулах (1)÷(4) ймовірності: $P(B_i)$ – i-ї події на «вході» (події-причини B); $P(C)$ – події-умови C; $P(A)$ – події-наслідку A	

Розглядалися два гіпотетичні сценарії можливого неконтрольованого виливу води з басейну добового регулювання Зарамагської ГЕС-1. Сценарії були узгоджені з ВАТ «Ленгідропроект» (С.-Петербург).

Сценарій 1 (A_1). Руйнування бетонної конструкції огородження басейну добового регулювання (ДБР) з різних причин, в тому числі при максимальному розрахунковому землетрусі (МРЗ) з періодом повторення 1000 років, з наступним виливом води в сторону р. Ардон.

Сценарій 2 (A_2). Перелив води через гребінь бетонної конструкції огородження басейну добового регулювання (БДР).

Для сценарію A_2 розглядалися дві гіпотетичні аварійні ситуації (сценарії), які за певних обставин можуть викликати перелив, а саме:

$A_{2.1}$ – руйнування турбінного водоводу з перекриттям гідравлічного тракту з різних причин, в тому числі при МРЗ;

$A_{2.2}$ – втрата пропускної здатності гідроагрегатів ГЕС-1, в тому числі внаслідок обриву лінії видачі потужності.

Дерево відмов й несправностей в цілому з відображенням сценаріїв A_1, A_2, $A_{2.1}$, $A_{2.2}$, представлене на рис. 2-4. Колами показані базові події, якими описуються різні граничні стани, відмови та несправності, заокругленими прямокутниками – події-умови. Прямокутниками показані події-наслідки, ромбами – нерозкриті гілки дерева відмов та несправностей.

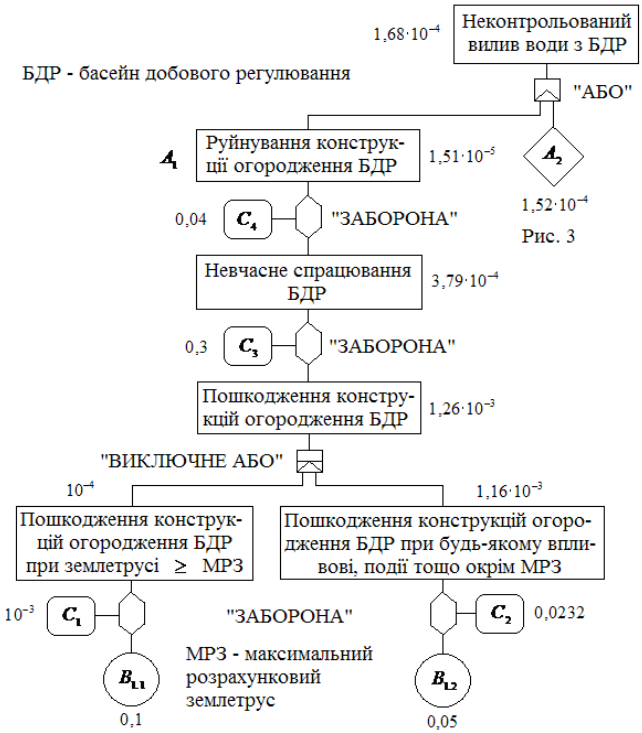

Рис. 2. Дерево відмов та несправностей для оцінки ймовірності неконтрольованого виливу води з басейну добового регулювання Зарамагської ГЕС-1 (продовження див. на рис. 3)

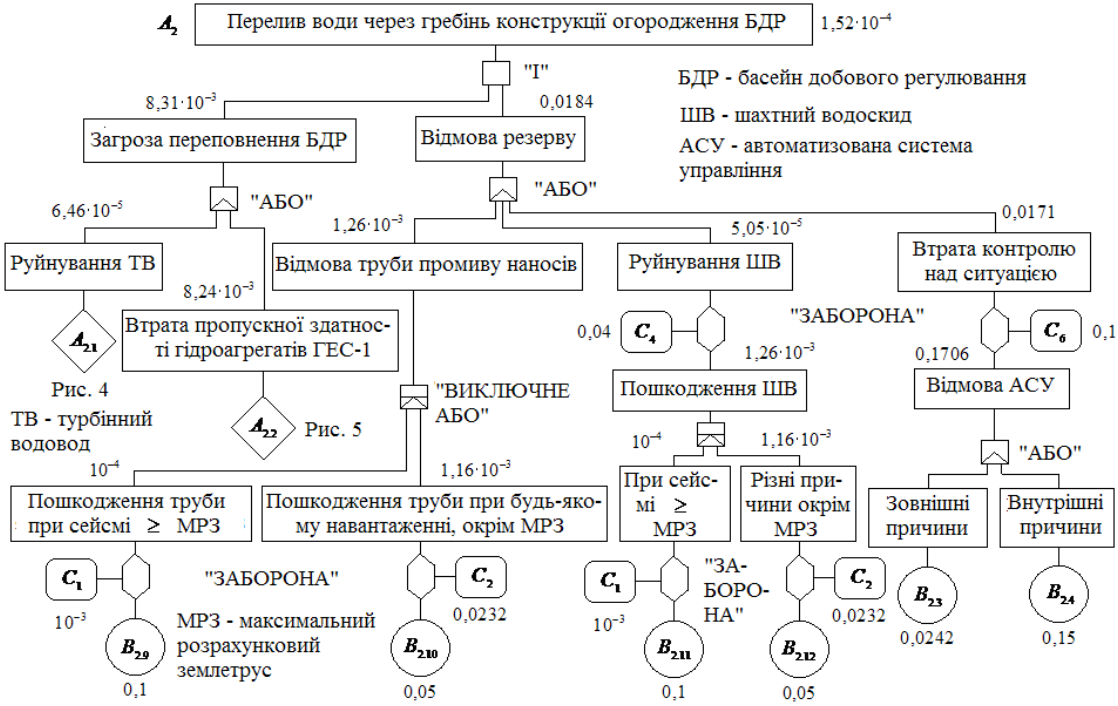

Рис. 3. Дерево відмов та несправностей для оцінки ймовірності переливу води через гребінь конструкції огородження басейну добового регулювання Зарамагської ГЕС-1 (продовження див. рис. 4, 5)

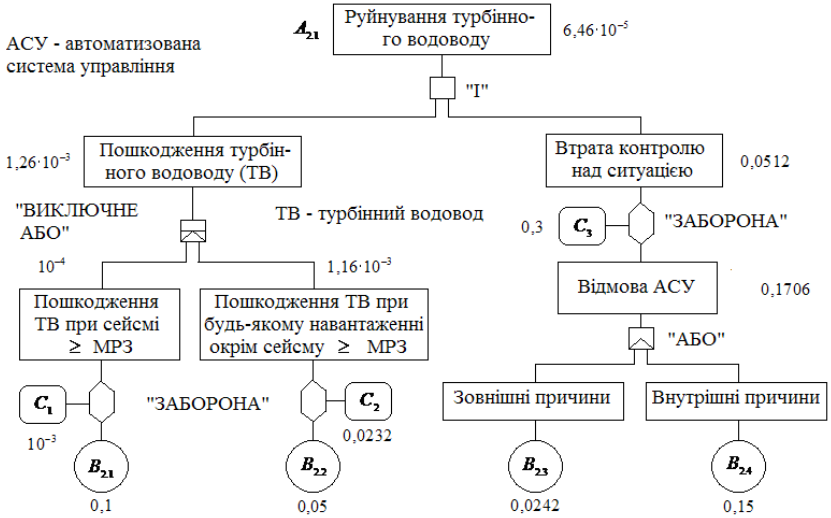

Рис. 4. Дерево відмов та несправностей для оцінки ймовірності реалізації аварійної ситуації $A_{2.1}$

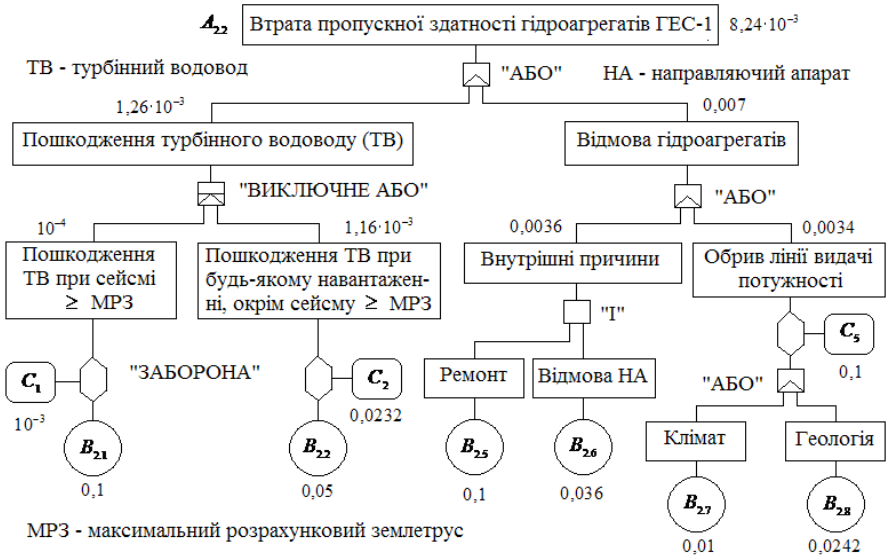

Рис. 5. Дерево відмов та несправностей для оцінки ймовірності реалізації аварійної ситуації $A_{2.2}$

Ймовірності базових подій та подій-умов встановлювалися до розрахунку дерева відмов і несправностей. З запасом ризику приймалися верхні граничні

(максимально припустимі) оцінки ймовірностей відповідних подій. Описи базових подій і подій-умов та їх ймовірності наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Базові події і події-умови та їх розрахункові ймовірності

Символ події	Опис події	Розрахункова ймовірність
1	2	3
$B_{1.1}$	Пошкодження бетонних конструкцій огородження БДР при землетрусі не меншому МРЗ	0,1
$B_{1.2}$	Пошкодження бетонних конструкцій огородження БДР з будь-яких причин, окрім землетрусів не менших МРЗ	0,05
C_1	Землетрус не менший МРЗ, з періодом повторення 1000 років	10^{-3}, рік$^{-1}$
C_2	Будь-яке небезпечне сполучення навантажень тощо, окрім землетрусів не менших МРЗ	0,0232, рік$^{-1}$
C_3	Системна помилка оператора в умовах стресу, викликаного аварійною ситуацією [1]	0,3
C_4	Втрата живучості ушкодженої конструкції [2]	0,04
$B_{2.1}$	Пошкодження турбінного водоводу при землетрусі не меншому МРЗ	0,1
$B_{2.2}$	Пошкодження турбінного водоводу з будь-яких причин, окрім землетрусів не менших МРЗ	0,05
$B_{2.3}$	Відмова автоматизованої системи управління через зовнішні впливи [3]	0,0242, рік$^{-1}$
$B_{2.4}$	Відмова автоматизованої системи управління з внутрішніх причин [4]	0,15, рік$^{-1}$
$B_{2.5}$	Ремонт гідроагрегату [5]	0,1, рік$^{-1}$
$B_{2.6}$	Відмова направляючого апарата гідротурбіни [4]	0,036, рік$^{-1}$
$B_{2.7}$	Обрив лінії видачі потужності через вітрові і льодові навантаження на ЛЕП [6]	0,01, рік$^{-1}$
$B_{2.8}$	Обрив лінії видачі потужності через геологічні впливи (землетруси, зсуви, селі тощо) [3]	0,0242, рік$^{-1}$
$B_{2.9}$	Пошкодження труби для промиву наносів при землетрусі не меншому МРЗ	0,1
$B_{2.10}$	Пошкодження труби для промиву наносів з будь-яких причин, окрім землетрусів не менших МРЗ	0,05

продовження табл. 2

1	2	3
$B_{2.11}$	Пошкодження конструкції шахтного водоскиду при землетрусі не меншому МРЗ	0,1
$B_{2.12}$	Пошкодження конструкції шахтного водоскиду з будь-яких причин, окрім землетрусів не менших МРЗ	0,05
C_5	Невчасне відновлення лінії видачі потужності [6]	0,1
C_6	Системна помилка оператора при діях відповідно до встановленого регламенту в умовах стресу, викликаного аварійною ситуацією [1]	0,1

Примітки.

[1] Приймалася максимальна оцінка ймовірності за даними [12].

[2] Оцінка ймовірності приймалася рівною середньостатистичному коефіцієнту переходу ушкоджень бетонної гідроспоруди в руйнування [8].

[3] Ймовірність події приймалася рівною повній ймовірності виникнення небезпечних сполучень навантажень і впливів, включно землетруси не менші МРЗ. У нашому випадку – це сума ймовірностей подій-умов C_1 і C_2.

[4] Ймовірність події приймалася на основі статистичних даних щодо відмов основних елементів автоматизованих систем управління на ГЕС (див. табл. 3).

[5] Ймовірність події приймалася з врахуванням статистичних даних щодо відмов, що вимагають проведення ремонтів, на гідроагрегатах російських ГЕС залежно від кількості встановлених на ГЕС агрегатів (рис. 6).

[6] Ймовірність події приймалася з врахуванням рекомендацій Міжнародної електротехнічної комісії [13].

Таблиця 3

Середньостатистичні ймовірності знаходження в непрацездатному стані елементів автоматизованих систем управління на гідроелектростанціях [14]

Елементи систем управління	Ймовірність відмови, рік$^{-1}$
Комп'ютери, включно периферію	0,007
Мережі передачі даних	0,018
Автоматичні перемикачі	0,007
Самописці рівнів води в б'єфах	0,028
Локальні мережі електропостачання	0,001
Направляючі апарати	0,036
Контролери	0,040
Відмова системи в цілому	0,137 *

Примітка.

* У розрахунках, з запасом ризику, імовірність відмови автоматизованої системи управління (подія $B_{2.4}$) приймалася рівною 0,15, рік$^{-1}$.

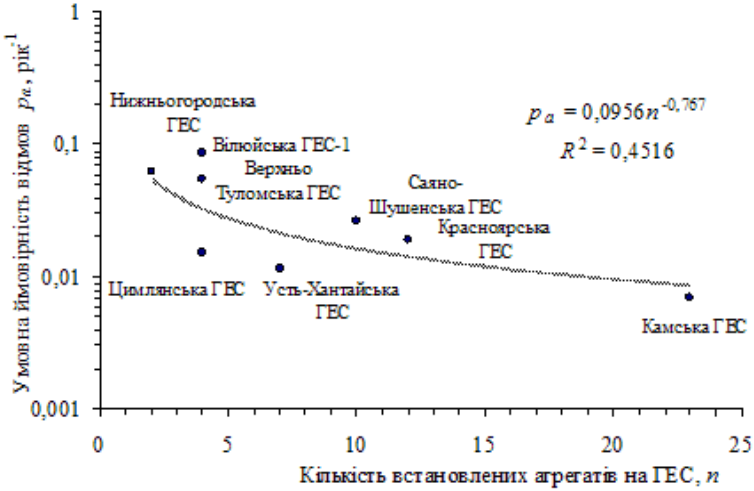

Рис. 6. Залежність умовної ймовірності відмов гідроагрегатів на російських гідроелектростанціях від кількості агрегатів [3]

При оцінці щорічної ймовірності реалізації події-умови C_2 з подій C_1 і C_2 формувалася повна група. Покладалося, що при розрахунковому строку служби споруди T_p = 100 років (як для споруд II класу згідно з російськими нормами) повна ймовірність реалізації події-умови C_1 буде:

$$P(C_1, T_p) = 1 - [1 - P(C_1)]^{T_p} = 1 - (1 - 10^{-3})^{100} = 0{,}0952. \quad (5)$$

Тоді, з врахуванням умови формування повної групи подій, повна ймовірність реалізації події-умови C_2 впродовж T_p = 100 років:

$$P(C_2, T_p) = 1 - P(C_1, T_p) = 1 - 0{,}0952 = 0{,}9048. \quad (6)$$

Звідки щорічна ймовірність події-умови C_2, що доповнює умову C_1:

$$P(C_2) = 1 - [1 - P(C_2, T_p)]^{\frac{1}{T_p}} = 1 - (1 - 0{,}9048)^{(1/100)} = 0{,}0232, \text{ рік}^{-1}. \quad (7)$$

У результаті розрахунків дерева відмов та несправностей (рис. 2-5) були отримані наступні щорічні ймовірності розвитку аварійних подій:

за сценарієм A_1: $P(A_1) = 1{,}51 \cdot 10^{-5}$, рік$^{-1}$;

за сценарієм $A_{2.1}$: $P(A_{2.1}) = 6{,}46 \cdot 10^{-5}$, рік$^{-1}$;

за сценарієм $A_{2.2}$: $P(A_{2.2}) = 8{,}24 \cdot 10^{-3}$, рік$^{-1}$;

за сценарієм A_2: $P(A_2)$ = 1,52·10^{-4}, рік$^{-1}$.

Повна ймовірність неконтрольованого виливу води з басейну добового регулювання Зарамагської ГЕС-1 склала 1,68·10^{-4}, рік$^{-1}$.

Порівняння отриманого розрахункового значення ймовірності неконтрольованого виливу води з допустимим значенням ймовірності виникнення аварії 5·10^{-4}, рік$^{-1}$, дозволило зробити висновок, що гідроспоруди басейну добового регулювання Зарамагської ГЕС-1 відповідають встановленим вимогам щодо техногенної безпеки.

1. Данелия А. И. Зарамагские ГЭС: проектные решения и ход строительства / А. И. Данелия, П. Г. Кочиев и др. // Гидротехническое строительство. – 2007. – № 6. **2.** Стефанишин Д. В. Задача про порівняння варіантів Рогунської греблі / Д. В. Стефанишин // Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво. Зб. наук. праць. –Вип. 33. – Рівне: НУВГП, 2008. – С. 51-58. **3.** Стефанишин Д. В. Імовірнісна оцінка техногенної безпеки напірних гідроспоруд Саратовського гідровузла на р. Волзі / Д. В. Стефанишин // Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво. Зб. наук. праць. – Вип. 33. – Рівне: НУВГП, 2008. – С. 59-64. **4.** Стефанишин Д. В. Імовірнісна оцінка безпеки гідроспоруд Бурейського гідровузла / Д. В. Стефанишин // Вісник НУВГП. Зб. наук. праць. – Вип. 2 (46). – Рівне: НУВГП, 2009. – С. 121-127. **5.** Стефанишин Д. В. Оцінка надійності ґрунтових гідротехнічних споруд Дністровської ГАЕС / Д. В. Стефанишин, О. В. Жеребятьєв // Вісник НУВГП. Зб. наук. праць. – Вип. 3 (47). Ч. 1. – Рівне: НУВГП, 2009. – С. 520-530. **6.** Malizderskyi R. M. Probabilistic assessment of the reliability of the arch dam taking into account the uncertainty calculation methods of choice / R. M. Malizderskyi, D. V. Stefanyshyn // Hydro 2010 “Meeting demands for a changing world”. Abstracts of Conference Papers, Lisbon, Portugal, 2l-29. 09. – 2010. – 07-09. Full papers are on the HYDRO 2010 Proceedings CD. **7.** Стефанишин Д. В. Вероятностное моделирование гипотетических сценариев двух нетиповых аварий на гидроэнергетических объектах при отказах автоматики [Электронный документ]/ Д. В. Стефанишин, Е. Г. Романчик // Предотвращение аварий зданий и сооружений. – 2011. – Режим доступу: http://pamag.ru/pressa/vmgs-heo. **8.** 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. **9.** Стефанишин Д. В. Метод аналізу параметричної надійності гідротехнічних об’єктів в рамках системного підходу / Д. В. Стефанишин // Вісник НУВГП. Зб. наук. праць. – Вип. 3 (35). – Рівне: НУВГП, 2006. – С.101-110. **10.** Стефанишин Д. В. Методика оцінки ймовірностей аварій на гідроспорудах на основі рандомізації результатів розрахунків споруд за методом граничних станів / Д. В. Стефанишин // Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво. Зб. наук. праць. – Вип. 34. – Рівне: НУВГП, 2009. – С. 109-115. **11.** Стефанишин Д. В. Вибрані задачі оцінки ризику та прийняття рішень за умов стохастичної невизначеності / Д. В. Стефанишин. – К.: Азимут-Україна, 2009. **12.** Kumamoto H. Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists / H. Kumamoto, E. J. Henley. – New York. IEEE Press, 1996. **13.** Нагрузка и прочность воздушных линий электропередачи. Международная электротехническая комиссия, технический комитет 11: рекомендации для воздушных линий. – 1987. **14.** Lecornu J. Dam Safety in 1996 / J. Lecornu // From Engineers Duty to Risk Management. ICOLD. – 1996.

Рецензент: д.т.н., проф. Хлапук М. М. (НУВГП)