

## 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 1. МЕТОДОЛОГІЯ, ГІПОТЕЗИ ТА ПРИПУЩЕННЯ)

***Анотація.** Стаття є першою частиною комплексної роботи, присвяченої моделюванню і прогнозуванню гіпотетичних аварій, з оцінюванням ймовірностей їх виникнення, на гідропорудах, що формують напірний фронт Дністровського гідровузла. В цій частині 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.*

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

**DOI: 10.35350/2409-8876-2019-15-2-70-86**

#### **Вступ**

Дністровський гідровузол – один з найбільших в Україні гідровузлів. Розташований на р. Дністер, в її середній течії, на південному заході країни [1]. Основні гідропоруди гідровузла знаходяться біля м. Новодністровськ, обласного підпорядкування, Чернівецької області. Гідровузол є верхньою сходинкою Дністровського гідроенергетичного комплексу (рис. 1), в який входять дві гідроелектростанції (ГЕС) (Дністровська ГЕС-1, потужністю 702 МВт, у складі власне Дністровського гідровузла (рис. 2), і Дністровська ГЕС-2, потужністю 40,8 МВт, у складі розташованого вниз за течією річки буферного гідровузла) та Дністровська гідроакумулювальна електростанція (ГАЕС), найпотужніша в країні ГАЕС, потужність якої в турбінному режимі наразі становить 973 МВт, а після введення в експлуатацію всіх запланованих семи агрегатів має досягти 2268 МВт.

Будівельні роботи на основних гідропоруках Дністровського гідровузла розпочалися в 1975 р. В кінці 1981 р. було введено в експлуатацію перші два агрегати на Дністровській ГЕС-1, а в 1983 р. – останні п'ятий і шостий гідроагрегати. В 1987 р. напірні гідропоруди гідровузла було зведено до проектних відміток та здійснено перше заповнення водосховища до нормального підпірного рівня (НПР) [1]. Довжина водосховища Дністровського гідровузла при НПР сягає 194 км, площа дзеркала – 142 км<sup>2</sup>, повний об'єм – 3 млрд м<sup>3</sup>, в тому числі корисний – 2,0 млрд м<sup>3</sup>.

Гідровузол має комплексне призначення. Основна його функція – гідроенергетика. Іншими важливими функціями Дністровського гідровузла є також захист населених пунктів вниз за течією від руйнівних дій паводків, водопостачання населення і промисловості та іригація.



Рисунок 1 – Дністровський гідроенергетичний комплекс (з карт Google earth)



## Рисунок 2 – Дністровський гідровузол

Основними напірними гідроспорудами Дністровського гідровузла є суміщена з поверхневим водозливом будівля ГЕС, будівельною висотою 80 м, та дві кам'яно-земляні греблі – правобережна, максимальною висотою 47,5 м і лівобережна, максимальною висотою 59,0 м. Суміщена з водозливом будівля ГЕС, з водозливами над машинним залом, є унікальною гідроспорудою руслового типу, яка сприймає напір до 55 м, який є значно більшим, ніж, наприклад, максимальний напір в 38,4 м на пригреблевих Дніпровських ГЕС-1 і ГЕС-2. Така конструкція будівлі ГЕС дозволила відмовитись від будівництва окремої водозливної греблі у складі напірного фронту гідровузла. При 12 водозливних отворах перерізом 7,5×16,5 м і 6 працюючих агрегатах будівля ГЕС, суміщена з водозливом, здатна пропустити витрату 13260 м<sup>3</sup>/с щорічною імовірністю перевищення 0,01%.

Загальна довжина напірних гідроспоруд гідровузла по гребеню становить 1100 м, у тому числі: правобережна земляна гребля – 270 м; монтажний майданчик – 73 м; будівля ГЕС, суміщена з водозливом – 153 м; лівобережна земляна гребля – 620 м.

Згідно з чинними будівельними нормами (ДБН В.2.4-3:2010 [2]) напірні гідроспоруди Дністровського гідровузла відносяться до найвищого класу відповідальності за наслідками – класу СС3. Для обґрунтування надійності і безпеки гідроспоруд цього класу чинними нормами [2] допускається поряд з традиційними розрахунками їх стійкості, міцності тощо методом граничних станів в межах детерміністичного підходу здійснювати оцінювання їх надійності і безпеки і на основі імовірнісного підходу згідно з критерієм:

$$P(A) \leq [P(A)], \quad (1)$$

де  $P(A)$  – розрахункове значення щорічної ймовірності аварії як випадкової події на напірній гідроспоруді;  $[P(A)]$  – допустиме значення ймовірності аварії як випадкової події на напірній гідроспоруді відповідного класу за наслідками (відповідальністю), рік<sup>-1</sup>.

Хоча оцінювання надійності напірних гідроспоруд на основі критерію (1) не є обов'язковим, воно може бути корисним в контексті порівняння за надійністю і безпекою окремих гідроспоруд Дністровського гідровузла, що формують його напірний фронт, та з іншими напірними гідроспорудами подібного класу відповідальності за наслідками, що експлуатуються в країні. Ці оцінки можуть також бути використані при аналізі та оцінюванні ризику аварій на гідровузлі з врахуванням як ймовірностей відповідних аварійних подій, так і їх наслідків, та прийнятті рішень щодо підвищення надійності і безпеки напірних гідроспоруд гідровузла при експлуатації.

### 1. Загальний огляд проблеми

Дністровський гідровузол є важливим об'єктом національної критичної інфраструктури [3–6] і водночас потенційно небезпечним об'єктом [7–11], на якому можуть виникати аварії й надзвичайні ситуації з катастрофічними економічними, екологічними та соціальними наслідками.

Історія свідчить, що аварії на напірних гідропорадах є достатньо ймовірними подіями в порівнянні з іншими техногенними катастрофами, що

відбувалися в світі. Катастрофічні аварії на напірних гідропорадах різного типу і призначення та з самих різноманітних причин відбувалися як в минулому, так і не можуть бути повністю виключеними і в майбутньому, незважаючи на існуючу тенденцію поступового зменшення ймовірності настання таких аварій з часом [10–13]. Від аварій на напірних гідропорадах не застрахована жодна країна і жодний об'єкт. Відсутність дотепер серйозних аварій на вітчизняних гідровузлах, особливо на великих, до яких відносяться і напірні гідропоруди Дністровського гідровузла, не повинна заспокоювати вітчизняних вчених, інженерів та посадовців. Вітчизняні гідропоруди нічим особливим в контексті регулювання, забезпечення та підтримування надійності і безпеки не відрізняються від гідропоруд, що будуються і експлуатуються в світі [11]. Тому можливість аварій на вітчизняних напірних гідропорадах повністю теж виключити неможливо, незалежно від того, відбувалися подібні аварії в країні раніше, чи ні.

Слід зважати також на те, що більшість вітчизняних гідровузлів, в тому числі і Дністровський гідровузол, розміщені на рівнинних ріках. Їх нижні б'єфи, території вниз за течією, на які в першу чергу можуть поширюватися аварійні впливи при руйнуванні напірних гідропоруд (хвилі прориву при так званих гідродинамічних аваріях [7–11]), охоплюють урбанізовані та добре освоєні в сільськогосподарському та промисловому відношенні території. Долини цих рік насичені різного роду інфраструктурними об'єктами, в тому числі і об'єктами критичної інфраструктури. З врахуванням того, що масштаби урбанізації, природокористування в межах прирічкових територій з часом лише зростатимуть, то, відповідно, очікується і збільшення катастрофічності можливих аварій на напірних гідропорадах – через значну щільність населення та наявність соціально-економічної інфраструктури в зонах потенційних аварійних впливів (затоплень, підтоплень тощо).

Практика показує, що аварії можуть виникати і на сучасних, відносно недавно побудованих гідропорадах, та з причин, з яких раніше вони ще не відбувалися і до яких інженери можуть бути неготовими [14]. Хоча Дністровський гідровузол є наймолодшим серед найбільших гідровузлів країни, це також не є якоюсь додатковою перешкодою для виникнення на ньому аварій. Аварії на напірних гідропорадах відбувалися в різні періоди їх служби [10–13]: відносно часто – ще при будівництві, першому наповненні водосховища і протягом перших 5-20 років від початку експлуатації (в межах так званого періоду «припрацювання»); дещо рідше – під час тривалої «нормальної» експлуатації в 30-50 років після «припрацювання»; і знову частіше – в період поступового старіння гідропоруд. Все це обумовлює актуальність прогнозування гіпотетичних аварій на напірних гідропорадах незалежно від того, в якому стані (справному чи несправному) вони наразі знаходяться і який період часу вони вже експлуатуються.

Проблема аварійності технічних об'єктів і систем, імовірного прогнозування техногенних аварій вивчається вже давно. Важливі теоретичні та практичні рішення, що стосуються аналізу і оцінювання надійності і безпеки складних технічних об'єктів та систем, в тому числі і напірних гідропоруд

різного типу та призначення, імовірнісними методами, наведено, наприклад, в роботах [8, 11, 12, 14–36]. В різній мірі, на різних етапах досліджень, ці методи приймалися нами до уваги при прогнозуванні аварій з оцінюванням ймовірностей їх виникнення на напірних гідроспорадах Дністровського гідровузла.

## 2. Загальна постановка задачі та мета досліджень

Доцільність імовірнісних прогнозів, імовірнісних розрахунків напірних гідроспоруд на надійність з оцінкою ймовірностей виникнення аварій на них обумовлюється наступними основними причинами [4, 10, 11, 24, 26–30, 35]: 1) різноманіттям потенційно можливих чинників аварійності, мінливістю та невизначеністю даних про стан гідроспоруд, їх конструкцій, конструктивних елементів, основ, різного роду пристроїв в тілі споруд та в основах; про параметри навантажень і впливів, характеристики властивостей матеріалів конструкцій, ґрунтів основ; про показники надійності установаженого на гідроспорадах обладнання, устаткування тощо; 2) особливостями структури, організації та взаємодії з навколишнім середовищем гідроспоруд як складних синергетичних систем з невизначеною поведінкою.

Оцінювання надійності і безпеки напірних гідроспоруд гідровузлів за критерієм (1) може мати й практичну перевагу над оцінюванням надійності гідроспоруд згідно з традиційним методом граничних станів в межах детерміністичного підходу. Це пов'язано з тим, що імовірності аварій на гідроспорадах в тій чи іншій мірі завжди є агрегованими (узагальненими) за різними подіями, станами, сполученнями навантажень тощо оцінками надійності й безпеки, тоді як в методі граничних станів агрегація оцінок надійності за різними критеріями, сполученнями навантажень тощо є принципово неможливою. При цьому, при виконанні умови (1) при оцінюванні надійності й безпеки гідроспоруди за певним типом або видом аварії, вибраних в якості проектної аварії  $A_p$  на цій гідроспоруді (наприклад, аварії на греблі з проривом напірного фронту), ймовірністю  $P(A_p)$ , значення якої було відповідним чином агреговане (узагальнене) за різними  $i$ -ми формами або ж сценаріями аварії (зсув, перекидання, внутрішня ерозія, перелив води через гребінь тощо)  $A_{p,i}$ ,  $i = \overline{1, n}$ , при різних сполученнях навантажень, де  $n$  – загальна кількість форм (сценаріїв) можливої аварії на гідроспоруді, що враховуються при оцінюванні її надійності і безпеки, ймовірність будь-якої з  $i$ -х форм  $A_{p,i}$ ,  $i = \overline{1, n}$ , за якими здійснюється узагальнення (агрегація)  $P(A_p)$ , завжди буде:

$$P(A_{p,i}) < P(A_p). \quad (2)$$

Тобто при виконанні умови (1) гарантується нормативна надійність і безпека гідроспоруди за всіма розрахунковими формами  $A_{p,i}$ ,  $i = \overline{1, n}$ , аварії  $A_p$ , вибраної в якості проектної, і, відповідно, за всіма граничними станами, що, наприклад, цим формам аварії відповідають.

В той же час виконання умови (2) для кожної з  $i$ -х форм  $A_{p,i}$ ,  $i = \overline{1, n}$ , аварії на гідроспоруді ще не гарантує виконання умови (1). Це означає, що при оцінці

надійності і безпеки гідропоруди за методом граничних станів навіть у випадку її повної відповідності нормам, тобто за умови, що гідропоруда успішно пройшла перевірку на всі регламентовані нормами граничні стани, її надійність і безпека в цілому можуть бути і не гарантовані. Особливо це стосується гідровузлів, напірний фронт яких формується кількома гідропорудами різного типу й призначення.

Метою досліджень згідно з поставленою задачею є логіко-імовірнісне моделювання і прогнозування аварій на напірних гідропорудах Дністровського гідровузла з оцінюванням ймовірностей їх виникнення та перевірка надійності і безпеки окремих гідропоруд і гідровузла в цілому на основі імовірнісного підходу за критерієм (1). Для реалізації мети досліджень використовувалися: методи системно-структурного та абстрактно-логічного аналізу причин можливих аварій на гідропорудах гідровузла; методи системного аналізу причинно-наслідкових відношень, методи і підходи теорії ймовірностей та математичної статистики, математичної теорії надійності і теорії ризику; методи математичної логіки та теорії прийняття рішень, а також метод рандомізації результатів традиційних розрахунків стійкості і міцності гідропоруд. В якості основного методу, згідно з яким здійснювалась агрегація (синтез) ймовірностей виникнення різних аварійних подій на гідропорудах гідровузла, використовувався логіко-імовірнісний метод дерев відмов і несправностей. Вибір перерахованих вище методів спрямовувався на забезпечення адекватності моделювання і прогнозування аварій на гідропорудах гідровузла та достовірності отриманих результатів.

### **3. Методологія досліджень: підходи, методи, моделі**

#### **3.1. Деякі принципи зауваження, прийняті гіпотези та припущення**

Вибір та моделювання гіпотетичних форм аварій на напірних гідропорудах гідровузла, відмов і несправностей їх конструкцій, основ, конструктивних елементів, пристроїв, устаткування, обладнання та причин їх виникнення здійснювалися з врахуванням індивідуальних особливостей гідропоруд (типу, конструкції, умов експлуатації, взаємодії з іншими гідропорудами гідровузла тощо) та згідно із загальними рекомендаціями Міжнародної комісії з великих гребель (ICOLD) [27, 30]. При оцінюванні ймовірностей окремих аварійних подій використовувалися також статистичні дані аварійності гідропоруд [10, 12, 13, 28, 36]. В усіх випадках приймалася гіпотеза про стохастичну незалежність прийнятих форм аварій.

При оцінюванні ймовірностей порушення стійкості та міцності напірних гідропоруд гідровузла використовувався математичний апарат випадкових величин та їх функцій (фактор часу в явному вигляді не враховувався) з рандомізацією результатів розрахунків гідропоруд методом граничних станів, який регламентується чинними нормами проектування. Для врахування фактору часу розглядалися різні розрахункові (модельні) ситуації (аналогічні сполученням навантажень в методі граничних станів), ймовірності реалізації яких встановлювалися в залежності від тривалості навантажень тощо. Це дозволило суттєво спростити задачі оцінювання ймовірностей виникнення базових

(початкових, елементарних) аварійних подій, здатних ініціювати аварійні процеси на гідроспорудах.

На всіх етапах імовірнісного прогнозування аварійних подій і станів на гідроспорудах гідровузла, у відповідності з аксіомами теорії ймовірностей, формувалися повні групи подій за факторами, що визначають умови роботи гідроспоруд (сполученнями навантажень, небезпеками, впливами, відмовами, несправностями тощо). При цьому відповідні події-умови, з яких склалися повні групи подій, встановлювалися, а їх ймовірності визначалися, виходячи з припущення, що розвиток аварії на гідроспоруді відбувається у випадку перевищення деякого узагальненого силового впливу при відповідному сполученні навантажень протягом заданого періоду часу.

З метою структуризації задачі при розкритті складних аварійних подій та ідентифікації причинно-наслідкових зв'язків між подіями-причинами і подіями-наслідками поряд з формальними методами системного аналізу, аналітичними та логічними методами математичної теорії надійності використовувалися і евристичні методи дослідження аварійних подій [10, 25] з врахуванням результатів аналізу можливих причин аварій, що відбувалися на подібних гідроспорудах в минулому [10–14, 24, 27–30, 36]. При цьому експертні (суб'єктивні) оцінки ймовірностей для аварійних подій-припущень допускалися лише щодо тих аварійних подій, ймовірності яких, за наявних даних, принципово неможливо було встановити методами математичної статистики і теорії ймовірностей, методами математичної теорії надійності і математичної логіки.

При необхідності врахування кількох незалежних, сумісних чи несумісних, сценаріїв розвитку аварійних подій на гідроспорудах гідровузла, кожен з яких одноосібно може призвести до виникнення тієї чи іншої гіпотетичної форми аварії на окремій гідроспоруді або на гідровузлі в цілому, та за відсутності даних, які б дозволяли надійно зняти невизначеність щодо ймовірності реалізації кожного з цих сценаріїв в групі аварійних подій, використовувався принцип Бернуллі-Лапласа (принцип недостатніх підстав), згідно з яким всі потенційно можливі сценарії в такій групі подій приймалися однаково ймовірними гіпотезами.

Якщо серед можливих причин аварії на гідроспоруді, представлених у вигляді послідовностей подій у вигляді сполучень навантажень та впливів, комбінацій різних порушень, відмов і несправностей, що можуть окремо чи в сукупності призвести до аварії, знаходилась одна спільна причина їх реалізації (паводок, землетрус тощо), використовувався принцип дії «спільної причини» [23], згідно з яким узагальнена безумовна ймовірність аварії з врахуванням всіх таких подій не може перевищити ймовірності реалізації цієї спільної причини [14]. При цьому покладалось, що в результаті множинних аварійних подій та станів на гідроспоруді або гідровузлі в цілому, які виникають внаслідок спільної причини, одночасно можуть зніціюватися різні форми аварії. Всі ці форми аварії об'єднувалися в один модельний сценарій аварії внаслідок реалізації відповідної «спільної причини».

Такий підхід дозволяє отримати ефективні верхні граничні (sup) оцінки ймовірностей аварійних подій-наслідків, які апіорі, за визначених умов, не можуть бути перевищені на кожному з етапів імовірнісних розрахунків і агрегації аварійних подій за імовірністю. Зокрема, при узагальненні альтернативних сценаріїв розвитку аварійних подій, опосередковано, можуть враховуватися аварійні події і стани, що мають спільну причину виникнення й призводять до

однієї й тієї ж події-наслідку. При цьому зникає небезпека недоврахування при оцінюванні ймовірностей аварійних подій і станів на гідроспородах гідровузла тих поєднань подій і станів, сполучень навантажень і впливів, а також різного роду причинно-наслідкових відгалужень в загальній структурі відповідного узагальненого сценарію виникнення й розвитку аварії на гідроспоруді або гідровузлі в цілому, значимість яких наразі може, з тих чи інших причин, недооцінюватися.

При імовірнісному моделюванні більшості розрахункових параметрів та характеристик (коефіцієнтів стійкості, міцності тощо), що визначають стан напірних гідроспоруд гідровузла, їх конструкцій та основ при заданому сполученні навантажень і впливів (за певної умови експлуатації чи ситуації тощо), використовувалася гіпотеза про нормальний закон їх розподілу як випадкових величин. Ймовірності перевищення максимальних витрат води встановлювалися за проектними даними згідно з трьох-параметричним гамма-розподілом Крицького-Менкеля. Моделювання діючих градієнтів напору в ядрах кам'яно-земляних гребель та в цементацийних завісах в основах гідроспоруд здійснювалось за допомогою логарифмічно нормального закону розподілу ймовірності (рис. 3). Для оцінки параметрів розподілу діючих градієнтів напору використовувалися натурні дані про хід рівнів води в б'єфах з 08.01.1991 р. по 23.12.1998 р., що реєструвалися кожні 3-5 днів. Зокрема, було встановлено, що вибірки значень актуальних градієнтів напору мають від'ємну асиметрію і достатньо добре узгоджуються з логарифмічно-нормальним законом розподілу ймовірності.

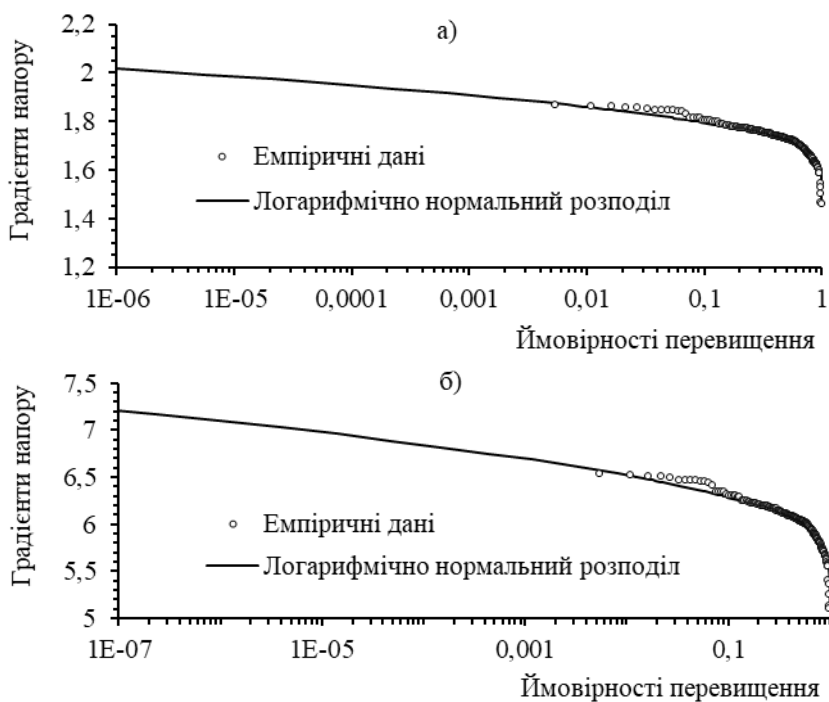


Рисунок 3 – Імовірнісне моделювання діючих градієнтів напору в ядрі (а)



та на цементацийній завісі в основі (б) лівобережної кам'яно-земляної греблі Дністровського гідровузла, визначених при рівнях води у верхньому б'єфі, що не перевищують форсованого підпірного рівня, та сейсмічних впливах, що не перевищують впливи від максимального розрахункового землетрусу

### 3.2. Основні положення методу дерев відмов і несправностей

Логіко-імовірнісне моделювання та прогнозування аварій на гідропоруках Дністровського гідровузла з оцінюванням їх ймовірностей здійснювалось графоаналітичним методом дерев відмов і несправностей. В літературі цей метод також відомий як метод помилок чи метод несправностей. Основні положення методу викладено в [10, 11, 25, 27, 28, 30].

Розрахунковою моделлю методу дерев відмов і несправностей є граф-дерево без циклів, вершиною якого є деяка результуюча (головна) аварійна подія-наслідок; множиною елементів – визначена зліченна множина подій-причин виникнення аварійної події-наслідку, а множиною відповідностей – відносини між ними.

Побудова діаграми дерева відмов і несправностей ґрунтується на дедуктивній логіці з розкриттям та аналізом можливих подій-причин виникнення головної аварійної події-наслідку в системі. При моделюванні використовуються спеціальні конструктивні елементи: символи-події та символи-оператори (логічні оператори) [11, 14]. За допомогою символів-подій відображаються різні події, які визначають виникнення і перебіг аварії на гідропоруді, – в залежності від їх виду, характеру взаємодії, ієрархії, причинно-наслідкових відношень тощо. Зазвичай деякі початкові (їх ще називають базовими або елементарними) аварійні події, що здатні ініціювати аварійні процеси в системі, прийнято показувати колами; події-наслідки – прямокутниками; події-умови – заокругленими прямокутниками; нерозкриті події – ромбами. Логічними операторами відображається логіка причинно-наслідкових зв'язків між різними аварійними подіями, і згідно з ними (в залежності від логіки цих причинно-наслідкових зв'язків) за відомими ймовірностями подій-причин розраховуються ймовірності подій-наслідків. Графічне зображення логічних операторів принципового значення не має.

При дослідженнях використовувалися наступні логічні оператори та формули для визначення ймовірностей подій-наслідків.

Логічний оператор «АБО» – коли подія-наслідок відбувається з будь-якої з подій-причин, що можуть ініціювати цю подію-наслідок; відповідає логічній операції «диз'юнкція»; ймовірність  $P(A)$  події-наслідку  $A$ :

$$P(A) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P(B_i)), \quad (3)$$

де  $n$  – загальна кількість  $i$ -х довільних незалежних сумісних подій-причин  $B_i$ ;  $P(B_i)$  – ймовірність  $i$ -ї події-причини  $B_i$ .

Логічний оператор «І» – у випадках, коли подія-наслідок має місце при одночасній реалізації всіх вхідних подій-причин; відповідає логічній операції «кон'юнкція»; ймовірність  $P(A)$  події-наслідку  $A$ :

$$P(A) = \prod_{i=1}^n P(B_i), \quad (4)$$

де  $n$  – загальна кількість  $i$ -х довільних незалежних подій-причин  $B_i$ ;  $P(B_i)$  – ймовірність  $i$ -ї події-причини  $B_i$ .

Логічний оператор «ВИКЛЮЧНЕ АБО» – у випадках, коли подія-наслідок має місце в результаті реалізації будь-якої з вхідних несумісних подій-причин, що формують повну групу подій; відповідає логічній операції «виключна диз'юнкція»; ймовірність  $P(A)$  події-наслідку  $A$ :

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(B_i), \quad (5)$$

де  $n$  – загальна кількість  $i$ -х несумісних подій-причин  $B_i$ ;  $P(B_i)$  – ймовірність  $i$ -ї події-причини  $B_i$ .

Логічний оператор «ЗАБОРОНА» – для моделювання ситуації, коли поява події-наслідку пов'язується з деякою умовою при реалізації вхідної події-причини; при цьому ця подія-умова блокує (забороняє) появу події-наслідку, зменшуючи таким чином її ймовірність; відповідає логічній операції «імплікація»; ймовірність  $P(A)$  події наслідку  $A$ :

$$P(A) = P(B) \cdot P(C), \quad (6)$$

де  $P(B)$  – ймовірність події-причини  $B$ ;  $P(C)$  – ймовірність події-умови  $C$ .

Логічний оператор «ЧАСТКОВА ЗАБОРОНА» – у випадках, коли подія-наслідок пов'язується з деякою додатковою умовою при можливості реалізації двох вхідних несумісних подій-причин; при цьому відповідна подія-умова блокує появу події-наслідку, зменшуючи її ймовірність, лише при реалізації однієї з подій-причин; ймовірність  $P(A)$  події наслідку  $A$ :

$$P(A) = P(B_1) \cdot P(C) + P(B_2) \cdot (1 - P(C)), \quad (7)$$

де  $P(B_1)$ ,  $P(B_2)$  – ймовірності реалізації подій-причин  $B_1$ ,  $B_2$ ;  $P(C)$  – ймовірність події-умови  $C$ .

Логічний оператор «М з N», який об'єднує  $n$  подій-причин та подію-наслідок, яка виникає тоді, коли реалізується не менш як  $m$  подій-причин; ймовірність  $P(A)$  події наслідку  $A$ :

$$P(A) = P(A)_m + P(A)_{m+1} + \dots + P(A)_n, \quad (8)$$

де ймовірності  $P(A)_m, P(A)_{m+1}, P(A)_n$ , при  $P(B_i) = P(B)$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $m < n$ :

$$P(A)_m = (1 - (1 - P(B))^n) \cdot (1 - (1 - P(B))^{n-1}) \cdot \dots \cdot (1 - (1 - P(B))^{n-m+1});$$

$$P(A)_{m+1} = P(A)_m \cdot (1 - (1 - P(B))^{n-m}); \dots; P(A)_n = P(B)^n, \quad (9).$$

де  $n$  – загальна кількість  $i$ -х несумісних подій-причин  $B_i$ ;  $P(B_i)$  – ймовірність  $i$ -ї події-причини  $B_i$ .

### 3.3. Рандомізація результатів розрахунків гідроспоруд згідно з методом граничних станів

Нехай  $k_{p,s,C}$  – деяке розрахункове значення, забезпеченістю  $p$ , коефіцієнта стійкості (міцності, в тому числі і фільтраційної тощо)  $k_s$  гідроспоруди (її конструкції, основи, конструктивного елемента тощо), яке було отримано за результатами розрахунків відповідного об'єкта в межах детерміністичного підходу згідно з методом граничних станів при деякому сполученні навантажень (за умови, ситуації тощо)  $C$ .

Сполучення навантажень (умова, ситуація)  $C$  може розглядатися як умовний переріз деякого випадкового процесу  $k_s(t)$ , що, в загальному випадку, є випадковою функцією часу [17, 22].

Нехай  $k_{s,C}$  як випадкова величина підкоряється нормальному закону розподілу. Тоді, відновлення математичного сподівання (середнього)  $m(k_{s,C})$  та середнього квадратичного відхилення (стандарту)  $s(k_{s,C})$  випадкової величини  $k_{s,C}$  можна виконати за формулами:

$$m(k_{s,C}) = k_{p,s,C} - u_p \cdot s(k_{s,C}), \quad (10)$$

$$s(k_{s,C}) = \frac{k_{p,s,C}}{u_p + \frac{1}{C_v(k_{s,C})}}, \quad (11)$$

де  $u_p$  – квантиль значення випадкової величини забезпеченістю  $p$  (при  $p = 95\%$ , наприклад,  $u_p = -1,645$ ; при  $p = 80\%$ ,  $u_p = -0,842$ ; при  $p = 50\%$ ,  $u_p = 0$ );

$C_v(k_{s,C})$  – коефіцієнт варіації  $k_{s,C}$  як випадкової величини при сполученні навантажень  $C$ .

Зазвичай, при проектуванні гідроспоруд, забезпеченість розрахункових значень відповідних характеристик приймається рівною 95% (для першої групи граничних станів) та 50% (для другої групи граничних станів).

Коефіцієнт варіації  $C_v(k_{s,C})$  можна отримати за наступною формулою:

$$C_v(k_{s,C}) = [C_v^2(R_C) + C_v^2(N_C) - 2C_v(R_C) \cdot C_v(N_C) \cdot \rho(R_C, N_C)]^{-0,5}, \quad (12)$$

де  $C_v(R_C)$ ,  $C_v(N_C)$  – коефіцієнти варіації узагальненої несучої здатності  $R_C$  та узагальненого силового впливу  $N_C$  при сполученні навантажень  $C$ , за якими, відповідно, визначається  $k_{s,C}$ ;  $\rho(R_C, N_C)$  – коефіцієнт кореляції випадкових величин  $R_C$  та  $N_C$ , відповідно.

Якщо випадкові величини  $R_C$  та  $N_C$  є стохастично незалежними величинами ( $\rho(R_C, N_C) \sim 0$ ), то

$$C_v(k_{s,C}) = \sqrt{C_v^2(R_C) + C_v^2(N_C)}. \quad (13)$$

Коефіцієнти варіації узагальненої несучої здатності  $R_C$  та узагальненого силового впливу  $N_C$  можна оцінити за формулами:

$$C_v(R_C) = \sqrt{\sum_i w^2(\xi_{i,R_C}) C_v^2(\xi_{i,R_C})}, \quad (14)$$

$$C_v(N_C) = \sqrt{\sum_j w^2(\xi_{j,N_C}) C_v^2(\xi_{j,N_C})}, \quad (15)$$

де  $C_v(\xi_{i,R_C})$ ,  $C_v(\xi_{j,N_C})$  – коефіцієнти варіації, відповідно,  $i$ -х показників та характеристик, що визначають узагальнену несучу здатність  $R_C$ , та  $j$ -х параметрів, що визначають узагальнений силовий вплив  $N_C$ , при сполученні навантажень  $C$ ;  $w(\xi_{i,R_C})$ ,  $w(\xi_{j,N_C})$  – «вагові» коефіцієнти, що враховують відносний вплив  $\xi_{i,R_C}$ ,  $\xi_{j,N_C}$  на  $R_C$  і  $N_C$  і характеризують «дольові» внески кожного з параметрів  $\xi_{i,R_C}$ ,  $\xi_{j,N_C}$  в значення  $k_{s,C}$  як випадкової величини, вираженої функцією відповідних випадкових аргументів:

$$w(\xi_{j,R_C}) = \frac{\partial k_{s,C}}{\partial \xi_{j,R_C}} \cdot \frac{1}{k_{s,C}}, \quad w(\xi_{j,N_C}) = \frac{\partial k_{s,C}}{\partial \xi_{j,N_C}} \cdot \frac{1}{k_{s,C}}, \quad (16)$$

де  $\frac{\partial k_{s,C}}{\partial \xi_{i,R_C}^j}$ ,  $\frac{\partial k_{s,C}}{\partial \xi_{j,N_C}^i}$  – частинні похідні функції  $k_{s,C}$  (рівняння зв'язку) за аргументами  $\xi_{i,R_C}^j$ ,  $\xi_{j,N_C}^i$ .

Складові формул (12–16) підбираються в залежності від аргументів рівняння зв'язку, за яким визначається коефіцієнт  $k_{s,C}$  при розрахунках стійкості або міцності гідроспороди відповідного об'єкта в межах детерміністичного підходу згідно з методом граничних станів при деякому сполученні навантажень (за умови, ситуації тощо)  $S$ . При дослідженнях стохастична мінливість параметрів навантажень і впливів, показників властивостей бетону, ґрунтів тіла земляних гідроспород, скельних і нескельних ґрунтів основ гідроспород приймалася на рівні максимально припустимих значень (із запасом за ризиком), визначених з врахуванням досвіду проектування, будівництва та експлуатації гідроспород різного типу і на різних основах. Відповідні дані наведено в [10, 28].

## Висновок

Запропонована стаття є першою частиною комплексної роботи, яка присвячена моделюванню і прогнозуванню гіпотетичних аварій, з оцінюванням ймовірностей їх виникнення, на гідроспородах, що формують напірний фронт Дністровського гідровузла. В цій частині обґрунтовано актуальність проблеми досліджень в контексті забезпечення надійності і безпеки Дністровського гідровузла як одного з важливих об'єктів національної критичної інфраструктури, який водночас є і потенційно небезпечним об'єктом, на якому можуть виникати аварії й надзвичайні ситуації з катастрофічними економічними, екологічними та соціальними наслідками. Розглянуто постановку задачі досліджень, сформульовано мету та викладено методологію досліджень, проаналізовано прийняті гіпотези та припущення, дано коротку характеристику моделей, методів і підходів, що використовувалися при вирішенні поставленої задачі.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дністровська ГЕС. URL : [https://uhe.gov.ua/filiyi/dnistrovska\\_hes](https://uhe.gov.ua/filiyi/dnistrovska_hes).
2. 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.
3. Об'єкти критичної інфраструктури та об'єкти критичної інформаційної інфраструктури в європейських країнах. Інформаційна довідка, підготовлена ЄІДЦ на запит Апарату ВР України. URL : <http://euinfocenter.rada.gov.ua/uploads/documents/29297.pdf>.
4. Стефанишин Д.В., Трофимчук О.М. Методологічні підходи до оцінки та врахування ризику в задачах забезпечення надійності і безпеки гребель. Концепція захисту критичної інфраструктури: Стан, проблеми та перспективи її впровадження в Україні. Зб. Матеріалів міжнародної наук.-практичної конференції (7-8 листопада 2013 р., Київ-Вишгород). НІСД. Серія «Національна безпека». Вип. 5. Київ : 2014. С. 88-98.

5. Зелена книга з питань захисту критичної інфраструктури в Україні : зб. мат-лів міжнар. експерт. нарад / упоряд. Д.С. Бірюков, С.І. Кондратов; за заг. ред. О.М. Суходолі. Київ : НІСД, 2015. 176 с.
6. Концепція створення державної системи захисту критичної інфраструктури. Схвалено розпорядженням КМУ від 6 грудня 2017 р. № 1009-р. URL : <https://www.kmu.gov.ua/ua/npas/pro-shvalennya-koncepciyi-stvorennya-derzhavnoyi-sistemi-zahistu-kritichnoyi-infrastrukturi>.
7. Методика ідентифікації потенційно небезпечних об'єктів. Затверджена наказом МНС України від 23.02.2006 р. за № 98. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України від 20.03.2006 р. за № 286/12160. URL : <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0286-06>.
8. Закон України «Про об'єкти підвищеної безпеки». Відомості ВРУ. 2001. № 15. Ст. 73. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2245-14>.
9. Ivashintsov D.A., Stefanishin D.V., Veksler A.B. Ecological and sociodemographic consequences of hydrotechnical construction (Problems of safety and risk). Power Technology and Engineering (formerly Hydrotechnical Construction). 1993. Vol. 27. Num. 12. P. 685-691.
10. Векслер А.Б., Ивашинцов 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.
11. Стефанишин Д.В. Прогнозування аварій на греблях в задачах оцінки й забезпечення їх надійності та безпеки. Гідроенергетика України. № 3-4. 2011. С. 52-60.
12. ICOLD Bulletin 99. Dam Failures: Statistical Analysis. ICOLD. Bulletin No. 99. Paris, 1995.
13. Стефанишин Д.В. Прогнозирование аварийности проектируемых и строящихся плотин на основе результатов статистического анализа произошедших аварий. Известия ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева. 2008. Т. 251. С. 3-9.
14. Романчук К.Г., Стефанишин Д.В. Імовірнісне моделювання сценаріїв двох нетипових аварій на гідроенергетичних об'єктах. Гідроенергетика України. № 2-3. 2014. С. 20-25.
15. Ермолаев Н.Н., Михеев В.В. Надежность оснований сооружений. Ленинград : Стройиздат, 1976. 152 с.
16. Ржаницын А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. Москва : Стройиздат, 1978. 239 с.
17. Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. Москва : Стройиздат, 1981. 351 с.
18. Барлоу Р., Прошан Ф. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность. Пер. с англ. Москва : Наука, 1984. 328 с.
19. Райзер В.Д. Методы теории надежности в задачах нормирования расчетных параметров строительных конструкций. Москва : Стройиздат, 1986. 190 с.
20. Надежность и эффективность в технике: Справочник: В 10 т. / Ред. совет: В.С. Авдеевский (пред.) и др. Т. 2.: Математические методы в теории надежности и эффективности [Под ред. Б.В. Гнеденко]. Москва : Машиностроение, 1987. 280 с.
21. Аугусти Г., Баратта А., Кашиати Ф. Вероятностные методы в строительном проектировании [Пер. с англ. Ю.Д. Сухова]. Москва : Стройиздат, 1988. 584 с.
22. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. Москва : Машиностроение, 1990. 448 с.
23. Ибрагимов М.Х., Данилова Н.А., Рачков В.И. Анализ безопасности АЭС с учетом отказов по общим причинам. Обзорная информация. Москва : Информэнерго, 1990.
24. Стефанишин Д.В., Шульман С.Г. Проблемы надежности гидротехнических сооружений. С.-Петербург : ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1991. 51 с.
25. Kumamoto H., Henley E.J. Probabilistic risk assessment and management for engineers and scientists. N.Y.: IEEE Press, 1996. 597 p.
26. Львов А.В., Федоров М.П., Шульман С.Г. Надежность и экологическая безопасность гидроэнергетических установок. С.-Петербург : СПбГТУ, 1999. 440 с.
27. 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.

28. Беллендир Е.Н., Ивашинцов Д.А., Стефанишин Д.В. и др. Вероятностные методы оценки надежности грунтовых гидротехнических сооружений. С.-Петербург : В 2-х томах. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2003. 553 с. 524 с.
29. Мирцхулава Ц.Е. Опасности и риски на некоторых водных и других системах. Виды, анализ, оценка. Тбилиси: «Мецниереба», 2003. 538 с.
30. Risk Assessment in Dam Safety Management. A reconnaissance of benefits, methods and current applications. ICOLD Bulletin 130. Paris, 2005. 276 p.
31. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. 2-е изд. перераб. и доп. С.-Петербург : БХВ-Петербург, 2006. 704 с.
32. Трофимчук А.Н., Черный В.Г., Черный Г.И. Надежность систем сооружение – грунтовое основание в сложных инженерно-геологических условиях. Киев : ПолграфКонсалтинг, 2006. 248 с.
33. Перельмутер А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. Москва : Издательство АСВ, 2007. 255 с.
34. Рябинин И.А. Надёжность и безопасность структурно-сложных систем. С.-Петербург : Издательство СПбГУ, 2007. 276 с.
35. Вайнберг А.И. Надежность и безопасность гидротехнических сооружений. Избранные проблемы. Харьков: Тяжпромавтоматика, 2008. 304 с.
36. Стефанишин Д.В. Статистичні оцінки живучості гребель. Екологічна безпека та природокористування. Зб. наук. праць. Вип. 11. Київ: КНУБА, ІТГП НАНУ, 2012. С. 53-61.

## REFERENCES

1. Dnistrovskia HES [Dnistrovskia hydroelectric power station]. Retrieved from [https://uhe.gov.ua/filiyi/dnistrovskia\\_hes](https://uhe.gov.ua/filiyi/dnistrovskia_hes). (In Ukrainian).
2. DBN V.2.4-3:2010. (2010). Hidrotekhnichni, enerhetychni ta melioratyvni 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).
3. Obiekty krytychnoi infrastruktury ta obiekty krytychnoi informatsiinoi infrastruktury v yevropeiskykh krainakh. Informatsiina dovidka, pidhotovlena YeIDTs na zapyt Aparatu VR Ukrainy. [Objects of critical infrastructure and objects of critical information infrastructure in European countries. Information certificate, prepared by the YESDC on request of the Apparatus of the Verkhovna Rada of Ukraine]. Retrieved from <http://euinfocenter.rada.gov.ua/uploads/documents/29297.pdf>. (In Ukrainian).
4. Stefanyshyn, D.V., Trofymchuk, O.M. (2014). Metodolohichni pidkhody do otsinky ta vrakhuvannia ryzyku v zadachakh zabezpechennia nadiinosti i bezpeky hrebel. [Methodological approaches to the assessment and risk taking in the tasks of ensuring the reliability and safety of the dam]. Kontsepsiia zakhystu krytychnoi infrastruktury: Stan, problemy ta perspektyvy yii vprovadzhennia v Ukraini. Zb. Materialiv mizhnarodnoi nauk.-praktychnoi konferentsii (7-8 lystopada 2013, Kyiv-Vyshhorod), NISD, «Natsionalna bezpeka», Vyp. 5, 88-98. (In Ukrainian).
5. Zelena knyha z pytan zakhystu krytychnoi infrastruktury v Ukraini. (2015). [Green book on critical infrastructure protection in Ukraine] : zb. mat-liv mizhnar. ekspert. narad / uporiad. D.S. Biriukov, S.I. Kondratov; za zah. red. O.M. Sukhodoli. Kyiv, NISD, 176 s. (In Ukrainian).
6. Kontsepsiia stvorennia derzhavnoi systemy zakhystu krytychnoi infrastruktury. [Concept of creation of the state system of protection of critical infrastructure]. Skhvaleno rozporiadzhenniam KMU vid 6 hrudnia 2017 r. № 1009-r. Retrieved from <https://www.kmu.gov.ua/ua/npas/pro-shvalennya-koncepciyi-stvorennia-derzhavnoyi-sistemi-zahistu-kritichnoyi-infrastrukturi>. (In Ukrainian).

7. Metodyka identyfikatsii potentsiino nebezpechnykh ob'ektiv. [Method of identification of potentially dangerous objects]. Zatverdzhena nakazom MNS Ukrainy vid 23.02.2006 r. za № 98. Zareiestrovano v Ministerstvi yustytsii Ukrainy vid 20.03.2006 r. za № 286/12160. Retrieved from <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0286-06>. (In Ukrainian).
8. Zakon Ukrainy «Pro ob'ekty pidvyshchenoi bezpeky». (2001). [Law of Ukraine «On the objects of increased security»]. Vidomosti VRU. 2001. № 15. St. 73. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2245-14>. (In Ukrainian).
9. Ivashintsov, D.A., Stefanishin, D.V., Veksler, A.B. (1993). Ecological and sociodemographic consequences of hydrotechnical construction (Problems of safety and risk). Power Technology and Engineering (formerly Hydrotechnical Construction), Vol. 27, Num. 12, 685-691.
10. Veksler, A.B., Yvashyntsov, D.A., Stefanyshyn, D.V. (2002). Nadezhnost, sotsyalnaia y ekolohycheskaia bezopasnost hydrotekhnicheskyykh ob'ektov: otsenka ryska y pryniatyeh resheniy. [Reliability, social and environmental safety of hydraulic facilities: risk assessment and decision making]. S.-Peterburh, VNYIH ym. B.E. Vedeneeva. 591 s. (In Russian).
11. Stefanyshyn, D.V. (2011). Prohnozuvannya 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).
12. ICOLD Bulletin 99. (1995). Dam Failures: Statistical Analysis. ICOLD. Bulletin No. 99. Paris, 1995.
13. Stefanyshyn, D.V. (2008). Prohnozyrovanye avaryinosty proektyruemykh y stroiashchykh sia plotyn na osnove rezultatov statystycheskoho analiza proyzoshedshykh avaryi. [Prediction of accidents of designed and under construction dams based on the results of statistical analysis of accidents occurred]. Yzvestiya VNYIH ym. B.E. Vedeneeva, T. 251, 3-9. (In Russian).
14. Romanchuk, K.H., Stefanyshyn, D.V. (2014). Imovirnisne modeliuвання stsenariiv dvokh netyповykh avarii na hidroenerhetychnykh ob'ektakh. [Probabilistic modeling of scenarios of two types of accidental accidents on hydropower objects]. Hidroenerhetyka Ukrainy. № 2-3, 20-25. (In Ukrainian).
15. Ermolaev, N.N., Mykheev, V.V. (1976). Nadezhnost osnovanyi sooruzheniy. [Reliability of the foundations of structures]. Leningrad, Stroyzdat, 152 s. (In Russian).
16. Rzhanytsyn, A.R. (1978). Teoriya rascheta stroytelnykh konstruktsiy na nadezhnost. [The theory of calculation of building structures for reliability]. Moskva, Stroyzdat, 239 s. (In Russian).
17. Bolotyn, V.V. (1981). Metody teoryi veroiatnostei y teoryi nadezhnosti v raschetakh sooruzheniy. [Methods of probability theory and reliability theory in calculations of structures]. Moskva, Stroyzdat, 351 s. (In Russian).
18. Barlou, R., Proshan, F. (1984). Statystycheskaia teoriya nadezhnosti y yspytaniya na bezotkaznost. [Statistical theory of reliability and reliability testing]. Per. s anhl. Moskva, Nauka, 328 s. (In Russian).
19. Raizer, V.D. (1986). Metody teoryi nadezhnosti v zadachakh normirovaniya raschetnykh parametrov stroytelnykh konstruktsiy. [Methods of reliability theory in the problems of rationing the design parameters of building structures]. Moskva, Stroyzdat, 190 s. (In Russian).
20. Nadezhnost y efektyvnost v tekhnike: Spravochnik. (1987). [Reliability and efficiency in technology: a Handbook]. V 10 t. / Red. sovet: V.S. Avduevskiy (pred.) y dr. T. 2.: Matematycheskiye metody v teoryi nadezhnosti y efektyvnosti. [Mathematical methods in the theory of reliability and efficiency]. [Pod red. B.V. Hnedenko]. Moskva, Mashynostroenye, 280 s. (In Russian).
21. Auhusty, H., Baratta, A., Kashyaty, F. (1988). Veroiatnostnye metody v stroytelnom proektyrovaniy. [Probabilistic methods in building design]. [Per. s anhl. Yu.D. Sukhova]. Moskva, Stroyzdat, 1988. 584 s. (In Russian).
22. Bolotyn, V.V. (1990). Resurs mashyn y konstruktsiy. [Resource machines and designs]. Moskva, Mashynostroenye, 448 s. (In Russian).



23. Ybrahymov, M.Kh., Danylova, N.A., Rachkov, V.Y. (1990). Analiz bezopasnosti AES s uchetom otkazov po obshchym prychynam. [Analysis of NPP safety taking into account failures for common reasons]. Obzornaia ynformatsyia. Moskva, Ynformenerho. (In Russian).
24. Stefanyshyn, D.V., Shulman, S.H. (1991). Problemy nadezhnosti hydrotekhnicheskyykh sooruzheniy. [Problems of reliability of hydraulic structures]. S.-Peterburh, VNIIEH im. B.E. Vedeneeva, 51 s. (In Russian).
25. Kumamoto, H., Henley, E.J. (1996). Probabilistic risk assessment and management for engineers and scientists. N.Y., IEEE Press, 597 p.
26. Lvov, A.V., Fedorov, M.P., Shulman, S.H. (1999). Nadezhnost y ekologicheskaya bezopasnost hydroenergeticheskyykh ustanovok. [Reliability and environmental safety of hydropower plants]. S.-Peterburh, Yzd-vo SPbHTU, 440 s. (In Russian).
27. 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.
28. Bellendyr, E.N., Yvashyntsov, D.A., Stefanyshyn, D.V. y dr. (2003). Veroiatnostnyye metody otsenki nadezhnosti hruntovykh hydrotekhnicheskyykh sooruzheniy. [Probabilistic methods for assessing the reliability of earth hydrotechnical structures]. S.-Peterburh, V 2-kh tomakh. VNIIEH im. B. E. Vedeneeva, 553 s. 524 s. (In Russian).
29. Myrskhulava, Ts.E. (2003). Opasnosty y ryzyky na nekotorykh vodnykh y druhykh sistemakh. Vidy, analiz, otsenka. [Hazards and risks on some water and other systems. Types, analysis, assessment]. Tbylisy, «Metsnyereba» («Nauka»), 538 s. (In Russian).
30. Risk Assessment in Dam Safety Management. A reconnaissance of benefits, methods and current applications. (2005). ICOLD Bulletin 130. Paris, 276 p.
31. Polovko, A.M., Hurov, S.V. (2006). Osnovy teoryi nadezhnosti. [Fundamentals of the theory of reliability]. 2-e yzd. pererab. y dop. S.-Peterburh, BKhV-Peterburh, 704 s. (In Russian).
32. Trofymchuk, A.N., Chernyi, V.H., Chernyi, H.Y. (2006). Nadezhnost system sooruzheniy – hruntovoe osnovanye v slozhnykh ynzhenerno-heologicheskyykh usloviyakh. [Reliability of systems construction – soil foundation in difficult engineering and geological conditions]. Kyiv, PolhrafKonsaltnykh, 248 s. (In Russian).
33. Perelmuter, A.V. (2007). Yzbrannyye problemy nadezhnosti y bezopasnosti stroytelnykh konstruksiy. [Selected problems of reliability and safety of building structures]. Moskva, Yzdatelstvo ASV, 255 s. (In Russian).
34. Riabynyn, Y.A. (2007). Nadezhnost y bezopasnost strukturno-slozhnykh system. [Reliability and safety of structurally complex systems]. S.-Peterburh, Yzdatelstvo SPbHU, 276 s. (In Russian).
35. Vainberh, A.Y. (2008). Nadezhnost y bezopasnost hydrotekhnicheskyykh sooruzheniy. Yzbrannyye problemy. [Reliability and safety of hydraulic structures. Selected issues]. Kharkiv, Tiazhpromavtomatyka, 304 s. (In Russian).
36. Stefanyshyn, D.V. (2012). Statystychni otsinky zhyvuchosti hrebel. [Statistical estimates of the survivability of dams]. Ekologichna bezpeka ta pryrodokorystuvannia. Zb. nauk. prats. Vyp. 11. Kyiv, KNUBA, ITHIP NANU, 53-61. (In Ukrainian).

*Стаття надійшла до редакції 20.04.2019.*