

УДК 504.05: 626/627

ПРО ОЦІНКУ ЙМОВІРНОСТЕЙ АВАРІЙ НА РІЧКОВИХ ГІДРОСПОРУДАХ В РЕЗУЛЬТАТІ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ ЯВИЩ, ПОВ'ЯЗАНИХ З ПОВЕНЯМИ

*Д. В. Стефанишин, д-р техн. наук
(Інститут телекомунікацій і глобального
інформаційного простору НАН України)*

Запропоновано методика оцінки верхніх граничних значень ймовірностей аварій на річкових гідропорудах в результаті екстремальних явищ, пов'язаних з повенями природного та техногенного походження.

Предложена методика оценки верхних граничных значений вероятностей аварий на речных гидротехнических сооружениях вследствие экстремальных явлений, связанных с паводками природного и техногенного происхождения.

The method of assessment of upper values of probabilities of failures on river hydraulic structures due to extreme phenomena connected with floods having their natural and man-caused origin is proposed.

В історії світового гідротехнічного будівництва зафіксовано значну кількість аварій на річкових гідротехнічних спорудах (гідропорудах), в тому числі з проривом напірного фронту, які відбувалися в різні роки та в різних країнах світу. За даними Міжнародної комісії з великих гребель (ICOLD) практично немає країни з розвиненим греблебудуванням, в якій не відбувалися аварії на річкових гідропорудах [1]. І хоча протягом останнього століття частоти аварій, особливо з катастрофічними наслідками, зменшились [2], аварія на Саяно-Шушенській гідроелектростанції, що відбулася 17 серпня 2009 року в Росії, в результаті якої загинуло 75 людей й було повністю зруйновано три з десяти гідроагрегатів потужністю 640 МВт кожен, засвідчила про те, що аварії на гідропорудах з великою кількістю людських жертв (табл. 1) не відійшли в минуле.

Можна стверджувати, що незважаючи на накопичений досвід експлуатації, проектування, вишукувань та розрахунків гідроспоруд, удосконалення технології та організації їх будівництва, підвищення якості матеріалів, запровадження сучасних засобів автоматизації виробничих процесів, контролю та моніторингу стану, підвищення загального рівня знань та інженерних рішень, небезпека аварій на напірних гідроспорудах, в тому числі і на унікальних об'єктах, залишатиметься актуальною і в майбутньому. Тому інженери починають більш критично ставитися до традиційних детерміністичних концепцій забезпечення надійності й безпеки гідроспоруд, і зважаючи на високий рівень невизначеності даних, що супроводжує процеси проектування, будівництва та експлуатації гідроспоруд, при їх розрахунках починають послуговуватися і імовірнісними методами та моделями [3, 4].

В Україні в минулому теж відбувалися аварії на гідроспорудах. Серед катастрофічних аварій слід згадати про руйнування дамб хвостосховищ на Куренівці в Києві в 1961 році та в Стебнику в 1983 році. Оскільки в країні вже експлуатуються і продовжують будуватися гідроспоруди, аварії на яких можуть мати катастрофічні наслідки, дослідження, спрямовані на удосконалення методів їх розрахунку, в тому разі й присвячені розробці імовірнісних методів, безумовно актуальні і мають високе наукове, та практичне значення.

Як показує практика [1—4], аварії на річкових гідроспорудах відбуваються з різних причин, серед яких виділяються екстремальні повені, які рідко повторюються, розрахункові характеристики яких (витрати, рівні води) носять імовірнісний, а інколи і невизначений характер, і не завжди можуть бути прогнозовані об'єктивно. Це можуть бути екстраординарні, понад розрахункові повені, на які споруди не розраховуються, переважно природного, інколи природно-техногенного походження, що виникають в результаті потужних злив, руйнувань розташованих вище за течією підпірних споруд (гребель, дамб), заторів, загорів тощо. До екстремальних повеней відносяться також небезпечні поєднання розрахункових паводків з вітровим нагоном, дією вітрових хвиль, з несправностями механічного устаткування (затворів, підйомних механізмів) та відмовами водопропускних споруд, що призводять до зменшення їх пропускної здатності. На відміну від явищ та

Таблиця 1 — Приклади катастрофічних аварій на греблях, пов'язаних з повеннями

Гребля (країна)	Тип */ висота, м	Рік аварії	Основні причини та наслідки аварії	Жертви, чол.
Дейл Дайк (Англія)	ГМ/ 29,0	1864	Переливання води через гребінь, понад розрахункова повінь, прорив греблі	238
Саус Форк (США)	ГМ/ 21,5	1889	Переливання води через гребінь, понад розрахункова повінь, прорив греблі	2500
Аустин (США)	БГ/ 15,2	1911	Зсув греблі по основі, повінь, переповнення водосховища, прорив греблі	100
Глено (Італія)	К/ 52,0	1923	Зсув греблі по основі, повінь, переповнення водосховища, прорив греблі	600
Сен-Френсіс (США)	БГ/ 62,6	1928	Хімічна суфозія в основі, повінь, переповнення водосховища, прорив греблі	400
Мальпаса ** (Франція)	А/ 66,0	1959	Зсув берегового межування, повінь, відмова водоскиду, переповнення водосховища, прорив греблі	421
Оруш (Бразилія)	ГМ/ 54,0	1960	Переливання води через гребінь, повінь, відмова водоскиду, прорив греблі	1000
Вайонг (Італія)	А/ 262,0	1963	Переливання води через гребінь, катастрофічний зсув у водосховище, повінь	2600
Семпор (Індонезія)	ГМ/ 54,0	1967	Переливання води через гребінь, повінь, відмова водоскиду, прорив греблі	200
Буфало Крик (США)	ГМ/ 32,0	1972	Переливання води через гребінь, повінь, відмова водоскиду, прорив греблі	125
Тетон *** (США)	ГМ/ 93,0	1976	Стрімке заповнення водосховища, контактна суфозія в основі, прорив греблі	11
Мачху-2 (Індія)	ГМ/ 26,0	1979	Переливання через гребінь, повінь, відмова механічного устаткування на водоскиді, прорив греблі	2000

* Типи гребель: ГМ — з ґрунтових матеріалів, БГ — бетонні гравітаційні, А — аркові, К — контрфорсні; ** Див. рис. 1; *** Див. рис. 2.

процесів, що ведуть до погіршення фізико-механічних властивостей матеріалів конструкцій гідроспоруд, їх зносу та старіння, накопичення пошкоджень та дефектів, а також від так званого «людського фактору» (помилки і прорахунків, неякісного виконання робіт, недостатнього контролю, відсутності своєчасних ремонтів, недотримання правил технічної експлуатації і використання некваліфікованого персоналу тощо), екстремальні повені реалізуються за стохастичними законами, що може бути враховано при оцінці надійності та безпеки гідроспоруд не інакше як в рамках імовірнісних методів та моделей.

За статистичними даними в результаті повеней безпосередньо, внаслідок стрімкого підйому води у водосховищах чи на спаді паводків, при неналежній роботі водоскидних споруд, а також в результаті поєднання паводків з іншими причинами відбулося до 80% від всіх катастрофічних руйнувань річкових гідроспоруд [1—4].

В табл. 1 наведені приклади катастрофічних аварій на гідроспорудах, в яких ключову роль відіграли повені. Слід зазначити, що й аварія на Саяно-Шушенській ГЕС, що відбулася 17 серпня 2009 року, з великою імовірністю могла отримати подальший, більш катастрофічний розвиток, з загрозою цілісності греблі та прориву напірного фронту. На момент аварії водосховище було заповнене майже до проектного рівня, пропуск води через гідроагрегати через аварію був призупинений, і якби не спрацювали водоскидні споруди гідровузла, з приходом осіннього паводка ще більша катастрофа могла бути неминучою.

Загалом при розрахунках гідроспоруд з метою забезпечення належних рівнів їх надійності та безпеки розглядають два класи екстремальних явищ, пов'язаних з повенями, з яких формують основні та особливі сполучення навантажень: клас розрахункових проектних подій (таких, наприклад, як розрахунковий проектний паводок або рівень води та розрахунковий шторм на водосховищі), при виникненні та по завершенні яких проектом передбачається збереження всіх заданих параметрів несучої здатності споруди, її конструкції, конструктивних елементів та основи, її функціонування в нормальному режимі без порушення вимог безпеки (унеможливлення загроз життю та здоров'ю експлуатаційного персоналу, стороннім особам, навколишньому середовищу), та клас макси-

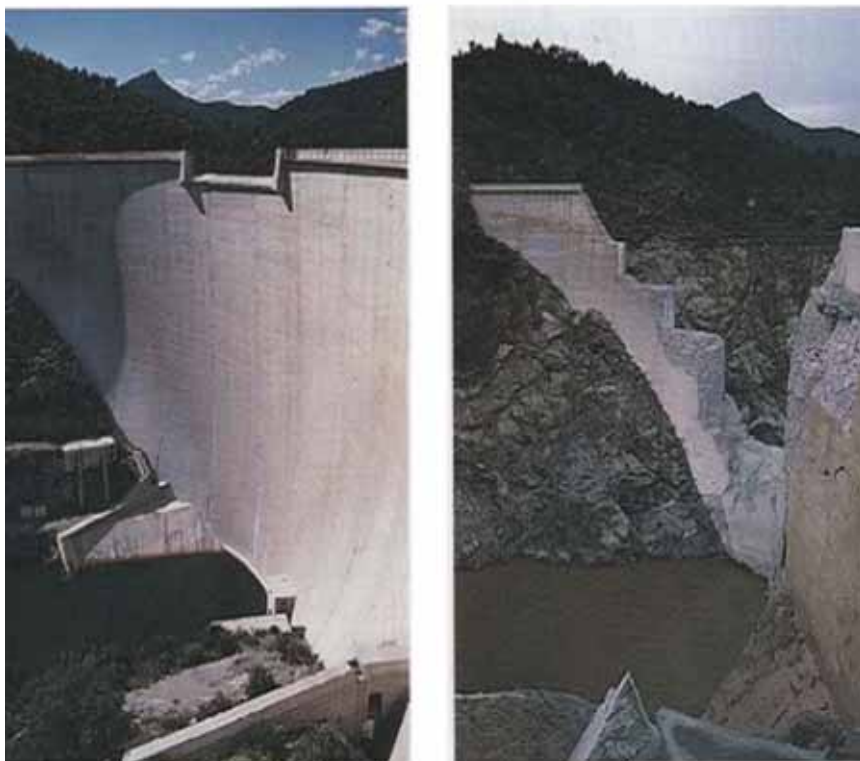


Рис. 1. Аркова гребля Мальпасе до та після руйнації у 1959 році

мальних проектних подій (максимальний розрахунковий паводок або рівень води та максимальний розрахунковий шторм), при яких допускається незначне пошкодження споруди, окремих її конструктивних елементів, без руйнування напірного фронту й виникнення гідродинамічної аварії, зі збереженням вимог безпеки.

Обидва класи подій є малоймовірними, періоди повторення яких можуть значно перевищувати розрахункові терміни служби, які для гідроспоруд досягають 50—100 років, або бути спів розмірними з ними. Так, наприклад, згідно з чинними в Україні нормами [5] при проектуванні напірних гідроспоруд першого (найвищого) класу, розрахунковий період служби яких приймаєть-



Рис. 2. Руйнування кам'яно-земляної греблі Тетон у 1976 році

ся 100 років, ймовірність перевищення проектного паводку встановлюється рівною 10^{-3} , подій на рік (рік^{-1}), тобто з періодом повторення 1000 років, максимального розрахункового — 10^{-4} , рік^{-1} , з періодом повторення 10000 років. При цьому, згідно з чинними нормами, у всіх випадках, при виникненні як проектних, так і максимальних розрахункових паводків, має забезпечуватися цілісність напірного фронту.

В даній статті розглядається методика оцінки верхніх граничних (sup) значень ймовірностей аварій на річкових гідротехнічних спорудах в результаті екстремальних явищ, пов'язаних з повеннями природного та техногенного походження, розрахункові характеристики яких встановлюються статистич-

ними методами або методами стохастичного (імовірнісного) моделювання. Припускається, що гідроспороди в умовах дії розрахункових сполучень навантажень, імовірнісні характеристики яких встановлюються в залежності від класу споруди [5], при виникненні й протіканні екстремальних явищ, пов'язаних з повенями, мають залишатися надійними, оскільки перебувають в проектних режимах експлуатації. Порушення критеріїв надійності можливе лише у випадку перевищення навантажень в результаті іншої, додаткової причини. Далі за ймовірностями перевищення розрахункових навантажень та їх сполучень при відповідних екстремальних явищах методами теорії ймовірностей та математичної теорії надійності визначаються граничні (sup) оцінки ймовірностей виникнення аварій на гідроспородах.

Для вирішення поставленої задачі приймаються наступні основні припущення та робочі гіпотези, які дають можливість отримувати верхні граничні оцінки ймовірностей аварій на гідроспородах, з запасами ризику.

1. При можливості одночасної реалізації кількох незалежних сценаріїв розвитку подій, що можуть призвести до аварії на споруді в результаті екстремального явища, пов'язаного з повинню, й відсутності надійних даних, що можуть зняти невизначеність відносно імовірності реалізації кожного з гіпотетичних сценаріїв, використовується принцип Бернуллі-Лапласа (принцип недостатніх підстав), згідно з яким всі модельні сценарії виникнення аварії в групі розглядаються як однаково імовірні гіпотези.

Так, рівно імовірними гіпотезами щодо сценаріїв виникнення аварії на гідроспоруді внаслідок повені надалі вважатимуться різні сценарії порушення загальної міцності та різні сценарії порушення загальної стійкості системи «споруда-основа».

2. Повна ймовірність аварії на споруді в результаті комбінацій факторів та впливів, що утворюють одне сполучення навантажень з екстремальним явищем, або їм породжуються, згідно з принципом дії спільної причини не може перевищити ймовірності реалізації відповідного екстремального явища.

3. Приймається, що в результаті екстремального явища як спільної причини, ресурс системи «споруда-основа» за одним з розрахункових критеріїв надійності (міцності або стійкості тощо) вичерпується. Окремі сценарії аварії на гідроспоруді

при цьому можуть бути об'єднані в один узагальнений сценарій виникнення аварії [4, 6], а умовна ймовірність аварії на споруді внаслідок спільної причини, як ймовірність реалізації будь-якого з окремих гіпотетичних сценаріїв, з запасом ризику, може прирівнюватися до одиниці.

4. Екстремальні явища та відмови структурних одиниць гідровузла, що враховуються при ймовірнісних розрахунках, розглядаються як незалежні події.

В методиці, що пропонується, для оцінки ймовірностей аварій на гідроспорудах в результаті екстремальних явищ, пов'язаних з повенями, використані основні положення теорії «викидів» випадкових процесів за заданий (проектний) рівень [7]. Згідно з цією теорією поставлена задача зводиться до оцінки ймовірності того, що хоча б один раз деяке екстремальне значення узагальненого навантаження на споруду, що розглядається як випадковий процес, вийде за межі заданого (проектного) розрахункового значення. При цьому припускається, що всі екстремальні явища, що можуть загрожувати цілісності гідроспоруд через «викиди випадкових процесів за заданий (проектний) рівень» розрахункових навантажень, реалізуються або в результаті повеней, або в поєднанні з повенями.

В чинних нормах проектування [5] розглядаються наступні екстремальні явища, параметри яких задають проектні рівні надійності й безпеки гідроспоруд, й при перевищенні яких, з тих або інших причин, можуть ініціюватися аварійні процеси.

Розрахунковий паводок (для основного випадку) з максимальними витратами води, що пропускаються при нормальному підпірному рівні (НПР) у верхньому б'єфі.

Максимальний розрахунковий паводок (для перевірконого випадку) з максимальними витратами води, що пропускаються при форсованому підпірному рівні (ФПР).

Як відомо в чинних нормах проектування в залежності від класу гідроспоруди встановлюються допустимі значення щорічних ймовірностей перевищення розрахункового та максимального розрахункового паводків (табл. 2).

Таблиця 2 — Допустимі щорічні ймовірності перевищення розрахункових максимальних витрат води згідно з чинними вітчизняними нормами (встановлені для країн бувшого СРСР) [5]

Розрахункові випадки	Щорічна допустима ймовірність перевищення, %, розрахункових максимальних витрат води для класів гідроспоруд			
	I	II	III	IV
Основний	0,1	1,0	3,0	5,0
Перевірочний	0,01*	0,1	0,5	1,0

* Витрата води встановлюється врахуванням гарантійної поправки до 20%

Розрахунковий землетрус (для основного випадку) інтенсивністю не нижче 7 балів за шкалою MSK з середнім періодом повторення 100—150 років та ймовірністю не перевищення максимальних прискорень на поверхні ґрунту $P_{\gamma} = 90\%$, незалежно від класу споруди, або *максимальний розрахунковий землетрус* (зазвичай для споруд I та II класів) інтенсивністю не нижче 7 балів за шкалою MSK з максимальним періодом повторення до 10000 років та ймовірністю не перевищення максимальних прискорень не менше 50%.

Навантаження від максимальних вітрових хвиль, які згідно з нормами розглядаються при дії розрахункового шторму (забезпеченість шторму може прийматися рівною 1% для споруд I і II класів, та 4% для споруд III, IV класів при НПР, або 50% незалежно від класу споруди при ФПР).

Температурні навантаження, які згідно з чинними нормами розглядаються або при НПР (визначаються для року з найбільшою амплітудою коливання середньомісячних температур зовнішнього повітря), або при ФПР (для року з середньою амплітудою коливання середньомісячних температур зовнішнього повітря).

Навантаження від льодяного покриву максимальної товщини й міцності, що розглядаються або при НПР (при ймовірності перевищення навантаження від 1% до 4% в залежності від класу споруди), або при ФПР (забезпеченість навантаження 50%).

Додатково до регламентованих нормами [5] впливів з позицій гарантування безпеки гідроспоруд в каскаді розглянемо також

можливість прориву розташованих вище за течією підпірних споруд.

Кожне з перерахованих вище явищ може спричинити аварію на гідроспоруді в результаті повені, в поєднанні з нею, з причин, виникнення яких пов'язане з повеннями.

Так, при проходженні розрахункових паводків критичною подією для розвитку аварії на напірній гідроспоруді є перевищення ФПР. Ця подія може реалізуватися при відмові за пропускною здатністю однієї або кількох водопропускних споруд, що формують водоскидний фронт гідровузла (в залежності від умов трансформації паводку водосховищем та пропускної здатності споруд). При перевищенні ФПР збільшується гідростатичний тиск, порушується нормальна робота дренажних та фільтраційних пристроїв, зростають фільтраційні й динамічні навантаження, пошкоджуються окремі конструктивні елементи в результаті розмивів та підмивів тощо, в результаті чого узагальнена несуча здатність споруди за одним з критеріїв (міцності, стійкості) може бути вичерпана. Відповідно, при проходженні розрахункових паводків, відмову водопропускних споруд за пропускною здатністю можна трактувати як «викид випадкового процесу за заданий (проектний) рівень».

Тоді верхнє граничне (sup) значення ймовірності аварії на гідроспоруді в результаті сумісної дії розрахункового паводку $P^{\text{sup}}(A, F_d)$ (далі — для основного випадку — індекс m , перевірного — індекс c) та відмови водоскидного фронту гідровузла, як ймовірності перетину зазначених двох подій буде:

$$P^{\text{sup}}(A, F_{d,m}) = P(F_{d,k,m}) \cdot P(A_{w,m}), \quad (1)$$

$$P^{\text{sup}}(A, F_{d,c}) = P(F_{d,k,c}) \cdot P(A_{w,c}), \quad (2)$$

де $P(F_{d,k,m})$, $P(F_{d,k,c})$ — ймовірності перевищення розрахункового та максимального розрахункового паводків, в залежності від класу споруди k та розрахункового випадку (основного m та перевірного c), відповідно; $P(A_{w,m})$, $P(A_{w,c})$ — ймовірності відмов водоскидного фронту, за яких можливе перевищення ФПР.

При реалізації максимального розрахункового паводку перевірного випадку для перевищення ФПР достатньо відмови за

пропускною здатністю будь-якої з водопропускних споруд. Маємо:

$$P(A_{w,c}) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P(A_{w,i})), \quad (3)$$

де $P(A_{w,i})$ — ймовірність відмови за пропускною здатністю i -ї водопропускної споруди зі споруд що формують водоскидний фронт; N — загальна кількість водопропускних споруд, задіяних у формуванні водоскидного фронту гідровузла.

При розрахунковому паводку основного випадку перевищення ФПР також може наступити при відмові за пропускною здатністю водопропускних споруд, наприклад, при відмові кількох водопропускних трактів внаслідок заклинювання затворів тощо. В загальному випадку верхнє граничне значення ймовірності відмови кількох (M з N) водопропускних споруд $P^{\text{sup}}(A_{w,M|N})$ можна оцінити за формулою [8]:

$$P^{\text{sup}}(A_{w,M|N}) = \left(1 - \prod_{i=1}^N (1 - P(A_{w,i}))\right) \cdot \left(1 - \prod_{j=1}^{N-1} (1 - P(A_{w,j}))\right)_{\text{max}} \times \dots \\ \dots \times \left(1 - \prod_{k=1}^{N-M+1} (1 - P(A_{w,k}))\right)_{\text{max}}, \quad (4)$$

де $P(A_{w,i})$, $P(A_{w,j})$, $P(A_{w,q})$ — ймовірності відмов i -ї, j -ї, k -ї з водопропускних споруд, що формують водоскидний фронт гідровузла, згрупованих таким чином, щоб максимізувалися значення відповідних ймовірностей відмов M з N споруд, коли кількість працюючих споруд стає меншою за загальну їх кількість N ; M — кількість водопропускних споруд, при відмові яких верхній б'єф переповнюється.

В загальному випадку надійність водопропускних споруд визначається їх готовністю до пропуску паводків. В свою чергу надійність підготовленої до пропуску паводку споруди в першу чергу (до першої відмови) визначається безвідмовністю механічного устаткування (системи «затвори — підйомні механізми»), та його ремонтпридатністю на випадок відмови (заклинювання тощо) [4]. Верхнє граничне значення ймовірності відмови

водопроникної споруди за пропускною здатністю на момент часу $t + t_{r,w}$ з врахуванням допустимого часу $t_{r,w}$ на відновлення працездатності механічного устаткування у випадку його відмови (у припущенні стаціонарного пуасонівського потоку відмов устаткування загальною інтенсивністю $\lambda_{\Sigma,w}$ й експоненціального закону відновлення працездатності) буде:

$$P^{\text{sup}}(A_w, t + t_{r,w}) = 1 - \exp\{-\lambda_{\Sigma,w} \cdot t \cdot \exp(-\mu_{\text{min},w} \cdot t_{r,w})\}, \quad (5)$$

де $\lambda_{\Sigma,w} = \sum_j \lambda_j$; λ_j — інтенсивність відмов j -го елемента конструкції або механізму водопроникної споруди; $\mu_{\text{min},w}$ — мінімальне значення інтенсивності відновлення працездатності споруди з врахуванням складності ремонтних операцій по відновленню працездатності різних структурних одиниць системи «затвори-підйомні механізми».

Отримані усередненням даних на різних об'єктах статистичні оцінки величин $\lambda_{\Sigma,w}$, $\mu_{\text{min},w}$, що характеризують працездатність водопроникних споруд за пропускною здатністю, приводяться в літературі [3, 4]. Для індивідуальних об'єктів ці значення можуть бути уточнені на основі вибірових статистичних досліджень [9].

За відомих значень $P^{\text{sup}}(A, F_{d,m})$ та $P^{\text{sup}}(A, F_{d,c})$ верхнє граничне значення повної ймовірності аварії на гідроспоруді $P^{\text{sup}}(A, F)$ в результаті сумісної дії паводків та відмов водопроникних споруд з врахуванням умови формування повної групи подій буде:

$$P^{\text{sup}}(A, F) = P^{\text{sup}}(A, F_{d,m}) \cdot (1 - P(F_{d,k,c})) + P^{\text{sup}}(A, F_{d,c}), \quad (6)$$

де $P(F_{d,k,c})$ — ймовірність перевищення максимального розрахункового паводку.

Як відомо, середня повторюваність сильних землетрусів (інтенсивністю 7 та більше балів за шкалою MSK) у високо сейсмічних районах (на території України — це Крим та Одеська область) зазвичай оцінюється величиною до 100—150 років, інколи й

менше. Розрахунки гідроспоруд на сейсмостійкість в таких випадках ведуть при НПР у верхньому б'єфі та деякому мінімальному рівні води в нижньому б'єфі. Оскільки НПР використовується для пропуску паводків, що не перевищують розрахунковий, то при можливому пошкодженні гідроспоруди внаслідок землетрусу може виникнути ситуація, коли стане неможливим безпечне спрацювання верхнього б'єфа й спорожнення водосховища від НПР.

Аварійна ситуація на гідроспоруді при її пошкодженні землетрусом може виникнути в двох випадках: 1) при розрахунковому паводку, коли мають бути задіяні всі водопропускні споруди гідровузла, і для скиду додаткових витрат води не вистачатиме пропускної здатності водоскидного фронту гідровузла; 2) якщо при проходженні паводку, що не більший розрахункового, відмовить водопропускний фронт за пропускною здатністю.

Верхнє граничне (sup) значення безумовної (повної) ймовірності пошкодження споруди $P^{\text{sup}}(A, E_d)$ при розрахунковому землетрусі E_d з середнім періодом повторення $\tau_{e,m}$ можна оцінити як ймовірність перевищення максимальних розрахункових прискорень на ґрунті, яка з врахуванням ймовірності їх не перевищення P_γ (у випадку встановлення середніх періодів повторення землетрусів $P_\gamma = 0,9$), буде:

$$P^{\text{sup}}(A, E_d) = (1 - P_\gamma) \cdot \tau_{e,m}^{-1}. \quad (7)$$

При розрахунковому паводку $F_{d,m}$ безпечне спрацювання водосховища стає проблематичним. Верхнє граничне значення умовної ймовірності розвитку аварії на пошкодженій землетрусом споруді в цьому випадку може прийматися рівним одиниці. В свою чергу верхнє граничне значення відповідної ймовірності розвитку аварії при паводку, що є меншим за розрахунковий, можна визначити як ймовірність відмови певної кількості водопропускних споруд за пропускною здатністю (4), при якій не забезпечується спрацювання водосховища в безпечному режимі.

Можливість поєднання сейсмічного явища з різними паводками можна врахувати в рамках повної групи подій, представлених паводками, що не перевищують розрахунковий, але при яких може не забезпечуватися спрацювання водосховища в безпечному режимі через відмову водопропускних споруд гідровузла за пропускною здатністю.

Для формування повної групи подій при врахуванні можливості реалізації кількох екстремальних явищ з різними ймовірностями перевищення виконується їх ранжирування з нумерацією подій за правилом:

$$P_1 < P_2 < \dots < P_j < \dots < P_{n-1} < P_n, \quad (8)$$

де P_j — щорічна ймовірність перевищення (% , рік⁻¹) j -ї екстремальної події, $j = 1, n$, n — загальна кількість екстремальних явищ, що включаються в повну групу подій.

Для ранжированих подій з різними ймовірностями перевищення оцінюються ймовірності реалізації відповідних умов незабезпечення спрацювання водосховища в безпечному режимі $C_1, C_2, \dots, C_j, \dots, C_n$ як несумісних подій. Оскільки з менш ймовірними подіями може бути пов'язана більша небезпека, а їхні характеристики змінюються у більшому діапазоні й оцінюються з більшою похибкою, то з запасом ризику приймемо:

$$\begin{aligned} P(C_1) &= 2P_1; \quad P(C_2) = 2P_2 - P(C_1); \quad \dots; \\ P(C_j) &= 2P_j - P(C_{j-1}); \quad \dots; \quad P(C_n) = 2P_n - P(C_{n-1}). \end{aligned} \quad (9)$$

Далі в рамках повної групи подій здійснюється нормування ймовірностей реалізації відповідних j -х умов за формулою:

$$P(C_j)^{\mu} = \frac{\mu \cdot P(C_j)}{\sum_{j=1}^n P(C_j)}, \quad (10)$$

де μ — нормуюча міра, яка у випадку, коли $\sum_{j=1}^n P_j \leq 1$ (або $\leq 100\%$) приймається рівною $\sum_{j=1}^n P_j$, якщо $\sum_{j=1}^n P_j > 1$ (або більше 100%), то приймається рівною одиниці або 100%.

Нехай, наприклад, необхідно сформувати повну групу подій для ранжируваного за правилом (8) ряду паводків з наступними ймовірностями перевищення максимальних витрат води:

$$P_1 = 0,01\%; P_2 = 0,1\%; P_3 = 1\%; P_4 = 2\%; P_5 = 3\%; \\ P_6 = 5\%; P_7 = 10\%.$$

Отримуємо ймовірності відповідних умов незабезпечення спорожнення водосховища в безпечному режимі як несумісних подій:

$$P(C_1) = 0,02\%; P(C_2) = 0,18\%; P(C_3) = 1,82\%; \\ P(C_4) = 2,18\%; P(C_5) = 3,82\%; P(C_6) = 6,18\%; \\ P(C_7) = 13,82\%.$$

Оскільки сума ймовірностей перевищення P_j , $j = \overline{1,7}$, в наведеному прикладі менше 100%, то нормуюча міра $\mu = \sum_{j=1}^{m=7} P_j = 21,11\%$.

Маємо нормовані ймовірності $P(C_j)^n$, $j = \overline{1,7}$, реалізації відповідних умов $C_1, C_2, \dots, C_j, \dots, C_7$, що формують повну групу несумісних подій: 0,015%, 0,135%; 1,37%; 1,64%; 2,88%; 4,66%; 10,41%.

Далі, згідно з формулою повної ймовірності повна ймовірність відмови водопропускного фронту за пропускною здатністю буде:

$$P^{\text{sup}}(A_w) = \sum_{j=1}^n P^{\text{sup}}(A_w | C_j) P(C_j)^n, \quad (11)$$

де $P^{\text{sup}}(A_w | C_j)$ визначаються за формулою (4), або в залежності від кількості q_j водопропускних споруд, що мають бути задіяні для безпечного пропуску j -го паводку:

$$P^{\text{sup}}(A_w | C_j) = \prod_{q=1}^{q_j} \left(1 - \prod_{i=q_j}^N [1 - P(A_{w,i})] \right), \quad (12)$$

$P(A_{w,i})$ — ймовірність відмови i -ї водопрпускнуої споруди (див. формулу (5)).

Для умов, при яких не забезпечується спрацювання водосховища в безпечному режимі після розрахункового землетрусу, повна ймовірність відмови водопрпускнуго фронту за пропускнуою здатністю:

$$P^{\text{sup}}(A_w, E_d) = \sum_{j=1}^n P^{\text{sup}}(A_w | E_d, C_j) P(C_j)^n, \quad (13)$$

де ймовірності $P^{\text{sup}}(A_w | E_d, C_j)$ визначаються залежно від кількості q_j водопрпускнух споруд (12), які мають бути задіяні для безпечного спорожнення водосховища у випадку проходження j -х паводків.

В результаті отримуємо верхнє граничне (sup) значення повної ймовірності аварії на гідроспоруді в результаті сумісної дії землетрусів та відмов водопрпускнух споруд гідровузла за пропускнуою здатністю:

$$P^{\text{sup}}(A, E) = P^{\text{sup}}(F, E_d) \cdot P^{\text{sup}}(A_w, E_d). \quad (14)$$

Оскільки аварія на гідроспоруді може мати місце при перевищенні навантажень в результаті відмов водопрпускнух споруд і до землетрусу (при розрахункових паводках F_d), то з врахуванням умови формування повної групи подій верхнє граничне значення повної ймовірності аварії на гідроспоруді в результаті двох екстремальних явищ буде:

$$P^{\text{sup}}(A, F, E) = P^{\text{sup}}(A, F) \cdot (1 - P^{\text{sup}}(A, E_d)) + P^{\text{sup}}(A, E), \quad (15)$$

де $P^{\text{sup}}(A, F)$ — верхнє граничне (sup) значення повної ймовірності аварії на гідроспоруді в результаті сумісної дії паводків та відмов водопрпускнух споруд (див. формулу (6)).

Верхні граничні значення ймовірностей виникнення аварії на гідроспоруді в результаті сумісної дії паводків та вітрових хвиль при штормі, паводків та температурних навантажень, паводків та навантажень від льодових явищ можуть розраховуватися за наступних умов, що моделюють «викиди випадкових процесів за заданий рівень»:

— у випадку врахування відповідних явищ малої ймовірності перевищення, що встановлюється з врахуванням класу споруди (основний випадок), — за умови, що рівень води у верхньому б'єфі внаслідок відмови однієї (або кількох) водопропускних споруд, що формують водоскидний фронт гідровузла, перевищить НПР;

— у випадку врахування відповідних явищ 50% ймовірності перевищення, незалежно від класу споруди (перевірочний випадок) — за умови, що рівень води у верхньому б'єфі внаслідок відмови однієї (або кількох) водопропускних споруд водоскидного фронту гідровузла перевищить ФПР.

За цих умов верхні граничні (sup) значення ймовірностей аварії на гідроспоруді в результаті сумісної дії відмов водоскидного фронту гідровузла при проходженні паводків та вітрових хвиль при штормі $P^{\text{sup}}(A, V_d)$, температурних навантажень $P^{\text{sup}}(A, T_d)$, навантажень від льодових явищ $P^{\text{sup}}(A, I_d)$ (для основних випадків — індекс m , перевірочних — індекс c) згідно з формулою ймовірності логічного добутку двох подій будуть:

$$P^{\text{sup}}(A, V_{d,m}) = P(V_{d,k,m}) \cdot P(A_{w,m}),$$

$$P^{\text{sup}}(A, V_{d,c}) = 0,5 \cdot P(A_{w,c}), \quad (16)$$

$$P^{\text{sup}}(A, T_{d,m}) = P(T_{d,k,m}) \cdot P(A_{w,m}), \quad P^{\text{sup}}(A, T_{d,c}) = 0,5 \cdot P(A_{w,c}), \quad (17)$$

$$P^{\text{sup}}(A, I_{d,m}) = P(I_{d,k,m}) \cdot P(A_{w,m}), \quad P^{\text{sup}}(A, I_{d,c}) = 0,5 \cdot P(A_{w,c}), \quad (18)$$

де $P(V_{d,k,m})$, $P(T_{d,k,m})$, $P(I_{d,k,m})$ — ймовірності перевищення розрахункових значень характеристик вітрових хвиль, навантажень від температурних та льодових явищ, відповідно, що встановлюються залежно від класу споруди k ; $P(A_{w,m})$, $P(A_{w,c})$ — ймовірності відмов водоскидного фронту, які оцінюються в за-

лежності від класу споруди k та розрахункового випадку (основного m , перевірного c), як імовірності перевищення НПР і ФПР, відповідно, за формулами (1–5).

Верхні граничні значення повних ймовірностей аварії на гідроспоруді в результаті сумісної дії паводків та вітрових хвиль $P^{\text{sup}}(A, V)$, паводків та температурних навантажень $P^{\text{sup}}(A, T)$, паводків та навантажень від льодових явищ $P^{\text{sup}}(A, I)$ як ймовірностей логічних сум відповідних «викидів випадкових процесів за заданий рівень» для основних та перевірочних випадків, з врахуванням умов формування повних груп подій, будуть:

$$P^{\text{sup}}(A, V) = P(A, V_{d,m}) + (0,5 - P(V_{d,k,m})) \cdot P^{\text{sup}}(A, V_{d,c}), \quad (19)$$

$$P^{\text{sup}}(A, T) = P(A, T_{d,m}) + (0,5 - P(T_{d,k,m})) \cdot P^{\text{sup}}(A, T_{d,c}), \quad (20)$$

$$P^{\text{sup}}(A, I) = P(A, I_{d,m}) + (0,5 - P(I_{d,k,m})) \cdot P^{\text{sup}}(A, I_{d,c}). \quad (21)$$

Аварії, що пов'язані з вітровими хвилями та льодовими явищами, є подіями несумісними. Повна ймовірність аварії на гідроспоруді $P^{\text{sup}}(A, V, I)$ в результаті цих явищ буде:

$$P^{\text{sup}}(A, V, I) = P^{\text{sup}}(A, V) \cdot (1 - P^{\text{sup}}(A, I)) + P^{\text{sup}}(A, I) \cdot (1 - P^{\text{sup}}(A, V)). \quad (22)$$

Температурні навантаження на гідроспоруді можуть мати як природне, так і техногенне походження, тому аварії, пов'язані з ними, слід розглядати як сумісні події з аваріями, спричиненими іншими явищами. Верхнє граничне значення повної ймовірності аварії на гідроспоруді в результаті дії паводків та вітрових хвиль, паводків та температурних навантажень, паводків та навантажень від льодових явищ буде:

$$P^{\text{sup}}(A, V, T, I) = 1 - (1 - P^{\text{sup}}(A, V, I)) \cdot (1 - P^{\text{sup}}(A, T)). \quad (23)$$

Нарешті верхнє граничне значення повної ймовірності аварії на гідроспоруді в результаті прориву розташованих вище за течією підпірних споруд $P^{\text{sup}}(A, B_{ud})$ можна оцінити як добуток ймовірності аварії на розташованій вище за течією ріки напірній

споруді $P^{\text{sup}}(B_{ud})$ та ймовірності перевищення ФПР внаслідок дії хвилі прориву $P^{\text{sup}}(F_{ud})$:

$$P^{\text{sup}}(A, B_{ud}) = P^{\text{sup}}(B_{ud})P^{\text{sup}}(F_{ud}). \quad (24)$$

При цьому можливість перевищення ФПР внаслідок дії хвилі прориву розташованої вище за течією ріки напірної споруди встановлюється розрахунками трансформації додаткового притоку води у водосховище.

Можливі два екстремальні випадки поєднання природного притоку ріки у водосховище та додаткового притоку внаслідок прориву розташованої вище за течією ріки напірної споруди, які слід розглядати як несумісні події.

В першому випадку аварія на розташованій вище за течією греблі відбувається при паводку, пропуск якого здійснюється при ФПР. Верхнє граничне значення ймовірності перевищення ФПР внаслідок дії хвилі прориву $P^{\text{sup}}(F_{ud,1})$ у цьому (першому) випадку приймається рівним ймовірності перевищення максимального розрахункового паводку $P(F_{d,k,c})$, що встановлюється для перевірочного випадку в залежності від класу споруди:

$$P^{\text{sup}}(F_{ud,1}) = P(F_{d,k,c}). \quad (25)$$

У другому випадку аварія на розташованій вище за течією греблі відбувається при паводках, пропуск яких організується при рівнях води у верхньому б'єфі, що є менші за ФПР. Верхнє граничне значення ймовірності перевищення ФПР внаслідок дії хвилі прориву $P^{\text{sup}}(F_{ud,2})$ у цьому (другому) випадку визначиться як ймовірність відмови водопропускного фронту за пропускною здатністю в результаті сумісної дії паводків, хвилі прориву та відмов водопропускних споруд:

$$P^{\text{sup}}(F_{ud,2}) = \sum_{j=1}^n P^{\text{sup}}(A_w | B_{ud}, C_j) P(C_j)^n, \quad (26)$$

де ймовірності $P^{\text{sup}}(A_w | B_{ud}, C_j)$ визначаються за формулою (12) залежно від кількості q_j водопропускних споруд, які мають бути задіяні для безпечного пропуску хвилі прориву у випадку проходження j -х паводків.

В результаті отримуємо повну ймовірність перевищення ФПР внаслідок дії хвилі прориву як ймовірність відмови водопропускного фронту за пропускною здатністю в результаті сумісної дії паводків, хвилі прориву та відмов водопропускних споруд, яка залежно від класу споруди k та з врахуванням несумісності випадків, буде:

$$P^{\text{sup}}(F_{ud}) = P(F_{d,k,c}) + P^{\text{sup}}(F_{ud,2}) \cdot (1 - P(F_{d,k,c})). \quad (27)$$

При оцінці повної ймовірності аварії на гідроспоруді, залежно від умов її експлуатації, дії природних та техногенних факторів, можуть враховуватися різні екстремальні явища, з перерахованих вище. З врахуванням умови формування повної групи подій верхнє граничне значення повної ймовірності аварії на гідроспоруді в результаті будь-якого з вище перерахованих явищ, буде:

$$\begin{aligned} P^{\text{sup}}(A, F, E, V, T, I) = \\ = P^{\text{sup}}(A, F) \cdot (1 - P^{\text{sup}}(A, E_d) - P^{\text{sup}}(A, V, T, I) - P^{\text{sup}}(A, B_{ud})) + \\ + P^{\text{sup}}(A, E) + P^{\text{sup}}(A, V, T, I) + P^{\text{sup}}(A, B_{ud}) \end{aligned} \quad (28)$$

Запропонована методика оцінки верхніх граничних (sup) значень ймовірностей аварій на річкових гідротехнічних спорудах в результаті екстремальних явищ, пов'язаних з повеннями природного та техногенного походження, може використовуватися при оцінці ризику аварій на гідроспорудах, що проектуються, будуються або знаходяться в експлуатації, оцінці техногенної безпеки гідроспоруд, прийнятті рішень, направлених на керування техногенною безпекою гідроспоруд з врахуванням ризику. Зокрема, використовуючи методику, можна виявити пріоритетні фактори, з найбільшим внеском в повну ймовірність аварії, на які при проектуванні та експлуатації споруди слід звертати найбільшу увагу. При необхідності при розрахунках повних ймовірностей аварій на гідроспорудах, в залежності від умов їх експлуатації та визначальних факторів, згідно з запропонованою методикою можуть враховуватися й інші екстремальні явища, наприклад

такі, як обвальньо-зсувні процеси на водосховищах в гірських районах тощо, дія яких спільно з паводками може розглядатися як «викиди випадкових процесів за заданий (проектний) рівень» розрахункових навантажень.

* * *

1. Dam failures — statistical analysis. Bull. No. 99. ICOLD. Paris. 1995.
2. Стефанишин Д. В. Статистичні оцінки аварійності гребель // Д. В. Стефанишин Вісник НУВГП. Збірник наукових праць. Випуск 3 (35). Рівне: НУВГП. 2006. С.111—117.
3. 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.
4. Векслер А. Б. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятия решений / А. Б. Векслер, Д. А. Ивашинцов, Д. В. Стефанишин. — СПб.: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2002.
5. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия / Госстрой СССР. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988.
6. Стефанишин Д.В. Моделирование гипотетических сценариев возникновения аварий на арочных плотинах / Д. В. Стефанишин, Р. Н. Мализдерский // Гидроэнергетика Украины, № 2, 2007. — С. 34—37.
7. Болотин В. В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений / В. В. Болотин. — М.: Стройиздат, 1981.
8. Стефанишин Д. В. Проблеми оцінки системної надійності гідроспоруд з врахуванням ефектів неповного резервування / Д. В. Стефанишин, Н. В. Степанюк // Вісник НУВГП. Збірник наукових праць. Випуск 3(31). Рівне: НУВГП. 2005. С. 198—205.
9. Стефанишин Д. В. Імовірнісна оцінка техногенної безпеки напірних гідроспоруд Саратовського гідровузла на р. Волзі / Д. В. Стефанишин // Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво. Зб. наукових праць. Вип. 33. Рівне: НУВГП, 2008. — С. 59—64.

Отримано: 1.10.2009 р.