



ПРОГНОЗУВАННЯ АВАРІЙ НА ГРЕБЛЯХ В ЗАДАЧАХ ОЦІНКИ Й ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЇХ НАДІЙНОСТІ ТА БЕЗПЕКИ

Обґрунтовано необхідність та запропоновано методи прогнозування аварій на греблях в контексті оцінки та забезпечення їх надійності й безпеки.

Греблі є найбільш розповсюдженими об'єктами серед відповідальних інженерних споруд, широко застосовуються в різних галузях народного господарства та сферах життєдіяльності людини, зокрема в гідроенергетиці.

Це один з найдревніших видів інженерних об'єктів, поряд з житловими, храмовими, оборонними спорудами та дорогами. Перші згадки про будівництво гребель з метою водопостачання населення, зрошення земель, захисту від повеней пов'язані ще з шумерською цивілізацією, яка існувала за 4 тисячі років до нашої ери.

Греблі по праву слід вважати найбільш довговічними інженерними спорудами. Серед відомих гребель, що збереглися ще з античних часів, — ґрунтова гребля Кофіні, висотою 10 м, що була побудована в Греції в 1260 р. до нашої ери [1]. Протягом 3300 років ця гребля пережила численні паводки й землетруси й продовжує експлуатуватися. В Іспанії дотепер успішно експлуатуються дві великі ґрунтові греблі (Прозерпіна, висотою 21 м, і Корнальбо, висотою 24 м), що були побудовані в I–II століттях нашої ери, ще за часів Римської імперії [1–3].

За даними Міжнародної комісії з великих

гребель (ICOLD) в світі вже побудовано більше, ніж 45 тисяч лише так званих "великих" гребель, до яких віднесені греблі висотою 15 метрів й вище, та греблі, що створюють водосховища об'ємом не менше 1 млн. м³. Загальна ж кількість всіх гребель, що були побудовані на Землі, перевищує 800 тисяч [4, 5].

Будівництво гребель у всі віки сприяло суспільно-економічному розвитку, індустріальним революціям тощо. Практично всі розвинені країни світу в минулому столітті пережили бум греблебудування на своїй території. Нині спостерігається нова хвиля масового будівництва гребель в країнах, що стрімко розвиваються, зокрема в Бразилії, В'єтнамі, Китаї та ін.

Однак історія греблебудування налічує й непоодинокі випадки аварій на греблях, в тому числі і катастрофічних — з людськими жертвами.

Так, протягом останніх 150 років, серйозні аварійні ситуації траплялися майже на кожній з 36 великих гребель, що зареєстровані ICOLD. При цьому майже на кожній з 158 великих гребель аварії супроводжувалися проривами напірного фронту і майже на кожній з 76 гребель руйнувань вдавалося уникнути лише завдяки екстремному (аварійному) спорожненню водосховищ [6].



а



б

Рис. 1. Греблі Прозерпіна (а) [2] та Корнальбо (б) [3]



За даними ICOLD, безпосередньо під час аварій на греблях, за минуле століття в світі загинуло біля 40 тис. осіб [6]. Одна з найбільших катастроф сталася в 1975 р. в Китаї, коли внаслідок паводку зруйнувалися дві великі греблі на р. Жу в провінції Хенань — гребля Шимантань, та наступна за течією в каскаді — гребля Баньцяо (Рис. 2). Аварія викликала масштабну проривну повінь, в результаті якої, за даними відкритих джерел [7], загинуло понад 26 тис. людей, 145 тис. померло внаслідок голоду й епідемій, було зруйновано 5960 000 будинків. Загалом внаслідок аварії постраждало майже 11 млн. осіб.



Рис. 2. Вид на зруйновану греблю Баньцяо (Китай, 1975 р.) [7]

Повністю виключити можливість аварій на греблях, в тому числі і катастрофічних аварій, напевно чи буде можливо — не тільки в найближчому, але і у віддаленому майбутньому. Наглядним прикладом цьому може слугувати трагедія на Саяно-Шушенській ГЕС, що сталася 17 серпня 2009 р. [8]. Греблі з часом старіють — і не тільки морально, а й фізично, зазнають різних пошкоджень. І хоча більшість таких пошкоджень, як показує практика, не є критичними, не всі вони, а також негативні процеси, що з ними пов'язані, вчасно виявляються, аналізуються та адекватно оцінюються з точки зору можливих наслідків.

В Україні, за даними проф. А.В. Яцика [9], налічується більше 1150 гребель різної висоти, типу, призначення, аварії на яких можуть нести загрозу життю людей.

Згідно з п. 13 "Методики ідентифікації потенційно небезпечних об'єктів" [10] греблі, як напірні гідроспоруди, в Україні відносяться до потенційно небезпечних об'єктів, на яких можуть виникати гідродинамічні аварії — техногенні аварії, що пов'язані з розповсюдженням з великою швидкістю води. Гідродинамічні аварії (ГДА) можуть виникати при руйнуванні (проривах) гребель, дамб, шлюзів, затворів, розгерметизації напірних трактів, при зсувах й обвалах у водосховищах, аварійному спрацюванні водосховищ тощо [11]. Джерелом ГДА можуть бути аварії на різних гідроспорудах, що створюють, підтримують напір чи працюють під напором, тобто виконують функції гребель. До таких гідроспоруд, зокрема, можуть відноситися дамби обвалування водосховищ та гідровідвалів; водозабірні, водопропускні та водоскидні споруди; стояни та підпірні стіни,

що входять до складу напірного фронту; механічне устаткування (затвори); берегоукріплювальні, регуляційні та захисні споруди; напірні стіни та тракти ГЕС, ГАЕС і насосних станцій; напірні гідроспоруди ТЕС і АЕС; греблі та дамби, що входять до складу систем інженерного захисту населених пунктів, сільськогосподарських угідь та господарських об'єктів [10].

Гідродинамічна аварія на греблі супроводжується утворенням так званої хвилі прориву

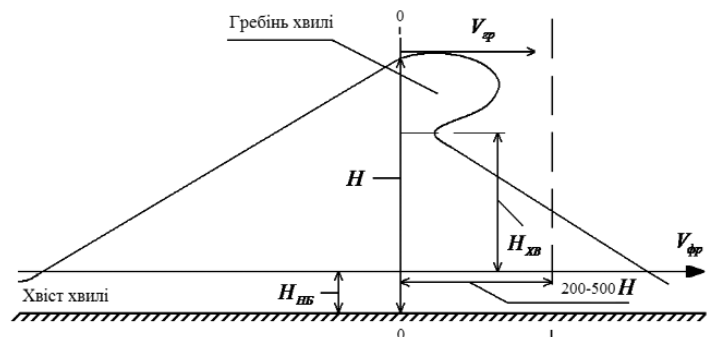


Рис. 3. Хвиля прориву (схема)
 $H_{нб}$ — глибина води у нижньому б'єфі до аварії;
 $V_{гр}$, $V_{фр}$ — швидкості поширення гребеня та фронту хвилі

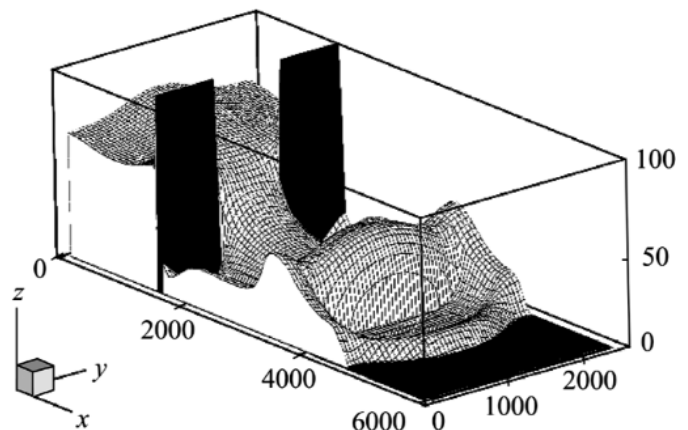


Рис. 4. Чисельне моделювання хвилі прориву в руслі з горизонтальним дном при "вивалі" секції бетонної гравітаційної греблі (за схемою проф. В.В. Пухначова)



Рис. 5. Руйнування греблі Тетон (США, 1976 р.) [12]

[11] (Рис. 3) — хвилі переміщення, висота якої при миттєвому розкритті прорану (наприклад, при руйнуванні бетонної греблі), може сягати до 60% різниці між висотою споруди та глибиною води у нижньому б'єфі (Рис. 4).

При руйнуванні ґрунтової греблі (Рис. 5) формування прорану може тривати кілька годин. При цьому утворюються більш "пологі" хвилі прориву, значну частину об'єму яких складають продукти руйнації греблі та наноси, що відклалися у водосховищі.

В залежності від форми долини ріки характеристики (висота, довжина, швидкість переміщення) хвилі прориву можуть різко змінюватися. В широкій долині хвиля прориву поводить себе як довга хвиля, довжина якої суттєво перевищує глибину потоку. У вузьких місцях долини висота хвилі прориву різко зростає й досягає десятків метрів. Різко збільшується при цьому і швидкість фронту хвилі — до кількох десятків метрів за секунду [11].



Рис. 6. Вид на аркову греблю Вайонт та долину р. П'яве (Північна Італія) до (а — стрілочками показано тіло зсуву) і після (б — верхній, в — нижній б'єфи) аварії 1963 р. [17]



Хвиля прориву утворює проривну повінь з затопленням значних територій, матеріальні збитки від якої можуть перевищувати збитки від природних повеней. Надзвичайно великою може бути й руйнівна здатність хвилі прориву. В матеріалах IX Міжнародного конгресу з великих гребель (Стамбул, 1967 г.) [13] були приведені дані, згідно з якими матеріальні збитки від проривної повені оцінювалися від 1 до 100 млн. дол. США на 1 км² площі затоплень або від 1 до 10 дол. США на 1 м³ води, що проривається в нижній б'єф.

В середньому, за даними ICOLD [13, 14], на 1 дол. вартості греблі може припадати 10 дол. США прямих збитків від її прориву.

Небезпечні ГДА у вигляді так званих хвиль витіснення ("обвальних" хвиль, імпульсних хвиль) [11, 15, 16] виникають також при обвалах та зсувах, сходженні снігових лавин у водосховища, при сейшах (сейсмічних потрясіннях на водосховищах). Одна з найбільш відомих катастроф в історії гідротехнічного будівництва, що сталася 9 жовтня 1963 р. на гірському водосховищі Вайонт (Північна Італія, р. П'яве), була викликана хвилею витіснення.

Водосховище Вайонт було утворено надвисокою арковою греблею висотою 262 м (Рис. 6) [17]. В результаті зсуву у водосховище гірських порід об'ємом, що перевищував 250 млн. м³, утворилася хвиля витіснення, висотою до 100 м, яка обрушилася на береги та перелилася через гребінь греблі. Бетонна гребля при цьому залишилась практично неушкодженою. Однак при аварії було повністю зруйновано 4 населені пункти у верхньому та нижньому б'єфах, загинуло біля 3000 місцевих жителів.

Хвилі витіснення на водосховищах в гірських районах внаслідок обвалів та зсувів неодноразово спостерігалися в Іспанії, Норвегії, США, Швейцарії, Японії та Росії [15].

Хвиля витіснення може проходити значну відстань по водосховищу. При Комському зсуві, що відбувся 26 липня 1969 р. на правому березі Красноярського водосховища в Росії, у серединній його частині, коли у водойму зрушилося 3 млн. м³ ґрунтової маси (0,5 млн. м³ — безпосередньо у воду), утворилася хвиля витіснення висотою до 8 м. На відстані у 18 км від місця зсуву висота хвилі все ще складала 3 м [17].

Особливо небезпечними хвилі витіснення стають на вузьких гірських водосховищах в безпосередній близькості до греблі, населеного пункту тощо. На можливість виникнення таких ГДА на водосховищах слід зважати при будівництві великих гребель в гірських районах Українських Карпат. Як показують натурні дослідження та лабораторні експерименти, висота нахату хвилі витіснення на береговий укіс або укіс ґрунтової греблі, особливо в межуваннях греблі з берегами, може перевищувати власну висоту хвилі в 2–3 й більше разів. Суттєво зменшити енергію хвилі витіснення не здатен навіть льодостав на водосховищі [15, 16].

Аварії на греблях є найбільш масштабними за наслідками аварійними подіями на гідротехнічних спорудах. Ризики від аварії на великій греблі для населення, для господарчої інфраструктури та довкілля, особливо в нижньому б'єфі, можуть бути не меншими, ніж від аварії на атомному чи хімічному виробництві, з якими спеціалісти й громадськість зазвичай пов'язують проблеми техногенного ризику [18]. Греблі, по суті, "концентрують" на собі більшість небезпек, що супроводжують будівництво та експлуатацію гідроспоруд різного призначення у складі гідровузлів, каскадів гідровузлів та інших гідротехнічних систем.

Все це обумовлює актуальність проблеми прогнозування аварій на греблях при вирішенні задач оцінки й забезпечення їх надійності та безпеки.

Як відомо існують два принципові підходи до вирішення задач прогнозування: детерміністичний (динамічний) та імовірнісний (стохастичний).

При детерміністичному підході вважається, що між подією-причиною та подією-наслідком існує строга (функціональна) причинно-наслідкова залежність.

При імовірнісному підході встановлюється імовірнісний зв'язок між подією-причиною і подією-наслідком. При цьому одній і тій же події-причині можуть з різними ймовірностями відповідати різні, в тому числі і протилежні (відбудеться або не відбудеться), події-наслідки.

Детерміністичний підхід до прогнозування вимагає надзвичайно малих (безкінечно малих) масштабів розгляду великої кількості явищ і процесів, що відбуваються на греблях, в їх тілі, осно-

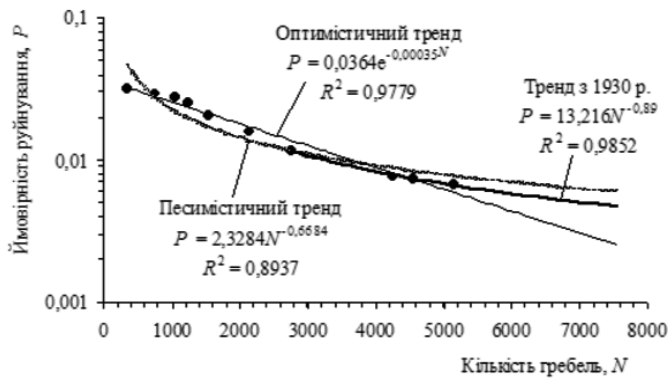


Рис. 7. Модельні тренди очікуваної ймовірності руйнівних аварій на бетонних греблях

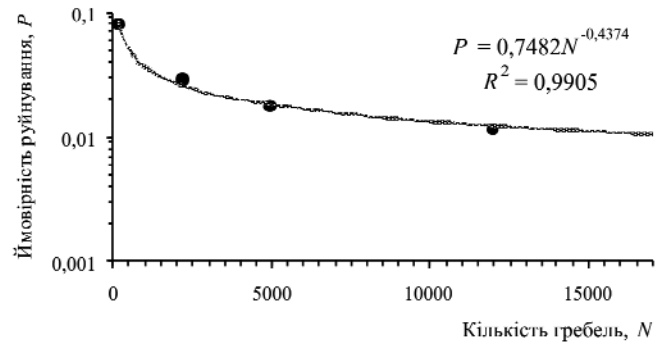


Рис. 8. Тренд очікуваної ймовірності руйнівних аварій на греблях з ґрунтових матеріалів

вах, на поверхнях. Тому його складно реалізувати на практиці. В реальності більш адекватним підходом до прогнозування аварій на греблях бачиться імовірнісний підхід – з врахуванням часткової детермінованості явищ та процесів, що відбуваються на греблях.

На разі пропонуються різні методи імовірнісного прогнозування аварій на технічних об'єктах в рамках оцінки їх надійності та безпеки. Ці методи можуть бути використані і при оцінці ймовірностей аварій на греблях. Найбільш актуальними серед них є [11]:

- статистичні методи;
- методи математичної теорії надійності з використанням як параметричних, так системних моделей надійності технічних об'єктів та систем;
- методи рандомізації традиційних детерміністичних моделей та розрахункових схем споруд, їх конструкцій та основ;
- логіко-імовірнісні методи дерев подій, дерев помилок, дерев відмов тощо.

Корисні для практики оцінки ймовірностей аварій на греблях, особливо з точки зору обґрунтування їх допустимих значень, можна отримати на основі статистичних даних. Однак більш-менш адекватне прогнозування аварій на греблях з використанням статистичних методів може здійснюватися лише щодо сукупності споруд (а portfolio). При цьому найбільш репрезентативні вибіркові сукупності для проведення такого прогнозування, як показує досвід статистичного аналі-

зу аварійності гребель [6, 11, 19], можуть бути сформовані за видом матеріалів, з яких споруди побудовані: з бетону та з ґрунтових матеріалів.

Загалом, результати статистичного аналізу аварійності на греблях свідчать, що відносна частота аварій, особливо руйнівних аварій, з роками, незважаючи на збільшення кількості споруд, поступово знижується. За даними ICOLD ймовірність серйозних аварій на греблях зменшилася з 0,05 на початку 20-го століття до 0,01 на його кінець, тобто за сто років в п'ять разів [6, 11]. Безперечно, що цю тенденцію до зменшення ймовірностей аварій на греблях слід враховувати і коли мова йде про імовірнісні критерії їх надійності й безпеки.

На Рис. 7, 8 представлені результати прогнозування на основі трендів відносних частот руйнівних аварій на греблях протягом їх служби.

Таблиця 1. Результати прогнозування очікуваних щорічних "зважених"* ймовірностей руйнівних аварій на бетонних греблях

Розрахунковий строк служби гідроспоруд	Очікувані ймовірності руйнівних аварій, рік ⁻¹ , при збільшенні кількості гребель у %			
	5	10	20	40
20	$3,21 \cdot 10^{-4}$	$3,06 \cdot 10^{-4}$	$2,76 \cdot 10^{-4}$	$2,31 \cdot 10^{-4}$
50	$1,28 \cdot 10^{-4}$	$1,22 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$9,2 \cdot 10^{-5}$
100	$6,4 \cdot 10^{-5}$	$6,1 \cdot 10^{-5}$	$5,5 \cdot 10^{-5}$	$4,6 \cdot 10^{-5}$
150	$4,3 \cdot 10^{-5}$	$4,1 \cdot 10^{-5}$	$3,7 \cdot 10^{-5}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$

* «Зважування» здійснювалося з врахуванням ваги коефіцієнтів детермінації модельних трендів: оптимістичного, песимістичного та з 1930 р. (див. рис. 7).

Таблиця 2. Результати прогнозування очікуваних щорічних ймовірностей руйнівних аварій на ґрунтових греблях

Розрахунковий строк служби гідроспоруд	Очікувані ймовірності руйнівних аварій, рік ⁻¹ , при збільшенні кількості гребель у %			
	5	10	20	40
20	$6,06 \cdot 10^{-4}$	$5,94 \cdot 10^{-4}$	$5,72 \cdot 10^{-4}$	$5,34 \cdot 10^{-4}$
50	$2,43 \cdot 10^{-4}$	$2,38 \cdot 10^{-4}$	$2,29 \cdot 10^{-4}$	$2,14 \cdot 10^{-4}$
100	$1,21 \cdot 10^{-4}$	$1,19 \cdot 10^{-4}$	$1,14 \cdot 10^{-4}$	$1,07 \cdot 10^{-4}$
150	$8,1 \cdot 10^{-5}$	$7,9 \cdot 10^{-5}$	$7,6 \cdot 10^{-5}$	$7,1 \cdot 10^{-5}$



Прогнозування здійснювалося окремо для бетонних та ґрунтових гребель, в залежності від кількості побудованих споруд.

Результати прогнозування (Рис. 7, 8) підкреслюють тенденцію зменшення ймовірностей аварій на греблях по мірі збільшення їх кількості. Відповідні перспективні значення очікуваних щорічних ймовірностей аварій на бетонних греблях і греблях з ґрунтових матеріалів в залежності від розрахункового строку їх служби наведені в Табл. 1, 2.

Зауважимо, що отримані щорічні ймовірності аварій на греблях (в сукупності) є значно нижчими за ймовірності катастрофічних подій, що допускаються в гірництві ($3 \cdot 10^{-3}$, рік⁻¹) та у великомасштабному будівництві загалом ($2 \cdot 10^{-3}$, рік⁻¹) [11, 20].

Значення ймовірностей, наведені в Табл. 1, 2 можна використати при прогнозуванні ризику аварій для сукупностей гребель (в цілому по країні, в галузі тощо), а також при обґрунтуванні допустимих значень щорічних ймовірностей руйнівних аварій на індивідуальних греблях в імовірнісних критеріях їх надійності й безпеки, наприклад, виду:

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

де $P(A)$ — розрахункове значення щорічної ймовірності аварії на індивідуальній греблі; $[P(A)]$ — допустиме значення ймовірності аварії на греблі, рік⁻¹.

Для оцінки надійності й безпеки індивідуальної греблі за критерієм (1) необхідно здійснити ймовірнісне прогнозування аварії на споруді з врахуванням її індивідуальних особливостей та умов експлуатації тощо. Така задача є більш складною задачею, аніж прогнозування аварії для вибірки споруд, де можливе математичне осереднення, оскільки при цьому, зазвичай, репрезентативні дані про аварійність, які б дозволяли врахувати всі індивідуальні особливості та умови експлуатації споруди, відсутні.

Практика показує, що аварії на греблях відбуваються на різних етапах їх життєвого циклу (при будівництві, введенні в експлуатацію, при постійній експлуатації, виведенні з експлуатації, ремонтах, реконструкції) та визначаються різними чинниками (природними, техногенними, природ-

но-техногенними та різними їх сполученнями). Час виникнення аварії на кожній індивідуальній греблі є подією випадковою, що залежить від багатьох чинників. До аварії на греблі призводять не лише несправності, відмови, дефекти та пошкодження її конструктивних елементів, надмірні навантаження на конструкцію, основу, небезпечні явища та процеси, що відбуваються в тілі споруди, на її поверхнях та в основі. Це можуть бути несправності та відмови інших гідроспоруд гідровузла, різноманітного устаткування та обладнання (механічного, гідроенергетичного, електротехнічного). Місцеположення джерела аварії на кожній індивідуальній греблі, події, явища, процеси або їх сполучення, що можуть ініціювати можливу аварію на греблі, також підкоряються ймовірнісним законам.

Аварії на греблях відбувалися за різними сценаріями, навіть коли причини, тип і конструкція споруди, основа тощо, були схожими. Причинно-наслідкові відношення між різними аварійними подіями та станами, що призводили до аварій на греблях в кожному індивідуальному випадку, часто виявлялися більш складними, щоб їх розглядати в рамках однієї моделі.

По суті задача прогнозування аварії на індивідуальній греблі є слабко структурованою задачею, обтяженою невизначеністю різного генезису, не тільки стохастичної, але і нестохастичної природи, пов'язаної з так званим "людським фактором" [11]. Модельні сценарії при прогнозуванні аварії на індивідуальній греблі об'єктивно не можуть розглядатися як статистичні факти, що мали місце в минулому. Скоріше мова йде про гіпотетичні сценарії у формі певних логічних, а інколи і суб'єктивних, припущень.

Все це ускладнює задачу прогнозування аварії на індивідуальній греблі.

Для вирішення задачі, в таких випадках, використовують методи системного аналізу: починаючи від ідентифікації аварійних подій та розробки гіпотетичних сценаріїв аварії на споруді, закінчуючи синтезом оцінок ймовірностей їх реалізації.

Сценарний підхід до моделювання аварій дозволяє реалізувати основну мету системного аналізу, яка полягає в структуризації задачі, розкритті невизначеності прогнозування.

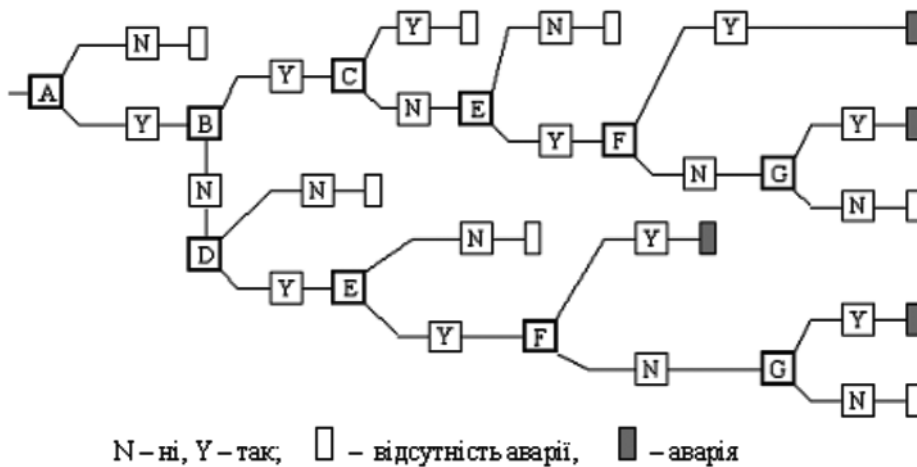


Рис. 9. Приклад побудови дерева подій при прогнозуванні аварії на ґрунтовій греблі в результаті виникнення тріщини в асфальтобетонній діафрагмі [14]

(A) – тріщина в діафрагмі; (B) – суфозія в тілі греблі; (C) – ефективне втручання і належний контроль; (D) – обводнення низової призми і порушення стійкості низового укосу греблі; (E) – руйнування діафрагми; (F) – прорив греблі; (G) – прорив греблі внаслідок перевищення допустимого рівня води у верхньому б'єфі

При сценарному моделюванні задачу прогнозування аварії на греблі можна цілеспрямовано звести до "більш структурованих" задач прогнозування за окремими сценаріями її виникнення й розвитку, які можуть описуватися простішими математичними моделями з меншим числом визначальних факторів та параметрів. Сценарний підхід до моделювання аварій дозволяє поєднати можливості різних методів та моделей; здійснити синтез імовірнісних оцінок, отриманих різними методами за окремими сценаріями.

В рамках сценарного підходу до прогнозування аварій на греблі, завдяки структуризації задачі, простіше забезпечити й адекватність даних про зміни стану, умов експлуатації споруди, математичних моделей явищ і процесів, що відбуваються в тілі споруди, в її основі, на інших спорудах гідровузла, оцінок ймовірностей виникнення аварійних подій та станів, що здатні ініціювати аварійні процеси, а також логічних та суб'єктивних припущень про гіпотетичні сценарії розвитку аварійних подій з врахуванням їх ієрархії та взаємодії.

При оцінці ймовірностей реалізації аварійних подій і станів, що здатні ініціювати аварійні процеси на греблі, можуть застосовуватися різні методи, в тому числі і статистичні – при наявності репрезентативних вибірок даних щодо реалізації відповідних подій і станів.

В найпростішому випадку повна (безумовна, абсолютна) ймовірність настання аварійної події як події-наслідку за деякої умови (події-причини) визначиться формулою повної ймовірності:

$$P(A, C) = P(C) \cdot P(A|C), \quad (2)$$

де $P(C) = P(X_C \geq x_C)$ – забезпеченість (ймовірність перевищення) деякої кількісної характеристики події C – ймовірність того, що випадкова величина X_C , якою описується відповідна кількісна характеристика випадкової події C , перевищить деяке допустиме значення x_C ; $P(A|C) = P(Y_{A,C} \leq y_{A,C})$ – умовна ймовірність реалізації події-наслідку A в результаті події-причини C , що встановлюється як інтегральна функція ймовірності деякого

допустимого значення $y_{A,C}$ кількісної характеристики $Y_{A,C}$ події A за умови C .

Якщо прогнозується розвиток аварійних подій за деяким сценарієм S без розгалужень, то ймовірність $P(S, A)$ відповідного сценарію, ініційованого початковою подією A , буде:

$$P(S, A) = P_S(A) \cdot P_S(B|A) \cdot P_S(C|B) \cdot P_S(D|C) \cdot \dots, \quad (3)$$

де $P_S(A)$ – ймовірність реалізації деякої початкової події A (або відповідного початкового стану), що здатна ініціювати сценарій S ; $P_S(B|A)$, $P_S(C|B)$, $P_S(D|C) \dots$ – умовні ймовірності переходу від події A до події B , від події B до події C , від події C до події D і т. д., з охопленням всього ланцюжка подій (станів), що складають сценарій S .

Початкова подія може набувати різних значень (наприклад, землетруси можуть мати різну інтенсивність, паводки – різні максимальні витрати) тощо. У цьому випадку формується сценарій з розгалуженнями (підсценаріями), де початкова подія A представляється повною групою подій A_i , $P_S = \prod_{i=1}^n P_i$, кожній з яких відповідає свій

підсценарій. Повна ймовірність розвитку аварійних подій за сценарієм з розгалуженнями при цьому буде:

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

де $P_S(S, A_i)$ – ймовірність реалізації i -го підсценарію.

Умовою формування повної групи подій, як відомо, є їх несумісність. Для несумісних подій



ймовірність об'єднання дорівнює сумі ймовірностей, тобто, ймовірність події A :

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

де $P_S(A_i)$ – ймовірність реалізації події A_i , що здатна ініціювати сценарій S .

В більш загальному випадку будується бінарне дерево подій, в якому відображаються як сценарії, що ведуть до аварії, так і сценарії виходу з аварійних ситуацій. Побудова дерева подій здійснюється на основі прямих логічних міркувань, наприклад, спрямованих на розв'язання проблеми: "Що буде, якщо в діафрагмі з асфальтобетону в тілі ґрунтової греблі виникне тріщина?" (Рис. 9).

Імовірнісні розрахунки дерева подій здійснюються з врахуванням несумісності розгалужень, що ведуть до аварії та до виходу з аварійної ситуації.

Для синтезу ймовірностей виникнення різних аварійних подій на греблі, сценаріїв аварій тощо найзручніше використовувати метод дерев відмов та несправностей [11].

Згідно з методом дерев відмов та несправностей ймовірності аварійних подій (станів), що є наслідками ("виходи"), встановлюються за відомими ймовірностями "входів" в залежності від логічних операторів, що моделюють логіку причинно-наслідкових зв'язків між "входами" та "виходами". Найчастіше використовуються наступні логічні оператори: "АБО" (логічна операція "диз'юнкція"); "І" (логічна операція "кон'юнкція"); "ВИКЛЮЧНЕ АБО" ("виключна диз'юнкція"); "ЗАБОРОНА" (логічна операція "імплікація") [11]. За їх допомогою можна відобразити логіку більшості причинно-наслідкових зв'язків між подіями, що відбуваються на греблях, та здійснити логіко-імовірнісне прогнозування, як різних сценаріїв виникнення й розвитку аварії на греблі, так і аварії в цілому (Табл. 3).

Метод дерев відмов і несправностей дозволяє виконати синтез ймовірностей аварійних подій, отриманих за допомогою різних методів, враховувати складність ієрархічної структури гребель як систем, гідровузлів як систем тощо [21]. В останні

роки цей метод набуває особливої популярності при імовірнісному прогнозуванні аварій на греблях. При реалізації методу ймовірності базових (початкових) аварійних подій і станів можуть встановлюватися незалежно від поставленої задачі системного моделювання. При визначенні базових аварійних подій і станів легко реалізувати принципи ієрархії і найменшої взаємодії. При цьому відносини ієрархії між подіями можуть визначатися в залежності від індивідуальних особливостей споруди, умов її експлуатації, суб'єктивних припущень щодо аварійних подій та пріоритетів. При надмірній складності ієрархічної структури споруди як системи, гідровузла як системи, може використовуватися системно-інтегруючий підхід (агрегування). При цьому більш деталізовані події й стани цілеспрямовано інтегруються у більш загальні і менш деталізовані події й стани, що надалі вже вважаються базовими. Для реалізації принципу найменшої взаємодії в системі достатньо підбирати базові аварійні події серед стохастично незалежних подій. В цьому випадку взаємодія між базовими подіями і станами не ускладнює задачі моделювання системних зв'язків та причинно-наслідкових відносин між аварійними подіями, що встановлюються при декомпозиції греблі, гідровузла тощо на системні одиниці.

Імовірнісне прогнозування аварій на індивідуальній греблі дозволяє:

- 1) оцінити надійність та безпеку споруди за ймовірнісним критерієм допустимого ризику (1);
- 2) оцінити сукупний ризик, пов'язаний з будівництвом та експлуатацією греблі;
- 3) здійснити ідентифікацію найбільш ймовір-

Таблиця 3. Формули для розрахунку ймовірностей подій-наслідків дерева відмов і несправностей

Найменування оператора	Розрахункові формули для оцінки ймовірностей події-наслідку A в залежності від подій-причин B та C
«АБО»	$P(A) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P(B_i)), \quad (6)$ n – загальна кількість i -х незалежних «вхідних» подій B_i
«ВИКЛЮЧНЕ АБО»	$P(A) = \sum_{i=1}^n P(B_i), \quad (7)$ n – загальна кількість i -х несумісних «вхідних» подій
«І»	$P = \prod_{i=1}^n P_i, \quad (8)$ n – загальна кількість i -х незалежних «вхідних» подій
«ЗАБОРОНА»	$P(A) = P(B) P(C), \quad (9)$
В формулах (6)-(9) ймовірності: $P(B_i)$ – ймовірність i -ї події на «вході» (події-причини B); $P(C)$ – події-умови C ; $P(A)$ – події-наслідку A	



них причин, умов та сценаріїв розвитку аварійних подій на споруді;

4) проаналізувати вплив на надійність та безпеку греблі змін умов будівництва, експлуатації споруди, гідровузла в цілому тощо;

5) провести аналіз ефективності заходів, направлених на забезпечення надійності та безпеки споруди [22].

Все це в комплексі сприятиме підвищенню надійності й безпеки греблі, мінімізації ризику аварій на греблі в контексті зменшення ймовірності виникнення аварії на споруді на різних етапах її життєвого циклу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Беллендир Е.Н., Ивашищев Д.А., Стефанишин Д.В и др. Вероятностные методы оценки надежности грунтовых гидротехнических сооружений// – СПб.: В 2-х томах. Т. 1. Изд-во ОАО "ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева", 2003. – 553 с.
2. http://en.wikipedia.org/wiki/Proserpina_Dam
3. http://en.wikipedia.org/wiki/Cornalvo_Dam
4. *Гидроэнергетика и окружающая среда/ Под общ. ред. Ю. Ландау и Л.А. Сиренко.* – К.: Либра, 2004. – 484 с.
5. Hoeg K. Dams: essential infrastructure for future water management// Hydropower and Dams. 2001. World Atlas and Industry Guide. Aqua-Media International, UK. – 37 p.
6. ICOLD Bulletin 99. Dam Failures: Statistical Analysis. – Paris, 1995.
7. <http://energyfuture.ru/ssg-chin>
8. Мищенко Б.И. Причины аварии на Саяно-Шушенской ГЭС, вытекающие из анализа Акта технического расследования// Гидроэнергетика Украины. – 2010. – № 3. – С. 25–31.
9. Яцик А.В. Екологічна безпека в Україні. – К.: Генеза, 2001. – 216 с.
10. 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.
11. Векслер А.Б., Ивашищев Д.А., Стефанишин Д.В. Надежность, социальная и экологическая безопасность гидротехнических объектов: оценка риска и принятие решений. – СПб.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2002. – 591 с.
12. http://en.wikipedia.org/wiki/Teton_Dam
13. *The behavior and deterioration of dams.* Trans. of the 9-th Int. Congress on Large Dams. Vol. 3. Q. 34. Istanbul-Turkey. 1967.
14. *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.
15. Performance of reservoirs. Trans. of the 19-th Int. Congress on Large Dams. Vol. 3. Q. 74. Florence-Italy. 1997.
16. Мамрадзе Г.П., Гвелесиани Т.Л., Джинджихашвили Г.Я. Прогнозирование волн в водохранилищах при сейсмических воздействиях. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
17. Кусковский В.С. Геоэкология береговых зон глубоководных водохранилищ Алтае-Саянской области (АСО)// Сибирский экологический журнал. – 2 (2000). – С. 123–134.
18. Маршалл В. Основные опасности химических производств. – М.: Мир, 1989. – 671 с.
19. Стефанишин Д.В. Оцінка живучості гребель за результатами статистичного аналізу їх аварійності// Вісник НУВГП. Зб. наук. праць. Вип. 1 (49). Рівне: НУВГП, 2010. – С. 42–48.
20. Лисиченко Г.В., Забулонов Ю.Л., Хміль Г.А. Природний, техногенний та екологічний ризики: аналіз, оцінка, управління. – Київ.: Наукова Думка, 2008. – 542 с.
21. Стефанишин Д.В., Жеребятъев О.В. Оцінка надійності ґрунтових гідротехнічних споруд Дністровської ГАЕС// Вісник НУВГП. Зб. наукових праць. Вип. 3 (47). Частина 1. Рівне: НУВГП, 2009. – С.520–530.
22. Стефанишин Д.В. Вибрані задачі оцінки ризику та прийняття рішень за умов стохастичної невизначеності. –К.: Азимут-Україна, 2009. – 104 с.

© Стефанишин Д.В., 2011

