

УДК 627.132

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

ДОСВІД І ПЕРСПЕКТИВИ ІМОВІРНІСНОГО АНАЛІЗУ НАДІЙНОСТІ Й БЕЗПЕКИ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД ГЕС І ГАЕС

Показано сучасний стан та перспективи імовірнісного аналізу надійності й безпеки гідротехнічних споруд ГЕС і ГАЕС.

Ключові слова: надійність, гідротехнічні споруди, ГЕС, ГАЕС.

Доцільність імовірнісного аналізу надійності і безпеки гідротехнічних споруд ГЕС і ГАЕС обумовлюється наступними двома основними причинами: 1) різноманітням визначальних факторів і параметрів, мінливістю та невизначеністю даних про навантаження і впливи, характеристики властивостей матеріалів конструкцій, ґрунтів основ тощо; 2) складною структурою, організацією та взаємодією з навколишнім середовищем гідроспоруд як систем, що за своєю суттю є синергетичними системами з невизначеною поведінкою.

Проф. Лонд, президент Міжнародної комісії з великих гребель (ICOLD) в 70-80 рр. минулого століття, на 4-тому Міжнародному конгресі з механіки скельних порід [1], що відбувся в 1979 р. в Швейцарії, про доцільність використання імовірнісних моделей та методів при розрахунках надійності гідроспоруд та їх основ сказав наступне: «Велика кількість параметрів, невизначеність їх чисельних значень та їх мінливість в просторі та часі, приводять до необхідності проведення імовірнісного визначення меж надійності. На разі це вже не викликає сумнівів. Інженери мають визнати, що неможливо об'єктивно оцінити надійність природного середовища з невизначеними й диспергованими параметрами на основі детерміністичних моделей. Інженери не мають іншого виходу, окрім параметричного аналізу проблеми з метою визначення найбільш значущих параметрів, які потребують більш точного вимірювання. Цей параметричний аналіз має базуватися на імовірнісних моделях».

Ще перед тим як розпочинати моделювання і аналіз надійності й безпеки гідроспоруди слід задатись питанням наскільки взагалі можливо подолати невизначеність гідрологічних, інженерно-геологічних,

геотехнічних, сейсмологічних, кліматичних та інших даних, що використовуються при її розрахунках на стійкість, міцність, довговічність тощо на основі детерміністичних моделей, щоб забезпечити таким чином абсолютну її надійність і безпеку.

Слід також задаватись і питанням наскільки можливо прогнозувати поведінку індивідуальної гідроспороди в рамках детерміністичного підходу, згідно з яким між подіями-причинами та подіями-наслідками мають встановлюватися однозначні причинно-наслідкові залежності, якщо на надійність гідроспороди, в аспекті її системної організації, *все може впливати на все*. Пуанкаре про системи, які відносять до складних синергетичних систем, сказав, що «поведінка системи, яка складається з частин, що сильно між собою взаємодіють, непередбачувана». Тому з точки зору досягнення мети прогнозування поведінки гідроспороди як системи ми можемо говорити лише про часткову детермінованість явищ та процесів, що відбуваються в навколишньому середовищі і на споруді, і, відповідно, не можемо відкидати наявність імовірнісних зв'язків між різними причинами і наслідками.

Імовірнісні методи аналізу надійності і безпеки технічних об'єктів і систем, в тому числі і інженерних споруд різного типу і призначення, конструкцій, основ, розробляються вже досить давно [2, 3]. В теоретичному плані це відбувається в рамках двох прикладних дисциплін – теорії надійності і теорії ризику, що є розділами загальної теорії систем. Серед загальних підходів, що розвиваються в теорії надійності і в теорії ризику, можна виділити два відносно самостійних напрямки: *параметричний* і *системний*. В останній час йде процес поступового злиття цих двох напрямків в єдину галузь знань та формування на цій основі *загальної теорії надійності* технічних об'єктів і систем [3]. В практичному сенсі параметричний і системний підходи при аналізі надійності і безпеки гідроспоруд можуть органічно взаємодоповнювати один одного. Це відбувається таким чином, що результати параметричних досліджень на основі синтезу відповідних оцінок можуть бути використані при моделюванні системної надійності й безпеки гідроспороди, а результати системних досліджень дозволяють спростити і оптимізувати параметричне моделювання її надійності й безпеки [3, 4].

Ще в 1926 р., можливо вперше, М. Майер в Німеччині, а в 1929 р. Н.Ф. Хоціалов в СРСР, запропонували вести проектування конструкцій з врахуванням мінливості основних їх параметрів і характеристик матеріалів, виходячи з оптимальної суми капітальних затрат та збитків від можливих аварій з врахуванням ймовірності «дефектних відхилень». Подальший розвиток теорії надійності, в 30-40-х роках минулого століття, пов'язується з радіоелектронікою, електротехнікою, раке-

тною індустрією. Перші розробки сучасних математичних моделей системної надійності були виконані в період другої світової війни в Німеччині групою Вернера фон Брауна, що займалася розробкою ракет «ФАУ». Запрошений в цю групу математик Роберт Люссер виявив, що прислів'я «Міцність ланцюга дорівнює міцності його найслабшої ланки» не придатне для технічних систем, в яких відсутня надмірність, тобто резервні компоненти, бо такі об'єкти можуть відмовляти спонтанно внаслідок випадкового виходу з ладу будь-якого з компонентів. Поштовх до інтенсивного розвитку теорії надійності в 50-х роках минулого століття дало цивільне авіабудування, коли збільшилась кількість пасажирських авіаперевезень і зросла кількість жертв авіакатастроф. В цей же період проявився інтерес до надійності в космічній та ядерній індустріях. Зокрема в 1961 р. Ватсоном в рамках оцінки параметрів надійності системи керування пусковою установкою для ракет «Мінітмен» було розроблено концепцію аналізу надійності, яка ґрунтується на використанні *дерев помилок*. На основі цієї концепції згодом розвинувся потужний напрямок логіко-імовірнісного моделювання надійності і безпеки технічних об'єктів і систем методами дерев несправностей, дерев подій, дерев рішень тощо, який найбільш популяризувався в ядерній енергетиці [5].

Значний вклад в теорію надійності в ці ж роки внесла українська математична школа, яку очолював акад. В.А. Гнеденко [6]. У цьому десятиріччі для опису надійності технічних об'єктів почали використовувати такі спеціалізовані терміни як «інтенсивність відмов», «очікуваний строк служби», «імовірність безвідмовної роботи» тощо. Надалі важливу роль у становленні імовірнісного підходу до аналізу надійності і безпеки технічних об'єктів і систем різного типу і призначення відіграли роботи В.В. Болотіна [7]. В будівельній справі в цьому напрямку особливо слід відзначити роботи А.Р. Ржаніцина [8], а при розрахунках надійності гідроспоруд – фундаментальні роботи Ц.С. Мірцхулави [9].

З вісімдесятих років минулого століття імовірнісні методи аналізу надійності і безпеки гідроспоруд стали предметом обговорення на численних міжнародних форумах, в тому числі і на форумах, що проводилися під егідою ICOLD. Серед найбільш відомих варто виділити: 1) 20-й Конгрес Міжнародної асоціації з гідравлічних досліджень в Москві (СРСР, 1983 р.); 2) Міжнародну конференцію з безпеки гребель в Коїмбрі (Португалія, 1984 р.); 3) Міжнародний семінар з оцінки безпеки гребель у Гріндельвальді (Швейцарія, 1993); 4) 18-й Конгрес ICOLD у Дурбані (ПАР, 1994 р.), де серед інших розглядалося питання 68 «Оцінка безпеки й удосконалення гребель»; 5) Міжнародну конферен-

цію в Делі «Оцінка безпеки гребель» (Індія, 1996 р.); 6) Міжнародну конференцію в Онтаріо «Сучасний стан питання і досягнення в області забезпечення безпеки гребель» (Канада, 1996 р.); 7) Міжнародний семінар «Оцінка безпеки гребель на основі аналізу ризику» у Трондгеймі (Норвегія, 1997 р.); 8) 19-й конгрес ICOLD у Флоренції (Італія, 1997 р.), де розглядалися питання 72 «Інноваційне фінансування проектів, включаючи греблі» і 75 «Інциденти й аварії на греблях»; 9) Міжнародну конференцію в Буффало «Керування ризиками при проектуванні, забезпеченні безпеки й експлуатації» (США, 1998 р.); 10) Міжнародний симпозіум у Барселоні «Нові тенденції і посібники з забезпечення безпеки гребель» (Іспанія, 1998 р.). В 1995 р. вийшов у світ спеціальний Бюлетень ICOLD (число 99) «Аварії гребель: Статистичний аналіз» [10]. Найбільш концентровано інтерес міжнародного інженерного співтовариства до проблем імовірнісного аналізу надійності і безпеки гідроспоруд був представлений на 20-му конгресі ICOLD у Пекіні (Китай, 2000 р.), де вперше в історії ICOLD було винесене на обговорення окреме питання 76 «Використання аналізу ризику при прийнятті рішень та забезпеченні безпеки гребель» [11]. Було розглянуто 48 спеціалізованих доповідей з 22 країн, що стосувалися різних аспектів імовірнісного прогнозування перебігу і наслідків аварій на гідроспорудах.

Слід зазначити, що в останні роки жоден значимий міжнародний науково-технічний захід в області гідротехніки, гідроенергетики і водного господарства не обходиться без доповідей, у яких не розглядалися б проблеми імовірнісного аналізу надійності і безпеки гідроспоруд і не давалися б рекомендації з практичного застосування результатів цих досліджень при їх проектуванні, будівництві й експлуатації.

Вперше на практиці імовірнісні методи при аналізі надійності гідроспоруд застосували голландські інженери – при проектуванні і розрахунках дамб захисту від повеней у Східному Шельде в 1976 р., а пізніше і при проектуванні хвилеломів і дамб захисту від повеней у Нюве Ватервег [11]. Про те наскільки корисними імовірнісні методи можуть бути при оцінці і обґрунтуванні надійності і безпеки гідроспоруд ГЕС і ГАЕС можуть засвідчити також і результати наших досліджень, що проводилися протягом останніх 15 років.

Імовірнісний аналіз проводився з різною метою: декларування безпеки гідроспоруд; кількісної оцінки ризику збитків від аварій; порівняння варіантів з врахуванням ризику; визначення найбільш ймовірних або обтяжених найбільшим ризиком збитків сценаріїв аварій на напірних гідроспорудах; ідентифікації визначальних факторів і параметрів.

Зокрема в різні роки нами виконувався імовірнісний аналіз надійності і безпеки гідроспоруд таких, добре відомих широкому загалу, ГЕС і ГАЕС: Бурейської, Мамаканської, Саратовської, Рогунської, Саяно-Шушенської і Майнської, Нижньо-Бурейської гідроелектростанцій, Зарамагської ГЕС-1, Богучанської ГЕС, Ленінградської і Дністровської ГАЕС [12-18]. Результати досліджень використовувались проектними (ВАТ «Ленгідропроєкт», м. С.-Петербург; ПАТ «Укргідропроект», м. Харків) та науково-дослідними (ВАТ «ВНДІП ім. Б.Є. Веденєєва) організаціями.

Найбільш повно і можливо вперше в світовій практиці в таких об'ємах імовірнісний аналіз надійності і безпеки гідроспоруд проводиться при проектуванні і будівництві Бурейської ГЕС, яка в 2010 р. була введена в постійну експлуатацію (рис. 1).



Рис. 1. Бурейська ГЕС на р. Бурейя (Російська Федерація, Амурська область).

Максимальна проектна висота Бурейської греблі, гравітаційного типу, частина якої виконана з укоченого бетону, складає 140 м, довжина на відмітці гребеня 719 м. Гребля створює водосховище повним об'ємом 20,94 км³

Імовірнісний аналіз надійності і безпеки гідроспоруд ГЕС виконувався: 1) на стадії проекту (1995 р.); 2) для чотирьох пускових комплексів ГЕС, перший з яких передбачав введення в 2003 р. в тимчасову експлуатацію двох гідроагрегатів (№ 1 і № 2), другий – в 2004 р. – агрегату № 3, третій – в 2005 р. – агрегату № 4, четвертий – в 2007 р. – останніх двох агрегатів (№ 5 і № 6) з постійними турбінами; 3) при введенні гідроспоруд ГЕС в постійну експлуатацію (2008 р.) [12]. Дослідження проводилися з метою декларування безпеки Бурейської греблі під час її проектування, будівництва, тимчасової та постійної експлуатації гідроагрегатів Бурейської ГЕС. При цьому оцінювалися ймовірності виникнення гідродинамічних аварій внаслідок порушення цілісності напірного фронту гідровузла.

Однією з найбільш важливих проблем, що була вирішена завдяки імовірнісному аналізу надійності і безпеки гідроспоруд Бурейської ГЕС при будівництві і тимчасовій експлуатації була проблема можли-

вого негативного впливу на безпеку змін в проекті, що стосувалися тимчасових будівельних водоскидів. Спочатку проектом розглядався варіант пропуску будівельних витрат води до 2004 р. розрахункового паводку 1% забезпеченості через десять водоскидних трактів, виконаних у вигляді труб в тілі бетонної греблі. При нарощенні греблі і збільшенні напору два тракти мали «заглушались» і водоскид мав працювати з вісьмома трактами. З метою скорочення термінів будівництва та прискорення введення в дію перших трьох агрегатів Бурейської ГЕС було прийнято рішення відмовитися від варіанта з десятьма трактами будівельного водоскиду на користь варіанта з вісьмома трактами, з одночасним збільшенням протипаводкового об'єму в тимчасовому водосховищі. В результаті імовірнісних розрахунків було встановлено, що варіант з водоскидом у складі восьми трактів є більш надійним і безпечним варіантом, ніж варіанти з десятьма та шістьма трактами.

Імовірнісний аналіз надійності і безпеки бетонної гравітаційної греблі Мамаканської ГЕС проводився в рамках декларування безпеки ГЕС в 2002 і 2008 рр. Було встановлено найбільш ймовірний сценарій руйнування греблі «Зсув частини секції бетонної греблі по горизонтальному шву між блоками», якому відповідає 50% внеску в повну ймовірність аварії на гідровузлі. При цьому, більше 35% від повної ймовірності аварії пов'язується з можливістю реалізації вищенаведеного сценарію вже при незначному перевищенні нормального підпірного рівня, що може свідчити про відсутність значних резервів надійності греблі.

При імовірнісному аналізі надійності і безпеки гідроспоруд Саратовської ГЕС враховувалася значна загальна протяжність напірного фронту гідровузла, яка складає 8516 м, та наявність у його складі трьох гідроспоруд: руслової земляної греблі, максимальною висотою 40 м, протяжністю по гребеню 1260 м; будівлі ГЕС висотою ~ 50 м, протяжністю 1136 м, у складі 24 секцій (22 агрегатних та двох монтажних площадок), суміщених з глибинними водоскидами (всього по фронту 51 водоскид); лівобережної земляної дамби, яка відгороджує м. Балаково від водосховища, максимальною висотою споруди 23 м та протяжністю 6120 м. Однією з задач, що при цьому вирішувалися, була задача ранжирування гідроспоруд за ризиком аварії з метою встановлення пріоритетних завдань перед персоналом щодо додаткових засобів контролю, проведення профілактичних заходів та ремонтних робіт. В результаті аналізу було виявлено «слабку ланку» гідровузла – лівобережну дамбу (біля 45% від повної ймовірності аварії на гідровузлі), та найбільш небезпечну форму потенційної аварії – порушення фільтра-

ційної міцності (біля 60% від повної ймовірності аварії на дамбі) [13].

Імовірнісний аналіз надійності і безпеки Рогунського гідровузла здійснювався з метою порівняння двох варіантів греблі з врахуванням ризику в рамках розробки аналітичної записки для переговорів між російською алюмінієвою Компанією «Русал», яка брала на себе зобов'язання щодо інвестування в будівництво греблі й майбутньої ГЕС, та урядом Таджикистану. Таджикистан наполягав на будівництві в Рогунському створі кам'яно-земляної греблі висотою 335 м, з ГЕС потужністю 3,6 тис. МВт, а Русал та його консультант – німецька проектно-інжинірингова фірма Lahmeyer – схилилися до будівництва аркової греблі висотою 280 м, з ГЕС потужністю 2,4 тис. МВт. В результаті проведених досліджень було встановлено, що варіант будівництва в Рогунському створі аркової греблі висотою 280 м буде обтяжений меншим ризиком в порівнянні з варіантом кам'яно-земляної греблі висотою 335 м за наступних умов: 1) якщо повна ймовірність руйнування кам'яно-земляної греблі при встановлених проектами споруд термінах будівництва та співвідношенні очікуваних сукупних ефектів перевищуватиме ймовірність аварії на арковій греблі, пов'язаної з порушенням стійкості берегових упорів або фільтраційною ерозією в основі; 2) якщо термін будівництва кам'яно-земляної греблі перевищуватиме 14 років в порівнянні з 10 річним терміном будівництва аркової греблі при встановлених розрахунками значеннях ймовірностей руйнування споруд та проектному співвідношенні очікуваних сукупних ефектів; 3) якщо очікуваний сукупний ефект від будівництва кам'яно-земляної греблі не перевищуватиме відповідний ефект від аркової греблі висотою 280 м більше ніж в 1,66 разів при проектних термінах будівництва та встановлених розрахунками значеннях ймовірностей руйнування споруд.

Крім того в ході досліджень були визначені можливі способи зниження сукупного ризику для варіанта кам'яно-земляної греблі висотою 335 м в порівнянні з варіантом аркової греблі висотою 280 м. Варіант кам'яно-земляної греблі висотою 335 м в Рогунському створі може стати менш обтяженим ризиком в порівнянні з варіантом аркової греблі висотою 280 м при зниженні одночасно ймовірності аварії на кам'яно-земляній греблі до величини, що близька двом ймовірностям аварії на арковій греблі, і терміну будівництва кам'яно-земляної греблі – до 18 років, та при співвідношенні сукупних ефектів (енергетика + іригація) як 100% з кам'яно-земляною, висотою 335 м, до 70% з арковою, висотою 280 м, греблями [14].

Важливі результати були отримані і при імовірнісному аналізі надійності і безпеки гідроенергетичного комплексу (ГЕК) «Саяно-

Шушенська ГЕС – Майнська ГЕС». Було встановлено, що при станах гідроспоруд близьких до граничних при основному і аварійному сполученнях навантажень, ймовірність сценарію аварії «Пошкодження й вихід з ладу гідроагрегату Саяно-Шушенської ГЕС внаслідок розгерметизації проточної частини. Надходження води в машинний зал та його затоплення» (один з модельних сценаріїв гідродинамічної аварії на ГЕК, затверджений в такому формулюванні в якості розрахункового на Технічній нараді у ВАТ «Ленгідропроєкт» в листопаді 2009 р.) на момент аварії, що сталася 17.08.2009 р., складала практично 99% від повної ймовірності гідродинамічної аварії на ГЕК. Досить високою доля цього ж сценарію залишалась і на момент декларування безпеки ГЕК на період тимчасової експлуатації берегового водоскиду й відновлених агрегатів Саяно-Шушенської ГЕС на період з 01.06.2010 до 01.10.2011 р. (до 70% від повної ймовірності аварії на ГЕК). В цілому ймовірність гідродинамічної аварії на Саяно-Шушенській ГЕС на момент катастрофи виявилася в 350 разів більшою ніж на Майнській ГЕС і у 8 разів більшою – на період декларування. Слід однак зауважити, що незважаючи на те, що ймовірності можливого порушення загальної стійкості і міцності тіла арково-гравітаційної греблі Саяно-Шушенської ГЕС при основному і аварійному сполученнях навантажень припускалися такими, що відповідають граничним станам споруди, ймовірність руйнування греблі виявилася на порядок меншою допустимого значення, встановленого російськими нормами [19]. Це може свідчити про достатньо високі резерви надійності арково-гравітаційної греблі Саяно-Шушенської ГЕС.

Імовірнісний аналіз надійності і безпеки гідроспоруд Нижньо-Бурейської ГЕС виконувався в ІТГП НАНУ в 2010 р. згідно з договором із ВАТ «Ленгідропроєкт» (м. Санкт-Петербург, Росія) в рамках НДР на тему «Оцінка ризику аварій на гідротехнічних спорудах Нижньо-Бурейської ГЕС». Всього було проаналізовано шість аварійних ситуацій на ГЕС, 30 різних сценаріїв розвитку аварії, в тому числі 52 підсценарії при різних сполученнях навантажень, з яких: 2 сценарії переповнення водосховища (один з них внаслідок аварії на Бурейській ГЕС); по 4 сценарії і 8 підсценаріїв розвитку аварії в межах правобережної бетонної греблі, монтажної площадки і станційної частини; 7 сценаріїв з 12 підсценаріями розвитку аварії в межах водозливної греблі; 9 сценаріїв з 16 підсценаріями розвитку аварії в межах руслової земляної греблі. Імовірнісний підхід до прогнозування можливої аварії на Нижньо-Бурейській ГЕС дозволив синтезувати оцінки ймовірностей аварій за всіма підсценаріями, сценаріями і аварійними ситуаціями. Було виявлено, що найбільш ймовірною аварією на Нижньо-