

Є. О. Шахов, В. В. Лахай, Є. О. Александров, Ю. А. Сапожников

Акціонерне товариство «Київський науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут “Енергопроект”»,
просп. Берестейський, 4, Київ, 01135, Україна

Розробка імовірнісного аналізу безпеки для багатоблокових АЕС на прикладі Хмельницької АЕС. Етапи 1 та 2

Ключові слова:

ядерна безпека,
імовірнісний аналіз безпеки,
багатоблоковість,
Хмельницька АЕС

Розглядаються результати перших двох етапів дослідження з розробки імовірнісних аналізів безпеки (ІАБ) для багатоблокових (ББ) атомних електростанцій на прикладі Хмельницької АЕС (ХАЕС). На етапі 1 виконано аналіз відповідності чинної нормативно-правової бази України завданням ББ ІАБ. Виявлено, що чинні нормативні документи лише частково охоплюють аспекти оцінки ризиків¹ для АЕС із кількома енергоблоками, що вказує на необхідність їхнього подальшого удосконалення. На етапі 2 виконано оновлення інтегральних імовірнісних моделей (ІМ) енергоблоків № 1 та № 2 ХАЕС відповідно до обраної «дати замороження». Актуалізовані дані щодо параметрів надійності обладнання, частоти вихідних подій тощо. Оновлені ІМ використані для створення єдиної інтегральної імовірнісної моделі майданчика ХАЕС, що дало змогу на наступних етапах дослідження оцінити ризики від аварій для ББ АЕС.

Вступ

На сьогодні для всіх АЕС України в рамках виконання імовірнісних аналізів безпеки (ІАБ) розглядається перелік постульованих вихідних подій, внутрішніх та зовнішніх екстремальних впливів з урахуванням чинних вимог норм, правил та стандартів з ядерної та радіаційної безпеки (ЯРБ) України щодо одиничного енергоблоку та не враховується кількість енергоблоків на майданчику АЕС.

Натомість кожен майданчик АЕС характеризується набором внутрішніх і зовнішніх небезпек, що можуть ініціювати послідовність подій, які в подальшому кидають виклик життєво важливим функціям безпеки і спричиняють аварії за участі декількох енергоблоків. Наприклад, енергоблоки зазвичай використовують

загальну електричну мережу і кінцевий тепловідвід, а в деяких випадках мають загальні конструкції і системи, що забезпечують життєво важливі функції безпеки. Спільне використання систем зазвичай забезпечує додаткове резервування для кожного енергоблоку. Однак таке спільне використання систем також збільшує імовірність аварії на енергоблоках.

Враховуючи, що на майданчиках АЕС України розташовано від двох до шести діючих енергоблоків, а особливо на тлі національних планів щодо будівництва нових енергоблоків, питання встановлення критеріїв безпеки для майданчика та виконання відповідних аналізів експлуатуючою організацією потребує серйозного вивчення та опрацювання.

Наразі у світі активно проводяться дослідження, в яких для реакторів, на додаток до оцінки ризику

© Є. О. Шахов, В. В. Лахай, Є. О. Александров, Ю. А. Сапожников, 2025

¹ Математично виражене очікування негативних наслідків від діяльності, що проваджується [9].

від одиничного енергоблоку, потрібна оцінка інтегрального ризику від майданчика АЕС, тобто інтегральних значень частоти пошкодження активної зони (ЧПАЗ), частоти пошкодження палива в басейні витримки (ЧПП) та частоти граничного аварійного викиду (ЧГАВ) для багатоблокових (ББ) АЕС. Так, у світлі уроків безпеки, набутих з досвіду аварії на АЕС «Fukushima Daiichi», були розроблені рекомендації IAEA Safety Reports Series No. 96 [1]. Так, у розділі 1 зазначено, що оцінку ризику для майданчика АЕС з кількома енергоблоками необхідно проводити інтегральним способом, а не оцінювати кожен енергоблок окремо. Також було проведено велику кількість досліджень ризику від аварій для ББ АЕС, наприклад [2–9].

Метою цього дослідження є опанування технології розробки ББ ІАБ та отримання конкретних значень показників імовірнісного ризику.

Як базовий у рамках цього дослідження обрано майданчик Хмельницької АЕС (ХАЕС) з двома енергоблоками ВВЕР-1000. Для виконання кількісної оцінки імовірнісних показників безпеки (інтегральні ЧПАЗ та ЧГАВ) для майданчика ХАЕС будуть використані модифіковані актуальні інтегральні імовірнісні моделі (ІМ) енергоблоків № 1 та № 2.

Ця робота базується на інформації з відкритих джерел щодо оцінки ризику для ББ АЕС і є попереднім аналізом.

Дослідження складається з шести етапів.

Етап 1. Аналіз існуючих законів та іншої нормативної документації України у сфері ЯРБ.

Етап 2. Оновлення існуючих ІМ оцінки безпеки енергоблоків № 1 та № 2 ХАЕС відповідно до обраної «дати замороження»².

Етап 3. Аналіз наявних ІМ окремих енергоблоків ХАЕС з точки зору врахування ризику від багатоблоковості:

- аналіз вихідних подій;
- аналіз надійності персоналу;
- аналіз аварійних послідовностей ІАБ 1-го рівня;
- аналіз аварійних послідовностей ІАБ 2-го рівня.

Етап 4. Модифікація ІМ енергоблоків № 1 та № 2 ХАЕС з метою врахування результатів досліджень етапів 2 та 3 з точки зору оцінки ризику для ББ АЕС.

Етап 5. Розрахунок модифікованих ІМ. Виконання аналізів домінантних мінімальних перетинів та аварійних послідовностей, виконання аналізів невизначеності, значущості та чутливості.

Етап 6. Порівняння отриманих результатів розрахунку імовірнісних показників безпеки для май-

данчика ХАЕС з результатами розрахунку «базових» імовірнісних моделей для окремих енергоблоків.

У статті наведено опис виконання перших двох етапів цього дослідження.

Етап 1. Аналіз законодавства та нормативно-правової документації України у сфері ЯРБ

На цьому етапі виконано аналіз відповідності чинної нормативно-правової бази України завданням ББ ІАБ. Проаналізовано такі документи:

Закон України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» [12];

Закон України «Про дозвільну діяльність у сфері використання ядерної енергії» [13];

НП 306.2.245-2024 (НП 306.2.141-2008). Загальні положення безпеки атомних електростанцій [14];

НП 306.2.162-2010. Вимоги до оцінки безпеки атомних електростанцій [10];

НП 306.2.214-2017. Вимоги до періодичної переоцінки безпеки енергоблоків атомних електростанцій [15];

СОУ НАЕК 186:2019. Вимоги до структури та змісту звіту з періодичної переоцінки безпеки енергоблоків АЕС [16].

Короткий опис розглянутих законів та нормативних документів України

Закон України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку»

«Цей Закон є основоположним у ядерному законодавстві України. Він встановлює пріоритет безпеки людини та довкілля, визначає права та обов'язки громадян у сфері використання ядерної енергії, регулює діяльність, пов'язану з використанням ядерних установок та джерел іонізуючого випромінювання, а також закріплює правові основи міжнародних зобов'язань України щодо використання ядерної енергії» [12, преамбула].

«Основними завданнями ядерного законодавства є:

правове регулювання суспільних відносин під час здійснення всіх видів діяльності у сфері використання ядерної енергії;

створення правових засад системи управління у сфері використання ядерної енергії і системи регулювання безпеки під час використання ядерної енергії;

встановлення прав, обов'язків і відповідальності органів державної влади, підприємств, установ і організацій, посадових осіб і персоналу, а також грома-

² Дата, на яку зафіксовано технічний стан енергоблоку, для якого виконується ІАБ [11].

дзян стосовно їх діяльності, пов'язаної з використанням ядерної енергії;

визначення основних принципів радіаційного захисту людей та навколишнього природного середовища;

забезпечення участі громадян та їх об'єднань у формуванні державної політики у сфері використання ядерної енергії;

сприяння подальшому зміцненню міжнародного режиму безпечного використання ядерної енергії» [12, ст. 3].

Закон України «Про дозвільну діяльність у сфері використання ядерної енергії»

«Цей Закон визначає правові та організаційні засади ліцензування діяльності у сфері використання ядерної енергії, а також загальні положення регулювання суспільних відносин, що виникають під час її здійснення, як виняток із загальних положень, установлених Законом України «Про ліцензування певних видів господарської діяльності».

«Дозвільна діяльність у сфері використання ядерної енергії спрямована на захист інтересів національної безпеки, забезпечення захисту людини та довкілля від впливу іонізуючого випромінювання, дотримання принципів радіаційного захисту, а також дотримання вимог режиму нерозповсюдження ядерної зброї» [13, преамбула].

НП 306.2.245-2024 (НП 306.2.141-2008). Загальні положення безпеки атомних електростанцій

«Загальні положення встановлюють цілі, принципи та критерії безпеки атомних електростанцій, а також вимоги до здійснення основних технічних і організаційних заходів, спрямованих на їх реалізацію та захист людей і навколишнього середовища від можливого радіаційного опромінення» [14, пункт 1.1].

«Дотримання цих положень є обов'язковим під час проведення робіт із розміщення, проектування, будівництва, введення в експлуатацію, експлуатації, зняття з експлуатації атомних електростанцій (атомних енергоблоків), а також проектування, виробництва та постачання вузлів і конструкцій для них» [14, пункт 1.2].

«Сфера застосування охоплює атомні електростанції (атомні енергоблоки) з водоводяними реакторними установками. Порядок і обсяг застосування цих Загальних положень для АЕС з іншими типами реакторних установок визначаються експлуатуючою організацією та погоджуються з органом державного регулювання ядерної та радіаційної безпеки» [14, пункт 1.3].

НП 306.2.245-2024 є новою редакцією НП 306.2.141-2008, затвердженою наказом Держатомрегулювання України від 04.03.2024 № 195 «Про внесення змін до Загальних положень безпеки атомних станцій» та зареєстрованою в Міністерстві юстиції України 25 квітня 2024 р. за № 598/41943.

Перегляд Загальних положень безпеки атомних електростанцій, які були затверджені Держатомрегулюванням ще у 2007 р., на думку Державної інспекції ядерного регулювання України, був зумовлений необхідністю врахувати понад 16-річний досвід застосування, поточні національні та міжнародні вимоги та найкращі європейські практики регулювання ядерної та радіаційної безпеки.

Під час перегляду Загальних положень безпеки атомних електростанцій, у порівнянні з попередньою редакцією, основних змін зазнали розділи, що встановлюють критерії безпеки, вимоги до забезпечення реалізації стратегії глибокешелюваного захисту, вимог до аналізу безпеки, вимоги до проектування та експлуатації АЕС. При цьому, зокрема, були враховані такі сучасні міжнародні документи:

Директива Ради 2014/87/ЄВРАТОМ від 8 липня 2014 р. про внесення змін і доповнень до Директиви 2009/71/Євратом про встановлення рамок Співтовариства для ядерної безпеки ядерних установок;

IAEA. Safety Standards. Safety of Nuclear Power Plants: Design. Specific Safety Requirements No. SSR-2/1 (Rev. 1);

IAEA. Safety Standards. Safety of Nuclear Power Plants: Commissioning and Operation Specific Safety Requirements No. SSR-2/2 (Rev. 1);

WENRA Safety Reference Levels for Existing Reactors 2020 та інші документи МАГАТЕ та WENRA [17].

НП 306.2.162-2010. Вимоги до оцінки безпеки атомних електростанцій

«Ці Вимоги встановлюють основні цілі та складові оцінки безпеки АЕС та визначають взаємозв'язок між звітами про оцінку безпеки на різних етапах життєвого циклу АЕС. Детальні вимоги до структури та змісту звітів з оцінки безпеки викладені в окремих нормативних документах з урахуванням положень цих Вимог» [10, пункт 1.1].

НП 306.2.214-2017. Вимоги до періодичної переоцінки безпеки енергоблоків атомних електростанцій

«Ці Вимоги встановлюють загальні вимоги до проведення періодичної переоцінки безпеки енергоблоків АЕС, порядок оформлення звітних документів про проведення періодичної переоцінки безпеки на етапі життєвого циклу «експлуатація ядерної установки», їх структуру та зміст. Вони є обов'язковими для вико-

нання всіма юридичними та фізичними особами, які здійснюють діяльність з переоцінки безпеки енергоблоків АЕС» [15, пункт 1 розділу «Загальні положення»].

СОУ НАЕК 186:2019. Вимоги до структури та змісту звіту про періодичну переоцінку безпеки енергоблоків АЕС

«Цей стандарт встановлює обсяги та підходи до формування звіту з періодичної переоцінки безпеки енергоблоків діючих АЕС (далі ЗППБ) і окремих факторів безпеки та комплексного аналізу, визначає структуру та зміст ЗППБ, який за результатами переоцінки надається до Держатомрегулювання кожні 10 років після початку експлуатації енергоблока або на вимогу Держатомрегулювання.

Вимоги цього стандарту є обов'язковими для структурних та відокремлених підрозділів ДП «НАЕК «Енергоатом», які здійснюють діяльність, пов'язану з переоцінкою безпеки енергоблоків атомних станцій, та обов'язкові для включення їх до тендерної документації та/або договорів з підрядними організаціями, які виконують розроблення звітів з періодичної переоцінки безпеки» [16].

Висновки щодо аналізу розглянутих законів та нормативно-правової бази України щодо аспектів ББ ІАБ

У результаті аналізу вищезазначених законів та нормативної документації України у сфері ЯРБ встановлено, що чинна нормативно-правова база України частково відповідає завданням ББ ІАБ.

Закон «Про дозвільну діяльність у сфері розвитку атомної енергетики» [13] визначає можливість розміщення кількох ядерних установок (ЯУ) на одному майданчику та визначає необхідну кількість ліцензій.

НП 306.2.245-2024 [14] містить наведені нижче вимоги.

«Для АС, на майданчику яких розташовано декілька ЯУ (включно зі сховищами відпрацьованого ЯП), враховується можливість впливу вихідної (початкової) події на всі ЯУ або на декілька ЯУ, що розташовані на майданчику АС, потенційний взаємний вплив таких ЯУ в разі виникнення вихідної (початкової) події на одній або декількох ЯУ майданчику АС, а також потенційний вплив наслідків аварії на іншому майданчику, якщо такий вплив не унеможливується умовами розташування АС та/або іншими факторами» (пункт 7 підрозділу 4 «Аналіз безпеки АЕС» Розділу V «Загальні організаційно-технічні принципи безпеки АС»);

«У разі застосування в проєкті енергоблоків багатоблокових АС систем, елементів і конструкцій, важливих для безпеки, які є спільними для декількох енергоблоків АС, відсутність негативного впливу такого проєктного рішення на безпеку кожного з енергоблоків АС обґрунтовується в ЗАБ» (пункт 28 підрозділу 1 «Основні вимоги до проєкту АС» розділу «Проєктування АС»).

Вимоги щодо необхідності врахування у звітах аналізу безпеки можливих зв'язків між енергоблоками АЕС, розташованих на одному майданчику, та їхнього взаємного впливу наведені в НП 306.2.214-2017 [15, пункт 7 розділу «Загальні вимоги до проведення періодичної переоцінки безпеки енергоблоків АС»].

У нормативному документі СОУ НАЕК 186:2019 [16] встановлено такі вимоги:

«5.3.6 Загальностанційні системи і елементи АЕС, що технологічно пов'язані з енергоблоком, досліджуються в рамках періодичної переоцінки безпеки цього енергоблока з урахуванням усього комплексу вимог щодо умов та меж безпечної експлуатації суміжного (суміжних) енергоблока (енергоблоків). Також визначаються і розглядаються інші можливі зв'язки між енергоблоками та взаємні впливи (багатоблоковість), зокрема в умовах аварій»;

«6.3.6.6 Повнота та рівень імовірнісних аналізів безпеки енергоблока» має містити інформацію щодо ... впливу багатоблоковості».

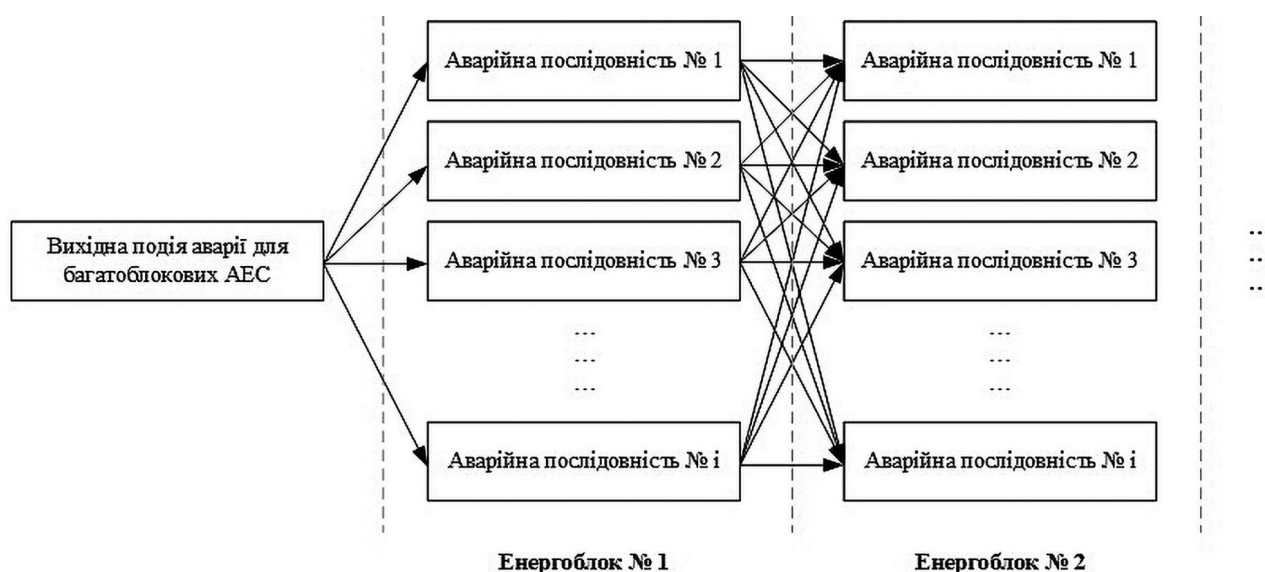
В інших розглянутих законах та нормативних документах України відсутні вимоги, що відповідають завданням ББ ІАБ, та вимоги щодо інтегральних значень ЧПАЗ, ЧПП та ЧГАВ для майданчика АЕС.

Етап 2. Оновлення існуючих ПМ оцінки безпеки енергоблоків № 1 та № 2 ХАЕС відповідно до «дати замороження»

Методологія виконання ББ ІАБ передбачає об'єднання індивідуальних моделей в одну для вивчення спільного впливу вихідних подій на показники ризику. На рис. 1 представлено загальний вигляд структури взаємодії аварійних послідовностей двох енергоблоків.

ПМ для енергоблоків № 1 та № 2 ХАЕС розроблені за однаковою методологією в частині визначення надійності базових подій, побудови дерев відмов, дерев подій тощо. Однак дата, на яку розроблені ці моделі, відрізняється. Таким чином, принаймні:

статистика для визначення надійності обладнання відрізняється;



Структура взаємодії послідовностей аварій для двох блоків

врахування експлуатаційних подій для визначення частоти вихідних подій проводилось за різні періоди; перелік модернізацій, реалізованих на енергоблоках, не актуальний.

При цьому неможливо провести будь-який аналіз без визначення кінцевої точки в часі для цього аналізу. Тому методологія проведення досліджень ІАБ вимагає визначення конкретного моменту часу, на який буде розроблена імовірнісна модель та, відповідно, виконано аналіз («дата замороження»). У цьому дослідженні «датою замороження» обрано 13 липня 2022 р.

Відповідно, завданням у рамках цього дослідження є доопрацювання ІМ для енергоблоків № 1 та № 2 ХАЕС до обраної «дати замороження».

На цьому етапі було оновлено ІМ для енергоблоків № 1 та № 2 ХАЕС з використанням імовірнісного коду RiskSpectrum PSA (ver.1.1.4.3). Детальний опис коду наведено в [17].

У рамках актуалізації ІМ для енергоблоків № 1 та № 2 ХАЕС [18, 19] виконано оновлення:

аналізу переліку модернізацій, реалізованих на енергоблоках № 1 та № 2 ХАЕС, та необхідності врахування їх у моделях ІАБ;

даних щодо надійності обладнання та елементів систем, що розглядаються в ІМ;

частоти внутрішніх та зовнішніх вихідних подій аварій (ВПА);

системного аналізу;

аналізу після-аварійних дій персоналу;

аварійних послідовностей для ІАБ 1-го та 2-го рівнів.

Розрахунок показників надійності обладнання

Основним джерелом даних з надійності обладнання є специфічні експлуатаційні дані щодо дефектів обладнання систем, що моделюються у рамках ІАБ 1-го та 2-го рівнів, зібрані на енергоблоках № 1 та № 2 ХАЕС.

Періоди збору даних такі:

для енергоблоку № 1 ХАЕС — з 1992 р. до 13.07.2022 р.;

для енергоблоку № 2 ХАЕС — з 2006 р. до 13.07.2022 р.

Під час збору специфічних даних зазвичай використовують такі джерела:

звіти про розслідування порушень;

українська база даних з надійності обладнання;

річні звіти з оцінки поточного стану експлуатаційної безпеки енергоблоку АЕС;

звітна документація підрозділів АЕС;

реєстраційні журнали;

бази даних за актами цехового обліку;

річні діаграми несення навантаження.

Групування обладнання виконано відповідно до вимог керівництва [20]. Бази даних з надійності й аномальних подій та інцидентів є загальними для енергоблоків № 1 та № 2 ХАЕС, тому з метою врахування найбільш актуальних статистичних даних в рамках цієї роботи були використані:

дані з надійності обладнання станом на 13.07.2022, наведені в [21];

дані щодо інцидентів і порушень станом на 13.07.2022, наведені в [22].

Розрахунок показників надійності [21], виконаний станом на 13.07.2022, враховує дані щодо дефектів і відмов обладнання енергоблоків № 1 та № 2 ХАЕС.

Розрахунок частот внутрішніх ВПА реакторних установок (РУ)

Для цілей цього аналізу було виконано уніфікацію переліку експлуатаційних станів (ЕС) та усереднення їхньої тривалості.

Під час аналізу ЕС для енергоблоків № 1 та № 2 виконано перегляд переліку ЕС РУ відповідно до діючої експлуатаційної документації ХАЕС. У звітах [21] та [23] наведено детальну інформацію щодо цього етапу, а саме:

- визначення ЕС РУ;
- опис регламентних станів РУ;
- опис ідентифікованих типів зупину енергоблоку;
- визначення попередніх ЕС для ідентифікованих типів зупину енергоблоку;
- визначення ЕС;
- визначення тривалості ЕС;
- розроблення матриці стану основних систем та обладнання енергоблоку при різних ЕС.

Розрахунок частот внутрішніх ВПА у [23], виконаний станом на 13.07.2022, враховує дані щодо дефектів і відмов обладнання енергоблоків № 1 та № 2 ХАЕС.

База даних щодо аномальних подій та порушень [21] є основним документом, що містить необхідну інформацію у вигляді набору вихідних даних щодо аномальних подій та інцидентів для енергоблоку № 2 ХАЕС в обсязі, достатньому для розрахунків частот ВПА в рамках ІАБ рівня 1.

Дані щодо аномальних подій та порушень, що відбулися на енергоблоці № 1 ХАЕС, були зібрані за період з 01.01.1989 по 13.07.2022, на енергоблоці № 2 ХАЕС — за період з 01.01.2006 по 13.07.2022. Далі наведено переліки подій, ідентифікованих як ВПА.

Як узагальнені були використані дані щодо таких енергоблоків:

- РАЕС-3 за період з 01.01.1989 по 13.07.2022;
- РАЕС-4 за період з 01.01.2006 по 13.07.2022;
- ЗАЕС 1-4 за період з 01.01.1995 по 13.07.2022;
- ЗАЕС-5 за період з 01.01.1991 по 13.07.2022;
- ЗАЕС-6 за період з 01.01.1998 по 13.07.2022;
- ПАЕС-3 за період з 01.01.1992 по 13.07.2022.

Відповідно до [24] всі вихідні події можна розподілити на три класи залежно від очікуваної частоти їхнього виникнення:

події з високою частотою виникнення (від $1\text{E}-01$ до $1\text{E}+01$ 1/рік);

події із середньою частотою виникнення (від $1\text{E}-03$ до $1\text{E}-01$ 1/рік);

події з низькою частотою виникнення ($<1\text{E}-03$ 1/рік).

ВПА з високою частотою виникнення розраховуються прямими методами за специфічними даними. Для подій із середньою частотою виникнення застосовується метод байєсівської оцінки, де як апріорна інформація використовуються узагальнені дані щодо подій для аналогічних енергоблоків. Для подій із низькою частотою виникнення застосовується експертна оцінка.

З огляду на специфіку розрахунків частот ВПА залежно від різних ЕС для розрахунку частот застосовується формула

$$f_{IE} = \lambda \times t_{POS}, \quad (1)$$

де f_{IE} — частота виникнення ВПА (групи ВПА) протягом ЕС на календарний рік, 1/рік; λ — інтенсивність виникнення ВПА у певному ЕС, 1/рік; t_{POS} — частка часу, що припадає на аналізований ЕС, протягом календарного року; T_{SUM} — сумарна тривалість ЕС за календарний рік, в яких можливе виникнення ВПА, год/рік; T_{POS} — тривалість ЕС, год/рік.

Для подій із середньою частотою виникнення застосовується метод байєсівської оцінки, розрахунки виконувались за наведеними нижче формулами.

Середнє значення частоти ВПА:

$$\lambda = \frac{2(N+n)+1}{2(T+t)}, \quad (2)$$

де N — кількість ВПА за специфічними даними; T — період спостереження збору даних (специфічні дані); n — кількість випадків ВПА, взята з узагальнених даних; t — період спостереження збору даних (узагальнені дані).

Для випадків нульової статистики використаний підхід [24], відповідно до якого кількість подій $N = 0,5$.

Нижня межа довірчого інтервалу

$$\lambda_L = \frac{\chi^2[0.05, 2(N+n)+1]}{2(T+t)}, \quad (3)$$

верхня межа довірчого інтервалу

$$\lambda_U = \frac{\chi^2[0.95, 2(N+n)+1]}{2(T+t)}. \quad (4)$$

Для подій з високою частотою виникнення за наявності специфічних даних щодо ВПА розрахунки виконувались за такими формулами:

середнє значення частоти ВПА

$$\lambda = \frac{N}{T}; \quad (5)$$

нижня межа довірчого інтервалу

$$\lambda_L = \frac{\chi^2[0.05, 2N+1]}{2T}; \quad (6)$$

верхня межа довірчого інтервалу

$$\lambda_U = \frac{\chi^2[0.95, 2N+1]}{2T}. \quad (7)$$

Фактор помилки в усіх випадках розраховується за формулою

$$EF = \sqrt{\frac{\lambda_U}{\lambda_L}}. \quad (8)$$

Для ВПА, за умов накладення додаткової відмови, передбачається, що ця відмова не є умовою для виникнення ВПА. У цьому випадку частота ВПА розраховувалася за формулою повної імовірності незалежних подій

$$\lambda = \lambda_{cp} \cdot P_n, \quad (9)$$

де P_n — середнє значення імовірності додаткової відмови.

Для специфічних ВПА, пов'язаних з відмовами забезпечуючих систем, застосовується метод дерев відмов.

Під час аналізу результатів розрахунку частот виникнення ВПА були виявлені вихідні події, виключені за критерієм: частота ВПА $< 1E-07$ 1/рік.

Розрахунок частот зовнішніх ВПА

Оцінка частот зовнішніх екстремальних впливів станом на 13.07.2022 виконана у [25] та враховує всі необхідні дані щодо екстремальних подій, що відбулися на майданчику ХАЕС і загалом в Україні.

Відповідно до виконаного відбіркового та граничного аналізу зовнішніх екстремальних впливів встановлено [26], що для врахування в інтегральній моделі ІАБ енергоблоків № 1 та № 2 ХАЕС залишилися такі впливи, як смерч на території майданчика ХАЕС та падіння літальних апаратів на території майданчика.

Оновлення системного аналізу, аналізу післяаварійних дій персоналу та аварійних послідовностей для ІАБ 1-го та 2-го рівнів ПІМ для енергоблоків № 1 та № 2 ХАЕС виконано відповідно до актуальних існуючих досліджень.

Висновки

Станом на сьогодні для всіх АЕС України, у рамках виконання ІАБ, розглядається перелік постульованих вихідних подій, внутрішніх та зовнішніх екстремальних впливів з урахуванням чинних вимог

норм, правил та стандартів з ЯРБ України щодо одиничного енергоблоку, проте не враховується кількість енергоблоків на майданчику АЕС.

У світлі уроків безпеки, набутих з досвіду аварії на АЕС «Fukushima Daiichi», були розроблені рекомендації IAEA Safety Standards Series No. 96, де в розділі 1 зазначено, що оцінку ризику для майданчика АЕС з кількома енергоблоками необхідно проводити інтегральним способом, а не оцінювати кожен енергоблок окремо.

Відповідно, у світі активно відбуваються дослідження, в яких для енергоблоків, на додаток до оцінки ризику від одиничного енергоблоку, виконується оцінка інтегрального ризику від майданчика АЕС (інтегральних значень ЧПАЗ, ЧПП та ЧГАВ для ББ АЕС).

Таким чином, розробка аналізів безпеки з урахуванням ризиків від багатоблоковості для АЕС України є надважливим завданням, особливо у світлі агресивної несправедливої війни, розв'язаної РФ. Очікуваним результатом по завершенню цього дослідження є:

попередня ПІМ для майданчика ХАЕС (ББ ПІМ);
пакет документів, що описує процес розробки попередньої ББ ПІМ та інтерпретує отримані результати розрахунку цієї моделі.

Надалі цей результат може бути використано як підґрунтя для впровадження загальногалузевого методичного керівництва з розробки ІАБ повного спектра вихідних подій в умовах усіх експлуатаційних станів РУ та БВ для ББ АЕС.

У статті наведено опис виконання двох етапів із запланованих шести, а саме:

Етап 1. Аналіз існуючих законів та іншої нормативної документації України у сфері ЯРБ.

Етап 2. Оновлення існуючих ПІМ оцінки безпеки енергоблоків № 1 та № 2 ХАЕС відповідно до обраної «дати замороження».

У рамках виконання етапу 1 з'ясовано, що розглянуті закони та нормативні документи України не повною мірою відповідають аспектам ІАБ для ББ АЕС і потребують доопрацювання. Наприклад, відсутні встановлені граничні значення інтегральних ЧПАЗ, ЧПП та ЧГАВ для майданчика АЕС.

Таким чином, результати етапу 1 дали змогу виявити прогалини у чинному законодавстві України щодо оцінки ризиків для АЕС із кількома енергоблоками. Це створює передумови для розробки нових підходів до нормативного забезпечення та встановлення критеріїв оцінки ризику для ББ АЕС.

У рамках виконання етапу 2 оновлені ПІМ енергоблоків № 1 та № 2 ХАЕС. Оновлення ПІМ дало змогу

отримати актуальну на «дату замороження» оцінку ризику для окремих енергоблоків ХАЕС. При цьому була відпрацьована методологія актуалізації ПІМ на єдину дату для двох енергоблоків.

Оновлені ПІМ використані для створення єдиної моделі майданчика ХАЕС, що дало змогу на наступних етапах дослідження оцінити ризики від багатоблоковості.

Опис етапів 4–6 буде наведено в окремих статтях.

Список використаної літератури

1. Technical approach to probabilistic safety assessment for multiple reactor units. Safety Reports Series No. 96. — Vienna : IAEA, 2019.
2. Samaddar S. Technical approach for safety assessment of MU NPP sites subject to external events / Sujit Samaddar, Kenta Hibino, Ovidiu Coman // Proceedings of Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM 12) (Honolulu, Hawaii, June 22–27, 2014).
3. Fleming K. N. On the risk significance of seismically induced multi-unit accidents / K. N. Fleming // Proceedings of the ANS International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment and Analysis. — ID, USA, 2015.
4. Ebisawa K. Concept and methodology for evaluating core damage frequency considering failure correlation at multi units and sites and its application / K. Ebisawa, T. Teragaki, S. Nomura [et al.] // Nuclear Engineering and Design. — 2015. — Vol. 288. — P. 82–97.
5. Senthil Kumar C. Integrated risk assessment for MU NPP sites — a comparison / C. Senthil Kumar, Varun Hassija, K. Velusamy, V. Balasubramaniyan // Nuclear Engineering and Design. — 2015. — Vol. 293. — P. 53–62.
6. Tu Duong Le Du. Probabilistic safety assessment of twin-unit nuclear sites: methodological elements / Tu Duong Le Duy, Dominique Vasseur, Emmanuel Serdet // Reliability Engineering and System Safety. — 2016. — Vol. 145. — P. 250–261.
7. Zhang S. An integrated modeling approach for event sequence development in MU probabilistic risk assessment / S. Zhang, J. Tong, J. Zhao // Reliability Engineering and System Safety. — 2016. — Vol. 155. — P. 147–159.
8. Modarres M. Advances in MU nuclear power plant probabilistic risk assessment / Mohammad Modarres, Taotao Zhou, Mahmoud Massoud // Reliability Engineering and System Safety. — 2017. — Vol. 157. — P. 87–100.
9. Kim D. S. Multi-unit Level 1 probabilistic safety assessment: Approaches and their application to a six-unit nuclear power plant site / Dong-San Kim, Sang Hoon Han, Jin Hee Park, Ho-Gon Lim, Jung Han Kim // Nuclear Engineering and Technology. — 2018. — Vol. 50. — P. 1217–1233.
10. НП 306.2.162-2010. Вимоги до оцінки безпеки атомних станцій.
11. Затверджено наказом Держатомрегулювання від 22.09.2010 р. № 124. — Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0964-10#Text>.
12. Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants: IAEA Safety Standards Series. Specific Safety Guide. No. SSG3 (Rev. 1). — Vienna : IAEA, 2024.
13. Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку: Закон України від 2 лютого 1995 р. N39/95-ВР // Відомості Верховної Ради України. — 1995. — № 2. Ст. 81. — Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-%D0%B2%D1%80#Text>.
14. Про дозвільну діяльність у сфері використання ядерної енергії: Закон України від 11.01.2000 р. № 1370-XIV // Відомості Верховної Ради України. — 2000. — № 9. Ст. 68. — Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1370-14#Text>.
15. НП 306.2.245-2024 (НП 306.2.141-2008). Загальні положення безпеки атомних електростанцій. — Затверджено наказом Держатомрегулювання від 19.11.2007 р. № 162 (в редакції наказу Державної інспекції ядерного регулювання України від 04.03.2024 р. № 195). — Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0598-24#Text>.
16. НП 306.2.214-2017. Вимоги до періодичної переоцінки безпеки енергоблоків атомних електростанцій. — Затвердж. наказом Держатомрегулювання від 30.08.2017 р. № 313 (в редакції Наказу Державної інспекції ядерного регулювання України від 05.10.2022 р. № 588). — Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1158-17#Text>.
17. СОУ НАЕК 186:2019 зм.1. Стандарт АТ «НАЕК «Енергоатом». Інженерна, наукова та технічна підтримка. Вимоги до структури та змісту звіту з періодичної переоцінки безпеки енергоблоків АЕС. Погоджено листом Держатомрегулювання від 06.10.2021 р. № 15-22/14686-14941. — [Чинний від 2021-11-01]. — Київ : ДП «НАЕК «Енергоатом», 2021. — 58 с.
18. Держатомрегулюванням розроблено та затверджено нову редакцію Загальних положень безпеки атомних станцій // Державна інспекція ядерного регулювання. Офіційний вебпортал. Всі новини. — Режим доступу: <https://snriu.gov.ua/news/derzhatomrehuliuvanniam-rozrobлено-ta-zatverdzheno-novu-redaktsiiu-zahalnykh-polozhen-bezpeky-atomnykh-stantsii>.
19. RiskSpectrum. Solutions. Probabilistic Safety Assessment (PSA). — Режим доступу: <https://www.riskspectrum.com/probabilistic-safety-assessment-psa>.

20. 24.1.42.ОБ.05.04.27. Хмельницкая АЭС. Энергоблок № 1. Отчет по анализу безопасности. Вероятностный анализ безопасности. Разработка интегральной вероятностной модели с учетом всех регламентных состояний РУ и БВ и ее доработка с учетом обновления существующих баз данных.
21. 24.2.42.ОБ.19.01.15.02. Хмельницька АЕС. Енергоблок № 2. Остаточний звіт з аналізу безпеки. Глава 19. Імовірнісний аналіз безпеки та аналіз запроектованих аварій. Частина 1. Імовірнісний аналіз безпеки. Розробка інтегральної моделі.
22. МТ-Т.0.41.719-21. Методика підготовки та обробки даних з надійності обладнання для цілей імовірнісного аналізу безпеки.
23. 24.2.42.ОБ.19.01.04. Хмельницька АЕС. Енергоблок № 2. Остаточний звіт з аналізу безпеки. Глава 19. Імовірнісний аналіз безпеки та аналіз запроектованих аварій. Частина 1. Імовірнісний аналіз безпеки. База даних з надійності обладнання.
24. 24.2.42.ОБ.19.01.03. Хмельницька АЕС. Енергоблок № 2. Остаточний звіт з аналізу безпеки. Глава 19. Імовірнісний аналіз безпеки та аналіз запроектованих аварій. Частина 1. Імовірнісний аналіз безпеки. База даних з аномальних подій та порушень.
25. 24.2.42.ОБ.19.01.05. Хмельницька АЕС. Енергоблок № 2. Остаточний звіт з аналізу безпеки. Глава 19. Імовірнісний аналіз безпеки та аналіз запроектованих аварій. Частина 1. Імовірнісний аналіз безпеки. Аналіз ЕС. Ідентифікація та групування ВПА.
26. 24.1.42.ОБ.04.10.02.04. Хмельницкая АЭС. Энергоблок № 1. Учет полного спектра исходных событий для всех регламентных состояний РУ и БВ в вероятностном анализе безопасности для энергоблока № 1 ОП ХАЭС. Методическое руководство по разработке ИАБ 1-го и 2-го уровней для полного спектра исходных событий при всех эксплуатационных состояниях РУ и БВ.
27. 24.2.42.ОБ.19.01.13.03. Хмельницька АЕС. Енергоблок № 2. Остаточний звіт з аналізу безпеки. Глава 19. Імовірнісний аналіз безпеки та аналіз запроектованих аварій. Частина 1. Імовірнісний аналіз безпеки. Оцінка частот зовнішніх екстремальних впливів.
28. 24.2.42.ОБ.19.01.13.02. Хмельницька АЕС. Енергоблок № 2. Остаточний звіт з аналізу безпеки. Глава 19. Імовірнісний аналіз безпеки та аналіз запроектованих аварій. Частина 1. Імовірнісний аналіз безпеки. Відбірковий та граничний аналіз імовірних зовнішніх екстремальних впливів (природних та техногенних), які можуть порушити роботу енергоблока.

Ie. O. Shakhov, V. V. Lakhai, Ye. O. Aleksandrov, Yu. A. Sapozhnykov

Joint Stock Company "Kyiv Research and Design Institute 'Energoproekt'", 4, Beresteyskyi Ave, 01135, Kyiv, Ukraine

Development of Multi-Unit Probabilistic Safety Assessment Using the Khmelnytskyi NPP Site as an Example

The safety assessment of nuclear power plants (NPPs) has traditionally focused on individual reactor units, without fully considering the interactions between multiple units at a single site. However, recent international studies, particularly following the Fukushima Daiichi accident, have emphasized the importance of integrated risk assessment for multi-unit (MU) sites. This study presents the initial stages of developing a Multi-Unit Probabilistic Safety Assessment (MU PSA) for the Khmelnytskyi NPP, addressing both regulatory and methodological aspects.

The research follows a six-stage framework, with this paper covering the first two stages. The first stage involved a comprehensive review of the Ukrainian nuclear safety regulatory framework to determine its applicability to MU risk assessment. The second stage focused on updating the integral probabilistic models of Units 1 and 2 of the Khmelnytskyi NPP to a unified "freeze date". This process involved standardizing failure rate data, refining initiating event frequencies, and ensuring consistency in system reliability parameters. The PSA models were updated using RiskSpectrum PSA software, incorporating operational reliability data, failure statistics, and maintenance records.

The regulatory review highlighted that Ukrainian nuclear safety regulations only partially account for MU risk and do not establish specific risk thresholds for site-wide indicators such as Core Damage Frequency (CDF) or Large Early Release Frequency (LERF). This underscores the need for further regulatory refinement to align with international best practices.

The model update provided a harmonized basis for MU PSA by: standardizing equipment failure data and initiating event frequencies; accounting for shared system dependencies and common-cause failures; updating human reliability assessments and accident sequences.

These refinements ensure that subsequent research phases can build on a robust foundation for evaluating integrated site-wide risk.

The findings from these initial stages lay the groundwork for a comprehensive MU PSA methodology applicable to Ukrainian NPPs. Further research will focus on integrating the individual unit models into a full-site probabilistic model and performing sensitivity and uncertainty analyses. The results will contribute to enhancing safety assessment approaches and supporting regulatory improvements for multi-unit sites.

Keywords: nuclear safety, probabilistic safety assessment, multi-unit, Khmelnytskyi NPP.

References

1. IAEA (2019). *Technical approach to probabilistic safety assessment for multiple reactor units*: Safety Reports Series No. 96. Vienna: IAEA.
2. Samaddar S., Hibino K., Coman O. (2014). Technical approach for safety assessment of MU NPP sites subject to external events. *Proceedings of Probabilistic Safety Assessment and Management (PSAM 12) (Honolulu, Hawaii, June 22–27, 2014)*.
3. Fleming K. N. (2015). On the risk significance of seismically induced multi-unit accidents. In *Proceedings of the ANS International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment and Analysis*. ID, USA.
4. Ebisawa K., Teragaki T., Nomura S., Abe H., Shigemori M., Shimomoto M. (2015). Concept and methodology for evaluating core damage frequency considering failure correlation at multi units and sites and its application. *Nuclear Engineering and Design*, vol. 288, pp. 82–97.
5. Senthil Kumar C., Varun Hassija, Velusamy K., Balasubramaniyan V. (2015). Integrated risk assessment for MU NPP sites — a comparison. *Nuclear Engineering and Design*, vol. 293, pp. 53–62.
6. Tu Duong Le Duy, Vasseur D., Serdet E. (2016). Probabilistic safety assessment of twin-unit nuclear sites: methodological elements. *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 145, pp. 250–261.
7. Zhang S., Tong J., Zhao J. (2016). An integrated modeling approach for event sequence development in MU probabilistic risk assessment. *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 155, pp. 147–159.
8. Modarres M., Zhou T., Massoud M. (2017). Advances in MU nuclear power plant probabilistic risk assessment. *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 157, pp. 87–100.
9. Kim D.-S., Han S. H., Park J. H., Lim H.-G., Kim J. H. (2018). Multi-unit Level 1 probabilistic safety assessment: Approaches and their application to a six-unit nuclear power plant site. *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 50, pp. 1217–1233.
10. [NP 306.2.162-2010. Requirements for safety assessment of nuclear power plants]. Approved by the Order of the State Committee for Nuclear Regulation dated 09/11/2010 No. 124 (as amended by the Order of the State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine No. 195, dated 04.03.2024). Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0964-10#Text>. (in Ukr.)
11. IAEA (2024). Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants: IAEA Safety Standards Series. Specific Safety Guide. No. SSG3 (Rev. 1). Vienna: IAEA, items 2.20, 3.8.
12. [On use of nuclear power and radiation safety. The Law of Ukraine No. 39/95VR, dated 02.02.1995]. *Vidomosti Verkhovnoii Rady Ukrainy* [The Official Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine], 1995, vol. 12, art. 81. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-%D0%B2%D1%80#Text>. (in Ukr.)
13. [On Permit Activity in the Field of Nuclear Energy Utilisation. The Law of Ukraine No. 1370XIV, dated 11.01.2000]. *Vidomosti Verkhovnoii Rady Ukrainy* [The Official Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine], 2000, vol. 9, art. 68. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1370-14#Text>. (in Ukr.)
14. [NP 306.2.245-2024 (HP 306.2.141-2008). General safety regulations of nuclear power plants]. Approved by the Order of the State Committee for Nuclear Regulation dated 11/19/2007 No. 162 (as amended by the Order of the State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine No. 195, dated 04.03.2024). Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0598-24#Text>. (in Ukr.)
15. [NP 306.2.214-2017. Requirements for periodic safety review of nuclear power plant power units]. Approved by the Order of the State Committee for Nuclear Regulation dated 08/30/2017 No. 313 (as amended by the Order of the State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine No. 588, dated 05.10.2022). Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1158-17#Text>. (in Ukr.)
16. SE NNEGC “Energoatom” (2021). [Requirements for the structure and content of the report on the periodic safety review of nuclear power plant units. SOI NNEGC186:2019]. Kyiv: SE NNEGC “Energoatom”. (in Ukr.)
17. [The State Committee for Nuclear Regulation has developed and approved a new edition of the General Safety Regulations for Nuclear Power Plants]. State Committee for Nuclear Regulation. Official web portal. All news. Available at: <https://snriu.gov.ua/news/derzhatomrehliuvanniam-rozrobлено-ta-zatverdzheno-novu-redaktsiiu-zahalnykh-polozen-bezpeky-atomnykh-stantsii> (in Ukr.)

18. RiskSpectrum. Solutions. Probabilistic Safety Assessment (PSA). — Available at: <https://www.riskspectrum.com/probabilistic-safety-assessment-psa>.
19. 24.1.42.OB.05.04.27. [Khmelnyskyi NPP. Unit 1. Safety Analysis Report. Probabilistic Safety Assessment. Development of an integrated probabilistic model considering all regulated states of the Reactor Unit and Power Unit, and its refinement based on updated existing databases]. Kyiv: JSC KIEP, 2021. (in Rus.)
20. 24.2.42.OB.19.01.15.02. [Khmelnyskyi NPP. Unit 2. Final Safety Analysis Report. Chapter 19. Probabilistic Safety Assessment and Beyond-Design-Basis Accident Analysis. Part 1. Probabilistic Safety Assessment. Development of an Integral Model]. Kyiv: JSC KIEP, 2024. (in Ukr.)
21. MT-T.0.41.719-21. [Methodology for the preparation and processing of equipment reliability data for the purposes of Probabilistic Safety Assessment]. NNEGC “Energoatom”, 2022. (in Ukr.)
22. 24.2.42.OB.19.01.04. [Khmelnyskyi NPP. Unit 2. Final Safety Analysis Report. Chapter 19. Probabilistic Safety Assessment and Beyond-Design-Basis Accident Analysis. Part 1. Probabilistic Safety Assessment. Equipment Reliability Database]. Kyiv: JSC KIEP, 2024. (in Ukr.)
23. 24.2.42.OB.19.01.03. [Khmelnyskyi NPP. Unit 2. Final Safety Analysis Report. Chapter 19. Probabilistic Safety Assessment and Beyond-Design-Basis Accident Analysis. Part 1. Probabilistic Safety Assessment. Abnormal Events and Violations Database]. Kyiv: JSC KIEP, 2024. (in Ukr.)
24. 24.2.42.OB.19.01.05. [Khmelnyskyi NPP. Unit 2. Final Safety Analysis Report. Chapter 19. Probabilistic Safety Assessment and Beyond-Design-Basis Accident Analysis. Part 1. Probabilistic Safety Assessment. Operational State Analysis. Identification and Grouping of Initiating Events]. Kyiv: JSC KIEP, 2024. (in Ukr.)
25. 24.1.42.OB.04.10.02.04. [Khmelnyskyi NPP. Unit 1. Consideration of the full spectrum of initiating events for all regulated states of the Reactor Unit and Fuel Pool in the Probabilistic Safety Assessment for Unit 1 of the KhNPP. Methodological guide for the development of Level 1 and Level 2 PSA for the full spectrum of initiating events in all operational states of the RU and FP]. Kyiv: JSC KIEP, 2021. (in Rus.)
26. 24.2.42.OB.19.01.13.03. [Khmelnyskyi NPP. Unit 2. Final Safety Analysis Report. Chapter 19. Probabilistic Safety Assessment and Beyond-Design-Basis Accident Analysis. Part 1. Probabilistic Safety Assessment. Assessment of External Extreme Event Frequencies]. Kyiv: JSC KIEP, 2024. (in Ukr.)
27. 24.2.42.OB.19.01.13.02. [Khmelnyskyi NPP. Unit 2. Final Safety Analysis Report. Chapter 19. Probabilistic Safety Assessment and Beyond-Design-Basis Accident Analysis. Part 1. Probabilistic Safety Assessment. Screening and Boundary Analysis of Probable External Extreme Events (Natural and Technogenic) That May Disrupt Unit Operation]. Kyiv: JSC KIEP, 2024. (in Ukr.)

Надійшла / Received 30.11.2024

Рекомендована до друку / Accepted 10.04.2025