

УДК 614.8 (076)

Volodymyr Vashchenko¹, doctor of physical and mathematical sciences, professor
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1585-1229> *e-mail*: nucleoroid@gmail.com

Iryna Korduba², candidate of technical sciences, associate professor of the department of technology of environmental protection and labor protection
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5135-8465> *e-mail*: uaror-korduba@ukr.net

¹Interdepartmental Scientific Center for Fundamental Research on Energy and Ecology, Odesa, Ukraine

²Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

PROBLEMS OF SAFE OPERATION OF ZAPORIZKA NPP IN THE CONDITIONS OF WAR IN UKRAINE

Abstract. *Among the specified types of terrorist threats, the most dangerous today is the nuclear threat, which has moved from the realm of the probable to a real military-terrorist attack on the Zaporizhzhia NPP and its capture by the occupiers. Therefore, the issue of determining the level of nuclear and environmental safety of Ukraine's nuclear power plants in extreme war conditions, using the example of the situation that developed at the Zaporizhzhia Nuclear Power Plant (ZNPP), the largest in Europe, is extremely urgent, precisely because of the station's location in the war zone.*

During the period of the full-scale war, there have already been dozens of warheads hitting the objects of the critical infrastructure of the ZNPP, the external and emergency power supply of the ZNPP (transformer equipment, power supply systems to consumers, the premises of diesel generators, the industrial site of the station, and others). There have been corresponding emergency shutdowns of the power units of the ZNPP due to the blackout of the station and due to the forced disconnection of consumers as a result of the destruction of various objects in the power grid systems. These events cause great alarm and concern of the world public regarding the possibility of new global nuclear-ecological disasters due to nuclear-radiation accidents at the ZNPP. Many years of global experience in the operation of nuclear power reactor facilities (NPRF) and their safety regulation, as well as lessons from the largest nuclear and radiation accidents at NPPs, have revealed the insufficient validity of traditional probability indicators and safety criteria for NPPs, including the Zaporizhzhya plant. Probabilistic approaches to assessing the objective level of safety of the Zaporizhzhya NPP in extreme conditions of war are insufficiently substantiated, taking into account, among other things, the need to predict the possibility of the occurrence of unlikely emergency events and their combinations, which will have catastrophic consequences.

Therefore, conducting an objective assessment of the level of nuclear and radiation safety at the ZNPP due to the station's location in the war zone, as well as substantiating practical recommendations for preventing nuclear and environmental disasters at the NPPs of Ukraine, is an extremely urgent issue for the entire nuclear energy industry of Ukraine.

Keywords: *Zaporizhzhia NPP; nuclear energy of Ukraine; nuclear and environmental safety of ZNPP; extreme operating conditions of ZNPP in war conditions; prevention of serious nuclear and environmental accidents and disasters.*

В.М. Ващенко¹, І.Б. Кордуба²

¹Міжвідомчий науковий центр фундаментальних досліджень з питань енергетики і екології, м. Одеса, Україна

²Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

ПРОБЛЕМИ БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗАПОРІЗЬКОЇ АЕС В УМОВАХ ВІЙНИ В УКРАЇНІ

***Анотація.** Серед визначених типів терористичних загроз, на сьогодні, найнебезпечнішою є ядерна загроза, яка перейшла з області ймовірних в реальну воєнно-терористичну атаку на Запорізьку АЕС та її захоплення окупантами. Тому, надзвичайно актуальним є питання визначення рівня ядерно-екологічної безпеки АЕС України в екстремальних умовах війни на прикладі ситуації, що склалася на найбільшій у Європі Запорізькій АЕС (ЗАЕС) саме з причин розташування станції в зоні бойових дій.*

За період повномасштабної війни вже сталися десятки попадань бойових снарядів по об'єктах критичної інфраструктури ЗАЕС, зовнішнього та аварійного електропостачання ЗАЕС (трансформаторне обладнання, системи електропостачання споживачам, приміщення дизель-генераторів, на промисловий майданчик станції і інші). Відбулися відповідні аварійні зупинки енергоблоків ЗАЕС через знеструмлення станції та через вимушене відключення споживачів в результаті руйнування різних об'єктів в системах електромереж. Ці події викликають велику тривогу та занепокоєння світової громадськості щодо можливості виникнення нових глобальних ядерно-екологічних катастроф внаслідок ядерно-радіаційних запроектованих аварій на ЗАЕС. Багаторічний світовий досвід експлуатації ядерних енергетичних реакторних установок (ЯЕРУ) та регулювання їх безпеки, а також уроки найбільших ядерних та радіаційних аварій на АЕС виявили недостатню обґрунтованість традиційних ймовірнісних показників та критеріїв безпеки АЕС і в тому числі Запорізької станції. Ймовірнісні підходи оцінки об'єктивного рівня безпеки Запорізької АЕС у екстремальних умовах війни недостатньо обґрунтовані з урахуванням, в тому числі, необхідності передбачати можливість виникнення малоймовірних аварійних подій та їх комбінації, які матимуть катастрофічні наслідки.

Тому проведення об'єктивної оцінки рівня ядерної та радіаційної безпеки на ЗАЕС з причин розташування станції в зоні бойових дій, а також обґрунтування практичних рекомендацій щодо запобігання ядерно-екологічним катастрофам на АЕС України є надзвичайно актуальним питанням для всієї ядерної енергетики України.

***Ключові слова:** Запорізька АЕС; ядерна енергетика України; ядерно-екологічна безпека ЗАЕС; екстремальні умови експлуатації ЗАЕС в умовах війни; запобігання важким ядерно-екологічним аваріям та катастрофам.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.3.29-38>

Вступ

Тероризм, як соціально-політичне явище, у різноманітних формах свого прояву наприкінці ХХ на початку ХХІ століття набув суттєво нових якісних рис. У середині 90-х років тероризм охопив понад 100 країн світу, а кількість терактів перевищила 25 тисяч [1]. Серед визначених типів терористичних загроз, на сьогодні, найнебезпечнішою є ядерна загроза, яка перейшла з області ймовірних в реальну воєнно-терористичну атаку на Запорізьку АЕС та її захоплення окупантами.

Мета роботи. Об'єктивна оцінка рівня ядерної та радіаційної безпеки ЗАЕС в екстремальних умовах воєнного часу, а також обґрунтування практичних рекомендацій щодо запобігання екологічним катастрофам.

Постановка задач і досліджень. Традиційно оцінка стану (рівня) ядерної та радіаційної безпеки АЕС заснована на імовірнісних та детерміністських показниках безпеки [2–13].

Основні імовірнісні показники безпеки у світовій ядерній енергетиці наступні:

– імовірність виникнення ядерної (важкої) аварії з пошкодженням ядерного палива (ЧПАЗ – частота пошкодження активної зони реактора):

$$\text{ЧПАЗ} \sim IP_s; \quad (1)$$

– імовірність виникнення гранично допустимого радіоактивного викиду:

$$\text{ЧПАВ} \sim \text{ЧПАЗ} \cdot P_b, \quad (2)$$

де I – імовірність виникнення вихідної аварійної події (ВАП); P_s – можливість відмови критичних змін систем безпеки ядерних енергоустановок; P_b – імовірність відмови захисних бар'єрів безпеки, що запобігають умовам радіоактивних викидів.

В якості ВАП регламентуються події/інциденти/порушення нормальних умов експлуатації, що призводять до аварійної зупинки реактора:

– течі/розриви трубопроводів та паропроводів систем, важливих для безпеки ядерних енергоустановок (СВБ ЯЕУ);

– знеструмлення енергоблоків; відмови СВБ нормальної експлуатації; екстремальні природні явища (землетруси, затоплення, торнадо, урагани тощо); падіння великих об'єктів на енергоблок та ін.

Зокрема, аварійні зупинки енергоблоків АЕС Fukushima-Daiichi у 2011 році сталися автоматично за зареєстрованим сигналом виникнення потужного землетрусу (з епіцентром у Тихому океані на відстані понад 100 км від узбережжя станції).

Імовірнісні критерії ядерної безпеки:

$$\text{ЧПАЗ} = \begin{cases} 10^{-4} \text{ 1/(реактор} \cdot \text{год)} - \text{для діючих ЯЕУ;} \\ 10^{-5} \text{ 1/(реактор} \cdot \text{год)} - \text{для нових ЯЕУ.} \end{cases} \quad (3)$$

Імовірнісні критерії радіаційної безпеки:

$$\text{ЧПАЗ} = \begin{cases} 10^{-6} \text{ 1/(реактор} \cdot \text{год)} - \text{для діючих ЯЕУ;} \\ 10^{-7} \text{ 1/(реактор} \cdot \text{год)} - \text{для нових ЯЕУ.} \end{cases} \quad (4)$$

Багаторічний світовий досвід експлуатації ЯЕУ та регулювання безпеки, а також уроки найбільших ядерних та радіаційних аварій визначили недостатню обґрунтованість традиційних імовірнісних показників та критеріїв безпеки (1)–(4). Зокрема, всі енергоблоки АЕС Fukushima-Daiichi на момент виникнення великої аварії у 2011 році відповідали встановленим критеріям ядерної та радіаційної безпеки.

Інші приклади можуть бути пов'язані з результатами імовірнісного аналізу безпеки (ІАБ) українських ЯЕУ з реакторами типу ВВЕР, в яких вважалося, що виникнення ВАП з повним тривалим знеструмленням енергоблоків (аналог ВАП на АЕС Fukushima-Daiichi) або торнадо (смерч) будь-якого класу інтенсивності однозначно призводить до відмови критичних для безпеки систем ($P_s = 1$). Однак імовірності цих ВАП є досить малою величиною, що задовольняє встановленим критеріям та умовам безпеки. Один із основних уроків Фукусімської аварії – необхідність передбачати можливість виникнення малоїмовірних ВАП, які мають катастрофічні наслідки.

Таким чином, застосування ймовірнісних підходів та методів оцінки стану ядерної, радіаційної та екологічної безпеки ЗАЕС в екстремальних умовах воєнного часу недостатньо обґрунтовано з таких причин:

- недосконалість імовірнісних методів оцінки рівня безпеки ЯЕУ;
- військові дії не передбачувані і підпорядковуються стохастичним закономірностям.

Більш обґрунтованими для об'єктивної оцінки безпеки є детерміністичні методи та підходи, що базуються на детерміністичному моделюванні аварійних послідовностей ВАП.

Детерміністськими критеріями ядерної та радіаційної безпеки зазвичай визначено: гранично допустимі температури ядерного палива та оболонки твелів; гранично допустимі тиски в реакторі та гермооб'ємі (контейнменті); гранично допустима концентрація водню; гранично допустимі дози радіоактивного опромінення персоналу, населення та довкілля.

Уроки Чорнобильської та Фукусімської аварій визначають актуальність додаткових детерміністських критеріїв безпеки: гранично допустимі умови виникнення парових енергетичних вибухів; гранично допустимі умови екстремальних зовнішніх впливів (землетруси, торнадо, урагани, затоплення промислових майданчиків, втрата кінцевого поглинача тепла, падіння потужних об'єктів на проммайданчик АЕС) та ін.

ЯЕУ з ВВЕР мають у своєму розпорядженні необхідні системи для запобігання ядерним і радіаційним аваріям при врахованих проєктом ВАП (течі трубопроводів, знеструмлення енергоблоку, відмови СВБ нормальної експлуатації, ненавмисні помилкові дії персоналу, землетруси та ін.).

В екстремальних умовах військового часу експлуатації ЗАЕС вихідними подіями ядерних та радіаційних аварій можуть бути: руйнування захисних бар'єрів безпеки ЯЕУ внаслідок навмисного чи випадкового влучення бойових зарядів; руйнування чи відмови критичних об'єктів інфраструктури, які забезпечують зовнішнє чи аварійне електроспоживання енергоблоків ЗАЕС; затоплення проммайданчика ЗАЕС внаслідок руйнування греблі Каховського водосховища; попадання потужних бойових зарядів у ставок-охолоджувач та інші.

До першої групи ВАП в екстремальних умовах експлуатації військового часу ЗАЕС відносяться: пошкодження або руйнування захисних бар'єрів безпеки ЯЕУ (захисна оболонка гермооб'єму – ЗО ГО, корпус реактора, тепловиділяючі збірки – ТВЗ, оболонки та паливна матриця, твел) внаслідок зовнішнього впливу бойових зарядів.

Відповідно до проєктної документації ЗАЕС гранично допустимий надлишковий тиск у ГО становить 0,5 МПа. Це граничне значення тиску може бути взято консервативно за основу оцінки граничної потужності бойових

зарядів руйнування ЗО ГО. При цьому необхідно враховувати, що експлуатаційні випробування на герметичність ЗО ГО проводяться при надлишкових тисках 0,07 МПа. Проте, тільки руйнування ГО не може бути безпосередньою причиною ядерної аварії (з пошкодженням ядерного палива). Для цього потрібна подальша руйнація захисних бар'єрів безпеки.

Гранично допустимий тиск (за умовами спрацьовування імпульсно-запобіжних клапанів) на корпус ядерного реактора ВВЕР – 17,0 МПа. Це гранично допустиме значення напруги у металі корпусу реактора при зовнішніх динамічних навантаженнях може бути консервативно прийнятим за основу оцінки гранично допустимої потужності бойового заряду пошкодження або руйнування корпусу ВВЕР. При цьому необхідно враховувати, що основа корпусу реактора – це сталь танкової броні. Тому більш реалістичними умовами пошкодження або руйнування корпусу ВВЕР є бойові заряди, здатні пробити броню сучасних танків. Крім того, необхідно враховувати, що лише порушення цілісності корпусу реактора не може бути достатньою умовою для початку ядерної аварії. Реально лише порушення цілісності корпусу реактора відповідає умовам максимальної проектної аварії (МПА) – гільйотинний розрив головного циркуляційного трубопроводу реакторного контуру.

Численні результати моделювання МПА ВВЕР-1000 на основі детерміністичних кодів встановили, що за умов збереження працездатності критичних (для забезпечення безпеки) конфігурацій систем безпеки умови початку ядерної аварії (при досягненні гранично допустимої температури оболонки твелів для початку інтенсифікації пароцирконієвої реакції при 1473 °К) не виникають при максимальній проектній аварії (МПА).

Таким чином, на основі результатів представленого аналізу встановлено, що необхідна для виникнення ядерної та радіаційної аварії потужність зовнішнього бойового заряду повинна бути здатна зруйнувати всі захисні бар'єри безпеки ЯЕУ та системи безпеки, що забезпечують управління аварійними процесами. Таку потужність можуть мати атомні чи водневі бомби.

До другої групи вихідних аварійних подій (ВАП) при експлуатації ЗАЕС в екстремальних умовах війни відносяться пошкодження або руйнування зовнішніми бойовими зарядами критичних об'єктів інфраструктури, що забезпечують зовнішнє та аварійне електропостачання АЕС. Важливо зазначити, що саме повна відмова систем зовнішнього та аварійного електропостачання власних потреб внаслідок спільного впливу землетрусу (потужністю близько 9 балів в епіцентрі) та затоплення промислового майданчика АЕС Фукусіма-1 цунамі з висотою хвилі біля узбережжя понад 14 метрів стала однією з основних аварій та катастрофічних екологічних наслідків Фукусімської аварії у 2011 році.

Лише за останній період повномасштабної війни в Україні сталося кілька десятків пошкоджень критичних об'єктів інфраструктур зовнішнього та аварійного електропостачання ЗАЕС (трансформаторне обладнання, системи електропостачання споживачам, приміщення дизель-генераторів та інші) та відповідні аварійні зупинки енергоблоків ЗАЕС через знеструмлення станцій. Аналогічні аварійні зупинки трапилися і на інших АЕС України. При цьому необхідно зазначити: процес аварійної зупинки ядерного реакторного енергоблоку знижує загальний рівень ядерної та радіаційної безпеки за

проектними допустимими циклами термічних та динамічних навантажень на системи важливі для безпеки ЯЕРУ з ВВЕР; аварійні зупинки АЕС суттєво впливають на надійність та працездатність усієї енергетичної системи України.

Наступною домінуючою для безпеки групою вихідних аварійних подій (ВАП) в екстремальних умовах військового часу експлуатації ЗАЕС є затоплення промислового майданчика станції внаслідок попадання бойових зарядів у греблю та в акваторію Каховського водосховища (висота греблі понад 50 метрів над рівнем водосховища), в ставок-охолоджувач ЗАЕС каскаду водосховищ, в якому знаходиться понад 2 млн тонн води.

Наслідками затоплення промислового майданчика ЗАЕС можуть бути: ВАП повного знеструмлення енергоблоків (аналог ВАП Фукусімської аварії); порушення умов теплообміну у сухих сховищах відпрацьованого ядерного палива (СВЯП).

Таким чином, найбільш актуальне для ядерної та радіаційної безпеки ВАП в екстремальних умовах експлуатації ЗАЕС в умовах війни є повне тривале знеструмлення (ПТЗ) внаслідок руйнування/пошкодження критичних об'єктів інфраструктури електропостачання та/або затоплення промислового майданчика (ВАП ПТЗ – аналог початку ядерних та радіаційних аварій Фукусімської катастрофи).

Відповідно до ядерного законодавства України офіційна оцінка критичності стану безпеки АЕС та прийняття рішень щодо можливості подальшої експлуатації або необхідності зупинення енергоблоків покладається на Державну інспекцію ядерного регулювання України (ДІЯРУ). Проте екстремальна ситуація в управлінні, експлуатації та регулюванні безпеки внаслідок терористичного тимчасового захоплення ЗАЕС вкрай ускладнює прийняття та реалізації ДІЯРУ адекватних рішень.

Оцінки стану безпеки ядерної енергетики України в екстремальних умовах війни. Нині в Україні, як і в світовій ядерній енергетиці, широкого поширення при модернізаціях ЯЕУ набув принцип «допустимості зниження рівня безпеки (ДЗРБ)» [1]. Відповідно до цього принципу зниження рівня безпеки ЯЕУ допустиме за умови

$$\frac{\Delta\text{ЧПАЗ}}{\text{ЧПАЗ}_0} \ll 1, \quad (5)$$

де ЧПАЗ_0 – базова імовірнісна оцінка частоти пошкодження активної зони (ЧПАЗ); $\Delta\text{ЧПАЗ}$ – навмисне або ненавмисне збільшення ЧПАЗ.

В екстремальних умовах експлуатації ЗАЕС $\Delta\text{ЧПАЗ}$ може бути пов'язане зі збільшенням імовірності ВАП, і якщо події/інциденти/порушення нормальної експлуатації, що виникають, задовольняють умові (5), то зберігається імовірність порушення умови (5). Крім того, як зазначалося вище, уроки відомих ядерних аварій ставлять рівень безпеки та допустиму подальшу експлуатацію енергоблоків у поточний момент часу. Такий підхід до оцінки рівня безпеки експлуатації ЗАЕС в екстремальних умовах війни є недостатньо обґрунтованим з наступних причин: у дофукусімський період в експлуатаційних звітах з імовірнісного аналізу безпеки (ІАБ) українських АЕС з ВВЕР-1000 важка ядерна аварія мала бути однозначним наслідком ВАП ПТЗ.

Однак, імовірність виникнення ВАП ПТЗ покладалась досить малою (порядку 10^{-7} реактор/рік). Тому внесок ВАП ПТЗ (повне тривале

знеструмлення) у базове значення ЧПАЗ був несуттєвим і умова допустимості зниження рівня безпеки (ДЗРБ) (5) виконувалася; а аварії з ВАП ПТЗ мали низький пріоритет для безпеки та розробки превентивних протиаварійних заходів. Однак після Фукусімської аварії ВАП ПТЗ отримали високий пріоритет для безпеки та розробки превентивних протиаварійних заходів.

Отже, найбільш актуальне для ядерної та радіаційної безпеки ВАП в екстремальних воєнних умовах експлуатації ЗАЕС – це повне тривале знеструмлення (ПТЗ) внаслідок руйнування/пошкодження критичних об'єктів інфраструктури електропостачання та/або затоплення промислового майданчика (ВАП ПТЗ – аналог початку ядерних та радіаційних аварій Фукусімської катастрофи).

В екстремальних умовах війни бойові дії є не передбачуваними і не підкоряються стохастичним закономірностям. Крім того, як зазначалося вище, уроки відомих ядерних аварій ставлять під сумнів обґрунтованість загалом усієї методології ІАБ для об'єктивної оцінки стану безпеки ядерних енергетичних установок (ЯЕУ) і в тому числі принцип допустимого зниження рівня безпеки (ДЗРБ). Такий підхід до оцінки рівня безпеки експлуатації ЗАЕС в екстремальних умовах війни є недостатньо обґрунтованим з наступних причин: це не виключає можливості появи нових ВАП, що ставить під сумнів обґрунтованість загалом усієї методології ІАБ для об'єктивної оцінки стану безпеки ЯЕУ (у тому числі й принцип ДЗРБ).

Більш обґрунтованим для об'єктивної оцінки стану (рівня) безпеки є детерміністський підхід, в основу якого покладено моделювання впливу конкретних екстремальних подій на умови безпеки. Одним із таких актуальних питань може бути оцінка умов затоплення промислового майданчика ЗАЕС внаслідок попадання бойових зарядів у греблю чи в Каховське водосховище, чи в ставок-охолоджувач. Затоплення промислового майданчика АЕС Fukushima-Daiichi у 2011 році цунамі було визначальною причиною повного тривалого знеструмлення (ПТЗ) енергоблоків, ядерних аварій та катастрофічних екологічних наслідків.

У стрес-тестах з переоцінки безпеки АЕС України з урахуванням уроків Фукусімської аварії було проведено детерміністський аналіз можливості затоплення промислового майданчика ЗАЕС внаслідок руйнування гребель Дніпровського каскаду водосховищ під час запроєктного землетрусу. Внаслідок цього було встановлено відсутність можливості/ризиків затоплення промислового майданчика ЗАЕС. Однак при моделюванні процесів затоплення у стрес-тестах використовувалися спрощені квазістаціонарні гідравлічні моделі, а також не враховувався вплив таких екстремальних явищ, як землетруси, торнадо та урагани безпосередньо на об'єми води в Каховському водосховищі та в ставку-охолоджувачі ЗАЕС.

У роботі [2] була розроблена вдосконалена гідродинамічна модель можливого затоплення промислового майданчика ЗАЕС внаслідок впливу означених екстремальних явищ на греблю та на акваторію Каховського водосховища та ставка-охолоджувача станції. Екстраполяція результатів цього моделювання на екстремальні воєнні умови експлуатації ЗАЕС дозволяє вважати, що затоплення промислового майданчика ЗАЕС можливе при попаданні бойових зарядів у греблю, в акваторію Каховського водосховища та ставок-охолоджувач з потужністю зарядів, здатною зруйнувати понад 30% греблі або еквівалентною землетрусу з відгуком прискорення на поверхні

грунту більше як 1,2 g, або торнадо більше 2-го класу інтенсивності, або урагану зі швидкістю вітру понад 80 км/год.

З урахуванням вищенаведених результатів умови затоплення промислового майданчика ЗАЕС за потужності бойового заряду із силою впливу F:

$$F > 1,2\rho HS_1 g \quad (6)$$

і/або

$$F > \Delta P_2 S_1 \quad (7)$$

і/або

$$F > 0,3\sigma S_2 \quad (8)$$

і/або

$$F > v_c^2 \rho HS_1 / L, \quad (9)$$

де ρ – щільність води; H – висота промислового майданчика ЗАЕС над рівнем ставка-охолоджувача; S_1, S_2 – площа поверхні ставка-охолоджувача та греблі Каховського водосховища відповідно; g – прискорення сили тяжіння; ΔP_2 – тиск розрідження у торнадо 2-го класу інтенсивності; σ – гранично допустима напруга руйнування бетону греблі Каховського водосховища; v_c – гранично допустима швидкість ураганного вітру; L – еквівалентний (наведений) розмір ставка-охолоджувача.

У постфукусімський період також були розроблені протиаварійні заходи для українських АЕС, пов'язані переважно з кваліфікацією систем дизель-генераторів, встановленням потужних батарей постійного струму, розширенням можливостей пасивних систем безпеки, впровадженням експлуатаційних інструкцій/посібників з управління аваріями з повним тривалим знеструмленням (ПТЗ) та ін. Проте ефективність всіх цих заходів щодо подолання наслідків затоплення недостатньо очевидна, оскільки на момент аварії на АЕС Fukushima-Daiichi всі зазначені вище заходи були реалізовані, але запобігти ядерним аваріям, руйнівним парогазовим вибухам і катастрофічним екологічним наслідкам зрештою не вдалося.

Крім того, необхідно враховувати, що на промисловому майданчику ЗАЕС розташовані сухі сховища відпрацьованого ядерного палива (СВЯП), в яких охолодження ядерного палива здійснюється природною циркуляцією повітря. У разі затоплення разом зі сміттям можуть бути порушені умови необхідного охолодження СХВЯП, що створює додаткові вихідні аварійні події (ВАП).

Таким чином, критичними наслідками затоплення промислового майданчика ЗАЕС можуть бути наступні ВАП: повне тривале знеструмлення енергоблоку; порушення умов теплообміну в СХВЯП.

В розроблених у пост-фукусімський період СОАІ/КЯА ВВЕР-1000 дії оперативного персоналу з управління аваріями з повним тривалим знеструмленням (ПТЗ) фактично зводяться до заходів з відновлення електропостачання та підключення всіх доступних засобів охолодження активної зони реактора і в тому числі акумуляторних батарей постійного струму для забезпечення працездатності електронасосів активних систем безпеки.

Слід зазначити, що спроби реалізації всіх зазначених заходів були і в умовах Фукусімської аварії. Проте уникнути ядерних аварій, руйнівних

вибухів та катастрофічних екологічних наслідків не вдалося. Тому не існує підстав щодо ефективності цих заходів у екстремальних умовах затоплення промислового майданчика ЗАЕС.

Для запобігання можливому затопленню промислового майданчика ЗАЕС може бути ефективним будівництво дамб на березі ставка-охолоджувача.

Висновки

1. Актуальним питанням оцінки стану/рівня безпеки ядерної енергетики України в екстремальних умовах війни є ситуація на найбільшій у Європі Запорізькій АЕС з причин її тимчасового знаходження в зоні бойових дій та труднощів в управлінні та експлуатації, а також регулювання безпеки на окупованій станції.

2. Імовірнісні підходи оцінки об'єктивного стану/рівня безпеки Запорізької АЕС у екстремальних умовах є недостатньо обґрунтованими з урахуванням уроків найбільших ядерних та радіаційних аварій.

3. На основі детерміністського підходу визначено умови критичного затоплення для безпеки промислового майданчика Запорізької АЕС внаслідок екстремальних бойових дій.

4. Затоплення промислового майданчика ЗАЕС може бути причиною виникнення двох вихідних аварійних подій: повне тривале знеструмлення енергоблоків; порушення умов теплообміну у сухих сховищах відпрацьованого ядерного палива.

5. Запобігання затопленню промислового майданчика Запорізької АЕС може ґрунтуватися на будівництві захисних бар'єрів від затоплення на березі ставка-охолоджувача.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Забулонов Ю.Л., Лисиченко Г.В., Ковалевський В.В. Тероризм XXI століття – реальна загроза техногенно-екологічній безпеці. – Збірник тез доповідей – Міжнародна науково-практична конференція “Перший Всеукраїнський з’їзд екологів” – Інтернет-спільнота «Промислова екологія» – <http://eco.com.ua/>
2. Комплекс методів переоцінки безпеки атомної енергетики України з урахуванням уроків екологічних катастроф у Чорнобилі та Фукусімі / За ред. В. І. Скалозубова. Одеса: Астропринт, 2013. 242 с.
3. Громов Г.В., Дибач А.М., Зелений О.В., Інюшев В.В. та ін. Результати експертної оцінки стрес-тестів діючих енергоблоків АЕС України з урахуванням уроків аварії на АЕС «Фукусіма-1» Японії. Ядерна та радіаційна безпека. 2012. № 1 (53). С. 3–9.
4. Острейковський В.А., Швириєв Ю.В. Безпека атомних станцій. Імовірнісний аналіз безпеки. М.: ФІЗМАТЛІТ, 2008. 352 с.
5. IAEA International Fact Finding Expert Mission of Fukushima Dai-Ichi NPP Accident Following the Great East Japan Earthquake and Tsunami: IAEA Mission Report. IAEA, 2011. 160 p.
6. Грищенко Б.Ю., Полянський М.А., Севбо О.Є., Семенюк І.А. Застосування ймовірнісних методів аналізу безпеки АЕС при дослідженні порушень крихкої міцності корпусу реактора. Ядерна та радіаційна безпека. 2013. № 1 (57). С. 22–25.
7. Щодо Плану дій з виконання цільової позачергової перевірки та подальшого підвищення безпеки АЕС України з урахуванням подій на Фукусіма-1. Колегія Держатомрегулювання, №2 від 19.05.11 р.

8. Борисенко В.І. Про деякі закономірності наслідків аварій на АЕС. Проблеми безпеки АЕС та Чорнобиля. 2012. Випуск 18. С. 6–15.
9. Результати проведення стрес-тестів Національний звіт України. ГІЯРУ, 2011. 137 с.

Стаття надійшла до редакції 09.03.2023 і прийнята до друку після рецензування 31.05.2023

REFERENCES

1. Zabuloniv, Yu.L., Lysychenko, H.V., & Kovalevskiy, V.V. Teroryzm XXI stolittia – realna zahroza tekhnohenno-ekolohichnii bezpetsi. In *Zbirnyk tez dopovidei Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia “Pershyi Vseukrainskyi zizd ekolohiv”*. Internet-spilnota «Promyslova.ekolohiia». Retrieved from: <http://eco.com.ua/> [in Ukrainian].
2. Skalozubov, V. I. (Ed.). (2013). *Kompleks metodiv pereotsinky bezpeky atomnoi enerhetyky Ukrainy z urakhuvanniam urokv ekolohichny khkatastrof u Chornobyli ta Fukusimi*. Odesa: Astroprint [in Ukrainian].
3. Hromov, H.V., Dybach, A.M., Zelenyi, O.V., Iniushev, V.V. et al. (2012). *Rezultat yekspertnoi otsinky stres-testiv diiuchykh enerhoblokv AES Ukrainy z urakhuvanniam urokv avariina AES «Fukusima-1» Yaponii. Yaderna ta radiatsiina bezpeka*, 1 (53), 3-9 [in Ukrainian].
4. Ostreikovskiy, V.A., & Shvyriaiev, Yu.V. (2008). *Bezpeka atomnykh stantsii. Imovirnisnyi analiz bezpeky*. Moskow: FIZMATLIT [in Ukrainian].
5. IAEA International Fact Finding Expert Mission of Fukushima Dai-Ichi NPP Accident Following the Great East Japan Earthquake and Tsunami. (2011). IAEA Mission Report.
6. Hryshchenko, B.Yu., Polianskyi, M.A., Sevbo, O.Ye., & Semeniuk, I.A. (2013). *Zastosuvannia ymovirnisnykh metodiv analizu bezpeky AES pry doslidzhenni porushen krykhkoi mitsnosti korpusu reaktora. Yaderna ta radiatsiina bezpeka*, 1 (57), 22-25 [in Ukrainian].
7. Shchodo Planu dii z vykonannia tsilovoi pozacherhovoї perevirky ta podalshoho pidvyshchennia bezpeky AES Ukrainy z urakhuvanniam podiina Fukusima-1. *Kolehiia Derzhatomrehuliuвання*, №2 vid 19.05.11.
8. Borysenko, V.I. (2012). *Pro deiaki zakonornosti naslidkiv avariina AES. Problemy bezpeky AES ta Chornobyliia*, 18, 6-15 [in Ukrainian].
9. *Rezultaty provedennia stres-testiv. Natsionalnyi zvit Ukrainy*. (2011). НІАРУ.

The article was received 09.03.2023 and was accepted after revision 31.05.2023

Автори висловлюють свою вдячність Скалозубову Володимиру Івановичу, доктору технічних наук, професору кафедри атомних електростанцій Національного університету «Одеська політехніка» за обговорення та корисні поради в процесі виконання даної роботи.

Ващенко Володимир Миколайович

доктор фізико-математичних наук, професор Міжвідомчого наукового центру фундаментальних досліджень з питань енергетики і екології

Адреса робоча: пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1585-1229> **e-mail:** nucleoroid@gmail

Кордуба Ірина Богданівна

кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій захисту навколишнього середовища і охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури

Адреса робоча: Повітрофлотський проспект, 31, м. Київ, Україна, 03037

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5135-8465> **e-mail:** uaror-korduba@ukr.net