

# ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ В ЕНЕРГЕТИЦІ

## ENVIRONMENTAL PROBLEMS IN ENERGY

УДК 629.031

DOI 10.20535/1813-5420.3.2022.272090

**В. А. Кондратюк**, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0001-5035-311X

**Є.М.Письменний**, д-р техн. наук, професор, ORCID 0000-0001-6403-6596

**І.А. Остапенко**, інженер, ORCID 0000-0003-3980-1609

**Д.О.Федоров**, інженер, ORCID 0000-0003-3751-6986

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### УРОКИ АВАРІЇ НА АЕС FUKUSHIMA-DAIICHI ДЛЯ БЕЗПЕКИ ЯДЕРНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ

*Основними причинами руйнівних парогазових вибухів з катастрофічними екологічними наслідками в процесі аварії на АЕС Fukushima-Daiichi стала втрата герметичності контурів пасивних систем безпеки відведення залишкових тепловиділень реактора та критичної для безпеки функції відведення залишкових тепловиділень у басейні витримки відпрацьованого ядерного палива. Основний урок Фукусімської аварії для екологічної безпеки ядерної енергетики України – необхідність передбачити можливість виникнення малоймовірних аварійних подій, що мають катастрофічні екологічні наслідки. До таких малоймовірних подій належать: затоплення проммайданчика АЕС, повне тривале знеструмлення, парогазові руйнівні вибухи, спільна дія зовнішніх екстремальних явищ. Виходячи з цього сформульовані наступні уроки Фукусімської аварії для ядерної енергетики України щодо малоймовірних аварійних подій із катастрофічними екологічними наслідками: урок 1 - необхідність надійної ізоляції приміщень дизель-генераторів зовнішніх екстремальних явищ; урок 2 - необхідність удосконалення стратегій та способів керування аваріями з повним тривалим знеструмленням та урок 3 - необхідність визначення умов парогазових вибухів. Уроки Фукусімської аварії та відомі результати аналізу умов вибухонебезпечності в ядерних енергоустановках із ВВЕР визначають необхідність удосконалення методів моделювання умов та наслідків парогазових вибухів на динамічних етапах аварійних процесів. Уроки Фукусімської аварії та результати розрахункового моделювання аварії з повним тривалим знеструмленням ядерних енергоустановок з ВВЕР визначають необхідність удосконалення стратегій та способів запобігання та управління аваріями з повним тривалим знеструмленням. Перспективним підходом є комплексне застосування додаткових пасивних систем безпеки забезпечення функції підживлення парогенераторів турбонасосами (область щодо підвищених тисків) та природною циркуляцією (область щодо знижених тисків).*

**Ключові слова:** уроки Фукусімської аварії, управління аваріями, пасивні системи безпеки

#### Вступ

У березні – квітні 2011 р. на АЕС Fukushima-Daiichi (Японія) внаслідок потужного сейсмічного впливу та затоплення проммайданчика сталася одна з найбільших аварій ядерної енергетики. Затоплення проммайданчика та турбінних відділень із дизель-генераторами систем електропостачання призвело до втрати зовнішнього електропостачання та відмов електронасосів систем безпеки, що забезпечують відведення залишкових тепловиділень ядерного палива. Пасивні системи безпеки, що не вимагають електропостачання, також не забезпечили необхідні умови ядерної безпеки та вибухобезпеки, що зрештою призвело до важких аварій, руйнівних парогазових вибухів та катастрофічних радіаційних та екологічних наслідків.

В результаті великої аварії, за оцінками експлуатуючої компанії ТЕРСО, за один місяць, що пройшов після аварії (до 13 квітня 2011 р.), обсяг викиду в навколишнє середовище радіоактивного йоду-131 склав 105 ТБк, а цезію-137 - 104 ТБк.

Для порівняння: при аварії на Чорнобильській АЕС сумарна активність речовин, викинутих у навколишнє середовище, склала, за різними оцінками, до 14·10<sup>6</sup> ТБк, у тому числі 1,8·10<sup>6</sup> ТБк йоду-131, 0,085·10<sup>6</sup> ТБк 0,01·10<sup>6</sup> ТБк стронцію-90, 0,003·10<sup>6</sup> ТБк ізотопів плутонію. На частину «шляхетних» газів припадало близько 50 % від сумарної активності. Наведені дані свідчать про те, що аварія на АЕС Fukushima-Daiichi за своїми радіаційними наслідками відповідає рівню Чорнобильської аварії.

Спочатку аварію на АЕС Fukushima-Daiichi було перекваліфіковано з 4-го рівня міжнародної шкали INES на 5-й рівень – «аварія з широкими наслідками, пов'язаними з тяжким пошкодженням активної зони».

Однак, на думку експертів МАГАТЕ та низки регулюючих органів інших країн, аварію на АЕС Fukushima-Daiichi слід кваліфікувати не нижче 6-го рівня – «важка аварія, значний викид радіоактивних продуктів за межі майданчика АЕС, які вимагають прийняття відповідних контрзаходів». Остаточно аварії на блоках № 1 – 4 були об'єднані у спільну подію, яка кваліфікована аналогічно до Чорнобильської АЕС найвищим 7-м рівнем – «велика аварія».

Причини, наслідки та уроки Фукусімської аварії є актуальними для всієї світової ядерної енергетики. Тому уроки великої аварії на АЕС Fukushima-Daiichi необхідно враховувати для різних конструкцій ядерних енергоустановок, умов та досвіду експлуатації.

Основна мета роботи – аналіз уроків Фукусімської аварії для забезпечення безпеки українських атомних енергоблоків при екстремальних зовнішніх явищах та повному тривалому знеструмленні ядерних енергоустановок із ВВЕР.

Хронологія, наслідки та уроки великої аварії на АЕС Fukushima-Daiichi розглянуті у численних роботах [1 – 16]. Узагальнення результатів цих досліджень дозволяє зробити висновок, що основними причинами аварії були:

- значні конструкційно-технічні недоліки киплячих реакторів BWR у запобіганні ядерним (важким) аваріям та парогазовим вибухам при повній втраті електропостачання;

- недостатня підготовленість персоналу до управління аваріями з повним тривалим знеструмленням в екстремально складній обстановці після затоплення промайданчика АЕС.

### **Аналіз уроків Фукусімської аварії для безпеки ядерної енергетики України**

Основний урок Фукусімської аварії для екологічної безпеки ядерної енергетики України – необхідність передбачити можливість виникнення малоймовірних аварійних подій, що мають катастрофічні екологічні наслідки. До таких малоймовірних подій, що відбулися на АЕС Fukushima-Daiichi, належать: затоплення промайданчика АЕС; повне тривале знеструмлення ЯЕУ; парогазові руйнівні вибухи; спільна дія зовнішніх екстремальних явищ (землетрус, смерчі, урагани, падіння великих об'єктів).

Далі розглянемо докладніше уроки Фукусімської аварії для ядерної енергетики України щодо малоймовірних аварійних подій із катастрофічними екологічними наслідками.

Урок 1. Необхідність надійної ізоляції приміщень дизель-генераторів зовнішніх екстремальних явищ.

За визнанням експлуатуючої організації ТЕРСО затоплення промайданчика, що мало місце в процесі аварії на АЕС Fukushima-Daiichi, виявилось повною несподіванкою і стало основною причиною подальших катастрофічних подій. Промайданчик АЕС Fukushima-Daiichi розташований на висоті 10 м над рівнем моря, система хвилерізів висотою понад 5 м над рівнем моря, а максимальна проектна розрахункова висота цунамі 5,5 м. Тому хвиля, що виникла біля узбережжя висотою понад 14 м, що призвела до катастрофічного затоплення, представлялася вкрай малоймовірною подією, а протиаварійні заходи щодо запобігання затопленню приміщень з дизель-генераторами були недостатніми і персонал не був підготовлений до управління аваріями на енергоблоках у складі.

До Фукусімської аварії у Звітах з безпеки (ОАБ) організації АЕС України, що експлуатує, питання можливого затоплення промайданчиків взагалі не розглядалися. Після аварії вже у 2012 р. Головна інспекція ядерного регулювання України (ДІЯРУ) розробила стрес-тести переоцінки безпеки АЕС України з урахуванням уроків Фукусімської аварії, в яких одне з пріоритетних питань – аналіз можливості затоплення промайданчиків АЕС внаслідок руйнування землетрусом гребель пристанційних вод.

Основний результат проведених стрес-тестів – відсутність можливості затоплення промайданчиків АЕС. Проте методичне забезпечення стрес-тестів ґрунтувалося на квазірівноважних гідравлічних моделях затоплення. Так, при моделюванні можливого затоплення промайданчика Запорізької АЕС у стрес-тестах вважалося, що внаслідок руйнування землетрусом гребель Дніпровського каскаду водосховищ близько 2 млн. тон води з висоти понад 50 м поступово поступатиме і розтікатиметься в обсязі Каховського водосховища. При цьому не враховувалася також можливість безпосереднього спільного динамічного впливу землетрусу, смерчів (торнадо) та ураганів на обсяги Каховського водосховища та пристанційного ставка-охолоджувача Запорізької АЕС.

У роботах [17, 21] була представлена оригінальна гідродинамічна модель можливого затоплення промайданчика Запорізької АЕС при спільній дії екстремальних природних явищ. В результаті встановлено умови можливого затоплення промайданчика Запорізької АЕС:

- відгук прискорення землетрусу на поверхні ґрунту більше 1,0 g (при тривалості сейсмічних поштовхів не більше 10 с) та/або;

- смерч (торнадо) більше 2-го класу інтенсивності та/або;

- ураганний вітер не менше 100 км/год.

Необхідно також зазначити, що в ОАБ вважалося, що смерч (торнадо) будь-якого класу інтенсивності призводить до ядерної (важкої) аварії. Але виникнення смерчу в ОАБ мало малоймовірну

екстремальну подію для України, і тому моделювання умов та наслідків для безпеки виникнення смерчів в ОАБ не представлено. Припущення про малу ймовірність виникнення смерчів на території України суперечить багаторічним спостереженням, згідно з якими східна та північно-західна частини України є смерчо небезпечними зонами із зареєстрованими смерчами 3-го класу інтенсивності [21].

Таким чином, з урахуванням уроків Фукусіми необхідно передбачити можливість затоплення проммайданчиків АЕС України як малоймовірну аварійну подію, яка може мати катастрофічні наслідки. Затоплення проммайданчика АЕС Fukushima-Daiichi (у тому числі і приміщень аварійних дизель-генераторів) призвело до повного тривалого знеструмлення блоків (крім 6-го) та непереборних труднощів управління аварією. Тому потрібні превентивні заходи повної ізоляції приміщень з аварійними дизель-генераторами від затоплень. Зокрема, якби ці заходи були передбачені на АЕС Fukushima-Daiichi, то, можливо, це б запобігло відмовим аварійного електропостачання дизель-генераторами.

Урок 2. Необхідність удосконалення стратегій та способів керування аваріями з повним тривалим знеструмленням.

У киплячих реакторах BWR АЕС Fukushima-Daiichi функція безпеки щодо відведення залишкових тепловиділень у реакторі та басейнах витримки відпрацьованого ядерного палива (БВ ВЯП) забезпечувалася електронасосами з джерелами електроживлення від мереж зовнішнього електропостачання, аварійних дизель-генераторів та акумуляторів. В результаті затоплення проммайданчика станції та приміщень з дизель-генераторами відбулася повна втрата зовнішнього електропостачання всіх блоків, а працездатними залишилися один дизель-генератор на 6-му блоці та акумуляторні батареї на 3-му, 5-му та 6-му блоках. Проектний термін безперервної ефективної експлуатації акумуляторних батарей АЕС Fukushima-Daiichi був не більше 8 год. Таким чином, 1-й, 2-й та 4-й блоки у початкові моменти затоплення, а 3-й та 5-й блоки – через 8 год опинилися в аварійному стані повного знеструмлення з відмовами всіх електронасосів проектних (штатних) систем безпеки.

В умовах повного знеструмлення функцію безпеки щодо відведення залишкових тепловиділень у блоках з BWR повинні були забезпечити пасивні системи безпеки, що не потребують тривалого електропостачання. На 1-му блоці такою пасивною системою безпеки була система басейну-барботера ізоляційного конденсатора (IC). IC була контуром природної циркуляції з відбором пароводяної суміші з реактора і конденсацією пароводяного теплоносія в басейні-барботері, розташованому в реакторному приміщенні за межами первинної захисної оболонки реактора. Проектний час працездатності однієї IC визначався запасом води у басейні-барботері та становив близько 4 год.

Пасивна система відведення залишкових тепловиділень у 2 - 6-му блоках (RCIC) складалася з контуру циркуляції з турбонасосом з паровим приводом від реактора та басейном зниження тиску, розташованими в реакторному відділенні за межами первинної захисної оболонки. Проектний час ефективної працездатності однієї RCIC також обмежений запасами бака-накопичувача конденсату; при цьому RCIC може бути ефективною тільки за підвищеного тиску в реакторі, що забезпечує працездатність турбонасоса.

Основні недоліки пасивних систем безпеки IC та RCIC реакторів BWR щодо управління аваріями з повним знеструмленням:

- а) неефективність забезпечення відведення залишкових тепловиділень у реакторі при аваріях з повним тривалим знеструмленням;
- б) при виникненні теч у контурах IC і RCIC можливе пряме попадання водню та радіоактивних продуктів за межі первинної захисної оболонки.

У БВ ВЯП BWR АЕС Fukushima-Daiichi пасивні системи безпеки відведення залишкових тепловиділень взагалі не були передбачені.

Таким чином, функції безпеки щодо відведення залишкових тепловиділень у зупинених реакторах і БВ ВЯП при повному тривалому знеструмленні не були забезпечені, що зрештою призвело до ядерних (важких) аварій та руйнівних парогазових вибухів.

Основні дії персоналу в процесі аварій з повним тривалим знеструмленням: відновлення електропостачання; вентиляція для зниження тиску в реакторі та захисному гермообсязі; підключення всіх доступних засобів охолодження. На думку експертів МАГАТЕ персонал станції героїчно діяв відповідно до встановлених симптомно-орієнтованих процедур з управління аваріями з повним знеструмленням. Проте уникнути катастрофи зрештою не вдалося, і проектні стратегії управління аваріями виявилися неефективними.

Після Фукусімської аварії Національний комітет ядерного регулювання США (NRC) провів подвійні інспекції на всіх енергоблоках АЕС щодо аналізу ефективності встановлених стратегій і способів управління подібними аваріями з повним тривалим знеструмленням [16]. В результаті проведених інспекцій було встановлено недостатню ефективність стратегій та способів управління подібними аваріями з повним тривалим знеструмленням на енергоблоках АЕС США.

До Фукусімської аварії в ОАБ українських АЕС аварія з повним знеструмленням належала як вкрай малоймовірна подія (10-7 – 10-8 1/реактор) і тому не мали пріоритетного значення для забезпечення

безпеки ЯЕУ з ВВЕР. Стратегії та способи управління аваріями з повним тривалим знеструмленням в ЯЕУ з ВВЕР відображені в експлуатаційних посібниках з управління важкими аваріями (РУТА) та симптомно-орієнтованих аварійних інструкціях (СОАІ), де регламентовані аналогічні фукусімські заходи – відновлення електропостачання, вентиляція реактора низьконапірних систем охолодження та ін. Однак уроки Фукусімської аварії визначили недостатню ефективність такої стратегії та способів управління аваріями з повним тривалим знеструмленням.

Принциповою відмінністю ЯЕУ з ВВЕР і ВВР є наявність парогенератора, який у разі виникнення аварій з повним знеструмленням може бути основною пасивною системою безпеки, що забезпечує відведення залишкових тепловиділень в реакторі. В цьому випадку критичною функцією при аварії з повним тривалим знеструмленням є забезпечення необхідного рівня живильної води в об'ємі парогенератора для ефективного відведення тепловиділень в реакторі (у тому числі при відмовах аварійного захисту реактора).

Проведений у постфукусімський період в ОАБ ВВЕР-1000 детерміністський аналіз кодами RELAP та MELCOR аварій з повним тривалим знеструмленням встановив, що порушення умов ядерної безпеки настає при «порожненні» обсягу парогенератора та відносної потужності залишкових тепловиділень менше 2%. За результатами проведених досліджень, зокрема стрес-тестів визначено, що забезпечення необхідного рівня води в об'ємі парогенератора може бути здійснено шляхом подачі середовища за допомогою аварійного живильного електронасосу (АПЕН), мобільних установок, пожежних машин тощо.

У постфукусімський період основними напрямками підвищення ефективності стратегій управління аваріями з повним тривалим знеструмленням ЯЕУ з ВВЕР є:

- модернізація системи електропостачання власних потреб;
- впровадження додаткових пасивних систем безпеки підживлення парогенератора, які потребують тривалого електропостачання.

Модернізація системи електропостачання власних потреб в основному передбачає встановлення додаткових потужних акумуляторів, які забезпечують достатні умови виконання функцій безпеки для аварій з повним знеструмленням не менше трьох діб.

Недоліки такого підходу:

- а) великі економічні витрати;
- б) неефективність акумуляторних джерел електропостачання у разі відмов із загальної причини (що й сталося під час аварії на АЕС Fukushima-Daiichi).

Найбільш перспективним є напрям розробки та впровадження додаткових пасивних систем безпеки підживлення парогенератора, що не потребують тривалого електропостачання.

Перший підхід у цьому напрямку ґрунтується на застосуванні систем пасивного відведення тепла природною циркуляцією від парогенератора (СПОТ ПЦ). Однак СПОТ ПЦ обґрунтовані для зниження відносно низького (порівняно з парогенератором) тиску в гермообсязі ЯЕУ з ВВЕР за відсутності «жорстких» вимог до витрати конденсату, що утворився. Актуальним недоліком СПОТ ПЦ також є необхідність розташування теплообмінників-конденсаторів за межами гермооболонки ЯЕУ з ВВЕР, що знижує загальний рівень безпеки при екстремальних зовнішніх впливах. Уроки Фукусімської аварії на 1-му блоці визначили як недостатню ефективність подібної СПОТ ПЦ від реактора задля забезпечення критичної функції безпеки відведення залишкових тепловиділень, а й можливість ініціювання парогазових вибухів при порушеннях герметичності системи. У роботі [19] на основі аналізу теплогідродинамічних процесів у СПОТ ПЦ показано, що для забезпечення витрати одного АПЕН парогенератора СПОТ ПЦ парогенератора повинна мати нереальні габаритні розміри (площа теплообмінної поверхні близько десятків тисяч квадратних метрів на висоті кількох сотень метрів над гермооболонкою).

Другий підхід ґрунтується на пропозиції професора А.В. Корольова про застосування аналога турбонасоса RCIC ВВР з пароприводом від парогенератора для керування аварією з повним знеструмленням. Як такий турбонасос пропонується так званий «насос Тесла». Проте експериментально працездатність насоса Тесли була обґрунтована для низьких тисків пари. При цьому необхідно враховувати, що гідравлічна характеристика насосів з пароприводом (на відміну від насосів з електроприводом) залежить від тиску в пароприводі. У процесі аварії тиск пари в парогенераторі може змінюватись у широкому діапазоні (від 8,0 до 0,1 МПа).

Найбільш перспективним підходом є застосування аналога основного турбоживильного насоса (ТЖН) ЯЕУ з ВВЕР [19]. Багаторічний досвід експлуатації ТЖН ЯЕУ з ВВЕР визначив достатню його надійність та ефективність експлуатації. Проведена у роботі [19] розрахункова кваліфікація «аналогу ТЖН» з паровим приводом від парогенератора визначила ефективність забезпечення умов безпеки модернізованою стратегією управління аваріями з повним знеструмленням. СПОТ ПЦ реалістичних габаритів з необхідними зміцненнями конструкції може бути ефективною для кінцевих етапів розвитку аварії при відносній потужності залишкових тепловиділень менше 2% та тиску в парогенераторі менше 0,3 МПа.

Уроки Фукусімської аварії визначили, що пасивні системи безпеки підживлення парогенератора мають бути віднесені з 1-го класу безпеки ЯЕУ з ВВЕР.

Урок 3. Необхідність визначення умов парогазових вибухів.

Парогазовий вибух – це явище імпульсного виділення внутрішньої енергії у парогазовому середовищі внаслідок критичної інтенсифікації тепломасообмінних та/або фізико-хімічних процесів виділення вибухонебезпечних газів.

У ядерній енергетиці парогазові вибухи умовно поділяються на «парові», спричинені інтенсифікацією процесів пароутворення, та «водневі», спричинені утворенням водню критичної концентрації. Умовність такого поділу визначається температур, що при потужних «парових» вибухах можливе «розщеплення» молекул водяної пари на водень (детонатор «водневого» вибуху) та кисень (каталізатор «водневого» вибуху); а при потужних «водневих» вибухах можлива наступна інтенсивна генерація водяної пари та виникнення умов «парового» вибуху.

Потужний руйнівний парогазовий вибух на 4-му блоці Чорнобильської АЕС 1986 р. став основною причиною катастрофічних радіаційних та екологічних наслідків.

При великій аварії на АЕС Fukushima-Daiichi після повного знеструмлення штатних систем охолодження та неефективності пасивних систем безпеки аварійно зупинених реакторів та БВ ВЯП 4-го блоку сталися парогазові вибухи різної потужності, які стали однією з основних причин катастрофічних екологічних наслідків. До цього часу у фахівців відсутня однозначна інтерпретація причин і умов парогазових вибухів.

12 березня о 15:36 у центральному залі перевантаження палива 1-го блоку стався вибух, який спричинив руйнування верхньої частини реакторної будівлі. Можлива причина цього вибуху – втрата герметичності контуру ІС і пряме попадання достатньої для вибуху кількості парогазової суміші з реактора до будівлі реактора (минаючи первинний гермооб'єм). Можлива причина втрати герметичності контуру циркуляції ІС – запроектовані сейсмічні дії.

14 березня об 11:01 на 3-му блоці стався потужний руйнівний вибух у верхній частині реакторного відділення, каліцтва співробітників станції та руйнування системи вентиляції 2-го блоку. Можлива причина вибуху – втрата герметичності контуру циркуляції RCIC внаслідок землетрусу та пряме надходження достатнього для вибуху парогазового середовища з реактора до реакторного відділення 3-го блоку. На думку багатьох фахівців, підвищена потужність вибуху визначається, можливо, тим, що реактор 3-го блоку був на третину завантажений МОХ-паливом [16].

15 березня о 6:14 стався вибух у первинному захисному гермооб'ємі реактора 2-го блоку. Можлива причина – порушення герметичності трубопровідної обв'язки реактора та течі при підвищеному тиску парогазової суміші з реактора на гермооб'єм. Ще пізно ввечері 14 березня персонал зареєстрував різке збільшення тиску як у реакторі, так і у гермооб'ємі. Персонал відкрив запобіжні клапани протягом наступних 3 - 4 годин для зниження тиску в реакторі та підключення низьконапірного охолодження, однак тиск у гермооб'ємі продовжував збільшуватися. І рано-вранці 15 березня стався вибух із руйнуванням гермооболонки, що підтверджувалося різким зниженням тиску в гермооб'ємі, появою парової хмари («білий дим») над реакторною будівлею 2-го блоку та різким збільшенням потужності дози випромінювання на станції. Гермооб'єм реакторів ВВР заповнений інертними газами (декаталізаторами «водневого» вибуху), тому, з урахуванням зареєстрованого імпульсного збільшення тиску в реакторі та гермооб'ємі, можна вважати, що стався «паровий» вибух.

Після вибуху на 2-му блоці практично відразу ж стався руйнівний вибух у БВ ВЯП 4-го блоку. Спочатку передбачалося, що причиною вибуху було влучення водню від сусідніх блоків. Однак подальший аналіз наслідків вибуху показав, що основна причина – повна втрата функцій безпеки щодо відведення залишкових тепловиділень у БВ ВЯП 4-го блоку, що містить понад 1300 відпрацьованих тепловиділяючих зборок (у тому числі і з МОХ-паливом) [16]. Після вибухів на 2-му та 4-му блоках було зафіксовано максимальну за період початку потужність дози випромінювання (до 12 мЗв/год).

Аналіз умов і наслідків парогазових вибухів, що виникли, дозволяє вважати, що на 1-му, 3-му і 4-му блоках сталися руйнівні «водневі» вибухи, а на 2-му блоці – руйнівний «паровий» вибух. Усі вибухи стали основною причиною катастрофічних екологічних наслідків.

Традиційно під час аналізу безпеки ЯЕУ з ВВЕР моделюються лише умови водневої детонації у гермооб'язі відомою діаграмою Шапіро – Монфетті у форматі «водень – каталізатор – декаталізатор». У цьому необхідно враховувати, що діаграма Шапіро – Монфетті обґрунтована лише з рівноважних («повільних») етапів розвитку аварії [21]. Умови виникнення «парових» та «водневих» вибухів на динамічних етапах внутрішньо- та позакорпусної стадій аварій не моделюються, можливо, через допущення їхньої малої ймовірності чи відсутності адекватних методів моделювання умов парогазових вибухів.

У роботах [18, 21, 22, 23, 24] на основі оригінальної моделі важкої аварії ЯЕУ з ВВЕР визначено критерії та умови виникнення парогазових вибухів та термоударів на динамічних етапах внутрішньо- та позакорпусної стадій аварії, які визначаються умовами інтенсивності процесів тепло масообміну та

фізико-хімічних процесів, а також потужністю енерговиділення ядерного палива. На основі розроблених методів визначено галузі ефективного регулювання аварійних процесів для запобігання парогазовим вибухам. Проте розроблений метод потребує експериментальної верифікації.

#### **Висновки**

1. Основними причинами руйнівних парогазових вибухів з катастрофічними екологічними наслідками в процесі аварій на АЕС Fukushima-Daiichi стала втрата герметичності контурів пасивних систем безпеки відведення залишкових тепловиділень реактора (1-й та 3-й блоки), герметичності реакторного контуру в межах захисного гермооб'єму (2-й блок) та критичної для безпеки функції відведення залишкових тепловиділень у басейні витримки відпрацьованого ядерного палива 4-го блоку.

2. Уроки Фукусімської аварії та відомі результати аналізу умов вибухонебезпечності в ядерних енергоустановках із ВВЕР визначають необхідність удосконалення методів моделювання умов та наслідків парогазових вибухів на динамічних етапах аварійних процесів.

3. Уроки Фукусімської аварії та результати розрахункового моделювання аварій з повним тривалим знеструмленням ядерних енергоустановок з ВВЕР визначають необхідність удосконалення стратегій та способів запобігання та управління аваріями з повним тривалим знеструмленням.

Перспективним підходом є комплексне застосування додаткових пасивних систем безпеки забезпечення функції підживлення парогенераторів турбонасосами (область щодо підвищених тисків) та природною циркуляцією (область щодо знижених тисків).

#### **Список використаної літератури**

1. Damage Situation and Police Countermeasures Associated with the 2011 Tohoku District-off the Pacific Ocean Earthquake (National Police Agency, 2015) [https://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/higaijokyo\\_e.pdf](https://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/higaijokyo_e.pdf).

2. Introductory Statement to Board of Governors. International Atomic Energy Agency (IAEA, 2013) <https://www.iaea.org/newscenter/statements/introductory-statement-board-governors-3>.

3. Report of the Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety: The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations (Government of Japan, Nuclear Emergency Response Headquarters, 2011) <http://www.iaea.org/newscenter/focus/fukushima/japan-report>.

4. Additional Report of the Japanese Government to the IAEA: The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations. Second Report (Government of Japan, Nuclear Emergency Response Headquarters, 2011) [http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/iaea/iaea\\_110911.html](http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/iaea/iaea_110911.html).

5. Investigation Committee on the Accident at the Fukushima Nuclear Power Stations of Tokyo Electric Power Company. Final Report (Cabinet Secretariat of the Government of Japan, 2012) <http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/icanps/eng/final-report.html>.

6. Investigation Committee on the Accident at the Fukushima Nuclear Power Stations of Tokyo Electric Power Company. Interim Report (Cabinet Secretariat of the Government of Japan, 2011) <http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/icanps/eng/interim-report.html>.

7. National Diet of Japan. The Official Report of the Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission (Tokyo, 2012).

8. Fukushima Nuclear Accident Analysis Report. Tokyo Electric Power Company (Tokyo: TEPCO, 2012).

9. Evaluation of the Situation of Cores and Containment Vessels of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units-1 to 3 and Examination into Unsolved Issues in the Accident Progression. Tokyo Electric Power Company (Tokyo: TEPCO, 2013).

10. Report on the Investigation and Study of Unconfirmed/Unclear Matters in the Fukushima Nuclear Accident. Progress Rep. No. 2. Tokyo Electric Power Company (Tokyo: TEPCO, 2014).

11. Analysis of the TEPCO Fukushima Daiichi NPS Accident. Interim Report (Nuclear Regulation Authority, 2014) [https://www.iaea.org/sites/default/files/anaylysis\\_nra1014.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/anaylysis_nra1014.pdf)

12. Information on the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (Japan Meteorological Agency, 2015) [http://www.jma.go.jp/jma/en/2011\\_Earthquake/Information\\_on\\_2011\\_Earthquake.html](http://www.jma.go.jp/jma/en/2011_Earthquake/Information_on_2011_Earthquake.html)

13. IAEA Power Reactor Information System (PRIS) (IAEA, 2015), <http://www.iaea.org/pris/>

14. Tsunami Information (Estimated Tsunami Arrival Time and Height) (Japan Meteorological Agency, 2011) [http://www.jma.go.jp/en/tsunami/info\\_04\\_20110311145026.html](http://www.jma.go.jp/en/tsunami/info_04_20110311145026.html)

15. The 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami Information (Coastal Engineering Committee of Japan Society of Civil Engineers, 2013) <http://www.coastal.jp/tsunami2011/index.php?Field%20survey%20results>

16. Метод моделювання умов надійності гідравлічних впливів на насоси теплових і атомних електростанцій на Скалозубов В., Ньюї З., Чілкін О., Пірковській Д. *Вопросы атомной науки і техніки*, 2017, 110(4), С. 74–78

17. Excitation of thermoacoustic oscillations in a heated channel. Antonyuk, N.I., Gerliga, V.A., Skalozubov, V.I. *Journal of Engineering Physics*, 1990, 59(4), pp. 1323–1328

18. Гідродинамічні удари в обладнанні ядерних енергоустановок при трансзвукових режимах течії парорідних потоків Скалозубов В., Білоус Н., Пірковський Д., Комаров Ю., Чілкін О. *Ядерна та радіаційна безпека*, 2019, 2(82), С. 43–46.

19. Аналіз критичних умов надійності при гідродуарах в активних системах безпеки ядерних енергетичних установок з ВВЕР-1000 Скалозубов В., Козлов І., Чілкін О., Комаров Ю., Піонтковській О., Piontkovskiy, O. *Ядерна та радіаційна безпека*, 2019, 1(81), С. 42–45

20. Improved mathematical model of fluid level dynamics in a drum-type steam generator as a controlled object. Klymchuk, A.A., Lozhechnikov, V.F., Mykhailenko, V.S., Lozhechnikova, N.V. *Journal of Automation and Information Sciences*, 2019, 51(5), pp. 65–74

21. Revision of nuclear power plants safety systems' routine testing assigned periodicity during the design extension period Skalozubov, V.I., Kozlov, I.L., Chulkin, O.A. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2017, 111(5), pp. 53–56

22. Імпульсне джерело нейтронів високої енергії, що випускаються реакціями синтезу під час стиснення d-t газу кумулятивними детонаційними хвилями Русов В., Тарасов В., Чернеженко С., Урбаневич В., Зеленцова Т. *Журнал фізичних досліджень*, т.23, №1(2019), 1201(7с.).

23. Design of a combined burner based on the patterns of interaction between an external swirling jet and an axial direct-flow jet. Klymchuk, O., Denysova, A., Zaitsev, N., Lozhechnikova, N., Borysenko, K. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, 1(8-109), pp. 44–51

24. Очищення водних розчинів від солей та радіонуклідів Герліга В., Кравченко В., Притика І., Хуссам Г. *Ядерна та радіаційна безпека*, 2018, 1(77), С. 47–51.

**V. Kondratyk**, associate professor, philosophy doctor, **ORCID** 0000-0001-5035-311X

**Y. Pysmennyu**, professor, doctor, **ORCID** 0000-0001-6403-6596

**I. Ostapenko**, engineer, **ORCID** 0000-0003-3980-1609

**D. Fedorov**, engineer, **ORCID** 0000-0003-3751-6986

**National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**

#### **ACCIDENT LESSONS AT THE FUKUSHIMA-DAIICHI NPP FOR THE SAFETY OF THE NUCLEAR POWER INDUSTRY IN UKRAINE**

The main causes of destructive steam and gas explosions with catastrophic environmental consequences during the accidents at Fukushima-Daiichi NPP were the loss of tightness of the passive safety systems of the reactor residual fuel removal safety system and the critical residual heat removal function in the spent nuclear fuel holding tank. The main lesson of the Fukushima accident for the environmental safety of Ukraine's nuclear power industry is the need to anticipate the possibility of unlikely emergency events with catastrophic environmental consequences. Such unlikely events include: flooding of the nuclear power plant site, complete long-term blackout, steam-gas destructive explosions, joint action of external extreme phenomena. Based on this, the following lessons of the Fukushima accident were formulated for the nuclear power industry of Ukraine regarding unlikely emergency events with catastrophic environmental consequences: lesson 1 - the need for reliable isolation of diesel generator rooms from external extreme events; lesson 2 - the need to improve strategies and methods of managing accidents with complete long-term blackout and lesson 3 - the need to determine the conditions of steam-gas explosions. The lessons of the Fukushima accident and the known results of the analysis of explosive conditions in nuclear power plants with WWER determine the need to improve methods for modeling the conditions and consequences of steam and gas explosions at the dynamic stages of emergency processes. The lessons of the Fukushima accident and the results of the calculated modeling of accidents with complete long-term power outages of nuclear power plants with WWER determine the need to improve strategies and ways to prevent and manage accidents with complete long-term power outages. A promising approach is the integrated use of additional passive safety systems to ensure the function of feeding steam generators with turbopumps (area for high pressures) and natural circulation (area for low pressures).

Key words: lessons from the Fukushima accident, accident management, passive safety systems.

#### **References**

1. Damage Situation and Police Countermeasures Associated with the 2011 Tohoku District-off the Pacific Ocean Earthquake (National Police Agency, 2015) [https://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/higaijokyo\\_e.pdf](https://www.npa.go.jp/archive/keibi/biki/higaijokyo_e.pdf).

2. Introductory Statement to Board of Governors. International Atomic Energy Agency (IAEA, 2013) <https://www.iaea.org/newscenter/statements/introductory-statement-board-governors-3>.

3. Report of the Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety: The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations (Government of Japan, Nuclear Emergency Response Headquarters, 2011) <http://www.iaea.org/newscenter/focus/fukushima/japan-report>.
4. Additional Report of the Japanese Government to the IAEA: The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations. Second Report (Government of Japan, Nuclear Emergency Response Headquarters, 2011) [http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/iaea/iaea\\_110911.html](http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/iaea/iaea_110911.html).
5. Investigation Committee on the Accident at the Fukushima Nuclear Power Stations of Tokyo Electric Power Company. Final Report (Cabinet Secretariat of the Government of Japan, 2012) <http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/icanps/eng/final-report.html>.
6. Investigation Committee on the Accident at the Fukushima Nuclear Power Stations of Tokyo Electric Power Company. Interim Report (Cabinet Secretariat of the Government of Japan, 2011) <http://www.cas.go.jp/jp/seisaku/icanps/eng/interim-report.html>.
7. National Diet of Japan. The Official Report of the Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission (Tokyo, 2012).
8. Fukushima Nuclear Accident Analysis Report. Tokyo Electric Power Company (Tokyo: TEPCO, 2012).
9. Evaluation of the Situation of Cores and Containment Vessels of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units-1 to 3 and Examination into Unsolved Issues in the Accident Progression. Tokyo Electric Power Company (Tokyo: TEPCO, 2013).
10. Report on the Investigation and Study of Unconfirmed/Unclear Matters in the Fukushima Nuclear Accident. Progress Rep. No. 2. Tokyo Electric Power Company (Tokyo: TEPCO, 2014).
11. Analysis of the TEPCO Fukushima Daiichi NPS Accident. Interim Report (Nuclear Regulation Authority, 2014) [https://www.iaea.org/sites/default/files/anaylysis\\_nra1014.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/anaylysis_nra1014.pdf)
12. Information on the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (Japan Meteorological Agency, 2015) [http://www.jma.go.jp/jma/en/2011\\_Earthquake/Information\\_on\\_2011\\_Earthquake.html](http://www.jma.go.jp/jma/en/2011_Earthquake/Information_on_2011_Earthquake.html)
13. IAEA Power Reactor Information System (PRIS) (IAEA, 2015), <http://www.iaea.org/pris/>
14. Tsunami Information (Estimated Tsunami Arrival Time and Height) (Japan Meteorological Agency, 2011) [http://www.jma.go.jp/en/tsunami/info\\_04\\_20110311145026.html](http://www.jma.go.jp/en/tsunami/info_04_20110311145026.html)
15. The 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami Information (Coastal Engineering Committee of Japan Society of Civil Engineers, 2013) <http://www.coastal.jp/tsunami2011/index.php?Field%20survey%20results>
16. Modelling method of conditions for reliability-critical hydraulic impacts on pumps of thermal and nuclear power plants Skalozubov, V.I., Huiyu, Z., Chulkin, O.A., Pirkovskiy, D.S. Problems of Atomic Science and Technology, 2017, 110(4), pp. 74–7
17. Excitation of thermoacoustic oscillations in a heated channel. Antonyuk, N.I., Gerliga, V.A., Skalozubov, V.I. Journal of Engineering Physics, 1990, 59(4), pp. 1323–1328
18. Water hammers in transonic modes of steam-liquid flows in npp equipment Skalozubov, V., Bilous, N., Pirkovskiy, D., ...Komarov, Y., Chulkin, O. Nuclear and Radiation Safety, 2019, 2(82), pp. 43–46
19. Analysis of reliability-critical hydraulic impact conditions at WWER-1000 NPP active safety systemsa Skalozubov, V., Kozlov, I., Chulkin, O., Komarov, Y., Piontkovskiy, O. Nuclear and Radiation Safety, 2019, 1(81), pp. 42–45
20. Improved mathematical model of fluid level dynamics in a drum-type steam generator as a controlled object. Klymchuk, A.A., Lozhechnikov, V.F., Mykhailenko, V.S., Lozhechnikova, N.V. Journal of Automation and Information Sciences, 2019, 51(5), pp. 65–74
21. Revision of nuclear power plants safety systems' routine testing assigned periodicity during the design extension period Skalozubov, V.I., Kozlov, I.L., Chulkin, O.A. Problems of Atomic Science and Technology, 2017, 111(5), pp. 53–56
22. Impulse source of high energy neutrons emitted by fusion reactions after compression of D–T gas by cumulative detonation waves Rusov, V.D., Tarasov, V.A., Chernenchenko, S.A., Urbanevich, V.V., Zelentsova, T.N. Journal of Physical Studies, 2019, 23(1), 1201
23. Design of a combined burner based on the patterns of interaction between an external swirling jet and an axial direct-flow jet. Klymchuk, O., Denysova, A., Zaitsev, N., Lozhechnikova, N., Borysenko, K. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2021, 1(8-109), pp. 44–51
24. Purification of aqueous solutions from salts and radionuclides. Gerliga, V., Kravchenko, V., Prityka, I., Hussam, G. Nuclear and Radiation Safety, 2018, 1(77), pp. 47–51

Надійшла 4.07.2022

Received 4.07.2022