

УДК 621.039.586

АНАЛИЗ ПРИЧИН БОЛЬШОЙ АВАРИИ НА АЭС ФУКУСИМА-1
АНАЛІЗ ПРИЧИН ВЕЛИКОЇ АВАРІЇ НА АЕС ФУКУСИМА-1
ANALYSIS OF SEVERE ACCIDENT CAUSES AT FUKUSHIMA-1

Научный руководитель – кафедра атомных электрических станций; профессор, доктор технических наук - Скалозубов В. И., магистр – Каскевич В. В.
Науковий керівник - кафедра атомних електричних станцій; професор, доктор технічних наук - Скалозубов В. І., магістр – Каскевич В. В.
Supervisor - department of nuclear power plant; professor, doctor of technical sciences – V. I. Skalozubov, master – V. V. Kaskevych

Аннотация: Анализируются коренные причины разрушения защитных барьеров безопасности в процессе аварии на АЭС Фукусима-1 и предложены рекомендации по дальнейшему совершенствованию обеспечения управления подобными тяжелыми авариями на отечественных энергоблоках с ВВЭР.

Ключевые слова: внешние и внутренние экстремальные события, запроектная авария, тяжелая авария, защитный барьер безопасности, критическая конфигурация систем, функция безопасности.

Анотація: Аналізуються корінні причини руйнування захисних бар'єрів безпеки в процесі аварії на АЕС Фукусіма-1 і запропоновано рекомендації щодо подальшого вдосконалення забезпечення управління подібними важкими аваріями на вітчизняних енергоблоках з ВВЕР.

Ключові слова: зовнішні та внутрішні екстремальні події, позапроектна аварія, важка аварія, захисний бар'єр безпеки, критична конфігурація системи, функція безпеки.

Annotation: The paper analyses fundamental causes of destruction of protective safety barriers during accident at Fukushima-1 and offers recommendations on further development of supporting of similar severe accident management at domestic power units with WWER.

Key words: external and internal extreme events, beyond design basis accident, severe accident, protective safety barrier, critical system configuration, safety function.

У 2011 році відбулася одна з найбільших за своїми наслідками за всю історію світової ядерної енергетики аварія на АЕС Fukushima-Daiichi (Японія). Першопричиною аварії став спільний вплив на промисловий майданчик потужного землетрусу і цунамі. Наслідками цих екстремальних впливів стало повне знеструмлення АЕС і відмова активних систем безпеки з електронасосами. Пасивні системи безпеки також не змогли запобігти тяжким аваріям з пошкодженням ядерного палива та руйнівні парогазові вибухи.

Ситуація, яка виникла виявилася повною несподіванкою для експлуатуючої організації ТЕРСО. Наслідком цього стала недостатня підготовленість технічних засобів і персоналу до управління аварійними процесами.

Аналіз причин великої аварії на АЕС Фукусіма-1

11 березня 2011 року в 14 год 46 хв (за місцевим часом) в Японії стався дев'ятибальний землетрус, що призвело до автоматичного останову 11 енергоблоків на АЕС Фукусіма-1, Фукусіма-2, Онагава і Токай Данні. Найбільш критична ситуація склалася на АЕС Фукусіма-1, яка має 6 блоків BWR (киплячі корпусні реактори з водою під тиском). До землетрусу в роботі знаходилися енергоблоки № 1 (460 МВт), № 2 (784 МВт) і № 3 (784 МВт). Блоки № 4 (784 МВт), № 5 (784 МВт) і № 6 (100 МВт) перебували

в планово-попереджувальних ремонтах. При цьому ядерне паливо на блоці № 4 знаходилося в приреакторному басейні витримки, а на блоках № 5 і 6 - в реакторах.

На рис. 1 і 2 наведені вигляд майданчика АЕС Фукусіма-1 і схема компонування основного обладнання АЕС з BWR.



Майданчик АЕС Фукусіма-1

Рис. 1. Майданчик АЕС Фукусіма-1

Відповідно до офіційних повідомлень Японського атомно-промислового форуму (JAIF) і Кризового центру МАГАТЕ та події подальших основних подій на АЕС Фукусіма-1 наступна.

11 березня в 15 ч 42 хв - втрата всіх джерел електроживлення (в тому числі резервних дизель-генераторів), крім блоку № 6. Цистерни з паливом для дизель-генераторів були змиті цунамі. В результаті землетрусу було втрачено зовнішнє живлення енергоблоків від відкритого розподільного пристрою, і в подальшому сталося аварійне відключення дизель-генераторів систем безпеки в результаті затоки морською водою. Блоки перейшли на охолодження активних зон пасивними системами безпеки за допомогою акумуляторних батарей. розпочато роботи з налагодження електропостачання каналів активних систем безпеки.

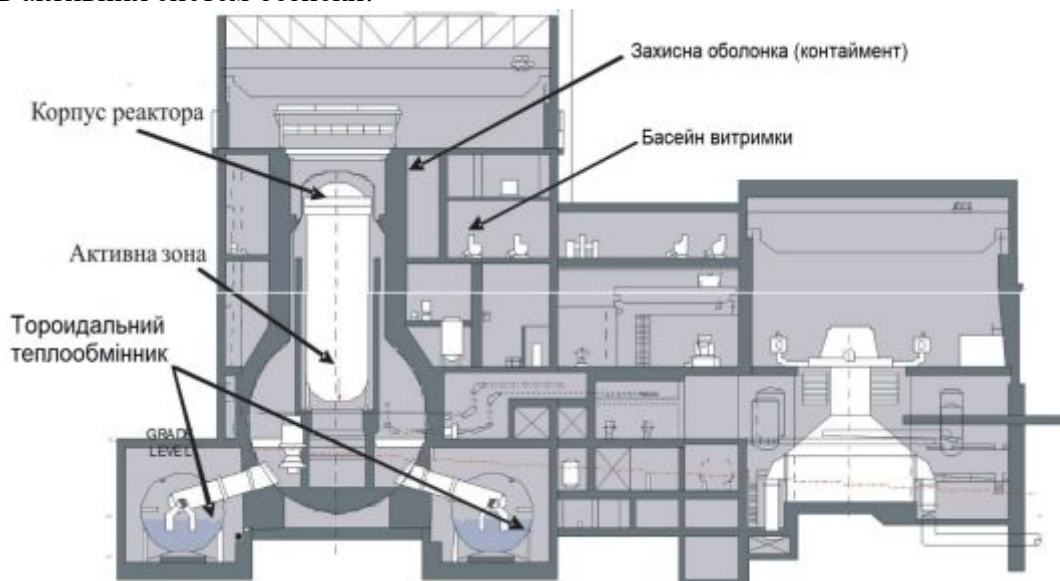


Рис. 2. Принципова схема компонування основного обладнання АЕС з BWR

12 березня в 0 год 49 хв відзначено аномальне зростання тиску в контейнмент реактора блоку № 1, а в 15 год 36 хв стався вибух. Захисна оболонка блоку № 1 не постраждала. Увечері 12 березня аварійно-ремонтній бригаді вдалося відкрити клапан на лінії дозаповнення теплоносія і подати до реакторної установки (РУ) морську воду в суміші з борною кислотою за допомогою спеціальної пересувної насосної станції. В результаті повторних поштовхів силою до 6,2 бала за шкалою Ріхтера зруйновано одну зі стін допоміжного корпусу поблизу енергоблоку № 1 АЕС, стався вибух ресивера водню.

13 березня. На всіх трьох аварійно відключених енергоблоках (блоки № 1 - 3) тривають роботи з налагодження штатного електропостачання каналів безпеки реакторних установок. Захисна оболонка РУ блоку № 1 залишається цілісною і продовжує перебувати під надлишковим тиском парогазової суміші, яка утворилася через википання теплоносія. Персонал станції продовжує проводити превентивні періодичні скиди надлишків пара на майданчик АЕС з метою збереження цілісності захисної оболонки РУ. На блоках № 2 і 3 організовано розхолодження через систему інжекційного вприскування теплоносія в реакторний контур, живиться від автономного джерела. Потужність дози опромінення на майданчику АЕС Фукусіма-1 поступово зростає і становить від 4000 до 10000 мкР / год (фонові значення - близько 15 - 25 мкР / год). У місяцях радіоактивного забруднення на майданчику АЕС близько енергоблоку № 1 знайдені ізотопи радіоактивного йоду і цезію, що підтверджує попередні припущення про пошкодження паливних елементів в активній зоні блоку № 1 АЕС. Протягом дня на блоці № 3 послідовно відмовили спочатку система вентиляції гермооб'єму РУ, потім - система вприскування теплоносія в РУ.

Персоналом АЕС були виконані аварійні превентивні скиди надлишків радіоактивної парогазової суміші з-під захисної оболонки. Персонал станції почав підготовку подачі морської води в захисну оболонку реактора через штатну систему пожежогасіння.

14 березня в 4 ч 08 хв відзначено зростання температури води в басейні витримки палива блоку № 4 до 84 ° С. На блоці № 1 після впорскування борної води в корпус реактора, здійсненого 13 березня, триває закачування морської води в захисну оболонку реакторного відділення через штатну систему пожежогасіння. Захисна оболонка не пошкоджена.

На блоках № 2 і 3 вранці 14 березня сталася різке зростання тиску парогазової суміші всередині гермооболочки. У 11 ч 01 хв стався вибух водню в приміщенні блоку № 3 (за межами захисної оболонки РУ). При цьому захисна оболонка залишилася цілою, блоковий щит управління РУ не пошкоджений. Увечері була налагоджена подача охолоджувальної морської води всередину гермооб'єму через штатну систему пожежогасіння. Триває залив водою обладнання РУ.

Потужність дози опромінення на майданчику АЕС Фукусіма-1 становить близько 4600 мкР / год. У місяцях радіоактивного забруднення на майданчику АЕС підтверджено наявність ізотопів радіоактивного йоду і цезію. На блоках № 1 - 3 тривають роботи по налагодженню штатного електропостачання каналів активних систем безпеки. Енергопостачання окремих систем здійснюється пересувними мобільними дизель-генераторами.

15 березня на всіх трьох аварійно відключених енергоблоках (блоки № 1 - 3) не відновлено налагоджене штатне електропостачання каналів активних систем безпеки РУ. Стався вибух водню в приміщенні блоку № 2. При цьому захисна оболонка залишилася цілою. Надмірний тиск парогазової суміші всередині контейнменту становить близько 6,5 атм. За інформацією МАГАТЕ в результаті тривалого випаровування теплоносія пошкоджено не менше 5% ядерного палива. На блоках № 1 та 3 триває закачування морської води в захисну оболонку реакторного відділення через штатну систему

пожежогасіння. Однак у персоналу відсутня впевненість в надійному надходженні морської води в РУ. Частково зруйнована будівля енергоблоку № 2.

16 березня триває закачування морської води в захисну оболонку реакторного відділення блоків № 1 - 3 через штатну систему пожежогасіння. Підтверджено факт, що має місце пошкодження ядерного палива, порушена цілісність контуру РУ і захисної оболонки. Частково зруйновано будівлі енергоблоків № 1 - 3.

Приреакторного басейну витримки, в якому знаходилися всі тепловиділяючі елементи блоку № 4, повністю зневоднений. Приміщення басейну зруйновано вибухом. Планується охолодження басейну за допомогою пересувних водометів. Персонал АЕС планує відновити електропостачання каналів активних систем безпеки від працездатного дизель-генератора енергоблоку № 6.

17 березня розпочато роботи по розбризкуванню води над басейном витримки. Персонал АЕС здійснював прокладку тимчасової мережі електроживлення до блоку № 2. Планується його підключення до електричної мережі після завершення робіт по заливу блоку № 3. Протягом 17 березня в 30-кілометровій зоні тимчасового відселення навколо АЕС Фукусіма-1 місцями зафіксовано значне зростання потужності дози опромінення (від 80 до 170 мкЗв / год). На кордоні 30-кілометрової зони найвища потужність зафіксована на північному заході від АЕС на рівні від 3 до 170 мкЗв / год, в інших напрямках - рівень потужності дози становив від 1 до 5 мкЗв / год.

Вранці 18 березня було здійснено чотири скидання морської води на будівлю блоку №3 військовими вертольотами. Через високі рівні опромінення наступні спроби охолодження блоку будуть здійснюватися лише з землі за допомогою шести поліцейських водометів.

Попередня інформація щодо поточного стану блоків АЕС Фукусіма-1 на 7 год 30 хв 21 березня (активні зони і приреакторні басейни витримки)

Характеристика та параметри блоку	Характеристики і стан блоків АЕС Фукусіма-1: Даїчі, Японія					
	Блок № 1	Блок № 2	Блок № 3	Блок № 4	Блок № 5	Блок № 6
Активна зона РУ	Частково пошкоджена	Частково пошкоджена	Значно пошкоджена	-	Надійно охолоджується	Надійно охолоджується
Приреакторний басейн витримки	Залит водою, пошкоджений	Залитий водою	Частково пошкоджено	Значне пошкодження	Надійно охолоджується	Надійно охолоджується
Контур РУ	Пошкоджений	Нещільний	Пошкоджено	-	Щільний	Щільний
Захисна оболонка	Пошкоджена	Нещільний	Зруйнована	-	Щільна	Щільна
Будівля блоку	Пошкоджено	Пошкоджено	Зруйновано	Зруйновано	Ціле	Ціле
Потужність дози поблизу блоків	Наближається до 1 – 3 Р/г	Наближається до 3 – 5 Р/г	Наближається до 5 – 10 Р/г	Наближається до 10 – 40 Р/г	Наближається до 0,1 – 0,3 Р/г	

25 березня рівень загрози нових аварійних подій залишається стабільно високим. У контейнмент блоків № 1 і 2 з 23 березня постійно подається морська вода в кількості 10 - 11 м³ / год. За останню добу вдалося знизити температуру металу корпусу реактора блоку № 1 до 229 ° С, блоку № 2 - до 102 ° С, блоку № 3 - до 185 ° С (штатна температура корпусу реактора типу ВWR / 4 складає 305 ° С). Подано електропостачання до штатних систем контролю блочного щита управління блоку №1. Приреакторного басейну

витримки відпрацьованого ядерного палива енергоблоків № 1 - 4 АЕС Фукусіма-1: стан ядерного палива та конструкцій басейну блоку № 1 до цих пір не визначено і не контролюється через надвисокі рівні опромінення (потужність експозиційної дози опромінення в навколишніх приміщеннях досягає 27,9 Зв / год); відновлений контроль температури теплоносія в басейні блоку № 2, яка становить 47 ° С (потужність експозиційної дози опромінення в навколишніх приміщеннях становить 1,49 Зв / год); стан ядерного палива та конструкцій басейну блоку № 3 до цього часу не визначено і не контролюється, триває залив морської води; стан ядерного палива та конструкції басейну блоку № 4 до цих пір не визначено і не контролюється, триває залив морської води.

Загальна ситуація на майданчику АЕС Фукусіма-1 почала стабілізуватися тільки на початку квітня. З квітня вдалося переключити електроживлення насосів, закачують воду в активну зону, з пересувного на штатний генератор.

Спочатку аварія на АЕС Фукусіма-1 була перекваліфікована 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 Фукусіма-1 слід кваліфікувати не нижче 6-го рівня - «важка аварія, значний викид радіоактивних продуктів за межі АЕС, які вимагають прийняття відповідних контрзаходів». Остаточню аварії на блоках № 1 - 3 були об'єднані в загальне подія, яка кваліфіковано аналогічно Чорнобильської АЕС 7-м рівнем - «велика аварія».

Попередній аналіз хронології основних подій в процесі аварій на енергоблоках № 1 - 4 АЕС Фукусіма-1 дозволяє сформулювати ряд істотних коментарів по основним причинам.

1. Щодо забезпечення безпеки при аварії на енергоблоках з повною втратою надійного і тривалого проектного електропостачання виявлені принципові недоліки реакторів ВWR, що мають досить тривалі терміни експлуатації:

а) недостатнє забезпечення відновлення / дублювання виконання функції надійного і тривалого електропостачання активних систем безпеки;

б) недостатнє забезпечення виконання функції надійного і тривалого охолодження РУ пасивними системами безпеки, що не потребують тривалому електропостачанні (в тому числі конструкційні обмеження щодо забезпечення ефективного охолодження природною циркуляцією);

в) недостатня ефективність систем запобігання парогазових вибухів;

г) недостатня організація і ефективність систем контролю і діагностики (в тому числі фактична відсутність об'єктивної і достовірної інформації в стані палива, реакторного контуру і контаймента);

д) недостатня організація і ефективність автоматизованих систем управління аварійними процесами (в тому числі запроектними).

В кінцевому підсумку зазначені фактори і визначили перехід аварії в запроектну стадію з пошкодженням палива і залежність розвитку аварійних процесів від ненавмисно помилкових дій персоналу, який одержував обмежену (іноді і суперечливу) інформацію про стан захисних бар'єрів безпеки (паливних конструкцій, реакторного контуру, контаймменту) і про умови розвитку аварійних послідовностей.

2. Недостатня обгрунтованість і ефективність системи інструкцій / керівництв з управління запроектними (в тому числі тяжкими) аваріями, що мають відносно малу ймовірність виникнення (зокрема, аваріями з повною втратою надійного і тривалого електропостачання). Відсутність такої ефективної системи управління щодо малоймовірними запроектними аваріями, можливо, і стало основною причиною

ненавмисно помилкових дій персоналу в процесі розвитку аварійних процесів, що підтверджується:

- а) відсутністю оперативного і ефективного відновлення / резервного забезпечення необхідного енергоживлення активної частини систем безпеки;
- б) фактом не припинення парогазових вибухів і пожеж, які призвели до порушення цілісності захисних бар'єрів безпеки і значних викидів радіоактивних продуктів;
- в) відсутністю оперативних дій із забезпечення ефективного охолодження басейнів витримки і проміжного сховища відпрацьованого ядерного палива (ці заходи почалися фактично після вибухів і руйнувань в зупиненому до аварії на ремонт блоці № 4, паливо якого було повністю перевантажено в приреакторного басейну витримки).

Аварія виявила обмеженість традиційного підходу нормативно-методичного забезпечення посібників / симптомно-орієнтованих аварійних інструкцій з управління запроектними і важкими аваріями (ПУЗА, ПУТА, СОАІ), який фактично виключає організацію ефективного управління аваріями з відносно малоїмовірними вихідними подіями і аварійними послідовностями, а також не враховує залежність розвитку процесів і аварійних послідовностей тяжких аварій (ТА) від вихідної аварійної події (ВПА) і передісторії виникнення умов важкого пошкодження активної зони реактора. Згідно з міжнародною практикою критерієм доцільності розгляду аварійних послідовностей запроектних аварій (АПЗА) є оцінки 10^{-6} – 10^{-9} 1 / (реактор · рік) [1], нижче яких зазвичай не розробляються відповідні організаційно-технічні заходи (ОТЗ) з управління запроектними аваріями. Аварії на АЕС Фукусіма-1 з одночасними відмовами основного і резервного електроживлення також є малоїмовірними, що і послужило можливою причиною фактичної невідповідності експлуатуючої організації до управління та усунення наслідків таких аварій.

Залежність ОТЗ при управлінні ТА від передісторії виникнення умов ушкодження палива на прикладі корпусних реакторів продемонстрована на рис. 3: первинні ІСА визначають безліч АПЗА, що призводять до неприпустимого пошкодження активної зони реактора, а відповідно і різний стан працездатності критичних конфігурацій систем (ККС), що забезпечують виконання необхідних функцій безпеки (ФБ). Стан працездатності ККС ФБ в процесі АПЗА визначають як вихідні події тяжких аварій на різних стадіях розвитку для корпусних реакторів (ВПА Т1, ВПА Т2, ВПА Т3), так і розвиток аварійних послідовностей тяжких аварій (АПТА), а відповідно і дії / заходи по управлінню ТА (в тому числі по відновленню / дублюванню працездатності ККС ФБ). Непрямим підтвердженням залежності розвитку ТА від передісторії розвитку запроектних ситуацій є аварії на блоках №1 - 3 АЕС Фукусіма-1: при одночасному виникненні загального первинного ВПА (повна втрата електропостачання) тяжке ушкодження активної зони реакторів і вибухи сталися в різний час і в різних місцях (на блоці № 1 і 3 вибух імовірно над захисною оболонкою, а на блоці № 2 в районі теплообмінника - див. рис.2).

Недостатня обґрунтованість системи управління малоїмовірними аваріями, можливо, послужила також однією з корінних причин переходу запроектних аварійних процесів на енергоблоках АЕС Фукусіма-1 в стадію важких аварій (з пошкодженням палива), викликану ненавмисно помилковими діями персоналу. Аналіз попередньою інформацією JAIF - МАГАТЕ за хронологією розвитку подій показує, що до моменту вибухів і пошкоджень палива на аварійно зупинених реакторах (12 березня на блоці № 1, 14 березня на блоці № 3 і 15 березня на блоці № 2) була періодично і частково забезпечена подача охолоджувального середовища в реактори системами безпеки від акумуляторних батарей, інжекційним уприскуванням теплоносія, системами пожежогасіння морською водою та ін.

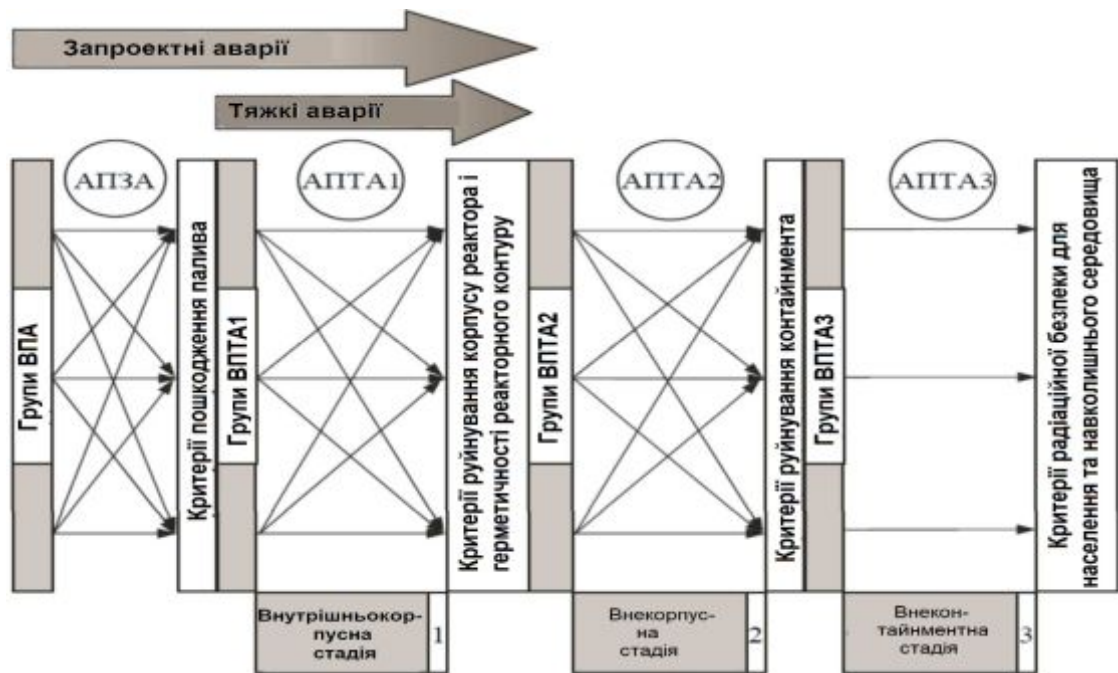


Рис. 3. Етапи та стадії виникнення і розвитку ТА на корпусних реакторах

Ефекти взаємодії містить спочатку плутоній МОХ-палива (Використовуваного в вітчизняних реакторах ВВР) при підвищеній по відношенню до проектних умов температурі з періодично і частково подається охолоджуючої середовищем вивчені недостатньо. Принаймні, можна говорити про відсутність однозначного ставлення фахівців до доцільності таких заходів. Відсутні також однозначне ставлення і до необхідності охолодження водою вже пошкодженого ядерного палива. Одним з аргументів опонентів охолодження водою ядерного палива є виникнення інтенсивного пароутворення, що сприяє різкого зростання тиску, а також ймовірності і потужності парогазового вибуху. Ці питання вимагають, безсумнівно, подальшого більш детального глибокого вивчення і меншою мірою об'єктивних науково-технічних обґрунтувань.

Іншим характерним прикладом недостатньої обґрунтованості системи управління аваріями є обмежений час моделювання аварійних процесів при технічних обґрунтуваннях Руза, РУТА, СОАІ. Розвиток аварійних подій на АЕС Фукусіма-1, що призвели до пошкодження захисних бар'єрів безпеки, тривало близько тижня з моменту повної втрати електроживлення. Ці факти вказують на обмеженість традиційних підходів моделювання та аналізу аварій зазвичай протягом доби (наприклад, в звітах з аналізу безпеки енергоблоків АЕС України).

Минуло 25 років з моменту великої аварії на Чорнобильській АЕС, корінними причинами якої були технічні недоліки проекту станції і ненавмисні помилкові дії персоналу, пов'язані з об'єктивною непередбачуваністю до контролю і управління такими ТА. На жаль, слід визнати, що ці причини виявилися і на АЕС Фукусіма-1.

Висновки

В даний час АЕС України експлуатують інший тип реактора (ВВЕР), що має сотні реакторо-років безпечної експлуатації. Імовірність виникнення на АЕС України землетрусів потужністю 9 балів і цунамі практично виключена. Однак досвід великих аварій на Чорнобильській АЕС та АЕС Фукусіма-1 визначає цілий ряд актуальних для АЕС з ВВЕР завдань, пов'язаних з нормативно-методичним і проектотехнічним

забезпеченням контролю і управління ТА, серед яких попередньо необхідно виділити наступні:

1. Перегляд і вдосконалення критеріїв доцільності розгляду запроектованих аварій (моделювання, аналіз і обґрунтування ОТМ) з урахуванням стану працездатності ККС ФБ. Такий підхід дозволить розробляти ОТМ і для таких малоімовірних аварій як на Чорнобильській АЕС і АЕС Фукусіма-1. Важливо відзначити, що остання довгострокова Комплексна програма підвищення безпеки АЕС України (КСПБУ) фактично не визначає заходи з моделювання та управління запроектованими аваріями з повною втратою електропостачання. Однією з причин такого становища є прийнятий в КСПБУ підхід оцінки значущості та пріоритетності ОТМ за вкладом в основні показники безпеки (частота пошкодження активної зони - ЧПАЗ, частота граничного аварійного викиду - ЧГАВ). Імовірність виникнення ВПА з повною втратою електропостачання для проектів ВВЕР відносно мала (на кілька порядків менше, ніж домінуючих для ВВЕР груп аварій з контурними і межконтурними течіями) і внесок такої запроектованої аварії, наприклад, в ЧПАЗ ВВЕР менше 10^{-7} 1 / год (категорії значущості для безпеки і пріоритетності виконання ОТМ найнижчі, фактично виключають їх виконання). Такий підхід в КСПБУ неприпустимий, так як на АЕС Фукусіма-1 сталася аналогічна запроектована аварія з вкрай важкими наслідками. Так, відповідно до результатів звітів з аналізу безпеки для блоку № 5 Запорізької АЕС приріст ЧПАЗ для аварійної послідовності з повною втратою електропостачання (аналогічної аварії на АЕС Фукусіма-1) становить $2,7 \cdot 10^{-8}$ 1 / рік (0,06% від сумарної ЧПАЗ), що відповідно до КСПБУ свідчить фактично про відсутність значимості для безпеки заходів з управління такою запроектованою аварією.

Таким чином, необхідно на нормативному рівні виключити недоцільність розробки заходів і посібників з управління малоімовірними аваріями (в тому числі запроектованими аваріями з повною втратою електропостачання). Також потребують перегляду і безпосередні імовірнісні оцінки виникнення ВПА з повною втратою електропостачання з урахуванням специфіки кожного майданчика АЕС України. Так, для однієї з найбільших в світі Запорізької АЕС приміщення всіх будівель дизель-генераторів розташовані однаково в машинному залі на нульовій позначці; а в підвалі на позначці -3,6 м знаходяться допоміжне обладнання дизель-генераторів, насоси технічної води відповідальних споживачів і обладнання аварійного генератора. На Дніпрі накопичений обсяг води, в 4 рази більше річної витрати самої річки. Весь цей обсяг знаходиться на висоті значно вище рівня Каховського водосховища і утримується на цій висоті греблями каскаду дніпровських ГЕС. Технічний стан гребель наших гідроелектростанцій постійно викликає занепокоєння громадськості країни. Відповідно, ймовірність відмови дизель-генераторів через затоплення відносно висока, а з урахуванням фактичної відсутності пересувних дизель-генераторів проблема стає ще більш актуальною.

2. До теперішнього часу при моделюванні і аналізі ТА на ВВЕР зазвичай в якості ВПА розглядаються великі течії 1-го контуру або втрата живильної води при кінцевих станах з пошкодженням палива (див., Наприклад, [2, 3 та ін.]). Такий підхід вимагає додаткових обґрунтувань його консервативності, так як при інших ВПА (наприклад, межконтурні течії, екстремальні впливи і т.д.) можуть створитися «гірші» умови виникнення і розвитку ТА (див. Рис. 3). Аналіз ТА повинен проводитися з урахуванням усього переліку первинних ІСА, а також передісторії і реальної тривалості розвитку АПЗА. Такий підхід дозволить більш обґрунтовано розробляти ОТМ з управлінням ТА.

3. Розробка альтернативних ризик-орієнтованих критеріїв надійності захисних бар'єрів безпеки АЕС з ВВЕР, які враховують передісторію експлуатаційних навантажень і технічний стан конструкцій на момент виникнення внутрішніх і зовнішніх екстремальних впливів. В даний час нормативно-проектною документацією визначено в

основному детерминистские критерії надійності захисних бар'єрів безпеки (зазвичай допустимі значення температури і тиску). Події на АЕС Фукусіма-1 визначають необхідність додаткових технічних обґрунтувань надійності захисних бар'єрів безпеки ВВЕР при зовнішніх і внутрішніх екстремальних події (Землетруси, повені, вибухи, пожежі, падіння великих об'єктів і т.п.), які враховують не тільки впливу / навантаження безпосередньо в процесі аварій, а й з урахуванням передісторії експлуатації та фактичного стану конструкцій. Облік зазначених вище альтернативних ризик-орієнтованих критеріїв дозволить отримати більш реалістичні оцінки основних імовірнісних показників безпеки АЕС з ВВЕР.

4. Необхідне вдосконалення уніфікованих для всіх АЕС України методик штатного та аварійного моніторингу, прогнозування розвитку аварії з викидом радіоактивності в навколишнє середовище, оцінки наслідків аварії, викиду та оцінки ефективності контрзаходів, з урахуванням досвіду АЕС Фукусіма-1.

5. Подальша модернізація систем контролю і управління домінуючими для безпеки АЕС з ВВЕР запроектованими аваріями (течі 1-го контуру, межконтурная течі) повинна проводитися з акцентом на розвитку пасивних систем безпеки, що мають більш високу надійність і не потребують тривалого енергопостачання. З досвіду аварії на АЕС Фукусіма-1 в якості додаткових заходів щодо підвищення безпеки ВВЕР можна рекомендувати: підвищення надійності систем основного і резервного енергопостачання для забезпечення ефективної та тривалої працездатності активних систем безпеки; підвищення надійності забезпечення систем пожежо і вибухобезпеки; підвищення надійності аварійного охолодження реакторів, басейнів перевантаження і сховищ ядерного палива пасивними системами безпеки.

Технічні обґрунтування додаткових ОТМ повинні ґрунтуватися на специфіці проекту, умов і досвіду експлуатації ВВЕР.

Для підвищення надійності контролю за станом і складом ядерного палива перспективним є також відновлення і подальший розвиток альтернативної до штатних системи нейтринної діагностики. Україна володіє унікальними в світі нейтрино лабораторіями (на Рівненській АЕС), створеними ще за радянських часів і законсервованих на справжній момент. Перевагами систем нейтринної діагностики стану і складу ядерного палива є принципова можливість їх розташування за межами реактора і контаймента, а також здійснення контролю для інших енергоблоків і навіть проммайданчиків АЕС (в тому числі і об'єкта "Укриття").

Перспективні проекти АЕС України повинні розглядатися з реакторами нового покоління підвищеної безпеки (подвійна захисна оболонка і системи пасивного відведення тепла гермозони, «пастки» розплавленого палива, вдосконалені системи усунення вибухо і пожежонебезпечних середовищ і т.п.).

Література

1. Скалозубов В. И., Ключников А. А., Колыханов В. Н. Основы управления запроектованными авариями с потерей теплоносителя на АЭС с ВВЭР. – Чернобыль: Ин-тут проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2010. – 400 с.
2. Обеспечение локализирующих функций защитной оболочки НВАЭС-2 при запроектованной аварии с течами из реакторной установки (ФГУП «Атомэнергопроект» – ИПБЯЭ РНЦ « Курчатовский институт») // Материалы конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». – Подольск (Россия): ФГУП ОКБ «ГП», 2008.
3. Звонарев Ю., Будаев М., Кобзарь В., Волчек А. Валидация компьютерного кода ASTEC и применение для анализа безопасности АЭС с ВВЭР // Code application and PSA methodologies. Paper No 1. The first European Review Meeting on Severe Accident Research (ERMSAR-2005). – Aix-en- Provence (France), 14 – 16 November 2005.

4. Ключников А. А. Методические основы руководств по управлению тяжелыми авариями на АЭС с ВВЭР / А. А. Ключников, В. И. Скалозубов, С. В. Волков, Ю. А. Коврижкин, В. Н. Колыханов, Г. Г. Габлая, В. Н. Ващенко, В. В. Злочевский // Вторая международная научно-техническая конференция "Повышение безопасности и эффективности АЭС " 5 - 7 октября 2010, г. Одесса.

5. Скалозубов В. И., Ключников А. А., Колыханов В. Н. Основы управления запроектными авариями с потерей теплоносителя на АЭС с ВВЭР. – Чернобыль: ИПБ АЭС НАНУ, 2010. – 400 с.

6. Ващенко В. Н. Опыт большой аварии на АЭС Фукусима-1 для повышения экологической безопасности объектов Украины с высокорadioактивными источниками [Электронный ресурс] / В.Н. Ващенко, С. С. Яровой, В. В. Злочевский // Збірник наукових статей “III-го Всеукраїнського з’їзду екологів з міжнародною участю”. – Вінниця, 2011. – Том.1. – С.102–104. Режим доступу: <http://eco.com.ua/>

Скалозубов Владимир Иванович,
Скалозубов Володимир Іванович,
Skalozubov Vladimir,
Каскевич Владислав Виталиевич,
Каскевич Владислав Віталійович,
Kaskevych Vladislav