

**ВПЛИВ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВ НА ЗАТОПЛЕННЯ ПРОМИСЛОВОГО
МАЙДАНЧИКА ЗАЕС З УРАХУВАННЯМ УРОКІВ ФОКУСИМА-1**

**ВЛИЯНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ НА ЗАТОПЛЕНИЕ
ПРОМЫШЛЕННОЙ ПЛОЩАДКИ ЗАЭС С УЧЁТОМ УРОКОВ ФОКУСИМА-1**

**INFLUENCE OF EXTREME CONDITIONS ON FLOODING OF THE
INDUSTRIAL SITE OF ZNPP, TAKING INTO ACCOUNT FOCUSIM-1 LESSONS**

Научный руководитель – кафедра атомных электрических станций; профессор,
доктор технических наук - Скалозубов В. И., магистр – Дидух Е. С.

Науковий керівник - кафедра атомних електричних станцій; професор, доктор
технічних наук - Скалозубов В. І., магістр – Дідух Є. С.

Supervisor - department of nuclear power plant; professor, doctor of technical sciences –
V. I. Scalozubov, master – E. S. Didukh

Аннотация: Объектом исследования статьи были основные причины и последствия
большой аварии на АЭС Фокусима-1.

Был проведен анализ результатов стресс тестов по переоценке безопасности
ядерной энергетики Украины с учетом уроков аварии на АЭС Фокусима-1 .

Ключевые слова: Фокусима-1 , затопление, промышленная площадка, ЗАЭС .

Анотація: Об'єктом дослідження статті були основні причини та наслідки великої
аварії на АЕС Фокусіма-1

Був проведений аліз результатів стресс тестів з переоцінки безпеки ядерної
енергетики України з урахуванням уроків аварії на АЕС Фокусіма-1

Ключові слова: Фокусіма-1, затоплення, промисловий майданчик, ЗАЕС..

Annotation: The research object of the article was the main causes and consequences of
the major accident at the Fokushima-1 nuclear power plant.

The analysis of the results of stress tests on the reassessment of the safety of nuclear
power in Ukraine was carried out, taking into account the lessons of the accident at the
Fokushima-1 nuclear power plant.

Key words: Fokushima-1, flooding, industrial site, ZNPP.

Основними причинами великої аварії на АЕС Fukushima-Daiichi в березні 2011 р,
яка призвела к катастрофічним екологічним наслідкам, були:

- недостатнє забезпечення захищеності промислового майданчика та конструкцій
атомних енергоблоків від зовнішніх екстремальних впливів (за-проектних землетрусів і
цунамі), що призвели до затоплення та повної втрати тривалого електропостачання
власних потреб;

- принципові недоліки експлуатованих на АЕС Fukushima-Daiichi американських
проектів ядерних енергоустановок з "киплячими" реакторами (BWR), що не забезпечують
запобігання виникненню та управління важкими аваріями (з неприпустимими
ушкодженнями ядерного палива) при повній втраті тривалого електропостачання;

- недостатня підготовленість персоналу з управління подібними малоїмовірними
за- проектними аваріями.

Події що відбулися на АЕС Fukushima-Daiichi змусили всю світову ядерну спілку
та державні органи регулювання екологічної безпеки знову після Чорнобильської
катастрофи повернутися до необхідності переоцінки безпеки всіх діючих і проєктованих

АЕС. Одним з основних виявлених концептуальних обмежень загальноприйнятих підходів з оцінки ядерної та радіаційної безпеки атомної енергетики слід визнати недостатню увагу до відносно малоімовірним аварійним подіям, які фактично і відбулися на АЕС Fukushima-Daiichi: спільне виникнення кількох зовнішніх екстремальних за-проектних впливів, повна втрата тривалого електропостачання, парові "енергетичні" вибухи та інші. Відповідно до загальноприйнятих підходів з аналізу безпеки АЕС (в т.ч. і на Україні), пріоритетність розгляду аварійних подій здійснювалася на основі імовірнісних оцінок їх вкладу в інтегральні показники безпеки (сумарна частота пошкодження активної зони – ЧПАЗ, частота граничного аварійного викиду – ЧГАВ та ін.). Уроки великих аварій на Чорнобильській АЕС та АЕС Fukushima-Daiichi показали неприпустимість такого підходу.

Проведені Державною інспекцією ядерного регулювання України "стрес-тести" (початковий етап) з переоцінки безпеки діючих реакторних установок з урахуванням великої аварії на АЕС Fukushima-Daiichi фактично не визначили нові "дефіцити" безпеки. Основні результати "стрес-тестів" до необхідності реалізації додаткових заходів щодо посилення резервного електроживлення власних потреб, підвищення ефективності систем запобігання вибухів водню, а також з переоцінки міцності систем і устаткування на умови за проектних сейсмічних навантажень. Ключові же питання перегляду методичного забезпечення аналізу безпеки атомних енергоблоків з урахуванням уроків великої аварії на АЕС Fukushima-Daiichi не знайшли необхідного рішення. Однією з можливих причин отриманих в "стрес-тестах" результатів є фактична відсутність досить обґрунтованих методів моделювання таких щодо малоімовірних подій, як затоплення промислових майданчиків АЕС в результаті спільного впливу зовнішніх екстремальних явищ (сталася на АЕС Fukushima-Daiichi), руйнівних парогазових "енергетичних" вибухів (відбулося на Чорнобильській АЕС и АЕС Fukushima-Daiichi) та ін., а також методичного забезпечення стратегій управління щодо малоімовірних за-проектних та важких аварій, які аналогічні катастрофі на Фукусімі.

Аналіз результатів стрес тестів з переоцінки безпеки ядерної енергетики України з урахуванням уроків аварії на АЕС Фукусіма-1.

Міжнародне ядерне співтовариство на нараді 4 - 14 квітня 2011 р по виконанню Конвенції з ядерної безпеки, Рада Європейського союзу, європейські регулюючі органи (ENSEG) прийняли рішення щодо обов'язкової переоцінки безпеки діючих ядерних реакторів з урахуванням уроків великої аварії на АЕС Fukushima-Daiichi [2]. У відомому звіті МАГАТЕ [3] були сформульовані попередні уроки аварії на АЕС Fukushima-Daiichi і виявлені проблеми безпеки, які в основному відносяться до необхідності впровадження достатніх захистів і заходів від ризику всіх можливих природних впливів (в тому числі і за-проектних), вдосконалення методології та організаційно-технічних заходів з управління за-проектними і важкими аваріями з урахуванням екстремальних природних впливів, періодичної переоцінки безпеки з пріоритетністю детерміністських методів і ін.

В Україні в травні 2011 р регулюючий орган (ДІЯРУ) і експлуатуюча організація (ДП НАЕК "Енергоатом") розробили і прийняли план заходів з виконання цільової позачергової перевірки та подальшого підвищення безпеки АЕС з урахуванням подій на АЕС Fukushima-Daiichi [3], який в основному спрямований на уточнення і доповнення діючої комплексної (зведеної) програми безпеки АЕС України (КсППБУ). Одним з базових короткострокових заходів цього плану було проведення в 2011 р стрес-тестів переоцінки безпеки, основна мета яких пов'язана з експрес-оцінкою поточного стану безпеки і обґрунтуванням додаткових до КсППБУ довгострокових заходів щодо подальшого підвищення безпеки АЕС України з урахуванням уроків великої аварії на

АЕС Fukushima-Daiichi.

Основні результати стрес-тестів переоцінки безпеки діючих українських енергоблоків АЕС ВВЕР відображені в Національному звіті України "Результати стрес-тестів" від 2011 року і полягають в наступному:

- 1) не встановлені додаткові до проекту дефіцити безпеки і комбінації зовнішніх екстремальних впливів, які значно впливають на безпеку;
- 2) проекти енергоблоків АЕС з ВВЕР, а також реалізований і реалізований комплекс галузевих заходів щодо підвищення безпеки визначають значні "запаси" безпеки, в тому числі і по відношенню до зовнішніх екстремальних впливів.

За результатами стрес-тестів визначені додаткові заходи до комплексної (зведеної) програми підвищення безпеки АЕС України з урахуванням уроків великої аварії на АЕС Fukushima-Daiichi:

- 1) забезпечення працездатності споживачів системи технічної води відповідальних споживачів при зневодненні бризкальних басейнів внаслідок впливу смерчу;
- 2) комплекс заходів, спрямованих на забезпечення тривалого (до 72 год) відведення залишкових тепловиділень від активної зони реактора і БВ при повному знеструмленні і / або втраті кінцевого поглинача;
- 3) розробка РУТА для БВ;
- 4) модернізація контрольно-вимірювальних приладів з метою забезпечення їх працездатності в умовах важкої аварії.

Крім того, визначені додаткові вимоги до продовження термінів експлуатації енергоблоків АЕС України:

- 1) забезпечення стійкості обладнання, трубопроводів, будівель споруд і конструкцій, які необхідні для виконання основних функцій безпеки до сейсмічного впливу відгуку прискорень на ґрунті не менше 0,1g (для промислового майданчика ЮУАЕС - 0,12g);
- 2) забезпечення виконання основних функцій безпеки в "жорстких" умовах експлуатації;
- 3) впровадження на енергоблоках з ВВЕР-1000 вентилявання контаймента;
- 4) впровадження заходів щодо забезпечення підживлення (розхолодження) ПГ і БВ в умовах довгострокового повного знеструмлення і / або втрати кінцевого поглинача тепла;
- 5) введення РУТА (в реакторі і БВ) і СОАІ для зупиненого реактора.

Результати стрес-тестів були узгоджені в рамках колегії ДІЯРУ 24 - 25.11.2011 р, на якій було зазначено [5]: "Послідовність подій, що сталися на АЕС Fukushima-Daiichi, практично неможлива для АЕС України. Реалізовані протягом 10 - 15 років заходи щодо підвищення безпеки енергоблоків АЕС в значній мірі знизили ймовірність пошкодження активної зони і викиду радіоактивних речовин. Чи не виявлені нові критичні зовнішні природні впливи або комбінації впливів додатково до розглянутих при проектуванні АЕС і детально проаналізованих в рамках обґрунтування безпеки АЕС".

Результати стрес-тестів АЕС України в 2012 р в цілому були узгоджені групою незалежних експертів європейських регуляторів ядерної безпеки (ENSREG), яка відзначила ряд проблемних питань:

- 1) неповна відповідність вимогам МАГАТЕ NS-R-1 в частині кваліфікації обладнання, важких аварій, сейсмічності, повноти імовірнісного і детерміністського аналізу безпеки;
- 2) роботи з аналізу важких аварій ще не завершені в Україні. Для цих робіт повинен бути встановлений найвищий пріоритет;

3) необхідність посилення робіт по національній програмі підвищення безпеки. Фахівцями ІПБ АЕС НАНУ в ініціативному порядку було проведено незалежний аналіз результатів стрес-тестів діючих АЕС України.

В стрес-тестах розглянуті питання, які безпосередньо пов'язані з подіями на АЕС Fukushima-Daiichi:

- затоплення промислових майданчиків при за-проектних землетрусах;
- втрата електропостачання;
- управління важкими аваріями.

Далі наведено аналіз тільки тих результатів стрес-тестів, які мають, на нашу думку, неоднозначний або спірний характер.

Основні обмеження і недоліки результатів стрес-тестів щодо можливості затоплень промислових майданчиків діючих АЕС України при за-проектних землетрусах, на наш погляд, полягають в наступному.

1. Вплив землетрусів враховуються тільки щодо можливого руйнування дамб / гребель водосховищ. Безпосереднє сейсмічну дію на швидкість і рівні хвиль води в потоках і ставках-охолоджувачах не враховується. При цьому потужність динамічного впливу при за-проектних землетрусах може значно перевищувати нівелірні, вітрові та паводкові чинники, на яких заснований аналіз в стрес-тестах.

2. Використовувані в ряді випадків (наприклад, для ХАЕС і РАЕС) аргументи "досить далекого розташування водосховищ від промислових майданчиків" є недостатньо обґрунтованими (знову ж через неврахування безпосереднього динамічного впливу за-проектних землетрусів на швидкість і висоту можливих хвиль затоплень).

3. З цієї ж причини недостатньо обґрунтовані в стрес-тестах "запаси" рівня до затоплення промислових майданчиків (для ЗАЕС 2,6 м; для ХАЕС 3 м; для ЮУАЕС 2,5 м; для РАЕС 24 м): безпосередні сейсмічні впливи на водні обсяги можуть істотно вплинути на їх значення.

4. Для РАЕС основну небезпеку становить цілком реальне затоплення насосної станції підживлення системи водопостачання відповідальних споживачів при за-проектних землетрусах, так як насосна станція знаходиться фактично на одному рівні з водним об'ємом (~ 165 м). У цьому випадку надійність виконання функції безпеки щодо забезпечення водопостачанням СБ для охолодження зупинених реакторів фактично повністю покладається на системи градирень і бризкальних басейнів. Тому стрес-тестами повинна була бути визначена необхідність глибокої кваліфікації зазначених систем в умовах за-проектних землетрусів (в тому числі в комплексі з іншими зовнішніми екстремальними подіями); а висновки про те, що відмова систем підживлення від насосної станції в повній мірі дублюються іншими системами видаються передчасними.

5. Окрім результати мають суперечливий характер. Наприклад, щодо ССВЯП на промисловому майданчику ЗАЕС: з одного боку, визначено, що при затопленні можливо забивання мулом, водоростями, сміттям і т.д. ВКГ, які забезпечують необхідне охолодження ВЯП природною циркуляцією (критичні умови для безпеки); а з іншого боку, вказується, що гідрогеологічні умови не припускають затоплень ССВЯП, і навіть при гіпотетичному повному забиванні ВКГ ССВЯП не наступають критичні умови для безпеки.

Один з основних уроків великої аварії на АЕС Fukushima-Daiichi пов'язаний з необхідністю контролювання і управління процесами з ВЯП: на початковому розвитку важких аварій персонал недостатньо займався забезпеченням безпеки при-реакторних БВ ВЯП на блоці № 4 (основні заходи були пов'язані з енергоблоками № 1 - 3) . Тому питання забезпечення безпеки сховищ / басейнів з ВЯП в процесі розвитку аварій (в тому числі і при затопленнях, викликаних за-проектними землетрусами) вимагають найпильнішої

розгляду (моделювання, аналізу та розробки протиаварійних процедур).

Таким чином, результати стрес-тестів щодо аварій із затопленням промислових майданчиків, викликаними за-проектними землетрусами або іншими зовнішніми екстремальними впливами, вимагають подальшого вивчення.

Загальні для всіх промислових майданчиків проектні рішення щодо захисту енергоблоків від затоплення:

1) територія спланована з ухилом від будівель для відведення дощових і талих вод до дощової каналізації, а територія промислового майданчика біля реакторного відділення головних корпусів має загальний ухил в бік підвідного каналу;

2) передбачені автоматичні дренажні системи / насоси для берегових насосних станцій; для прямиків приміщень РДЕС (і ЗРДЕС); для "мінусових" відміток головних корпусів реакторного та турбінного відділень

3) система моніторингу можливого переповнення прямиків приміщень

Всі наведені проектні рішення не забезпечують попередження за-проектних затоплень промислових майданчиків (наприклад, для аналогічної ситуації при великій аварії на АЕС Fukushima-Daiichi рівень води тільки в машинному залі турбінного відділення сягнув понад 1,5 м, що в кінцевому підсумку призвело до виходу з ладу 12 з 13 ДГ.

У разі виникнення за-проектних зовнішніх затоплень (в тому числі з причини за-проектних землетрусів) необхідно розгляд додаткових заходів.

На основі результатів аналізу можливості затоплення промислових майданчиків діючих АЕС України, викликаних за-проектними землетрусами, в стрес-тестах зроблені висновки про те, що розробка і реалізація додаткових заходів щодо підвищення стійкості енергоблоків до можливих зовнішніх затоплень не потрібно.

Разом з тим, на ЗАЕС передбачена реалізація наступних додаткових заходів:

1) розроблені схеми відкачування води при затопленні реакторних і турбінних відділень;

2) планується поставка додаткових заглибних насосів відкачки води підвищеної продуктивності;

3) визначені приміщення, що підлягають герметизації для виключення затоплення реакторного відділення;

4) виконані роботи по ущільненню приміщень "мінусових" відміток реакторного відділення і РДЕС;

5) виготовлені пристрої ущільнення клапанів надлишкового тиску приміщень "мінусових" відміток реакторного відділення і розроблені регламенти їх застосування;

6) розроблені процедури знеструмлення обладнання РЦУ і дій персоналу при затопленні реакторного відділення.

Щодо висновків стрес-тестів про недоцільність додаткових заходів щодо підвищення стійкості енергоблоків до зовнішніх затоплень (в тому числі викликаних землетрусами) необхідно зазначити наступне.

1. Як було показано вище, технічні обґрунтування "запасів" рівнів до затоплення всіх промислових майданчиків недостатні, оскільки не враховують домінуючий внесок безпосередніх за-проектних сейсмічних впливів на гідродинаміку рівнів водних об'ємів. Тому висновки стрес тестів про недоцільність додаткових заходів щодо підвищення стійкості енергоблоків до зовнішніх затоплень при за-проектних землетрусах є, як мінімум, передчасними. Необхідний додатковий поглиблений аналіз можливості затоплень при за-проектних землетрусах з урахуванням специфіки кожного промислового майданчика АЕС.

2. У разі якщо на основі поглибленого аналізу підтвердиться можливість затоплення

промислового майданчика при за-проектних землетрусах, то необхідно розробляти і впроваджувати додаткові заходи, спрямовані на:

- забезпечення герметичності при затопленнях приміщень реакторного та турбінного відділень, РДЕС і інших приміщень, в яких перебувають системи / обладнання, що визначають безпечну експлуатацію і управління аваріями;
- установку додаткових систем (з пріоритетом пасивного принципу дії) для усунення наслідків затоплення;
- підготовку персоналу до управління процесами і усунення наслідків затоплень і ін.

3. Для РАЕС в будь-якому випадку актуальним є питання кваліфікації (обґрунтуванні працездатності і надійності) систем бризкальних басейнів і градирень, що забезпечують резервне водопостачання відповідальних споживачів.

Реалізовані та плановані додаткові заходи щодо підвищення стійкості промислового майданчика ЗАЕС до затоплень в цілому обґрунтовані і ефективні. Однак, на наш погляд, не всі аспекти враховані при можливих затопленнях промислового майданчика ЗАЕС. Зокрема, це відноситься до розташованих на промисловому майданчику ЗАЕС ССВЯП.

В даний час на ЗАЕС експлуатуються ССВЯП "застарілого" американського проекту, які представляють собою бетонні циліндричні конструкції з поміщається в них ВЯП. Підтримка необхідного температурного режиму зберігання ВЯП здійснюється за рахунок ВКГ, що забезпечують природну циркуляцію повітря в сховищах і охолодження ВЯП.

У разі виникнення затоплення промислового майданчика можливо "забивання" ВКГ мулом, сміттям і т.д. з водою від ставка-охолоджувача. "Забивання" ВКГ може привести до порушення умов природної циркуляції, а відповідно і до порушення необхідного температурного режиму. Таким чином, з урахуванням уроків великої аварії на АЕС Fukushima-Daiichi щодо забезпечення безпеки сховищ відпрацьованого ядерного палива при затопленні промислового майданчика, доцільна модернізація ССВЯП вітчизняних енергоблоків АЕС.

Перспективним вирішенням цього питання є впровадження сучасних ССВЯП "європейського проекту". Приклад такого сховища з ВЯП на АЕС Темелін (експлуатуючої реактори типу ВВЕР), розробленого відомою компанією СЕЕІ (Central Europe Engineering & Investment).

Основні переваги ССВЯП компанії СЕЕІ:

- 1) наявність загального гермо об'єму сховища забезпечує додатковий захист ВЯП від зовнішніх екстремальних впливів;
- 2) автоматизація закриття / відкриття вентиляційних каналів забезпечує захист від затоплень контейнерів з ВЯП.

В стрес-тестах плану заходів щодо подальшого підвищення безпеки атомної енергетики України з урахуванням уроків великої аварії на АЕС Fukushima-Daiichi визначені основні сутани діючих енергоблоків з ВВЕР:

1. Подача (впорскування) теплоносія в 1-й контур.
2. Зниження тиску в 1-му контурі.
3. Підживлення в ПГ.
4. Зниження тиску в ПГ.
5. Впорскування в гермо об'ємі (ГО).
6. Управління концентрацією водню в ГО.
7. Скидання середовища з ГО.
8. Зовнішнє охолодження реактора.
9. Охолодження розплаву в бетонній шахті реактора.

Крім того, визначено стратегію управління радіоактивними викидами при виникненні за проектною аварією з повним знеструмленням енергоблоку (аналог ІС на АЕС Fukushima-Daiichi) і втратою кінцевих поглиначів тепла (в тому числі і для стадії важкої аварії), яка заснована на використанні проектних систем підживлення 1-го і 2-го контурів, спринклерної системи для охолодження і зниження тиску в ГО, а також додаткових заходів за результатами стрес-тестів (зокрема, подання охолодження в ПГ від мобільних насосних агрегатів пожежних машин).

Основні обмеження і недоліки запропонованої в стрес-тестах стратегії управління важкими аваріями і радіоактивними викидами наступні.

1. Проектні СБ аварійного підживлення 1-го і 2-го контурів, а також спринклерна система є активними системами (тобто залежать від електропостачання). Тому в разі виникнення за проектною аварією з повним знеструмленням використання активних СБ для тривалого відводу тепла проектом не передбачено.

2. Необхідні додаткові обґрунтування достатності та ефективності альтернативної подачі охолодження від пожежних машин у 2-й контур. Зокрема, в процесі великої аварії на АЕС Fukushima-Daiichi ефективність пожежних систем для охолодження зруйнованих активних зон реакторів була недостатньою.

3. Як ІС радіаційної аварії розглянуто початок роботи ППУ КД (або середня текти 1-го контуру). Необхідні додаткові обґрунтування консервативності прийнятого ІС радіаційних аварій і / або його достатності для обліку всіх можливих ситуацій. Зокрема, ІС з між-контурна течіями (байпас ГО) при відмові "на закриття після відкриття" ПСУ може привести до радіаційної аварії навіть без стадії важкої аварії.

4. У стратегії стрес-тестів з управління радіоактивними викидами при за-проектних / важких аваріях не розглядаються заходи щодо запобігання парогазових вибухів (детонація водню і / або парові енергетичні вибухи) в реакторі при "щільному" 1-му контурі. А адже саме парогазові вибухи на блоках № 1 - 4 АЕС Fukushima-Daiichi привели до руйнування захисних бар'єрів безпеки і радіаційних аварій з катастрофічними наслідками.

У перелік стратегій і їх змістів з управління важкими аваріями до стадії відмови корпусу реактора повинна бути врахована стратегія "Запобігання парогазових вибухів в реакторі при" щільному "1-му контурі".

Обґрунтування такої стратегії повинні комплексно враховувати визначають механізми водневих / парових вибухів і спрямовані на:

а) зниження температури пошкодженого палива (для зниження швидкості пароцирконієвої реакції концентрації водню і можливості водневої детонації / дефлаграції);

б) зниження швидкості пароутворення (для запобігання парових енергетичних вибухів);

в) превентивне видалення парогазового середовища з реактора (для зниження можливості парогазових вибухів в реакторі);

г) підтримання необхідної концентрації пара, який є де-каталізатором водневого вибуху та інші.

При цьому заходи Сути "Запобігання парогазових вибухів в реакторі при щільному 1-му контурі" повинні бути обґрунтовано оптимізовані по їх ефективності. Наприклад, заходи на зниження температури пошкодженого палива для запобігання водневого вибуху (а) можуть при певних умовах (інтенсивне охолодження) привести до стрибкоподібного зростання тиску і паровому вибуху, який зруйнує корпус реактора і / або ініціює наступний водневий вибух (при паровому вибуху різко зростає локальна концентрація водню і кисню).

З цієї ж причини прийнята в стрес-тестах за результатами аналізу уразливості

енергоблоків з ВВЕР стратегія "Подача (впорскування) теплоносія в 1-й контур" повинна корелювати з запропонованою стратегією запобігання парогазових вибухів. Крім того, ефективність прийнятої стратегії "Подача (впорскування) теплоносія в 1-й контур" вимагає додаткових глибоких науково-технічних обґрунтувань: до теперішнього часу немає однозначного уявлення про ефективність інтенсивного охолодження вже пошкодженого ядерного палива (особливо, плутоній-місткого).

Реалізація прийнятої в стрес-тестах сутани при відмові корпусу реактора (порушення герметичності корпусу реактора) "Зниження параметрів в ГО" повинна враховувати, що превентивні (навіть фільтровані) викиди з ГО крім позитивних ефектів (наприклад, зниження тиску в ГО) можуть мати і негативні ефекти: безпосередні радіоактивні "невідфільтровані" викиди в навколишнє середовище і контакт водню з киснем повітря за межами реакторного відділення. Так, нагадаємо, що руйнівний вибух за межами контаймента 1-го блоку АЕС Fukushima-Daiichi, який призвів до катастрофічних наслідків, стався фактично відразу після превентивного викиду персоналом парогазового середовища з контаймента. Також слід враховувати, що контаймент енергоблоків з ВВЕР-1000 значно більше контаймента BWR, які експлуатувалися на АЕС Fukushima-Daiichi. Тому для реалізації стратегії "Зниження параметрів в ГО" більш перспективна застосування пасивних СБ (наприклад, застосовувані в реакторах ВВЕР нового покоління безпеки СПОТ).

Прийнята в стрес-тестах сутани після відмови корпусу реактора "Управління концентрацією водню в ГО" повинна бути замінена комплексною стратегією "Управління умовами виникнення парогазових вибухів в ГО". Виняток з розгляду парових енергетичних вибухів з проведених раніше аналізів уразливості енергоблоків з ВВЕР (як щодо малоймовірних подій) необґрунтовано: і на АЕС Fukushima-Daiichi, і на Чорнобильській АЕС такі вибухи відбувалися; а відмінна від них конструкція реактора і ГО ВВЕР не виключає можливості виникнення парових вибухів.

На нашу думку, виключення з розгляду парових вибухів при аналізі уразливості ВВЕР, пов'язано, головним чином, з недостатнім методичним забезпеченням моделювання умов їх виникнення. Визначальною умовою виникнення парових вибухів є локальний стрибкоподібне зростання тиску, який може статися в окремих приміщеннях ГО. При цьому, навіть якщо локальний паровий вибух не призведе до критичних руйнувань, він може бути каталізатором подальшого більш потужного водневого вибуху.

Загальний недолік наведених в стрес-тестах сутани пов'язаний з тим, що ці стратегії повинні визначатися не тільки цілями заходів і / або дій персоналу щодо пом'якшення наслідків пошкодження ядерного палива Мп, але також передісторією розвитку АП та конфігурацій доступних до використання СБ в момент початку важкої аварії.

Результати стрес-тестів фактично не відображають необхідність додаткових заходів щодо вдосконалення нормативної та методичної бази аналізу та регулювання безпеки з урахуванням уроків аварії АЕС Fukushima-Daiichi. Необхідність таких заходів передбачена як Планом[4], так рекомендаціями МАГАТЕ[3].

Аналіз використовуваної до теперішнього часу методичної бази звітів з аналізу безпеки та кваліфікації систем АЕС з ВВЕР визначає, на наш погляд, необхідність вирішення наступних завдань з урахуванням уроків аварії на АЕС Fukushima-Daiichi.

1. У КсППБУ, звітах з аналізу безпеки і посібниках / інструкціях з управління за-проектними і важкими аваріями повинна бути впроваджена методологія ідентифікації подій і АП (в тому числі і щодо малоймовірних) на основі принципу критичних конфігурацій систем, що забезпечують виконання необхідних функцій безпеки.

Такий принцип, з одного боку, враховує всі за-проектні події / АП, які можуть привести до важких аварій (в тому числі щодо малоймовірним, як це було на АЕС

Fukushima-Daiichi), а з іншого боку, обмежує розгляд за-проектних аварій, що не приводять до неприпустимого пошкодження ядерного палива.

2. Розробка і впровадження необхідних і достатніх критеріїв виникнення парогозових вибухів в різних умовах протікання аварій.

В даний час в звітах з аналізу безпеки ВВЕР для оцінки умов виникнення вибуху водню використовується відома діаграма Шапіро-Мофетта в координатах концентрації водню, пара і повітря (кисню), яка обґрунтована тільки для квазірівноважних процесів. Моделювання парових вибухів в звітах з аналізу безпеки взагалі виключено (через їх малу ймовірність), що не відповідає уроків великих аварій на Чорнобильській АЕС та АЕС Fukushima-Daiichi[1].

3. Кваліфікація систем, обладнання та будівель в "жорстких" умовах (в тому числі зовнішні екстремальні події та парогозові вибухи) повинна ґрунтуватися на методології розрахунків на міцність, що враховують істотно динамічний характер навантажень і фактори залишкових дефектів з досвіду виробництва і експлуатації.

До теперішнього часу в програмах кваліфікації і продовження термінів експлуатації використовується методичне забезпечення оцінки умови міцності при статичних або квазістатических навантаженнях. Саме такі підходи використовувалися в технічних обґрунтуваннях проектів ВWR енергоблоків АЕС Fukushima-Daiichi.

У напрямку вдосконалення нормативної бази регулювання безпеки з урахуванням уроків АЕС Fukushima-Daiichi доцільно вирішення наступних завдань.

1. Перегляд нормативних документів, що регулюють сейсмічні впливи, щодо ймовірної періодичності ПЗ і МПЗ.

Проекти АЕС України розроблялися для ПЗ 5 балів (1 раз в 100 років) і МПЗ 6 балів (1 раз в 10 тис. років). Сучасні геологічні дослідження і уроки аварії на АЕС Fukushima-Daiichi визначили необхідність кваліфікації будівель, систем та обладнання енергоблоків АЕС в Україні на землетрусу з відгуками прискорень на ґрунті, відповідними землетрусів понад 6 балів (з оцінкою ймовірності порядку 1 раз в 5000 років). На наш погляд, найбільш ефективне рішення цього питання повинно бути пов'язане з усуненням з нормативних документів імовірнісних критеріїв для ПЗ і МПЗ.

2. Необхідно уточнення термінів кваліфікації обладнання, систем, будівель.

Відповідно до прийнятої термінології процедури кваліфікації відносяться до обґрунтування працездатності / надійності в нормальних умовах експлуатації і проектних аваріях. Уроки Чорнобиля і Фукусіми показують необхідність кваліфікації і в умовах за-проектних аварій.

3. Необхідно виключити з нормативних документів імовірнісні критерії безпеки.

Попередній перелік вимагають перегляду діючих норм і правил з ядерної та радіаційної безпеки атомної енергетики України (ПНАЕ Г-14-029-91, ПНАЕ Г-5-006-91, ПНАЕ Г-5-020-90, ПНАЕ Г-9-26-90, ПНАЕ Г-9-027-91, НП 306.2.144-2008), а також розробка нових нормативних документів з проектування пасивних СБ, запобігання вибухонебезпечних СБ, запобігання вибухонебезпечним ситуаціям і зовнішніх екстремальних впливів[6].

Велика аварія на АЕС Fukushima-Daiichi знову підтвердила, що відносно малі ймовірності виникнення важких і радіаційних аварій ще не визначають достатній рівень безпеки і можливості виникнення великих аварій за період експлуатації АЕС.

Разом з тим, зазначене не заперечує необхідності подальшого розвитку імовірнісних РОП для вирішення багатьох актуальних практичних завдань щодо підвищення безпеки атомної енергетики України.

На основі проведеного аналізу результатів стрес-тестів Плану дій щодо виконання цільової позачергової оцінки стану безпеки та подальшого підвищення безпеки

енергоблоків АЕС України з урахуванням уроків великої аварії на АЕС Fukushima, а також сучасного стану методичного забезпечення моделювання та аналізу важких аварій можна сформулювати наступні додаткові (до стрес-тестів) заходи в КсППБУ-2010.

1. Удосконалення методичного забезпечення моделювання та аналізу важких аварій в частині:

1) ідентифікації повного переліку важких аварій з урахуванням передісторії розвитку процесів на основі симптомно-орієнтованого підходу;

2) визначення умов виникнення парогазових вибухів при істотно динамічні процеси розвитку важких аварій в реакторі, ГО і БВ;

3) додаткове моделювання та аналіз можливості затоплення промислових майданчиків АЕС при за-проектних сейсмічних впливах на водойми-охолоджувачі / кінцеві поглиначі тепла;

4) додатковий аналіз ефективності заходів з охолодження пошкодженого ядерного палива і превентивних викидів з ГО.

2. Визначення в РУТА в реакторах і БВ всіх ефективних стратегій управління з урахуванням передісторії розвитку аварійних процесів і фактичного стану працездатності СБ на основі симптомно-орієнтованого підходу.

3. Розробка і впровадження додаткових пасивних СБ з управління важкими аваріями при повному знеструмленні енергоблоків.

Висновки

Проведено аналіз результатів стрес тестів з переоцінки безпеки ядерної енергетики України з урахуванням уроків аварії на АЕС Фукусіма-1.

Представлені результати моделювання можливого затоплення промислового майданчика Запорізької АЕС при за проектних землетрусах з ураганим вітром. Встановлено, що затоплення промислового майданчика АЕС можливе при землетрусах з прискоренням відгуку на поверхні ґрунту більш 1,0g або ураганного вітру зі швидкістю понад 100 км/год з руйнуванням греблі Каховського водосховища.

Список використаної літератури

1. Скалозубов В. И., Ключников А. А., Ващенко В. Н., Яровой С. С. Анализ причин и последствий аварии на АЭС Fukushima как фактор предотвращения тяжелых аварий в корпусных реакторах. – Чернобыль: ИПБ АЭС НАНУ, 2012. – 280 с.

2. Громов Г. В., Дыбач А. М., Зеленый О. В., Инюшев В. В. и др. Результаты экспертной оценки стресс-тестов действующих энергоблоков АЭС Украины с учетом уроков аварии на АЭС "Фукусима-1" в Японии // Ядерна та радіаційна безпека. – 2012. – № 1 (53). – С. 3 – 9.

3. IAEA International Fact Finding Expert Mission Of The Fukushima Dai-Ichi NPP Accident Following the Great East Japan Earthquake and Tsunami: IAEA Mission Report. – IAEA, 2011. – 160 p.

4. 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.

5. Про результати виконання цільової позачергової оцінки стану безпеки діючих енергоблоків АЕС з урахування подій на АЕС Фукусіма / Колегія Держатомрегулювання, № 13 від 24-25.11.11 р.

6. Архангельський К. Л., Михасюк С. Р. Аналіз недоліків проекту АЕС

"Fukushima-DaiIchi" за наслідками важкої аварії в світлі подальшого посилення безпеки АЕС України // Ядерна та радіаційна безпека. – 2011. – № 3 (51). – С. 9 – 14.

Скалозубов Владимир Иванович,

Скалозубов Володимир Іванович,

Scalozubov Vladimir,

Дидух Евгений Сергеевич,

Дідух Євген Сергійович,

Didukh Evgeny