

ОБГРУНТОВАНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ З МІНІМІЗАЦІЇ ВОДНЕВОЇ НЕБЕЗПЕКИ ПРИ АВАРІЯХ НА СУЧАСНИХ БЛОКАХ АЕС

Г.М. Федоренко¹, докт. техн. наук, Я.С. Буєва², магістрант

¹ – Ін-т електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

² – Нац. техн. ун-т України «КПІ»,
пр. Перемоги, 37, Київ-56, 03056, Україна

Представлено рекомендації щодо зменшення водневої небезпеки при проходженні важких аварій на блоках АЕС, що може призвести до деградації ядерного палива. Розглянуто потенційні джерела генерації водню, режими горіння водню, методи вимірювання, контролю та видалення його з гермооб'єму. Бібл. 5, рис. 2, табл. 4.

Ключові слова: воднева безпека, зменшення водневої небезпеки, генерація водню, пароцирконієва реакція, режими горіння, системи запалювання, пасивні автоматичні каталітичні рекомбінатори.

Розгляд важких аварій на АЕС – це важливий компонент захисту щодо підходу до ядерної безпеки. При важкій аварії – запроектній – відбувається пошкодження активної зони [1]. Особливо небезпечні такі аварії, що супроводжуються окисними реакціями з цирконієм і сталлю з виділенням водню. Важкі аварії мають дуже низьку ймовірність виникнення, але можуть мати серйозні наслідки в результаті деградації ядерного палива.

Основною ціллю управління аварією на атомних електростанціях є захист цілісності захисної оболонки гермооб'єму (ГО), що є кінцевим фізичним бар'єром захисту. На АЕС передбачені фізичні бар'єри безпеки, що попереджають можливий викид радіоактивних речовин у навколишнє середовище. Ними є паливо і оболонка ТВЕЛа, що забезпечує його цілісність і герметичність, обладнання І-го контура і контаймент – герметична залізобетонна оболонка енергоблока реакторного відділення, що спроможна локалізувати радіоактивні речовини при виникненні максимальної проектної аварії. На сьогодні найбільш значимими є аварія на четвертому блоці Чорнобильської АЕС (26 квітня 1986 р); аварія на АЕС «Три Майл Айленд», штат Пенсильванія, США (28 березня 1979 р); аварія на АЕС «Фукусіма Даїчі», Японія (11 березня 2011 р.). Під час цих аварій відбулося плавлення ядерного палива в ТВЗ, у результаті чого були значно зруйновані перші два бар'єри безпеки. При значному підвищенні температури відбулася пароцирконієва реакція – окислення цирконію з одночасним виділенням вільного водню і кисню, накопичення яких призвело у двох випадках до вибуху водню (ЧАЕС і Фукусіма Даїчі). Аналіз усіх питань, пов'язаних з ризиком генерації водню, є важливим кроком для будь-якого заходу, спрямованого на запобігання горінню водню в реакторі, або його пом'якшення.

Для більшості АЕС важкі аварії призводять до виділення значної кількості водню, і ще не розроблено достатньої кількості методів його контролю. У місцях утворення водню може бути досягнуто високої його концентрації за короткий проміжок часу, що призведе до утворення горючої суміші газів у ГО. Генерація водню, його розподіл у контурі і згорання у післяаварійних процесах є дуже складними і можуть відбуватись за певним сценарієм. Згорання водню може відбуватись у різних формах: м'яка дефлаграція, швидке або прискорене полум'я, детонація. Для того щоб вивчити вплив і ліквідацію наслідків горіння водню, необхідні детальні дослідження концентрації водню та його загальний вміст у ГО. Розуміння всіх цих явищ має вирішальне значення для планування та реалізації ефективних заходів з управління воднем, що включають інертизацію азотом, навмисне спалювання водню, використання рекомбінаторів.

У більшості країн немає жорстких нормативних вимог, що стосуються реалізації заходів з водневої безпеки, які допоможуть зменшити наслідки важких аварій для існуючих

установок. Для реакторів, які плануються або перебувають у стадії будівництва, ці заходи мають бути включені до проекту.

Внутрішньокорпусні джерела водню у штатному режимі роботи. До основних джерел утворення водню в результаті виникнення важкої аварії можна віднести:

- окислення цирконію або карбиду бора, що використовується як поглинач нейтронів з парю або водою, що міститься в корпусі реактора;
- окислення металевих матеріалів (Zr, Cr, Fe ...) під час прямого нагрівання активної зони;
- радіоліз води;
- інші менш значні джерела утворення водню (СО ефект).

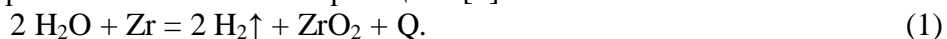
Коротко розглянемо шляхи генерації водню в ТВЕЛлах під час виникнення аварії на блоках АЕС. Виділимо два етапи пошкодження ТВЕЛів: ранні пошкодження ТВЕЛів без втрати герметичності і втрата основної герметичності [2].

При підвищенні температури в активній зоні відбувається окислення оболонки палива. Через швидке окислення цирконію і сильноекзотермічний характер цієї реакції генерується велика кількість водню і виділяється теплота. Можливе підвищення температури вище ~ 1300 К, що може призвести до часткової деградації палива, але без втрати його форми і цілісності. Початок металевих розплаву і блокування деяких каналів часто розглядаються як «ранні фази основних деградацій». Під час основного нагрівання на ранній стадії деградації водень в основному генерується шляхом окислення облицювання Zr для реакторів типу ВWR, деякий внесок може вносити також окислення В₄С.

Достатньо точно встановлено, що поки геометрія палива залишається незмінною, водень у середньому генерується зі швидкістю близько 0,2 кг/с для типових реакторів 1000 МВт.

Під час втрати геометрії ТВЕЛів вважають, що основним джерелом водню є (U-Zr-O) окислення розплаву шляхом розчинення у розплавленому Zr або інших металевих матеріалів, таких як залізо, паливо UO₂ при високих температурах. Правильне моделювання (U-Zr-O) окислення розплаву перебуває у стадії дослідження, заснованого на спеціальних експериментальних програмах. Існує певна невизначеність стосовно виробництва водню на етапі основної деградації оболонки. Проте у зв'язку зі зменшенням поверхні контакту металу з парю на цьому етапі, за оцінками експертів, виробництво водню може бути нижчим, ніж на попередньому етапі.

Розглянемо основні джерела водню (рис. 1). Головним джерелом його є пароцирконієва реакція. Припустимо, що генерація H₂ відбулася при повному 100 %-вому окислюванні маси Zr з парю за такою хімічною реакцією [3]:



Теплота реакції Q = 6280,5 кДж/кг; інтенсивність виділення водню складає 0,044 H₂/кг. У табл. 1 наведено масу водню, що утворюється у різних типах реакторів.

Таблиця 1

	Реактор типу PWR, (3600 МВт), кг	Реактор типу ВВЕР-1000 (російське паливо), кг	Реактор типу ВВЕР-1000 (паливо Westinghouse), кг	Реактор типу ВWR, (3800 МВт), кг
Zr	~26000	~22630 (1% Nb)	~24765	~76000
H ₂	~ 1150	~1000	~1095	~3360

Ще одне джерело – виробництво водню в результаті окислення сталі. Воно може становити від 5 до 10 % від загального об'єму генерації водню. Як і Zr, досить точні кореляції окислення доступні для незруйнованих геометрій ТВЕЛів.

Карбід бору (В₄С) використовується як поглинач нейтронів для реакторів ВWR, ВВЕР і деяких західних PWR. У ВВЕР і ВWR, як правило, В₄С використовується у вигляді порошку, що міститься всередині оболонки з нержавіючої сталі. У табл. 2 наведено величину В₄С і Zr для типових реакторів PWR, ВВЕР і ВWRs.

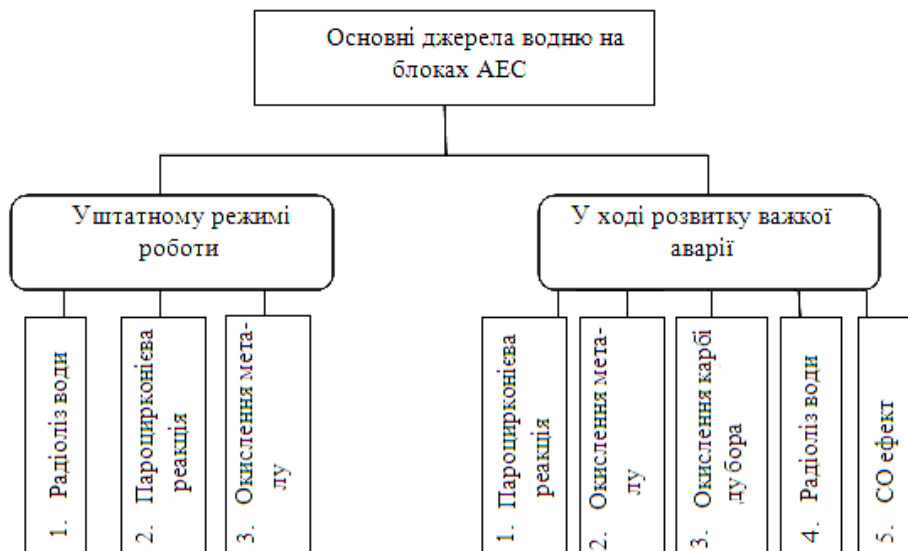


Рис. 1

Під час плавлення активної зони, коли пара вступає в контакт з рештою V_4C всередині керуючих стержнів, цілком ймовірно, що вся відкрита поверхня V_4C буде реагувати з парою [2]. У результаті реакцій може утворитись багато газів H_2 , CO , CO_2 і CH_4 . Крім того, виробляються пари V_2O_3 та різні кислоти бору.

Таблиця 2

	Типові PWR, (3600 МВт), кг	Французька P4-P'4 PWR, (3800 МВт), кг	Французька N4 PWR, (4270 МВт), кг	ВВЕР-1000 (російське паливо), кг	ВВЕР-1000 (паливо Westinghous), кг	Типові BWR, (3800 МВт), кг
V_4C	-	~320	~340	~270	~200	~ 1200
Zr	~26000	~28000	~30000	~22630 (1% Nb)	~24765	~7600
UO_2	~ 10^5	~ $1,15 \times 10^5$	~ $1,24 \times 10^5$	~80100	~91750	~ $1,55 \times 10^5$

Для ілюстрації процесу окислення V_4C у табл. 3 наведено порядки H_2 в результаті окислення V_4C порівняно з окисленням Zr. Порядок виробництва водню наближено становить 0,15 до 0,30 кг H_2 на 1 кг V_4C , що окислюється парою.

Отже, кількість H_2 , породжена окисленням V_4C , залишається на низькому рівні для реакторів PWR і ВВЕР порівняно з H_2 , що виділяється у результаті окислення оболонки ТВЕЛів. Все ж таки сильна лінійна кінетика окислення V_4C може сприяти утворенню водню.

Радіаційно-хімічне утворення водню і кисню у теплоносії першого контура відбувається в результаті [5]: радіолізу внутрішньоконтурного теплоносія; радіолізу води в герметичних приміщеннях; розкладання гідразину і аміаку, що містяться у розчині, який подається сплінктерною системою; радіолізу пари у герметичних приміщеннях.

Таблиця 3

Тип реактора	H_2 , що виділився окисленням V_4C з парою	H_2 у результаті окислення V_4C у порівнянні з окисленням H_2 у результаті окислення Zr з парою
Французька P4-P'4 PWR	Від 45 кг і 95 кг	Менше 10 %
Французька N4 PWR	Від 50 кг і 100 кг	Менше 10 %
ВВЕР-1000	Від 40 кг і 80 кг	Не більше ~ 8 %

Радіоліз води відбувається як при нормальній експлуатації, так і в аварійних умовах. Він включає в себе розкладання молекул води під дією нейтронного випромінювання, яке виробляє різні радикали. Проте оцінки показують, що в аварійних умовах швидкість виробництва водню в процесі радіолізу є низькою. Незважаючи на те, що радіоліз води і корозія металу в захисній оболонці (в основному з Al і Zr) враховуються до водневих джерел під час важкої аварії (наприклад, втрата теплоносія), ці джерела вважаються незначними у розвитку важкої аварії. Наприклад, типові цифри для радіолізу води близько кілька сотень кілограмів водню, отриманого після трьох місяців, і 100 кг водню, отриманого від корозії металу через кілька годин, тобто набагато менші, ніж з інших джерел. Такий низький рівень вироблення водню може бути легко узгоджений з існуючими засобами, наприклад, як водневі рекомбінатори.

Під час реакцій, що можуть відбуватись, також може бути вивільнений CO. Під час вивчення займистості в ГО необхідно брати до уваги суму (H_2+CO) у зв'язку зі спільним згоранням водню і CO. У цілому концентрація чадного газу в ГО становить менше 1 % від усього об'єму, незалежно від об'єму реактора відділу. Співвідношення між складом на одиницю об'єму окису вуглецю і водню може досягати значень, що не перевищують 10. Зазвичай нехтують внеском CO до ризику водню.

Горіння водню. Розглянемо процес горіння водню, перші концентраційні межі запалення і умови легкозаймистості його, основні фізичні процеси всіх можливих режимів горіння, такі як: дефлаграцію, детонації, прискорення полум'я. Всі режими горіння потенційно можливі у сценаріях важких аварій: для низької концентрації водню нижче 8 %, швидкість розповсюдження полум'я, яка очікується, буде повільною (повільне полум'я); якщо концентрація вища 8 %, то згорання є повним і може прискорити процес (швидке полум'я); для концентрації вище 10 % відбувається прискорення до швидкості звуку [4].

Для горючих воднево-пароповітряних газових сумішей експериментально була визначена мінімальна концентрація палива (бідна межа) і окислювача (багата межа), тобто межа займистості, необхідна для самостійного розповсюдження полум'я при заданому тиску і температурі. Межа займистості має окремий інтерес. Вона є ключовим моментом у визначенні запасу для виникнення загорання і розглядається як відповідна вказівка про існування небезпеки загорання.

Концентраційні межі експериментально визначені за допомогою стандартизованого лабораторного обладнання. У табл. 4 представлені концентраційні межі водню для воднево-повітряної суміші при температурі 25 ° C і тиску 0,1 МПа [2].

Таблиця 4

Розповсюдження полум'я	Нижня межа, %	Верхня межа, %
Вгору	4,1	74
Вниз	9,0	74
Горизонтальне поширення	6,0	74

Експериментальні результати показали, що межі для розповсюдження полум'я вгору ширші, ніж для розповсюдження вниз. З іншого боку, вони обмежуються і для горизонтального розповсюдження. Ці концентраційні межі можуть бути використані в галузі ядерної безпеки як керівництва для потенційної оцінки збитку.

Найвірогідніші два режими горіння: дефлаграція і детонація. Ці режими горіння можна легко відрізнити один від одного за швидкістю, структурою і механізмом поширення фронту реакції. Режими горіння і концентраційні межі показані на рис. 2.

Дефлаграція полум'я поширюється на дозвукових швидкостях щодо незгорілого газу.

Експериментально показано, що асиметрична дефлаграція для низьких концентрацій водню, зокрема, для концентрації водню між 4,1 і 6,0 %, буде поширюватись вгору від джерела запалювання. Водень концентрації між 6,0 і 9,0 % буде поширюватись як вгору, так і у горизонтальному напрямку, і водень концентрації, вищої за 9,0 %, буде поширюватись у

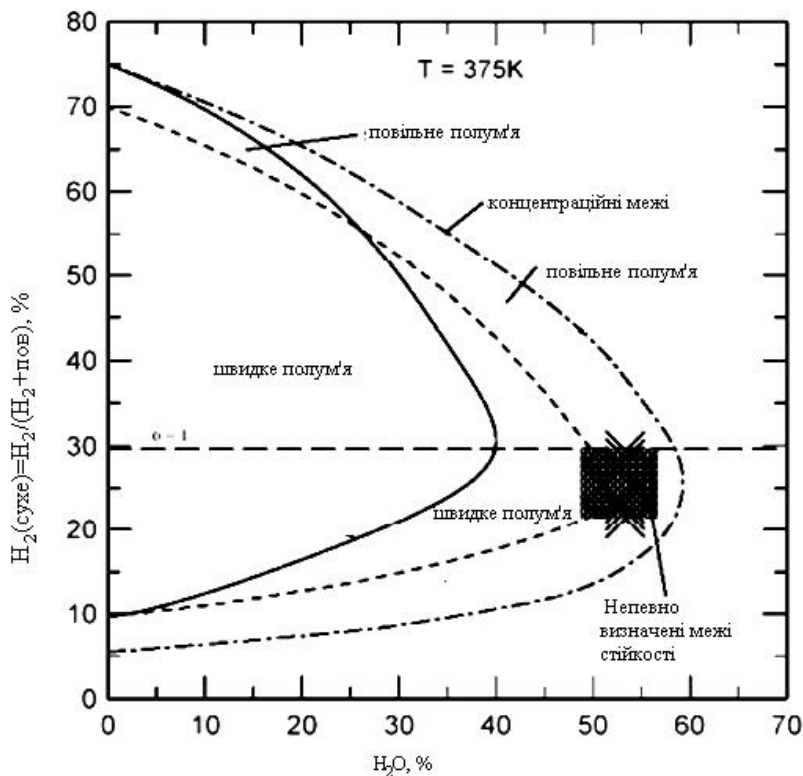


Рис. 2

рервного струменя водню у парі. Займання струменя або шлейф палива може відбутися, якщо температура між паливом та навколишнім повітрям (або окислювачем) досягає температури самозаймання.

Горіння може відбуватися з будь-якого джерела займання, такого як електрична іскра або якщо температура суміші вища температури самозаймання. Ця температура становить близько 550 °С у стехіометричних умовах. Вона збільшується зі збільшенням концентрації пари і збільшенням відхилення від стехіометричних умов.

Дефлаграція водню може представляти різні ризики для ГО та інших систем.

У важкій аварії водень виробляється протягом певного періоду часу, а його частину (або все) можна спалити під час раннього згорання або спонтанно (наприклад, від довільної іскри, породженої вмиканням у роботу насоса або роботою клапана, або навіть від статичної електрики). Також водень може накопичуватися до помітної концентрації, перш ніж стане легкозаймистим. Існує безліч можливостей для процесу горіння.

Методи вимірювання, контролю та видалення водню. Є два методи вимірювання кількості водню: встановлення системи вимірювання водню всередині ГО або вибірка газової суміші у ньому. Що стосується вимірювань концентрації водню всередині ГО, то вони є регламентовані для жорстких умов аварії, у тому числі вплив CO і CO₂ газів, наявність аерозолів і т. п.

Системи на основі вибірки не обов'язково мають бути кваліфіковані у жорстких умовах аварії, а аналіз зразка вмісту здійснюється за межами захисної оболонки. При цьому велика увага має бути приділена місцям положення і числу точок вимірювання, оскільки водень може бути розподілений не рівномірно по ГО. Дуже важливо мати більше одного місця виміру.

Щоб уникнути серйозних пошкоджень захисної оболонки, необхідно зменшити кількість водню. Основні контрзаходи: розбавлення горючих газів, інертизація (розведення), видалення водню шляхом спалювання або рекомбінації.

На більшості реакторів типу BWR використовують часткову інертизацію. У цьому випадку інертизація азотом при нормальній роботі не наражає на небезпеку персонал і не

всіх напрямках, хоча вгору поширення може бути швидшим, ніж вниз. Ця асиметрія зникає для сумішей з більш високою концентрацією.

Детонація хвилі горіння поширюється на надзвукових швидкостях щодо незгорілого газу перед ним. Для воднево-повітряної суміші швидкість складає близько 2000 м/с.

Отже, є можливість, що несуча спроможність головної внутрішньої структури може піддаватися високій швидкості полум'я (наприклад, більше 100 м/с). Нові конструкції ГО могли б бути побудовані з розрахунком більш високих динамічних навантажень, проте за рахунок додаткових витрат.

В умовах аварії водень виділяється у вигляді безпе-

заважає роботі. Для інертизації захисної оболонки, наприклад, після відключення РУ, холодний азот подається в ГО за допомогою існуючої системи вентиляції.

Повна інертизація (тобто повне спалювання концентрації водню) можлива тільки тоді, коли концентрація вуглекислого газу або пари перевищує приблизно 60 % за обсягом у повітрі; концентрація інертного азоту має бути більшою 75 % за обсягом.

На сьогодні немає жодної АЕС, котра використовує метод повної інертизації, хоча він дає можливість повного запобігання горінню водню.

Система запалювання є ініціатором самого процесу горіння в місцях, де виникають легкозаймисті суміші, видалення водню повільними дефлаграціями при контрольованих розподілах енерговиділення за часом і простором. При цьому припускають, що загорання від випадкових джерел є неминучим і що потенційні руйнівні ефекти згорання (тобто температура згорання та надлишковий тиск) постійно зростають зі збільшенням проникнення горючих компонентів. Існують такі елементи запалювання, як свічка запалювання і каталітичні рекомбінатори.

Свічки запалювання – це прості електричні нагрівачі опору, які нагріваються до температури поверхні від 800 до 900 °С, що є позитивним джерелом запалювання для горючих сумішей водню. Вони є надійними і найенергійнішими джерелами займання для ГО, що мають можливість бути близькими до абсолютних меж займистості і гарантують самозапалення суміші. Але однією з характеристик свічок запалювання є те, що їм необхідне окреме джерело живлення через їх високу споживану потужність (зазвичай від 150 до 200 Вт кожна). Свічки запалювання встановлені у багатьох атомних електростанціях в усьому світі.

Каталітичні запалювачі використовують тепло H_2-O_2 реакції на просторових каталітичних елементах для створення поверхні займання, температура на яких досить висока, щоб викликати запалення, і мають автономне джерело живлення.

Каталітичні рекомбінатори використовують каталізатори для окислення (рекомбінування) водню і знаходяться у робочому стані за межами займистості. Пасивні автоматичні каталітичні рекомбінатори (ПАКР) розроблені і стали легко доступними в останні десятиліття. Основною особливістю ПАКР є те, що це прості пристрої, які складаються з поверхні каталізаторів, розташованих у відкритому корпусі. У присутності водню миттєво відбувається каталітична реакція на поверхні каталізаторів і тепловий ефект реакції виробляє природний потік конвекції через корпус, тобто рекомбінує у вологе повітря, збіднене воднем. Таким чином, ПАКР не потрібні зовнішні джерела живлення або спеціальні дії оператора, потрібно тільки розмістити ПАКР у найбільш імовірних місцях утворення водню у рамках ГО, щоб отримати бажаний діапазон охоплення.

Також можливе поєднання систем запалення і каталітичної рекомбінації водню, яке відоме як «подвійна концепція», що була розроблена і випробувана у Німеччині. Результати випробувань показали, що таке поєднання має бути ефективним у боротьбі з високою концентрацією водню всередині захисної оболонки. У цьому випадку слід визнати, що одні рекомбінатори не зможуть впоратися з високим рівнем утворення водню під час проходження важкої аварії. Використання запальників, що ініціюють повільне горіння в концентраційних межах, дає можливість запобігти утворенню висококонцентрованої суміші. Ця концепція реалізована для АЕС Ловіза у Фінляндії і APR1400 у Республіці Корея.

Висновки та рекомендації.

1. Під час проходження аварій на АЕС з важким пошкодженням активної зони відбувається генерація водню, кількість генерованого водню може змінюватися в діапазоні 100...1000 кг H_2 , що становить небезпеку для цілісності ГО.
2. Основним джерелом водню в результаті виникнення аварії є пароцирконієва реакція. Інші джерела водню (окислення сталі, карбиду бору, радіоліз води) становлять 10...15 % від загального об'єму генерації водню.
3. На ранніх фазах пошкодження ТВЕЛів без втрати їх форми і цілісності водень виробляється шляхом окислення оболонки Zr. Поки геометрія палива залишається

незмінною, водень у середньому генерується зі швидкістю близько 0,2 кг/с для типових реакторів потужністю 1000 МВт.

4. Під час втрати герметичності ТВЕЛів основним джерелом утворення водню є окислення розплаву $Zr-UO_2$ при температурах, близьких до 1300 °С. На етапі втрати основної цілісності ТВЕЛів кількість генерованого водню скорочується у зв'язку зі зменшенням площі контакту металу з парою.
5. Можливі два режими горіння водню: дефлаграція і детонація. Ефективне управління аварією значною мірою залежить від концентрації водню:
 - для низької концентрації водню нижче 8 % швидкість розповсюдження полум'я, яка очікується, буде повільною, і дефлаграцію виробляють квазістатичні навантаження тиску;
 - при концентрації водню вище 8 % відбувається повне горіння, що може призвести до більш високих навантажень;
 - при концентрації вище 10 % відбувається прискорення полум'я до швидкості звуку.
6. Головна внутрішня структура ГО може піддаватися високій швидкості полум'я (більше 100 м/с), тому необхідно розглядати можливість пошкодження ГО, що може призвести до водневого загорання за межами контайменту. Нові конструкції ГО мають бути побудовані з розрахунком на більші динамічні навантаження.
7. Доступні два різні методи для вимірювання концентрації водню у захисній оболонці після аварії. До експериментального методу належать вибірка зразка газової суміші в ГО і аналіз його вмісту. До розрахункових методів відноситься встановлення систем вимірювання всередині всього ГО або розрахунок за допомогою обчислювальної техніки і попередньо розрахованих кривих для визначення приблизної концентрації генерованого водню.
8. Розробка та обґрунтування засобів зниження концентрацій водню показали, що найбільш ефективними є: попередня інертизація азотом; установка систем запалювання водню; установка ПАКР у ймовірних місцях генерації водню; комбінація ПАКР і систем запалювання.
9. Основним методом видалення водню є метод ПАКР, але при високому рівні генерації водню в ході важкої аварії потужності ПАКР не можуть повністю забезпечити видалення водню.
10. Мінімізація водневої небезпеки в ході важкої аварії має ґрунтуватись на поєднанні різних засобів, зокрема систем ПАКР і систем запалювання.

1. Державний комітет ядерного регулювання України. Наказ Про затвердження Загальних положень безпеки атомних станцій (Загальні положення, розд.2) 19.11.2007 N 162.
2. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Mitigation of Hydrogen hazards in severe accidents in nuclear power plants, IAEA-TECDOC-1661, VIENNA, 2011.
3. Ключников А.А., Шарагевский И.Г. и др. Теплофизика безопасности электростанций НАН Украины. – Чернобыль: Изд. Ин-та проблем безопасности АЭС, 2010. – 484 с.
4. Семашко С.Е. Безлепкин В.В. Мероприятия по обеспечению водородной взрывобезопасности для энергоблоков № 1, 2 Кольской АЭС ВВЭР-440/230. – Подольск: ФГУП ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2005.
5. Микеев А.К. Противопожарная защита АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 432 с.

УДК 621.039.58.024

Г.М. Федоренко¹, докт. техн. наук, **Я.С. Буева²**, магистрант

1 – Ин-т электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина,

2 – Нац. техн. ун-т Украины «КПИ»,
пр. Победы, 37, Киев-56, 03056, Украина

Обоснованные выводы и рекомендации по минимизации водородной опасности при авариях на современных блоках АЭС

Представлены рекомендации по уменьшению водородной опасности при прохождении тяжелой аварии на блоках АЭС, которая может привести к деградации ядерного топлива. Рассмотрены потенциальные источники генерации водорода, режимы горения водорода, методы измерения, контроля и удаления его из гермообъема. Библ. 5, рис. 2, табл. 4.

Ключевые слова: водородная безопасность, уменьшение водородной опасности, генерация водорода, парациркониевая реакция, режимы горения, системы зажигания, пассивные автоматические каталитические рекомбинаторы.

G.M. Fedorenko¹, Ya.S. Bueva²

1 – Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremogy, 56, Kiev-57, 03680, Ukraine

2 – National Technical University of Ukraine «Kyiv's Polytechnic Institute»,
Peremogy, 37, Kyiv-56, 03056, Ukraine

Grounded conclusions and recommendations for mitigation of hydrogen hazard in accidents in modern nuclear power plants

Recommendations for mitigation of hydrogen hazards in severe accidents in nuclear power plants are presented. It can lead to degradation of nuclear fuel. Potential sources of hydrogen generation, hydrogen combustion modes, methods of measurement, control and removal of hydrogen from containment are considered. References 5, figures 2, table 4.

Key words: Hydrogen safety, reducing of Hydrogen hazard, generation of Hydrogen, Steam-Zirconium reaction, modes of combustion, ignition system, passive automatic catalytic reschemers.

Надійшла 25.01.2012

Received 25.01.2012