

*С.І. Азаров, д.т.н., с.н.с., зав. від., ІЯД НАН України,
О.В. Тарановський, аспірант, ІЯД НАН України,
В.Л. Сидоренко, к.т.н., доцент, нач. каф., ІДУЦЗ*

ОЦІНКА ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНОСТІ ВОДНЮ НА РАННІЙ СТАДІЇ РОЗВИТКУ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ АВАРІЇ

(представлено д-ром техн. наук Ключкою Ю.П.)

Розроблено сценарій ранньої стадії розвитку аварії з оцінкою впливу вибухонебезпечного водню на конструкцію реактора РВПК-1000. Показано, що визначальним фактором необхідних умов вибухонебезпечної водньоутримуючої пароповітряної суміші в активній зоні реактора буде являтися співвідношення швидкості локальної генерації газоподібного водню і швидкості поширення водню в парогазовому середовищі активної зони реактора.

Ключові слова: вибухонебезпечність водню, аварія, Чорнобильська АЕС.

Постановка проблеми. Події аварії на ЧАЕС показали, що важливим питанням керування важкими аваріями є забезпечення вибухонебезпечності, оскільки вибух привів до руйнування захисних бар'єрів безпеки і значних викидів радіоактивних продуктів розподілу в навколишнє середовище.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведені в роботах [1-3] досить докладні описи процесів розвитку аварії на 4-му блоці ЧАЕС мають деяку особливість. У них практично відсутнє обговорення питання про ранню стадію розвитку аварії (кілька секунд від початку виникнення аварії) і характер руйнівних сил (аналіз умов і механізмів утворення вибухонебезпечних газів і їхній підривний вплив на реакторну установку). Зрозуміло, що внаслідок неповноти вихідних експериментальних даних сценарій (математичне моделювання) ранньої стадії розвитку аварії неможливо повністю описати. Однак воно дає можливість осмислити характерні риси процесів, що відбуваються, і чітко зрозуміти вплив кожного компонента на хід аварії.

Постановка завдання та його вирішення. Метою даної роботи є розробка сценарію ранньої стадії розвитку аварії з оцінкою впливу вибухонебезпечного водню на конструкцію реактора РВПК-1000.

Приймається наступний «сценарій» ранньої стадії розвитку аварії (десятки секунд) на 4-му блоці ЧАЕС:

- у результаті порушення циркуляції теплоносія в контурі реактора відбулося "запарювання" робочих каналів. Момент початку "запарювання" приймаємо за точку відліку t_0 ;
- "запарювання" спричинило наростання потужності реактора.

При $t < t_0$ (тобто до початку аварії) реактор мав теплову потужність 200 МВт (близько 6 % від номінальної) і за (2,5-3) секунд реактор набрав повну потужність;

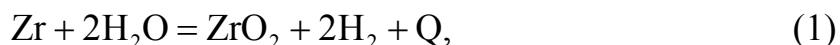
- впродовж (2,5-3) секунд від початку аварії температура технологічних каналів і твेलів піднялася від номінальної (573 °К) до 1273 °К і далі продовжувала рости в першому наближенні лінійно з часом. Температура реакторного графіту за час від t_0 до 3 секунд залишалася постійною і далі росла лінійно з градієнтом (10–30) К/с;

- при підвищенні температури збільшення тиску пари в контурі привів до розриву технологічних каналів: відбувся "хлопок" та зіткнення пари з графітовою кладкою;

- через (25-30) секунд після "хлопка" відбувся тепловий вибух, що привів до руйнування активної зони реактора.

Різка підвищення температури конструкційних матеріалів (оболонки твелів у ТВС й ін.) при порушенні умов охолодження активної зони реактора привело до активної їхньої взаємодії з водяною парою, що супроводжувалося утворенням водню і виділенням тепла.

Екзотермічна пароцирконієва реакція всередині активної зони при взаємодії водяної пари з металевим цирконієм протікає в такий спосіб:



де Q – теплота реакції, рівна 6280,5 кДж/кг.

Рівняння (1) являє собою спрощений балансовий опис багатостадійної реакції взаємодії цирконію з водяною парою, що включає в себе, зокрема, стадії: дифузію молекул H_2O через тонкий передстінний шар водню, абсорбцію цих молекул поверхнею, їхню дисоціацію, дифузію іонів кисню через шар діоксиду цирконію, рекомбінацію та десорбцію водню.

При температурах нижче 1140 К цирконій має щільно впаковану гексагональну структуру (α -фаза), що при більш високих температурах переходить в β -фазу, яка володіє об'ємно центрованою кубічною структурою. У присутності кисню α -фаза цирконію існує при більш високих температурах. Так що під шаром діоксиду цирконію в окисленому металі при високих температурах перебуває α -підшар, стабілізований киснем, а під ним – шар β -цирконію. Товщина α -підшару залежить від температури.

На рис. 1 представлено зміну товщини оксидної плівки цирконію ΔL залежно від температури оболонки твела [4].

Кінетика пароцирконієвої реакції взаємодії оболонки твела з пароповітряною сумішшю описується рівнянням Бейкера-Джаста [5]:

$$dN/dt = 1,1 \cdot 10^{-5} [S(t) \cdot k_{\text{Zr}}]^{0,5} \cdot t^{-0,5}, \text{ моль } \text{H}_2/\text{с}, \quad (2)$$

де N – число молів водню, S(t) – площа цирконію, що контактує з водяною парою, для реактора РВПК-1000 складає $1,2 \cdot 10^8 \text{ см}^2$, t – час в секундах.

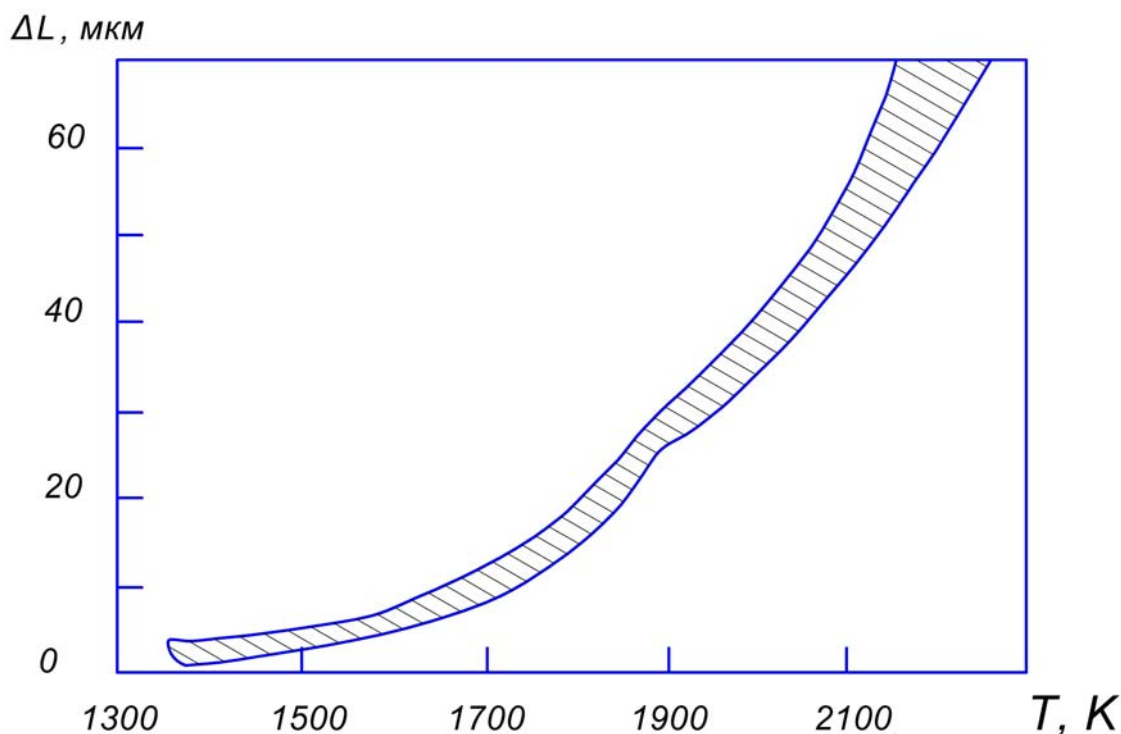


Рис. 1. Товщина оксидної плівки цирконію (ΔL) як функція температури оболонки твела

Значення константи швидкості k_{Zr} приймається відповідно до робіт [6, 7], а саме:

$$k_{Zr} = 3,33 \cdot 10^7 \exp(-45500/RT_k), \quad (3)$$

де R – універсальна газова постійна, Дж/(моль · К) и T_k – температура технологічних каналів і твелів, К. При розрахунках приймалося, що температура при аварії змінювалася за законом:

$$T_k = T_{k_0} + bt, \quad (4)$$

де $T_{k_0} \leq 573$ К – робоча температура технологічних каналів і твелів; b – коефіцієнт, що характеризує швидкість наростання температури, К/с.

Кінетика пароцирконієвої реакції істотно прискорюється при температурах понад (1500-1700) К і супроводжується, в основному, наступними ефектами:

- інтенсивне виділення тепла при високих температурах;
- виділення водню;
- зміна фізичних властивостей матеріалу оболонки твелів, зокрема, зниження механічної міцності через окрихчування;
- підвищення температури плавлення від 2170 К (Zr) до 2900 К (ZrO_2).

Взаємодія цирконію з паром відбувалася протягом усього часу від t_0 до моменту вибуху пароводневої суміші. Кількість водню, що утворилося за час t , визначається інтегруванням рівняння (2) з коефіцієнтами, що задають рівняннями (3) і (4).

Проведений розрахунок дає верхню границю кількості водню, що виділився за час t , оскільки: 1) закон Бейкера-Джаста – ідеальний, і звичайно експериментальні значення кількості водню трохи менше обчислених з цього рівняння; 2) при розрахунку передбачалося, що пароцирконієва реакція йде однаково у всіх каналах.

На рис. 2 представлено результат кінетики утворення водню за рахунок пароцирконієвої реакції.

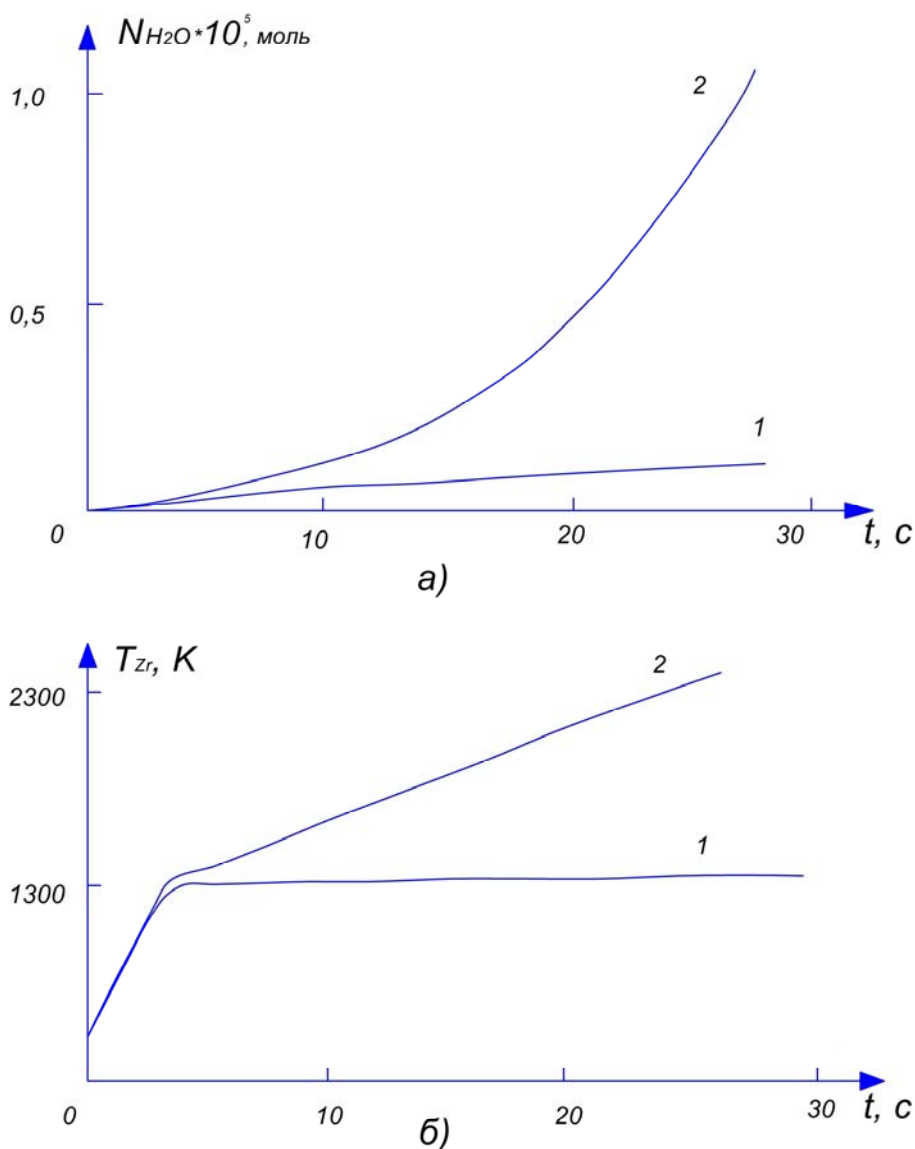


Рис. 2. Утворення водню за рахунок пароцирконієвої реакції (а) при різних варіантах зміни температури (б)

Розрахунки проводилися для двох варіантів зміни температури технологічних каналів і твелів: ріст температури від 573 до 1273 К за 3 секунди і далі – не змінюється (б, крива 1) і ріст температури від 573 до

1273 К за 3 секунди і далі – більше повільний ріст зі швидкістю $a = 40 \text{ K/c}$ (б, крива 2).

З даних, наведених на рис. 2 (а, крива 2) видно, що кількість водню, що утворюється, дуже велика: приблизно за 30 секунд утвориться більше 10^5 молей водню, тобто більше 2000 м^3 . Така кількість водню крім створення істотного надлишкового тиску у вільних обсягах активної зони реактора з киснем повітря утворить суміш, що неодмінно вибухне, оскільки в аварійному реакторі було досить багато джерел запалювання, таких як розпечені частки палива, нагріті металоконструкції тощо.

Достатніми умовами дефлаграції і детонації воднюотримуючої пароповітряної суміші є критичне сполучення концентрацій пального-окислювача-флегматизаторів при певному термодинамічному стані суміші [8]. При аналізі вибухонебезпечності традиційно як критерій виникнення умов дефлаграції і детонації водню використовується трикомпонентна діаграма Шапіро-Моффетте: пальне – водень; окислювач – повітря; флегматизатор – пара.

Приклад використання критеріїв Шапіро-Моффетте при аналізі вибухонебезпечності воднюотримуючої пароповітряної суміші у процесі розвитку ранньої стадії аварії на 4-му блоці ЧАЕС наведений на рис. 3.

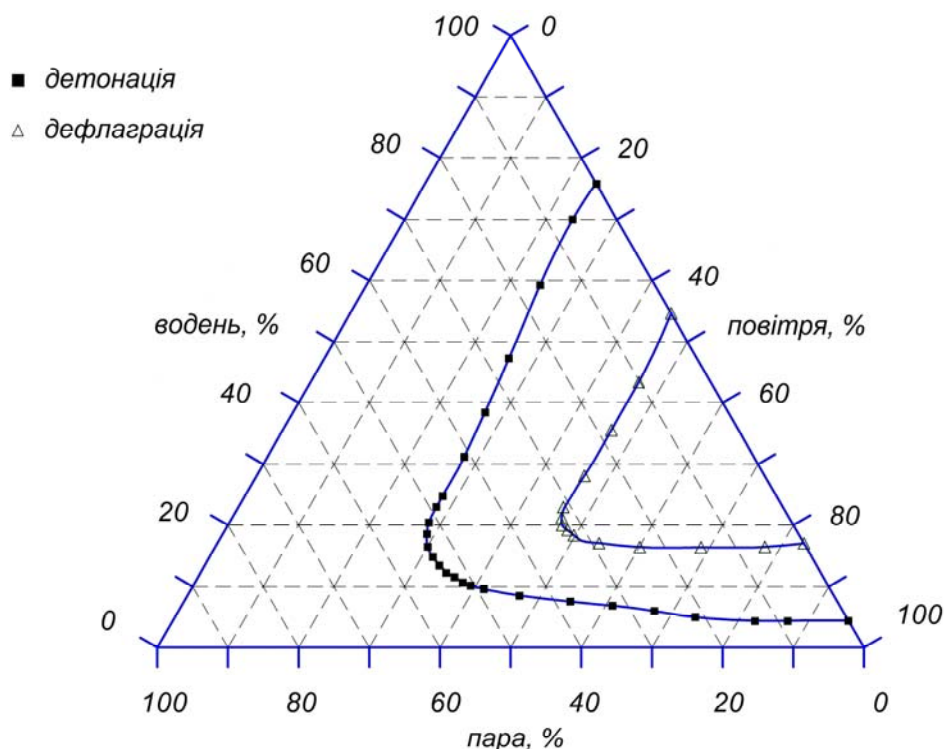


Рис. 3. Діаграма Шапіро-Моффетте

Виникнення і розвиток дефлаграційно-детонаційних процесів, що мають термохімічну природу буде залежати в основному від:

- концентрації і теплофізичних властивостей компонентів середовища;
- початкового термодинамічного стану;

- зовнішніх умов, що визначають розвиток механізмів горіння і детонації.

Розрахунковим шляхом було встановлено, що при згорянні водню виділиться енергія близько 260 кДж/моль реагенту, а при вибуху $\sim 10^5$ моль водню, що утворився, виділиться енергія більше $3 \cdot 10^7$ кДж, причому ця енергія буде розсіяна у виді імпульсу тривалістю в доли секунди.

Процеси дефлаграції і детонації будуть відрізнятися за максимальним значенням і тривалості імпульсу збурювання тиску, напрямку фронту збурювання тиску і відбитої хвилі збурювання, а також за іншими визначальними параметрами. Характерний приклад детонаційної і дефлаграційної хвилі збурювання наведений на рис. 4.

Для вибухобезпеки водньоутримуючої пароповітряної суміші найбільш значимими механізмами горіння є [9] FA-механізм ("Flame Acceleration") і DDT-механізм ("Deflagration-to-detonation transition"), що мають різні умови виникнення і наслідки.

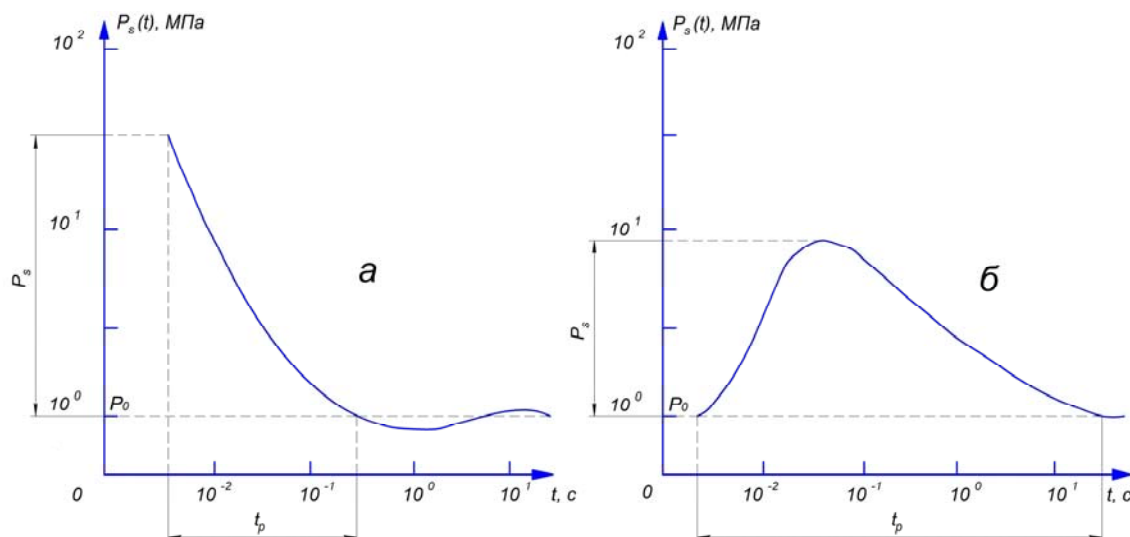


Рис. 4. Характерна форма тиску протягом детонаційної, шоквої хвилі (а) і дефлаграційної хвилі (б): P_0 – початковий тиск; P_s – пік тиску; t_p – тривалість позитивної фази

Пікові значення тиску P_{\max} і температур T_{\max} у процесах детонації-горіння водньоутримуючої пароповітряної суміші звичайно визначаються за напівемпіричними залежностями виду [9]:

$$T_{\max} = f_1(C_k, T_0, Q_k); \quad P_{\max} = f_2(P_0, T_0, T_{\max}), \quad (5)$$

де C_k , Q_k – концентрація і питомі внутрішні теплоенергетичні характеристики компонентів водньоутримуючої пароповітряної суміші; P_0 , T_0 – початкові значення тиску і температури середовища.

При цьому для оцінки P_{\max} звичайно (не цілком коректно) використовується рівняння стану ідеального газу, що обґрунтовано тільки для умов низьких значень тиску і температур (нехарактерних для пікових значень детонаційно-дефлаграційних хвиль).

Для умов вибухонебезпечності водню важлива не тільки загальна маса водню, що виділився, але і його локальна концентрація. Найбільша локальна концентрація газоподібного водню в початкові моменти часу буде в місцях розгерметизації реакторного контуру. З огляду на високу летючість і дифузійність газоподібного водню, варто очікувати досить швидке його поширення за обсягом активної зони реактора і зниження значень локальних концентрацій у місцях розгерметизації реакторного контуру.

Характерний час зниження вибухонебезпечних локальних концентрацій t_{VH} можна оцінити співвідношенням [10]:

$$t_{\text{VH}} = V_{\text{AZ}}/C_{\text{VH}}, \quad (6)$$

де V_{AZ} – «вільний» обсяг активної зони реактора; C_{VH} – середня за обсягом швидкість поширення водню, що залежить від нерівномірності розподілу концентрації водню, а також властивостей і стану парогазового середовища в активній зоні реактора.

Характерний час досягнення локальної критичної концентрації водню K_{KP} :

$$T_{\text{LH}} \approx K_{\text{KP}}/C_{\text{LH}}, \quad (7)$$

де C_{LH} – середня швидкість локального утворення, що залежить від джерел і механізмів утворення водню.

Отже, необхідна умова вибухонебезпечності (дефлагації-детонації) водню в активній зоні реактора буде визначатися залежністю виду:

$$V_{\text{AZ}}/C_{\text{VH}} \geq K_{\text{KP}}/C_{\text{LH}}. \quad (8)$$

Тобто визначальним фактором необхідних умов вибухонебезпечної водньоутримуючої пароповітряної суміші в активній зоні реактора буде являтися співвідношення швидкості локальної генерації газоподібного водню і швидкості поширення водню в парогазовому середовищі активної зони реактора.

Висновки. Таким чином, реалізація умов вибухобезпеки водньоутримуючої пароповітряної суміші істотно залежить від сценаріїв розгерметизації першого контуру і умов надходження джерел водню в активну зону реактора на початковій стадії важкої аварії на ЧАЕС.

Отримані з використанням даного сценарію дані вказують на першорядну роль водню при руйнуванні активної зони реактора 4-го блоку Чорнобильської АЕС і катастрофічних наслідках цієї події.

ЛІТЕРАТУРА

1. Fleicher C.D. Simulation of the Chernobyl Accident. Nuclear Engineering Design, 1988, vol. 105, № 2., p. 157–172.
2. Vanttola T.A., Rojamoki M.N. One-Dimensional Consideration of the Initial Phase of the Chernobyl Accident. Nuclear Technology, 1989, vol. 85, p. 33–47.
3. Kitchener G., Noack C.C. Code History and Nuclide Inventory of the Chernobyl Core at the Time Accident. Nuclear Safety, 1988, vol. 29, № 1, p. 1–5.
4. Sopajima M., Fujishiro T. Examination of the Destructive Forces in the Chernobyl Accident Based on NSRR Experiments. Engineering Design, 1988, vol. 106, № 2, p. 179–190.
5. Baker L., Just L. Studies of metal-water reactions at high temperatures. Experimental and theoretical studies of the zirconium-water reaction. ANL 6548-196.
6. Bostrom W.A. The high temperature oxidation of zirconium in water. WAPD 104. Westinghouse E. Co. 1954.
7. Lemmon A.W. Studies relating to the reaction between zirconium and water at high temperatures BMI-1154, 1957.
8. Breitung W., Royl P. Procedure and tools for deterministic analysis and control of hydrogen behavior in severe accidents. Nuclear Engineering and Design, 2002, vol. 202, 249–268.
9. Hydrogen Combustion Analysis of Dry-Type PWR Plant in Japan ICONE-8412, 2000.
10. Development of Database with Mechanical properties of Un-and Related WWER Cladding. V. Asmolv, L. Yegorova, E. Kapelun. Proc. Twenty-Fifth Water Reactor Safety Inform. Meeting, 1997. NUREG CP-0162-V. 2.

С.И. Азаров, А.В. Тарановский, В.Л. Сидоренко

Оценка взрывоопасности водорода на ранней стадии развития Чернобыльской аварии

Разработан сценарий ранней стадии развития аварии с оценкой влияния взрывоопасного водорода на конструкцию реактора РБМК-1000. Показано, что определяющим фактором необходимых условий взрывоопасной водородосодержащей паровоздушной смеси в активной зоне реактора будет являться соотношение скорости локальной генерации газообразного водорода и скорости распространения водорода в парогазовой среде активной зоны реактора.

Ключевые слова: взрывоопасность водорода, авария, Чернобыльская АЭС.

S.I. Azarov, O.V. Taranovsky, V.L. Sydorenko

Evaluation of the hydrogen explosion risk at an early stage of the Chernobyl accident development

It is developed the script of the accident early stage with assessing the effects of explosive hydrogen on the structure of the LWGR-1000. It is shown that the determining factor of necessary conditions for explosive hydrogen-steam mixture in the reactor core will be the ratio of the rate of local hydrogen gas generation and the hydrogen propagation velocity in the vapor-gas medium of the reactor core.

Keywords: hydrogen explosion hazard, accident, the Chernobyl NPP.