УДК 621.039:58

С. І. Азаров[1], В. Л. Сидоренко[2],
В. М. Євланов[3], М. М. Гаврилюк[1]

[1] *Інститут ядерних досліджень НАН України, м. Київ, Україна*
[2] *Інститут державного управління цивільного захисту, м. Київ, Україна*
[3] *Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки, м. Київ, Україна*

Аналіз умов і механізмів формування вибухонебезпечних сумішей на ранній стадії розвитку Чорнобильської аварії

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

Ключові слова: вибухонебезпечність водню, пароциркконієва реакція, реакторний графіт, Чорнобильська АЕС.

С. И. Азаров, В. Л. Сидоренко, В. М. Евланов, М. М. Гаврилюк

Анализ условий и механизмов формирования взрывоопасных смесей 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 создания условий взрывоопасной водородсодержащей паровоздушной смеси в активной зоне реактора является соотношение скорости локальной генерации газообразного водорода и скорости распространения водорода в парогазовой среде активной зоны реактора.

Ключевые слова: взрывоопасность водорода, пароциркониевая реакция, реакторный графит, Чернобыльская АЭС.

© С. І. Азаров, В. Л. Сидоренко, В. М. Євланов, М. М. Гаврилюк, 2016

До теперішнього часу не існує повністю науково обгрунтованого несуперечливого сценарію виникнення розвитку аварії на енергоблоці № 4 Чорнобильської АЕС в умовах нейтронно-фізичних, фізико-хімічних і вибухових процесів, а також їх комбінацій [1].

Загально прийнято аварійні процеси в реакторі РВПК-1000 на ранній стадії поділяти на дві фази [2]. Перша фаза — від моменту спрацювання аварійного захисту реактора до некерованого зростання потужності, стрімкого підвищення тепловиділення, температури в тепловидільних збірках і тиску пароводяної суміші в активній зоні, що призвело до «теплового» вибуху. Друга фаза — плавлення ядерного палива та окиснення цирконію в технологічних каналах і твелах, пароциркконієва реакція та окиснення графіту, утворення вибухонебезпечної суміші та другий фізико-хімічний вибух.

Мета даної роботи — проаналізувати термодинаміку фізико-хімічних процесів взаємодії цирконію та реакторного графіту з парами води і показати, яку роль у цих реакціях зіграли наявність азоту та/або кисню, що були основними активними компонентами середовища всередині активної зони реактора на ранній стадії розвитку аварії (десятки секунд) на енергоблоці № 4 ЧАЕС [3, 4].

Пропонується такий сценарій розвитку аварії:

внаслідок порушення циркуляції теплоносія в контурі реактора відбулося «запарювання» робочих каналів; момент початку «запарювання» приймаємо за точку відліку t_0;

«запарювання» спричинило зростання потужності реактора: при $t < t_0$ (тобто до початку аварії) реактор мав потужність 200 МВт (близько 6 % номінальної) і за 2,5—3 секунди набрав повну потужність;

впродовж 2,5—3 секунд від початку аварії температура технологічних каналів і твелів підвищилася від номінальної (573 К) до 1273 К і продовжувала зростати в першому наближенні лінійно з часом. Температура графіту за час від t_0 до 3 секунд залишалася постійною і далі зростала лінійно з градієнтом 10—30 К/с;

з підвищенням температури збільшення тиску пари в контурі призвело до розриву технологічних каналів: відбувся «хлопок» (тепловий вибух — зіткнення пари з графітовою кладкою);

через 25—30 секунд після «хлопка» стався фізично-хімічний вибух, що спричинив руйнування активної зони реактора.

Визначимо закономірності окиснення цирконію в різноманітних газоподібних середовищах за підвищених температур. Окремі дані стосовно окиснення цирконію в активних газоподібних середовищах підвищених температур нагріву наведено в довідниках, наукових працях та статтях [1—4].

Окиснення цирконію в кисні та повітрі. Відомо тільки про один стійкий у твердому стані оксид цирконію ZrO_2, хоча й не відкидається можливість існування оксиду ZrO. Кисень, розчинений у металі, розширює діапазон існування твердого розчину з гексагональною граткою, підвищує температуру переходу зі стану $\alpha \rightarrow \beta$ та температуру плавлення металу (рис. 1).

Дифузія кисню (табл. 1) відбувається таким чином, що розчинений атом послідовно переміщується з одного вузла гратки до іншого.

Після обробки експериментальних даних табл. 1, у діапазоні температур від 673 до 1773 К для коефіцієнта дифузії отримано узагальнюючу формулу

$$D = 5{,}12 \cdot 10^{-4} \exp\left(-50\,800/(RT)\right), \qquad (1)$$

де D — коефіцієнт дифузії, м^2/с; R — універсальна газова постійна, Дж/(моль·К); T — температура, К.

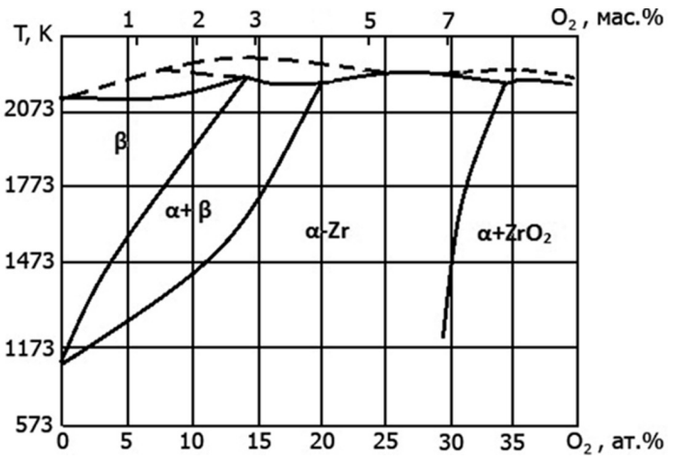

Рис. 1. Діаграма стану цирконій — кисень

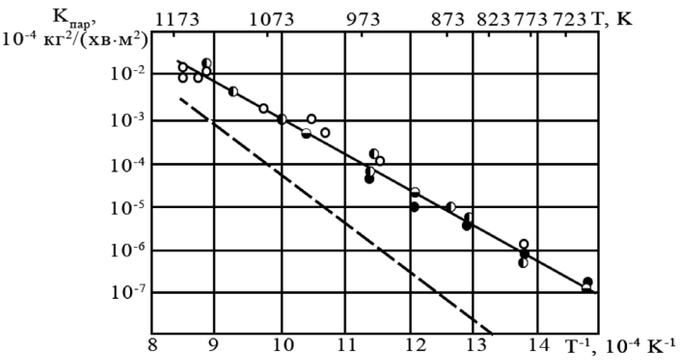

Рис. 2. Залежність константи швидкості параболічного окиснення цирконію від температури: суцільна лінія відповідає константі повної швидкості окиснення $K_{пар} = 6{,}6\ \exp(-36000/(RT))$; штрихова — максимальній швидкості розчинення кисню, що дорівнює $6{,}9\cdot10^3\ \exp(-36000/(RT))$; ○, ●, ◐, ◒ — емпіричні данні [6, 7, 9]

Таблиця 1. Коефіцієнт дифузії D кисню в цирконії [5]

Метал	Діапазон температур, К	D, м²/с
α-Zr	673...858	$9{,}4\cdot10^{-4}\ \exp(-51800/(RT))$
α-Zr	923...1123	$224\cdot10^{-4}\ \exp(-59700/(RT))$
α-Zr	673...923	$0{,}00046\cdot10^{-4}\ \exp(-35000/(RT))$
α-Zr	973...1123	$69{,}2\cdot10^{-4}\ \exp(-56200/(RT))$
α-Zr	673...973	$9{,}13\cdot10^{-9}\ \exp(-29800/(RT))$
β-Zr	1273...1773	$0{,}0453\cdot10^{-4}\ \exp(-59700/(RT))$
α-Zr	1273...1773	$0{,}196\cdot10^{-1}\ \exp(-41000/(RT))$

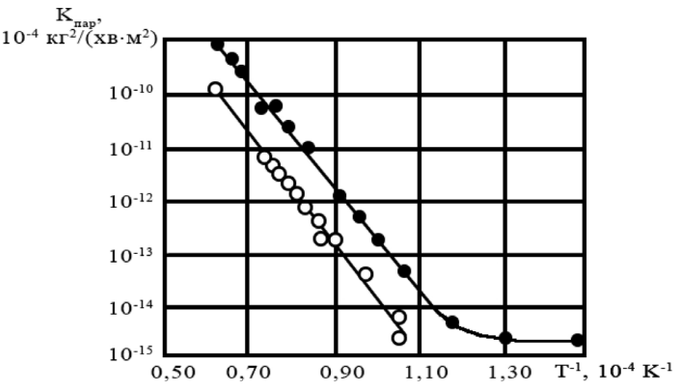

Рис. 3. Залежність константи швидкості реакції Zr з азотом від температури: ○, ● — емпіричні данні відповідно до [10]

Дослідження кінетики окиснення в парі [6] та сухому повітрі [7] показали, що в діапазоні температур 1273...1773 К окиснення підпорядковується параболічному закону. Узагальнивши велику кількість експериментальних даних, отримано загальну формулу для константи параболічного закону окиснення цирконію в діапазоні температур 1272—1673 К [8]:

$$K_{пар} = 11\ \exp\ (-36\ 000/(RT)),\ кг^2\cdot м^{-4}\cdot с^{-1}. \qquad (2)$$

Залежність константи параболічного закону окиснення Zr від температури показано на рис. 2.

Під час окиснення цирконію паралельно відбуваються процеси розчинення кисню в поверхневих шарах металу та утворення оксидної плівки. В діапазоні температур 673...873 К у металі розчинюється від 14 до 29 % кисню, що бере участь у реакції, і ця частка при 1123 К становить біля 60 %. У йодовому цирконії глибина проникнення кисню при 823 К досягає $0{,}2\cdot10^{-3}$ м, а при 1023...1223 К — $0{,}35\cdot10^{-3}$ м.

Взаємодія цирконію з азотом. Азот взаємодіє з цирконієм значно повільніше, ніж кисень. Встановлено, що в діапазоні температур 673...1913 К швидкість реакції цирконію з азотом підпорядковується параболічному закону, є вельми чутливою до наявності навіть невеликої кількості кисню в азоті та не залежить від тиску азоту (рис. 3). Енергія активації швидкості окиснення α-фази цирконію становить 164248 Дж/моль, а β-фази — 201120...217880 Дж/моль, при цьому константа швидкості поглинання азоту дорівнювала $2{,}5\cdot10^{-1}$ $(-48\ 000/(RT))$ $кг^2\cdot м^{-4}\cdot с^{-1}$. Реакція азоту з α-Zr відбувається швидше, ніж з β-Zr.

Встановлено [11], що за невисоких температур на поверхні цирконію в ході реакції з азотом утворюється тонкий, щільно прилягаючий до металу золотисто-жовтий шар нітриду. У разі нагріванні до температур 1173...1873 К відбувається дифузія азоту в β-Zr. Коефіцієнт дифузії для Zr

$$D = 1{,}55\cdot10^{-6}\ \exp\ (-30\ 700/(RT)),\ м^2/с. \qquad (3)$$

За нижчих температур дифузія азоту в Zr вельми мала: при 1116 К, наприклад, $D = 1{,}95\cdot10^{-13}\ \exp\ (-30\ 700/(RT))$, $м^2/с$. Таким чином, біля точки перетворення α→β дифузія азоту в α-Zr відбувається в 3—5 разів повільніше, ніж у β-Zr.

Окиснення цирконію в CO_2 та CO. Цирконій у вуглекислому газі окиснюється значно повільніше, ніж у чистому кисні та повітрі, як до, так і після деградації оксидної плівки. До деградації окиснення підпорядковується параболічному закону, а потім закон окиснення стає лінійним.

Деградація починається тим швидше, чим вища температура та тонша плівка металу. Швидше за все вона проявляється на гранях та кутах зразка.

На швидкості окиснення тиск вуглекислого газу (10^5...$8\cdot10^5$ Па) та вміст азоту в металі позначається слабо. Швидкість окиснення в CO при 773...1253 K нижча, ніж у CO_2:

$$Zr + 2CO_2 = ZrCO_2 + 2CO + 5{,}7 \text{ МДж/кг}. \qquad (4)$$

Таким чином, систематизація та узагальнення даних високотемпературного окиснення цирконію в активних газоподібних продуктах термічного розкладання (O_2, N_2, CO_2 та CO) показують, що:

1) процес окиснення цирконію є дуже складним і залежить від великої кількості різних чинників (стану поверхні металу, складу та властивостей навколишнього середовища тощо);

2) швидкість окиснення цирконію на різних стадіях визначається складом оксидної плівки на його поверхні, утворення якої залежить від орієнтації поверхні, наявності домішок у металі та газоподібному середовищі тощо. При цьому швидкість окиснення цирконію в суміші $O_2 + N_2 + H_2O$ [12] набагато вища (приблизно в 10 разів), ніж у CO_2 і CO, та визначається за рівнянням

$$\frac{d\xi_m}{dt} = K_m C_{O_2}^m \rho_{O_k}^m e^{-\frac{E_m}{RT}}, \qquad (5)$$

де ξ_m — ступінь окиснення цирконію; K_m — константа швидкості, $с^{-1}$; $C_{O_2}^m$ — відносний вміст O_2 в газовій суміші; $\rho_{O_k}^m$ — густина газової суміші, $кг/м^3$; E_m — енергія активації, кДж/моль, реакції окиснення цирконію; m — емпірична константа.

На основі наведеного розглянемо детальніше кінетику пароцирконієвої реакції на ранній стадії розвитку Чорнобильської аварії.

Різке підвищення температури конструкційних матеріалів при порушенні умов охолодження активної зони реактора призвело до їх активної взаємодії з водяною парою, що супроводжується утворенням водню і виділенням тепла. Екзотермічна пароцирконієва реакція всередині активної зони при взаємодії водяної пари з металевим цирконієм описується так:

$$Zr + 2H_2O = ZrO_2 + 2H_2 + Q, \qquad (6)$$

де Q = 6280,5 кДж/кг.

За температур нижчих, ніж 1140 K, цирконій має щільну гексагональну структуру (α-фаза), яка за більш високих температур переходить у β-фазу з об'ємно-центрованою кубічною структурою (див. табл. 1). У разі наявності кисню α-фаза цирконію існує при більш високих температурах. Тому під шаром діоксиду цирконію в окисненому металі за високих температур перебуває α-підшар, стабілізований киснем, а під ним — шар β-цирконію. Товщина α-підшару залежить від температури. Кінетика пароцирконієвої реакції описується рівнянням Бейкера–Джаста [5]:

$$\frac{dN}{dt} = 1{,}1\cdot10^{-5}\left[S(t)k_{Zr}\right]^{0,5} t^{-0,5}, \text{ моль } H_2/\text{с}, \qquad (7)$$

де N — число молів водню; $S(t)$ — площа цирконію, що контактує з водяною парою (для реактора РВПК-1000 дорівнює $1{,}2\cdot10^8$ $см^2$); t — час, с; k_{Zr} — константа швидкості, яка визначається за формулою

$$k_{Zr} = 3{,}33\cdot10^7 \exp\left[-45500/\left(RT_k\right)\right]; \qquad (8)$$

R — універсальна газова стала, Дж/(моль·K); T_k — температура технологічних каналів і твелів, K.

У розрахунках приймали, що температура під час аварії змінювалася за законом

$$T_k = T_{k_0} + at, \qquad (9)$$

де T_{k_0} — номінальна температура технологічних каналів і твелів; a — коефіцієнт, що характеризує швидкість зростання температури, K/с; t — час протікання аварійних процесів, с.

Пароцирконієва реакція істотно прискорюється при температурі 1700 K і супроводжується, в основному, такими ефектами:

інтенсивним виділенням тепла при високих температурах;

виділенням водню;

зміненням фізичних властивостей матеріалу оболонок твелів, зокрема зниженням механічної міцності через окрихчування;

підвищенням температури плавлення від 2170 K (Zr) до 2900 K (ZrO_2).

Взаємодія цирконію з парою відбувалася протягом усього часу від t_0 до моменту вибуху пароводневої суміші. Кількість водню, що утворилася за час t, визначається інтегруванням рівняння (6). Зазначимо, що розрахунок за співвідношеннями (6–9) дає верхню границю кількості водню, яка виділилася за час t, оскільки: 1) закон Бейкера—Джаста є ідеальним і, звичайно, експериментальні значення кількості водню трохи менші за обчислені; 2) у розрахунку передбачалося, що пароцирконієва реакція йде однаково в усіх каналах.

Високотемпературне окиснення реакторного графіту та утворення C+H_2. Температура початку окиснення реакторного графіту приблизно 700 K. Практично вже при температурі біля 1600 K графітовий виріб, поверхня якого не захищена від окиснення під час випалювання, вигорає на 10—15 мм. Пошкодження графіту відбувається по зкоксованому поєднувачу, що утворює містки між зернами наповнювача. З киснем в основному взаємодіє кокс поєднувача. Із зміненням тріщини порушуються коксові містки в процесі окиснення графіту, що призводить до суттєвої втрати їх міцності ще при незначній втраті міцності маси графітового матеріалу в цілому. Хімічна взаємодія реакторного графіту з газовим потоком за високих температур складається з кількох процесів:

перенесення хімічно активних молекул з газового потоку до поверхні;

адсорбції молекул активного газу, що ударяються об поверхню;

хімічної реакції між адсорбованими молекулами реагенту та молекулами матеріалу поверхні;

десорбції продуктів реакції з поверхні графітового матеріалу;

відведення продуктів реакції від поверхні.

Найбільш інтенсивно окиснення графітового матеріалу протікає в інтервалі 700—1000 K, де залежність швидкості

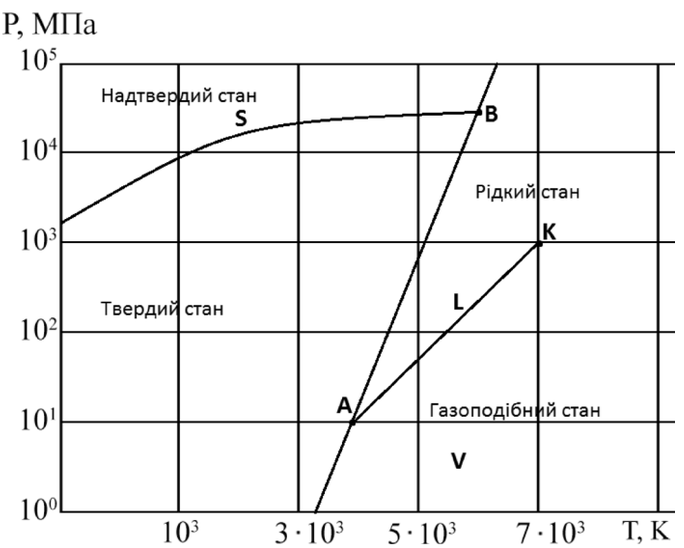

Рис. 4. Фазова діаграма графіту:
L—S (рідина—тверда фаза) — крива плавлення або кристалізації;
L—V (рідина—пара) — крива пароутворення чи конденсації;
V—S (пара—кристал) — сублімація (перегін)

окиснення вуглецю від температури і парціального тиску описується рівнянням [10]

$$W = A\, e^{-E/(RT)}\, P_{O_2}^{0,8}, \qquad (10)$$

де W — швидкість окиснення; A — передекспонентний член; E — енергія активації; R — універсальна газова стала; T — абсолютна температура; $P_{O_2}^{0,8}$ — парціальний тиск кисню.

Зан изьких температур (900—1000 K) окиснення графітового матеріалу відбувається не тільки на зовнішній геометричній поверхні пор графітового виробу. Процес окиснення супроводжується збільшенням об'єму пор, зростанням газопроникності вуглецевого матеріалу, зниженням його механічної міцності. Збільшення втрати маси графіту під час окиснення з 4 до 20 % супроводжується зростанням відкритої пористості. Вже на самих ранніх стадіях окиснення спостерігається втрата міцності, коли пористість і газопроникність практично не змінюються.

За більш високих температур (1430—2200 K) спостерігається спочатку гальмування процесу окиснення, потім швидкість окиснення графіту знову збільшується. При температурі біля 1430 K реакції окиснення сповільняються, що пояснюється зменшенням реакційної площі взаємодії в результаті змикання сусідніх пор після газифікації визначеної кількості графіту.

Вуглець менш активно, ніж кисень, взаємодіє з реакторним графітом. Випробування взаємодії вуглецю з діоксидом вуглецю в інтервалі температур 1500—3230 K показало, що при атмосферному тиску в діапазоні температур 1730−2200 K швидкість реакції $C + CO_2 = 2CO$ спочатку знижується, а потім зростає. При високих температурах у результаті скорочення активних центрів у твердому тілі в ньому відбуваються процеси структурного перетворення і, як наслідок, змінюється реакційна здатність графіту, відзначається аномальна швидкість взаємодії графіту з CO_2. Зменшення швидкості реагування пояснюють взаємним насиченням вільних валентностей поверхневих центрів, тобто фактичною зміною реакційної здатності графіту при підвищенні температури.

Температура початку реакції окиснення тим вища, чим досконаліша кристалічна структура графіту. Фазову діаграму графіту залежності від температури і тиску наведено на рис. 4.

Наведемо деякі з хімічних реакцій у пароводяному середовищі без доступу кисню, що активно проходить при температурах більш як 980 K:

$$C + H_2O = CO + H_2 - 175{,}3 \text{ кДж/моль}, \qquad (11)$$

$$C + 2H_2O = CO_2 + 2H_2; \qquad (12)$$

$$Zr + 2CO_2 = ZrO + 5900 \text{ Дж/г Zr}. \qquad (13)$$

Якщо взаємодія проходить у повітряному середовищі (за присутності кисню), потрібно врахувати такі хімічні реакції:

$$C + O_2 = CO_2 + 400 \text{ кДж/моль}; \qquad (14)$$

$$C + CO_2 = 2CO; \qquad (15)$$

$$C + 2H_2 = CH_4; \qquad (16)$$

$$2CO + O_2 = 2CO_2 - 288 \text{ кДж/моль}; \qquad (17)$$

$$2C + O_2 = 2CO + 110{,}5 \text{ кДж/моль}. \qquad (18)$$

Хімічні реакції (11)—(18) є вибухонебезпечними реакціями, які починаються при $T \geq 1300$ K [10]. Для оцінки внеску кожної з хімічних реакцій (11)—(18) у процес взаємодії реакторного графіту з H_2O і O_2 були розглянуті температурні залежності логарифма константи рівноваги $\lg S$ в інтервалі температур реального існування фаз реагентів і продуктів їхньої взаємодії. Для обчислення $\lg S$ використано спрощену залежність

$$\lg S = -\left[\Delta H_{300}/(\beta T)\right] + \Delta P_{300}/\beta, \qquad (19)$$

де ΔH_{300} —змінення стандартної ентальпії, ккал/(моль·K); ΔP_{300} — змінення поточної ентальпії, ккал/(моль·K); β — коефіцієнт, що дорівнює 4,576; T —температура, K.

Результати розрахунку хімічних реакцій реакторного графіту з водяною парою та киснем за допомогою формули (19) наведено в табл. 2.

Ймовірність протікання хімічних реакцій, як видно з табл. 2, зростає на багато порядків і всі реакції набувають екзотермічного характеру. В реальних умовах сукупність термодинамічних і кінетичних факторів має призводити до різкого збільшення внеску реакцій за участі кисню у збільшення концентрації вибухонебезпечної суміші $CO + H_2$ у разі аварії в активній зоні реактора РВПК-1000. Підвищення температури, що є наслідком екзотермічності реакцій за участі кисню, також збільшує ймовірність аварійних вибухів.

Розглянемо докладніше хімічну реакцію (11) при температурах, що перевищують 700 K, коли водяна пара починає взаємодіяти з реакторним графітом і утворює вибухонебезпечну суміш $CO + H_2$. При окисненні порошку графіту в потоці суміші парів води кінетика хімічної реакції описуватиметься рівнянням Ленгмюра—Хіншельвуда

Таблиця 2. Результати розрахунку хімічних реакцій реакторного графіту з водяною парою та киснем

Хімічна реакція	Рівняння залежності lg*S* від температури	lg*S*		
		Температура, К		
		1000	2000	3000
$C + H_2O = CO + H_2$	$6{,}9 - 6860/T$	0,12	3,54	5,12
$C + 2H_2O = CO_2 + 2H_2$	$4{,}8 - 4700/T$	0,08	2,43	3,76
$2CO + O_2 = 2CO_2$	$-4{,}5 + 14800/T$	10,31	2,87	−2,84
$C + CO_2 = 2CO$	$9{,}2 - 9000/T$	0,19	4,69	6,89
$CO + H_2O = CO_2 + H_2$	$-2{,}2 + 2200/T$	−0,11	−1,12	−2,13
$C + O_2 = CO_2$	$0{,}15 + 20550/T$	20,64	10,43	1,32
$2C + O_2 = 2CO$	$4{,}7 + 5770/T$	10,52	7,61	4,22
$3C + H_2O + O_2 = 3CO + H_2$	$16{,}3 + 4700/T$	20,44	18,72	17,85
$3CO + H_2O + O_2 = 3CO_2 + H_2$	$-11{,}2 + 3200/T$	20,53	4,67	−12,63

$$W = \frac{k_1 C_{H_2O}}{1 + k_2 C_{H_2O}},\ \text{моль/(г·с)}, \qquad (20)$$

де

$$k_1 = 5{,}0 \cdot 10^{12} \exp[-68000/(RT_г)],\ \text{см}^3/(\text{г·с}); \qquad (21)$$

$$k_2 = 6{,}7 \cdot 10^5 \exp[+14500/(RT_г)],\ \text{см}^3/(\text{г·с}); \qquad (22)$$

$T_г$ — температура графіту, К; R — універсальна газова константа.

Якщо тиск парів води відповідає певному тиску насиченої пари при 1 атм, тобто за умов, в яких відбувається взаємодія пари з графітом при аварії, реакція протікає відповідно до рівняння першого порядку відносно води, і швидкість утворення суміші чадного газу та водню дорівнюватиме

$$W = 2k_1 C_{H_2O}. \qquad (23)$$

З урахуванням (20) питома швидкість реакції (на 1 м графіту, що окиснюється)

$$dN(CO + H_2)/dt = 10^{13} \exp[-68000/(RT_г)] C_{H_2O},\ \text{моль/(г·с)}, \qquad (24)$$

де C_{H_2O} — концентрація парів води, моль/см^3.

Враховувалось, що температура графіту за час $t > t_0 \approx 3$ с змінюється за законом

$$T_г = T_{г0} + bt, \qquad (25)$$

де $T_{г0}$ — номінальна температура графіту (773 К); b — коефіцієнт, що характеризує швидкість зростання температури графіту, К/с; t — час, с.

Швидкість утворення чадного газу й водню в усій кладці графіту

$$dN(CO + H_2)/dt = M \cdot C_{H_2O} \cdot 10^{13} \exp[-68000/(RT_г)], \qquad (26)$$

де M — маса реагуючого графіту, кг.

Взаємодія графіту з парою можлива тільки при $t > t_0 \approx 3$ с, тобто після теплового вибуху, коли пара вступила в реакцію з графітовими блоками.

Висновки

У даній роботі зроблено спробу використати накопичений міжнародний досвід для представлення одного із сценаріїв розвитку аварійного процесу на ЧАЕС.

Отримані в роботі дані можна застосовувати в подальших дослідженнях для моделювання утворення вибухонебезпечних сумішей в об'ємах приміщень, розрахунку кількості повітря, пари і води в процесі аналізу вибухонебезпечності водневмісної пароповітряної суміші. Практичні розрахунки дають змогу в подальшому оцінити енергію руйнування й спрогнозувати силовий вплив на будівельні конструкції.

Список використаної літератури

1. Чернобыльская катастрофа / Гл. ред. В.Г. Барьяхтар. − К. : Наукова думка, 1995. − 588 с.

2. *Sich A. R.* Chornobyl accident revisited the source term analysis and reconstruction of events during the active phase // Nuclear Safety. — 1994. — P. 49—53.

3. *Азаров С. І.* Оцінка вибухонебезпечності водню на ранній стадії розвитку Чорнобильської аварії / Азаров С. І., Тарановський О. В., Сидоренко В. Л. // Проблеми надзвичайних ситуацій. — 2014. — Вип. 20. — С. 3—10.

4. *Азаров С. І.* Аналіз взаємодії реакторного графіту з водяною парою при аварії на ЧАЕС / Азаров С. І., Тарановський О. В., Сидоренко В. Л. // Пожежна безпека : теорія і практика. — 2014. — № 18. — С. 8—13.

5. *Baker L.* Studies of metal-water reactions at hight temperatures. III Experimental and theoretical of the zirconitim-water reaction / Baker L., Just L. // ANI-6548-196. — 1976. — P. 20—56.

6. *Urbanic V. F.* Oxidation of zirconium alloys in steam at 1000 to 1850 °C // III Int. Conf. on Zirconium in Nuclear Industry, Canada, 1976. — ASIM, 1977. — P. 19−77.

7. *Westerman R. E.* Zircaloy Cladding ID/OD Oxidation Studies / Westerman R. E., Hesson, R. M. — EPRI NP-525. — Nov. 1977. — P. 52—54.

8. *Brown A. F.* The kinetics of total oxygen uptake in steam oxidized zircaloy-2 in range 1272-1673K / Brown A. F., Healen T. // J. Nucl. Mater. — 1980. — Vol. 88, № 1. — P. 1—6.

9. *Lestiikov S.* Kinetik and Murphologie der isotermen dampf-oxidation von zicaloy4 bei 700—1300 °C / Lestiikov S., Schgahd G., Being H. — KFK-278. — Mar. 1978. — P. 17—22.

10. *Кабакчи С. А.* Радиационная химия в ядерном топливном цикле / Кабакчи С. А., Булгакова Г. П. / Лекции РХТУ им. Д. И. Менделеева. М.: — 1997. —96 с.

11. *Бартльме Ф.* Газодинамика горения / Бартльме Ф. — М. : Энергоатомиздат, 1981. — 280 с.

12. *Miassoedov A.* Overview of Severe Accident Research Activities at KIT / Institute for Nuclear and Energy Technologies, CSARP and MCAP Meetings September 14—18, 2015, Albuquerque, NM, USA, 2015, 271 p.

References

1. *Bariakhtar, V.G.* (1995), “Chornobyl Accident” [Chernobylskaia katastrofa], Kyiv, Naukova Dumka, 588 p. (Rus)

2. *Sich, A. R.* (1994), “Chornobyl Accident Revisited the Source Term Analysis and Reconstruction of Events During the Active Phase”, Nuclear Safety, pp. 49-53

3. *Azarov, S.I., Taranovsky, O.V., Sidorenko, V.L.* (2014), “Assessment of Hydrogen Explosiveness at an Early Stage of the Chornobyl Accident” [Otsinka vybukhonebezpechnosti vodniu na rannii stadiia rozvytku Chornobylskoi avarii], Problems of Emergencies, No. 20, pp. 3-10. (Ukr)

4. *Azarov, S.I., Taranovsky, O.V., Sidorenko, V.L.* (2014), “Analysis of Interaction of Reactor Graphite with Water Vapor during Chornobyl Accident” [Analiz vziemodii reaktornoho hrafitu z vodianoi paroiu pry avarii na ChAES], Fire Safety: Theory and Practice, No. 18, pp. 8-13 (Ukr)

5. *Baker, L., Just, L.* (1976), “Studies of Metal-Water Reactions at High Temperatures. III Experimental and Theoretical of the Zirconium-Water Reaction”, ANI-6548-196, pp. 20-56.

6. *Urbanic, V. F.* (1977), “Oxidation of Zirconium Alloys in Steam at 1000 to 1850 °C”, III Int. Conf. on Zirconium in Nuclear Industry, Canada, ASIM, pp.19-77.

7. *Westerman, R. E., Westerman, R. E., Hesson, R. M.* (1977), “Zircaloy Cladding ID/OD Oxidation Studies”, EPRI NP-525, pp. 52-54.

8. *Brown, A. F., Healen, T.* (1980), “The Kinetics of Total Oxygen Uptake in Steam Oxidized Zircaloy-2 in Range 1272-1673K”, J. Nucl. Mater., Vol. 88, No. 1, pp. 1-6.

9. *Lestiikov, S., Schgahd, G., Being, H.* (1978), “Kinetik and Murphologie der Isotermen Dampf-Oxidation von Zicaloy4 bei 700—1300 °C”, KFK-278, pp. 17-22.

10. *Kabakchi, S.A., Bulgakova, G.P.* (1997), “Radiation Chemistry in Nuclear Fuel Cycle” [Radiatsionnaia khimiia v yadernom toplivnom tsykle], Lections of Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 96 p. (Rus)

11. *Bartlme, F.* (1981), “Gasodynamic of Burning” [Gazodinamika goreniia], Moscow, Energoatomizdat, 280 p. (Rus)

12. *Miassoedov, A.* (2015), “Overview of Severe Accident Research Activities at KIT”, Institute for Nuclear and Energy Technologies, CSARP and MCAP Meetings September 14—18, Albuquerque, NM, USA, 2015, 271 p.

Отримано 14.06.2016.