

**РОЗРОБКА ЗАХОДІВ, ЯКІ ПІДВИЩУЮТЬ ЯДЕРНУ, РАДІАЦІЙНУ  
ТА ЕКОЛОГІЧНУ БЕЗПЕКУ ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ» ТА НОВОГО БЕЗПЕЧНОГО  
КОНФАЙНМЕНТА**  
(Тема 2)

**О. О. Ключников, В. О. Краснов, Є. Д. Висотський, В. Єн-І. Хан, О. О. Одінцов**

У рамках досліджень нейтронно-фізичних і фізико-хімічних характеристик ядерно-небезпечних скупчень (ЯНС) зведено матеріальний баланс між елементним складом лавоподібних паливовмісних матеріалів (ЛПВМ) і «жертвними матеріалами» зі складу підреакторних конструкцій, які могли бути залучені до процесу високотемпературної взаємодії з паливом.

Установлено, що відношення уран-цирконію в коричневих ЛПВМ ( $U : Zr = 2,2$ ) близьке до твельного ( $U : Zr = 2,6$ ). Буро-коричневий колір цього типу ЛПВМ визначається включеннями у силікатну матрицю переважно недоокисленого палива ( $UO_2$ ). Для чорної кераміки середнє відношення  $U : Zr = 1,1$  відповідає каналному, а вміст вищих окислів урану ( $U_3O_8$ ,  $UO_3$ ) та заліза визначають її колір. На підставі отриманих даних було зроблено припущення, що утворення коричневих ЛПВМ відбулося ще до розгерметизації активної зони (АЗ) унаслідок опускання по технологічних каналах розплаву палива в об'ємі південно-східного сектора схеми ОР. Взаємодія розплаву палива з серпентинітовою засипкою схеми ОР відбувалась при дефіциті каналного цирконію. Дані, отримані для чорних ЛПВМ, указують на відсутність у зоні формування ЛПВМ цього типу дефіциту кисневмісних сполук і розплавленої сталі. Такі умови могли реалізуватися в результаті тільки поступової (протягом шести діб) витрати окислюваної шихти, у складі якої перебували фрагменти технологічних каналів та графітових блоків.

Результати зведення балансу палива у приміщенні 305/2 за концентраційними вимірами та вмістом цезію в ЛПВМ ( $85 \pm 20$  т) з урахуванням наявності ядерно-небезпечних скупчень (ЯНС) практично збіглися з результатами теплотричних вимірювань ( $75 \pm 25$  т) та зведенням балансу за магнієм (88 т), що було зроблено раніше. Підтверджено кількісні оцінки палива, що знаходиться в південній зоні проплавлення підреакторної плити та утворює критичну масу. Проведено аналіз фактичного матеріалу, який має бути врахований при формуванні робочої версії розрахункової моделі ЯНС.

Реконструйовано послідовність подій, що відбувалися в приміщенні 305/2 і шахті реактора під час аварії, зумовили розподіл ПВМ за об'ємом приміщення 305/2 і привели, у тому числі, до утворення зон з високим вмістом урану. Запропоновано можливий сценарій утворення ЯНС.

На основі аналізу результатів бурових робіт і свердловинних вимірювань у масиві ПВМ приміщення 305/2 уточнено геометричні параметри й координати зони, в якій знаходиться скупчення ЛПВМ з високим вмістом урану.

Виконано оцінки ефектів, що призводять до зворотної критичності перезволоженої розмножуючої системи. За результатами варіаційних розрахунків з урахуванням експериментальних даних визначено граничні умови для параметрів модельного середовища. Оцінено ймовірність зворотної критичності при оптимізації водо-уранового відношення в результаті зневоднення, деградації структури, зміни температури.

Після зведення нового безпечного конфайнмента (НБК) і припинення проступання води від атмосферних опадів процес зневоднення розмножуючого середовища з великою ймовірністю призведе до зворотної критичності. Деградація структури і зміна температури можуть вплинути в основному тільки на кінетику ланцюгової самопідтримуючої реакції (ЛСР).

Установлено, що швидкість падіння температури бетону підреакторної плити не збігається зі спадом залишкового тепловиділення й сумарне тепловиділення перевищує (на 100 - 200 Вт/т урану) залишкове тепловиділення. Додатковим і практично постійним джерелом тепла може бути тільки тепло від вимушеного поділу. Тепло вимушеного поділу в підкритичній розмножуючій системі можливе лише при наявності внутрішнього джерела нейтронів.

Показано, що наявність постійного внутрішнього джерела нейтронів в ЛПВМ забезпечується зростанням виходу нейтронів ( $\alpha, n$ )-реакції на легких ядрах (кремнію, кисню, натрію, магнію, алюмінію), який компенсує падіння нейтронів спонтанного поділу.

Запропоновано для детального аналізу технічні рішення щодо виключення ризиків виникнення ЛСР, прийнятні для об'єкта «Укриття» після зведення НБК:

- 1) уведення рідких нейтроно-поглинаючих матеріалів (НПМ) в ЯНС;
- 2) кероване скидання води із зони локалізації ЯНС при гарантованому виключенні доступу води на підреакторну плиту;
- 3) уведення твердих НПМ.

Використання розчинів НПМ може бути неефективним, якщо структура критичної маси є молекулярним фільтром, тобто сполучення закритих газових макропор між собою відбувається через нанорозмірні парові канали, що утворилися в результаті накопичення радіаційних дефектів у процесі самоопромінення середовища.

Проведено збір та аналіз відомостей про технічні рішення, що запобігають виникненню повторної критичності в умовах обмеження та ліквідації наслідків важких аварій на АЕС:

- 1) розбавлення тепловиділяючого розплаву спеціальними матеріалами, у результаті чого забезпечується інверсія оксидної частини розплаву АЗ із важчою металевою та усувається прямий контакт розплаву з бетонними конструкціями в підреакторному просторі енергоблока. Таким чином забезпечується ефективне охолодження і зменшення температури розплаву;
- 2) зниження щільності розплаву шляхом уведення спеціальних матеріалів, що зменшують щільність продуктів поділу, в результаті чого гарантується відсутність утворення критичної маси;
- 3) створення умов для інтенсивного окислення найбільш сильних відновників, що входять до складу металевої частини розплаву АЗ, що запобігає утворенню й накопиченню водню вибухонебезпечної концентрації при взаємодії з парами води.

Розроблено експрес-методику визначення ізоотопів йоду в радіоактивно забрудненій воді (РЗВ) об'єкта "Укриття".

Гамма-спектрометричними вимірюваннями визначено вміст радіоактивних ізоотопів йоду у воді із свердловин Ю-9-Б і З-9-Ф і приміщень 001/3, 012/16 об'єкта "Укриття". Короткоживучих ізоотопів йоду  $^{131,132,135}\text{I}$  в досліджених пробах РЗВ об'єкта "Укриття" не виявлено. Об'ємна активність  $^{129}\text{I}$  в РЗВ об'єкта "Укриття" становить 3 - 7 Бк/дм<sup>3</sup>.

Аналіз співвідношень активностей  $^{90}\text{Sr}/^{129}\text{I}$  і  $^{137}\text{Cs}/^{129}\text{I}$  показує, що для проб РЗВ із свердловини Ю-9-Б відносний вміст  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{129}\text{I}$  в період спостережень 2010 - 2013 рр. змінювався незначно.

Проводились дослідження по розробці засобів видалення органічних речовин і радіонуклідів, зокрема трансуранових елементів з РЗВ об'єкта «Укриття». Завершено комплекс лабораторних досліджень по визначенню ефективності очищення РЗВ об'єкта "Укриття" від органічних домішок шляхом використання водного розчину титано-залізного коагулянту (ТЗК). Вміст органічних домішок визначався методом біхроматного окислення. Витрата водного розчину ТЗК з вмістом титану (у перерахунку на  $\text{TiO}_2$ ) 3,279 г/кг становила 10 - 60 мл на 1 дм<sup>3</sup> РЗВ. При очищенні РЗВ об'єкта "Укриття" з використанням ТЗК і наступною ультрафільтрацією зниження вмісту органічних (полімерних) речовин становило від 88 до 92 %.

Проведено натурні випробування нового покоління неорганічних іонітів і коагулянтів (фосфатів і силікатів титану і цирконію). Отримані результати дали змогу закласти основи нової коагуляційно-сорбційної технологічної схеми очищення РЗВ об'єкта "Укриття".

Виконано дослідження диференціації форм сполук радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  в середовищах з біотою з використанням проточної тонкошарової хроматографії з декількома нерухомими фазами, що хімічно модифіковані. З використанням біохімічних методів показано зміну зв'язаності радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  мікробними біотопами РЗВ об'єкта «Укриття». Отримані дані дають змогу описувати стан зв'язування радіонуклідів у мікробних біотопах РЗВ через зв'язуючі властивості білків, що містяться в мікробній спільноті.

Розроблено рекомендації щодо методів протидії біоті, яка посилює радіаційну та екологічну небезпеку при поводженні з рідкими та твердими радіоактивними відходами (РАВ).

У результаті дослідження фізико-хімічних властивостей ЛПВМ об'єкта "Укриття" отримано експериментальні дані по вилуговуванню цезію, стронцію, плутонію, америцію та урану з ЛПВМ приміщення 012/7 розчином 1 моль/л  $\text{HCl}$ .

На основі проведених радіохімічного та елементного аналізів зразків коричневих, чорних і поліхромних ЛПВМ, відібраних у приміщеннях об'єкта "Укриття" уточнено вміст трансуранових елементів, урану та цирконію в досліджених зразках ЛПВМ.

Дослідження фізико-хімічних властивостей РЗВ об'єкта "Укриття" з використанням гамма-спектрометричних ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{154,155}\text{Eu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ), альфа-спектрометричних ( $^{238,239,240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{242,244}\text{Cm}$  і

<sup>234,235,236,238</sup>U) і бета-радіометричних (<sup>90</sup>Sr) вимірювань активності радіонуклідів показали, що концентрація урану та об'ємні активності радіонуклідів в основних водних скупченнях об'єкта "Укриття" в період спостережень в 2014 р. залишалися в основному на колишньому рівні. У РЗВ приміщення 001/3 і протічках з труби, виведеної з ПРК у приміщення 001/3, спостерігається тенденція збільшення концентрації урану.

Розроблено та виготовлено лабораторний зразок дистанційно керованого агрегату (ДКА) для локалізації РАВ. Він складається з модернізованого пульта керування та системи локалізації РАВ, установленної на ДКА, яка являє собою гідропривід, що у свою чергу включає в себе резервуари з розчином, нагнітаючі компресори, периферійну обв'язку та розпилюючі форсунки.

Лабораторні випробування ДКА показали, що технічні характеристики відповідають проектним, комплекс забезпечує локальне пилопригнічення.

### ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ, ЯКІ ВИЗНАЧАЮТЬ ДЕГРАДАЦІЮ ПВМ ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ», НА ПЕРІОД ДО ЇХНЬОГО КОНТРОЛЬОВАНОГО ЗБЕРІГАННЯ ЧИ ПЕРЕРОБКИ

(Тема 3)

**С. В. Габелков, О. Е. Меленевський**

У 2014 р. дослідження за темою включали проведення серій послідовних ізотермічних термообробок зразків коричневої та чорної керамік на повітрі при температурах з інтервалів 150 - 450 °С і 70 - 800 °С відповідно та безпосереднє проведення експериментів із визначення об'ємів порових каналів у коричневій і чорній кераміках ЛПВМ після термообробок.

Визначалися складові порового простору ЛПВМ.

Досліджені зразки коричневої кераміки (№ 1 і № 2) мали уявну густину 2,70 і 2,81 г/см<sup>3</sup> і відкрити пористість 6,9 і 7,2 % відповідно. Зразок чорної кераміки мав уявну густину 2,16 г/см<sup>3</sup> і відкрити пористість 9,8 %.

Підтверджено, що поровий простір коричневої кераміки представлено великими газовими порами (значно більше 10 мкм), малими газовими порами (~10 мкм), тріщинами (середня товщина 2 - 2,5 мкм) та нанорозмірними поровими каналами (діаметром 40 - 60 нм). Установлено, що поровий простір чорної кераміки представлено газовими порами (~10 мкм), тріщинами (середня товщина ~2 мкм), нанорозмірними поровими каналами (діаметром 40 - 60 нм) та нанопорами (діаметром ~10 - 20 нм).

Отримані результати свідчать про те, що в ряді складових порового простору пори (великі й малі газові пори й нанопори), тріщини й нанорозмірні порові канали, ступінь нерівноважності й відповідно відношення в кожному з елементів порового простору найбільшого розміру до найменшого, зростає. Наноканали зменшують свій об'єм (закриваються) при термообробці при тих же температурах (100 - 150 °С), як і відпалюються треки α-частинок у силікатних стеклах за методикою твердотільних детекторів. Це підтверджує, що нанорозмірні порові канали є каналами, які сформувалися при взаємодії матеріалу силікатної матриці ЛПВМ з α-частинками, що утворювалися при α-розпадах трансуранових елементів. Наноканали є основною складовою порового простору ЛПВМ, що принципово відрізняє ЛПВМ від більшості відомих матеріалів.

Нанопори утворювалися за рахунок відмінності величин коефіцієнтів лінійного термічного розширення неоднорідностей у ЛПВМ, що сформувалися, імовірно, у результаті процесу ліквідації розплаву ЛПВМ.

### РОЗРОБКА МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ КОЕФІЦІЄНТІВ РЕАКТИВНОСТІ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

(Тема 9)

**В. І. Борисенко**

Розроблено алгоритми та програми обробки шумових сигналів нейтронних датчиків (внутрішньо- і зовнішньозонних), що використовуються в системах внутріреакторної шумової діагностики (СВШД). Проведено запис та off-line обробка сигналів СВШД для різних моментів паливної кампанії ВВЕР-1000. Визначено найбільш характерні частоти, що проявляються в шумовому сигналі нейтронного детектора. Проводиться накопичення даних для визначення залежності шумових характеристик нейтронних датчиків СВШД від часу знаходження тепловиділяючих збірок в активній зоні (вигорян-