

Д. В. Городецький, В. В. Деренговський, Л. І. Павловський

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова, 36а, Чорнобиль, 07270, Україна

ПРОБЛЕМА ВИЗНАЧЕННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ДЕЗАКТИВАЦІЇ РАДІОАКТИВНО ЗАБРУДНЕНИХ ОБ'ЄКТІВ ПРИ ПЕРЕТВОРЕННІ ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ» НА ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНУ СИСТЕМУ ТА ШЛЯХИ ЇЇ ВИРІШЕННЯ

Проаналізовано стан проблеми доцільності дезактивації радіоактивно забруднених об'єктів, що утворилися під час аварії на ЧАЕС, що будуть утворюватися під час діяльності з перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему, а також діяльності зі зняття з експлуатації ЧАЕС. Доцільність їхньої дезактивації визначається для кожного окремого випадку на підставі багатьох чинників, у тому числі на результатах аналізу «доз – витрат – вигоди». Важливим фактором, що може суттєво впливати на рішення щодо доцільності дезактивації радіоактивно забруднених об'єктів, є застосування для її виконання нових більш ефективних та економічних технологій дезактивації.

Ключові слова: зона відчуження, дезактивація, радіоактивно забруднені об'єкти, НБК-ОУ.

Вступ

Радіоактивно забруднені об'єкти (РЗО) – будівельні матеріали та конструкції, технічне обладнання та механізми, які зазнали радіоактивного забруднення внаслідок аварії на ЧАЕС або характеризуються радіоактивним забрудненням, що утворилося внаслідок її колишньої нормальної експлуатації, і потребують організації безпечного для навколишнього середовища поводження з ними після вилучення.

Утворення РЗО є наслідком трьох основних напрямків сучасної діяльності в чорнобильській зоні відчуження (ЧЗВ), що спрямовані на очищення її території від радіоактивних матеріалів техногенного походження і переведення їх у контрольований стан, а саме: перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему; зняття з експлуатації ЧАЕС; роботи з мінімізації наслідків аварії.

Загальні об'єми РЗО, що будуть утворюватися під час діяльності з перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему, а також діяльності по зняттю з експлуатації ЧАЕС, важко піддаються прогнозуванню і становлять десятки тисяч тонн різних за походженням і ступенем радіоактивного забруднення матеріалів.

Значна частина РЗО є цінною технічною сировиною і забезпечення її дезактивації для повторного використання в промисловості становить важливу науково-технічну проблему. Окрім того, часткова дезактивація РЗО, які потенційно належать до категорії довгоіснуючих високоактивних радіоактивних відходів, призведе до значної економії коштів на їхнє подальше зберігання за рахунок переведення у менш небезпечну категорію радіоактивних відходів (РАВ).

Проблема визначення доцільності виконання дезактивації РЗО полягає в тому, що для отримання позитивного рішення потрібно проаналізувати значну кількість радіологічних, технічних і економічних факторів, які, зважаючи на різноманітність походження та властивостей РЗО, мають широку амплітуду значень. Також необхідно враховувати те, що за тривалий період робіт із перетворення об'єкта «Укриття» (кілька десятків років) можливі позитивні зміни в собівартості виконання дезактивації як унаслідок упровадження нових технологій, так і за рахунок удосконалення і зменшення собівартості вже відомих.

Робота присвячена визначенню переліку й аналізу вихідних даних, що необхідні для забезпечення формалізації прийняття рішень щодо доцільності виконання дезактивації РЗО, які будуть утворюватися під час перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему, а також діяльності зі зняття з експлуатації ЧАЕС.

Характеристика техногенних РЗО, дезактивація яких потенційно доцільна

До найбільш розповсюджених РЗО, що утворюються внаслідок діяльності на території ЧЗВ, належать такі їхні види:

металеві будівельні конструкції, механізми та обладнання;
будівельні конструкції з мінеральної сировини (бетон, цегла);
сипучі будівельні матеріали (пісок, щебінь) і ґрунт.

© Д. В. Городецький, В. В. Деренговський, Л. І. Павловський, 2017

Слід зазначити, що повторне використання забруднених бетонних і цегляних будівельних конструкцій і матеріалів, що не належать (за результатами обстеження) до категорії РАВ, практично не передбачається. Після вилучення та обстеження, вони будуть зберігатись на спеціальних тимчасових або постійних майданчиках для складування. Але можливі випадки, коли за результатами обстеження вилучених будівельних матеріалів вони потрапляють до категорії високоактивних відходів (ВАВ). У таких випадках доцільно локалізувати осередки ВАВ, фрагментувати або дезактивувати виявлені будівельні конструкції і матеріали. Це також дасть позитивний економічний ефект.

Таким чином, із найбільш поширених РЗО, дезактивація яких потенційно доцільна з огляду на можливість їхнього повторного використання, є металеві будівельні конструкції, механізми та обладнання.

За даними [1, 2] на першому, другому та третьому блоках ЧАЕС знаходиться майже 98 тис. т радіоактивно забрудненого металу. Крім того, є ще об'єкт «Укриття», де точних оцінок забрудненого металу немає. За експертними оцінками, маса радіоактивно забруднених металевих конструкцій, що будуть вилучені тільки під час «раннього демонтажу», становить ~ 2000 т [3]. А взагалі в документі [4] наведено дані, відповідно до яких станом на 2006 р. у ЧЗВ було зосереджено більше 1 млн т чорного металу, який можна використовувати в металургії. Основна частина цих РЗО належить до низькоактивних відходів (90 - 95%). Через 20 років після аварії радіоактивно забруднення РЗО у ЧЗВ визначалося, головним чином, ^{137}Cs (83 %), ^{90}Sr (14 %), а також незначною кількістю ізотопів плутонію та продуктами їхнього розпаду.

На об'єктах атомної енергетики елементи ядерних реакторів протягом десятків років працюють в умовах сильного нейтронного опромінення. Потужні потоки нейтронів здатні проникати в метал, дотичний з ядерним паливом, на кілька сантиметрів. Такий вплив призводить до появи в металі наведеної радіоактивності, яка характеризується різноманітністю створюваних радіоізотопів, які є джерелами іонізуючого випромінювання різних видів. У результаті утилізація відпрацьованих конструкцій реакторів стає великою проблемою, оскільки є РАВ.

За характером розподілу забруднення РЗО, за яким визначається спосіб дезактивації та подальшого поводження з ними, забруднення можна поділити на поверхневе, об'ємне або змішаного типу. Найбільш придатними для успішного виконання дезактивації є металеві будівельні конструкції, механізми та обладнання, які зазнали забруднення в післяаварійний період і зазвичай характеризуються неглибоким поверхневим забрудненням.

Металеві РЗО, що будуть вилучатись з об'єкта «Укриття» і які зазнали забруднення в момент аварії внаслідок явища термічної дифузії, характеризуються найбільш негативними щодо дезактивації властивостями. Для таких об'єктів доцільне застосування часткової дезактивації з метою переведення цих РЗО до менш небезпечної категорії РАВ, що матиме не менш суттєвий економічний ефект.

Аналіз «доз – витрат - вигоди» при прийнятті рішення про доцільність виконання дезактивації РЗО

Згідно з вимогами нормативного документу [5] радіаційна безпека та протирадіаційний захист стосовно практичної діяльності будується з використанням таких основних принципів:

будь-яка практична діяльність, що супроводжується опроміненням людей, не повинна здійснюватися, якщо вона не є більш корисною опроміненням особам або суспільству в цілому в порівнянні зі шкодою, яку вона завдає (принцип виправданості);

рівні опромінення від усіх значимих видів практичної діяльності не повинні перевищувати встановлених меж доз (принцип неперевищення);

рівні індивідуальних доз та/або кількість осіб, які опромінюються, відносно кожного джерела випромінювання повинні бути настільки низькими, наскільки це може бути досягнуто з урахуванням економічних і соціальних факторів (принцип оптимізації - ALARA).

Одним з основних заходів із забезпечення принципу оптимізації є мінімізація опромінення персоналу і населення від техногенних джерел іонізуючого випромінювання, одним з яких є РЗО. Для зменшення такого впливу на персонал та населення пропонується проведення демонтажу, фрагментації, паспортизації та дезактивації. Розглянемо останню технологічну операцію більш детально.

Нині на ЧАЕС не встановлено чіткого алгоритму для прийняття рішення щодо доцільності проведення дезактивації фрагмента РЗО тим чи іншим методом. Тому для оптимізації витрат коштів, матеріальних та людських ресурсів, а також для зменшення об'єму утворюваних РАВ пропонується створити методику прийняття рішення щодо доцільності проведення дезактивації для РЗО на ЧАЕС.

За основу методики пропонується взяти рекомендації міжнародної комісії з радіаційного захисту (МКРЗ) та основних нормативних документів України, ЧЗВ та ДСП ЧАЕС. Найважливішим компонентом підходу МКРЗ до оптимізації є кількісне визначення результатів досліджень з оптимізації в тих випадках, коли це можливо. У виданих раніше публікаціях [6] рекомендованим методом був аналіз витрат і вигоди. У [7] метод аналізу витрат і вигоди наводиться як приклад, проте там рекомендовано для використання й інші методи. Практичні керівні матеріали щодо застосування цих методів викладено в [8, 9]. Як найбільш універсальний (проте й найскладніший у використанні) у цих публікаціях запропоновано метод багатокритеріального аналізу функції бажаності - як більш розширений метод аналізу «доз – витрат - вигоди».

Суть методу багатокритеріального аналізу функції бажаності полягає у введенні агрегованого критерію, в якому об'єднуються всі інші критерії. З цією метою для кожного критерію будують функцію бажаності $u_j(x)$, яка відображає область зміни кожного з критеріїв x у діапазоні балів, що змінюються від 0 до 1.

Узагальнений показник ефективності W_i i -го варіанта проведення заходу визначається як сума відповідних функцій бажаності

$$W_i = \sum_{j=1}^n k_j \cdot u_j(x_{ji})$$

з ваговими коефіцієнтами k_j , які вибираються так, щоб

$$\sum_{j=1}^n k_j = 1.$$

Вид функцій бажаності u_j і значення вагових коефіцієнтів k_j обираються залежно від вихідних даних, проектних рішень, прийнятих критеріїв і способів отримання їхніх чисельних значень, а також шкали переваг обраних критеріїв.

Для виконання аналізу доцільності проведення дезактивації необхідно встановити основні критерії, за якими буде виконуватися оцінка. З огляду на досвід виконання робіт щодо посилення блока балок Б1/Б2 об'єкта «Укриття», проекту стабілізації будівельних конструкцій об'єкта «Укриття», вибору варіанта будівництва нового безпечного конфайнмента (НБК), а також вимоги українських та міжнародних норм і рекомендацій щодо дотримання принципу ALARA запропоновано до розгляду такі основні критерії:

C_d - вартість виконання дезактивації;

C_z - вартість поводження недезактивованих РЗО;

C_v - вартість можливої фінансової вигоди від використання РЗО після дезактивації;

D_d - колективна ефективна доза (КЕД) при реалізації дезактивації;

D_z - КЕД при поводженні з РЗО, що не зазнали дезактивації;

F - фінансовий ризик;

T - час реалізації проекту;

Q - величина ризику наявності об'єктів інфраструктури з поводження з фрагментами РЗО, що утворюються (у тому числі ВАВ).

Усі наведені вище критерії залежно від ступеня опрацювання технічних рішень, повноти та достовірності вихідних даних можуть бути розраховані з відомою відносною похибкою. При відсутності повноти і/або достовірності вихідних даних, а також недостатньої детальності опрацювання технічних рішень за допомогою експертних систем проводять оцінку необхідних даних, і відповідні критерії матимуть оціночні значення із зазначенням відносної похибки або закону розподілу. Крім того, у загальному випадку всі критерії можуть бути як кількісними, так і якісними. Найчастіше, якісними є критерії, оцінені за допомогою експертних систем.

Розглянемо детальніше вибрані основні критерії. У більшості випадків перші сім критеріїв є кількісними. Значення критеріїв (1, 2, 3 і 6 – тис. грн., 4 і 5 – Зв, 7 – роки) визначають під час опрацювання технології дезактивації.

Восьмий критерій у більшості випадків є якісним. Теоретично якісна оцінка може бути виконана різними способами. Один із найбільш доступних і достатньо обґрунтованих - застосування методу експертних оцінок.

Для обчислення величини ризику наявності об'єктів інфраструктури щодо поводження з утворюваними фрагментами РЗО Q скористаємося методом безпосереднього оцінювання на основі універсальної 9-бальної шкали. Проаналізувавши вказані критерії, шкала оцінок матиме такий ви-

гляд: 1 - ризик, яким можна знехтувати; 3 - низький ризик; 5 - незмінний ризик; 7 - високий ризик; 9 - неприйнятний ризик; 2, 4, 6, 8 - проміжні значення між сусідніми значеннями шкали.

В якості запобіжного заходу узгодженості думок експертів можна прийняти розбіжність в оцінках не більше двох балів, що відповідає приблизно 20 % похибки всієї шкали. Отримувати більш точні значення не має сенсу, оскільки кількісні критерії не можуть бути обчислені з більшою точністю (похибки приладів вимірювань, складань технологічних карт, вихідних даних тощо).

Для побудови функції бажаності всіх кількісних критеріїв, де встановити верхню межу значення критерію неможливо, необхідне виконання таких умов:

в області малих значень вартості і дози функція повинна мати високі значення й бути малочутливою до змін аргументу;

в області великих значень вартості і дози функція повинна мати низькі значення й бути малочутливою до змін аргументу;

в інтервалі близьких значень аргументу функція повинна мати гарну роздільну здатність.

Перерахованим вище умовам відповідає функція

$$u_i = EXP(-0.7 \cdot (X / A)^4),$$

де $i = 1, \dots, 7$; X - значення критерію; A - константа, яку визначають як середнє значення i -го критерію всіх розглянутих варіантів.

Графічне представлення зазначених вище функцій бажаності показано на рис. 1.

Для порівняння якісних критеріїв буде використана система експертних оцінок методом безпосереднього оцінювання на основі універсальної 9-бальної шкали. Тоді функцію бажаності для якісних критеріїв можна визначити так ($i = 1 \dots 7$): $u_i(9) = 0$; $u_i(8) = 0,125$; $u_i(7) = 0,25$; $u_i(6) = 0,375$; $u_i(5) = 0,5$; $u_i(4) = 0,625$; $u_i(3) = 0,75$; $u_i(2) = 0,875$; $u_i(1) = 1$.

Графік такої функції бажаності має дискретний характер, оскільки функція визначена тільки в 9 точках (рис. 2).

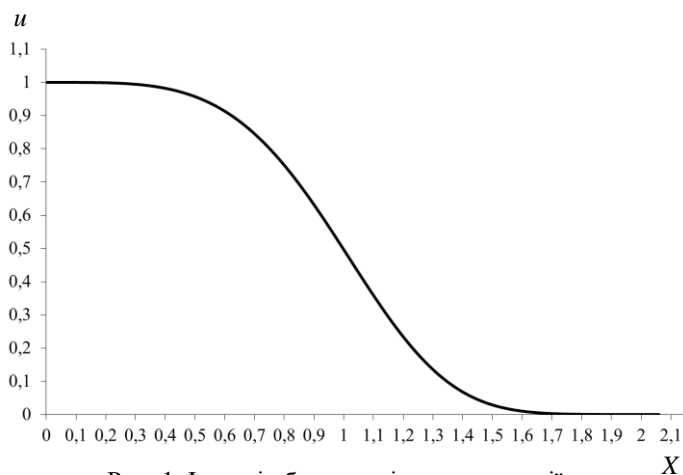


Рис. 1 Функція бажаності u для критеріїв, що не мають верхньої межі значень.

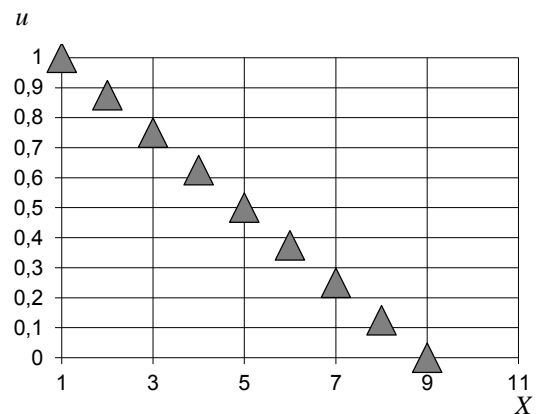


Рис. 2. Функція бажаності u для якісних критеріїв.

Даний метод пройшов експертизу в регулюючих органах України з радіаційної безпеки в рамках документів Плану здійснення заходів (ПЗЗ) при прийнятті рішення про доцільність реалізації стабілізаційних заходів «Посилення західної і східної опори балки «Мамонт», вибору варіанта конструкції НБК, а також при прийнятті рішення з відкладеного демонтажу нестабільних конструкцій об'єкта «Укриття» в рамках робіт із ПК-2. Він показав свою ефективність й універсальність при його коректному застосуванні.

Приклад застосування методу багатокритеріального аналізу

Розглянемо застосування запропонованого методу багатокритеріального аналізу на прикладі прийняття рішення про дезактивацію РЗО з міді. У табл. 1 наведено значення критеріїв із розрахунку на 1 м^3 міді (8960 кг) у цінах, перерахованих із першоджерел на 2017 р. Вартість міді отримано за результатами моніторингу Лондонської біржі за 2016 р ($\$5,3 \pm \$0,7$ за 1 кг) і курсу НБУ $\$1 = 27,12$ грн. Величина фінансового ризику прийнята рівною $\$0,7$ за 1 кг як можлива зміна ціни на мідь. Для розрахунків прийнято, що дезактивація 1 м^3 міді виконується за один робочий день або 0,003 роки. Аналогічно захоронення 1 м^3 міді виконується за один робочий день або 0,003 роки. Величина ризику

наявності об'єктів інфраструктури щодо поводження із фрагментами РЗО для варіанта з дезактивацією прийнята 0,9, бо РАВ майже не передбачаються після проведення дезактивації. Величина ризику наявності об'єктів інфраструктури по поводженню із фрагментами РЗО для варіанта без дезактивації прийнята 0,5, бо пункт захоронення радіоактивних відходів (ПЗРВ) «Буряковка» потребує розширення для захоронення значних об'ємів РАВ. Вартість захоронення на ПЗРВ «Буряковка» взято із проектної документації НБК. Вартість дезактивації розраховано за даними вартості хімічних реагентів на 1995 р. у перерахунку на 1 м³ міди за цінами 2017 р. КЕД при реалізації дезактивації прийнята умовно рівною 10⁻⁴ люд.-Зв, а КЕД при реалізації варіанта без дезактивації прийнята умовно рівною 2·10⁻⁴ люд.-Зв.

Таблиця 1. Вихідні дані для проведення аналізу

Варіант	Сд, грн.	Сз, грн.	Св, грн.	Дд, люд.-Зв	Дз, люд.-Зв	F, грн.	T, роки	Q
1 (дезактивація)	530	0	1290240	10 ⁻⁴	0	170240	0,003	0,9
2 (без дезактивації)	0	780	0	0	2·10 ⁻⁴	0	0,003	0,5

Таблиця 2. Результати розрахунків

Варіант	U _C	U _D	U _F	U _T	U _Q	ΣΔU	Σ k _i ΔU
1 (дезактивація)	1	0,87	0	0,5	0,9	1,16	0,232
2 (без дезактивації)	0	0,11	1	0,5	0,5		
ΔU	1	0,76	-1	0	0,4		
k _i	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5		

У табл. 2 представлено обчислені значення функцій бажаності вибраних груп критеріїв та їхню різницю для двох варіантів. Визначимо значення вагових коефіцієнтів для наших критеріїв рівнозначними. Тоді k₁ = k₂ = k₃ = k₄ = k₅ = 1/5. Після проведення всіх розрахунків отримаємо наступне показника ефективності $W = \sum k_i \Delta U = 0,232 > 0$. Отримане значення показника ефективності більше нуля, що означає доцільність виконання дезактивації при вказаних вихідних даних. Крім того, можна отримати значну фінансову вигоду від реалізації дезактивованого лому міди.

Наведений приклад деякою мірою формальний, бо для отримання достовірних вихідних даних потрібно знати детальні характеристики забруднення РЗО, технологічні карти процесів дезактивації, актуальні ціни хімічних реагентів та величини оплати праці, вартості захоронення різних видів РАВ (у тому числі ВАВ), дозові навантаження на персонал. У даному прикладі враховано не всі можливі витрати, перераховані критерії проведення аналізу не є остаточними і залежно від можливих витрат можуть бути скореговані. Але цей приклад показує процес та етапи прийняття рішення про доцільність проведення дезактивації РЗО.

Відповідно до [13] на етапі експлуатації комплексу НБК-ОУ у 2019 – 2023 рр. необхідно провести обґрунтування доцільності/недоцільності дезактивації демонтованих конструкцій об'єкта «Укриття» на основі аналізу «доз – витрат – вигоди». Але постає проблема недостатності вихідних даних щодо об'ємів та характеристик радіоактивного забруднення металевих будівельних конструкцій, механізмів та обладнання в НБК-ОУ та ДСП ЧАЕС та ін. Для вирішення виявлених проблем програмою науково-технічного супроводу НБК-ОУ [13] передбачено розв'язати такі завдання:

створити базу даних радіоактивно забруднених об'єктів (металевих будівельних конструкцій, механізмів і обладнання) в НБК-ОУ та ДСП ЧАЕС з їхніми характеристиками;

створити методику прийняття рішення про доцільність проведення дезактивації для РЗО, що будуть утворюватися у процесі перетворення об'єкта «Укриття» та під час робіт зі зняття з експлуатації ЧАЕС.

Сучасні ефективні методи дезактивації, застосування яких може підвищити її рентабельність

У процесі експлуатації інтегрованого об'єкта НБК-ОУ передбачено використання традиційних методів дезактивації за допомогою спеціальних розчинів [10]. Такий підхід найбільш ефективний у випадку дезактивації слабо забруднених конструкцій НБК, обладнання та засобів індивідуального захисту, тому що рівень їхнього вторинного радіоактивного забруднення буде відносно невисоким, глибина дифузії радіонуклідів незначною, а кількість вторинних відходів помірною.

Проте у процесі ліквідації наслідків аварії на ЧАЕС відбудеться зміна якісних характеристик РЗО, які будуть потребувати дезактивації. Це, у першу чергу, конструкції із залізобетону та великогабаритне обладнання 4-го енергоблока (РЗМ, мостовий кран, барабани-сепаратори тощо), які зазнали

радіоактивного забруднення безпосередньо в момент аварії. Такі матеріали характеризуються більшою глибиною поверхневого забруднення внаслідок високотемпературної дифузії паливного пилу. При цьому кількість ВАВ, що утворились за рахунок поверхневого забруднення паливним пилом, урахувати неможливо, але такі матеріали, безперечно, становитимуть основний обсяг ВАВ.

Такі обставини спонукають до необхідності запровадження більш ефективних способів дезактивації вказаних вище конструкцій та обладнання, які б дозволяли виконувати дезактивацію на значно більшу глибину та з мінімальною кількістю вторинних відходів.

Так, з метою дезактивації конструкцій, забруднених у результаті аварії на ЧАЕС, перспективним є використання технології очищення поверхні за допомогою гранул сухого льоду CO_2 (криогенний бластинг) [11]. Спеціальний пристрій розпилює гранули сухого льоду (зі швидкістю до 300 м/с) на поверхню, що очищується. Під дією гранул льоду, верхній шар поверхні миттєво охолоджується (до -79°C) і стає крихким (термічний ефект). Під час зіткнення з поверхнею гранули льоду за рахунок надшвидкої (декілька мілісекунд) сублімації до газоподібного стану вибухають і відокремлюють частки речовини поверхні, які видаляються з наступним потоком гранул (механічний ефект). При цьому гранули льоду повністю випаровуються, а частки речовини поверхні затримуються на повітряних фільтрах під час видалення газової суміші з робочої зони. Перевагою криогенного бластингу є відсутність утворення вторинних відходів, а відфільтровану газову суміш можна викидати в навколишній простір (в об'єм НБК-ОУ).

Цей метод є особливо ефективним для дезактивації металевих поверхонь і широко використовується в атомній енергетиці. Так, технологія криогенного бластингу була застосована фірмою «Toshiba» для створення робота для дезактивації конструкцій, зруйнованих у результаті аварії на АЕС Фукусіма-1 (Японія).

Очищення поверхні металевих конструкцій, де 90 - 95 % радіоактивного забруднення зазвичай знаходиться у верхньому (150 - 200 мкм) шарі, можливо за допомогою його випаровування імпульсним лазером. Ця технологія також характеризується економічністю за рахунок відсутності вторинних відходів. Нині вже розроблено промислові зразки такого обладнання для дезактивації, яке може працювати дистанційно [12].

Для очищення поверхні з бетону також ефективним є метод лазерної дезактивації – застосування наносекундного лазера з великою піковою потужністю (до кількох МВт), який видаляє забруднений шар через випаровування та супутній ефект теплового удару. Швидкість дезактивації таким методом становить декілька квадратних метрів на годину, глибина дезактивації (за один "прохід") 5 мм і більше [11]. За допомогою лазерних технологій можна використовувати різні ефекти, зокрема сколювання, термічне відшарування та випаровування. Лазерний метод також не призводить до утворення вторинних відходів.

Лазери можуть також використовуватися для закріплення пилу методом оплавлення бетонної поверхні. Із використанням 2,5-кіловатного діодного лазера швидкість оплавлення бетону досягає майже $2 \text{ м}^2/\text{год}$. Використання такої технології може бути досить ефективним у процесі демонтажу конструкцій об'єкта «Укриття» та його подальшого перетворення для зменшення підйому пилу.

Найбільш ефективним методом дезактивації може стати комбінований метод, за яким виконується обдування забрудненої поверхні сухим льодом та одночасне нагрівання матеріалу лазерним променем. Випробування цього методу показали, що матеріал видалявся у вигляді невеликих (до 0,5 мм) уламків, що спрощує процес фільтрації з використанням, наприклад, фільтрів-циклонів. При цьому товщина поверхневого шару бетону, що видаляється, становить 5 мм, а швидкість видалення шару - $1500 \text{ см}^3/\text{год}$ [11].

Таким чином, впровадження й адаптація до умов інтегрованого об'єкта НБК-ОУ (ДСП ЧАЕС) сучасних методів дезактивації (криогенного бластингу, лазерного та ін.) дозволить суттєво підвищити рівень радіаційної безпеки та мінімізувати об'єми довгоіснуючих та високоактивних РАВ, що будуть утворюватися у процесі перетворення об'єкта «Укриття» та під час робіт зі зняття з експлуатації ЧАЕС. Згідно з [13] до 2023 р. повинен бути проведений вибір ефективних методів дезактивації демонтованих конструкцій і забруднених поверхонь усередині НБК. На етапі введення в експлуатацію комплексу НБК-ОУ у 2018 р. необхідно отримати результати оцінки сучасних методів дезактивації з точки зору можливості та доцільності їхнього практичного використання в умовах НБК-ОУ. На етапі експлуатації комплексу НБК-ОУ у 2019 - 2023 рр. необхідно провести обґрунтування доцільності/недоцільності дезактивації демонтованих конструкцій об'єкта «Укриття» на основі аналізу «доз – витрат – вигоди» та за результатами експериментальних робіт із дезактивації необхідно вибрати методи, технології та обладнання для дезактивації.

Висновки

Проблема визначення доцільності дезактивації радіоактивно забруднених об'єктів, що будуть утворюватися у процесі перетворення об'єкта «Укриття» та під час робіт зі зняття з експлуатації ЧАЕС, сьогодні є досить актуальною, проте вона є недостатньо вивченою з наукової точки зору з боку прийняття оптимальних рішень. Крім того, існує проблема недостатності вихідних даних щодо об'ємів та характеристик радіоактивного забруднення металевих будівельних конструкцій, механізмів та обладнання в НБК-ОУ та ДСП ЧАЕС, а також щодо необхідності випробування і впровадження новітніх методів дезактивації в умовах НБК-ОУ та ДСП ЧАЕС. Для вирішення виявлених проблем надалі необхідно виконати такі завдання:

створити базу даних радіоактивно забруднених об'єктів (металевих будівельних конструкцій, механізмів та обладнання) в НБК-ОУ та ДСП ЧАЕС з їхніми характеристиками;

створити методику прийняття рішення про доцільність проведення дезактивації для РЗО, що будуть утворюватися у процесі перетворення об'єкта «Укриття» та під час робіт зі зняття з експлуатації ЧАЕС;

випробувати і впровадити найбільш прийнятні сучасні методи дезактивації в умовах НБК-ОУ та ДСП ЧАЕС.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 14.50.420.120-01.57. Итоговый отчет по результатам комплексного инженерного и радиационного обследования энергоблока № 1 ГСП ЧАЭС, 2000.
2. 14.50.420.300-01.53. Сводный итоговый отчет по результатам комплексных инженерных и радиационных обследований энергоблоков № 2, 3 Чернобыльской АЭС. – ГСП ЧАЭС, 2005.
3. SIP09-2-001 NI 03 RPT 038 03. Анализ концептуальных проектных решений «раннего» демонтажа нестабильных конструкций ОУ с учетом двух вариантов «интегрированного демонтажа/обращения» и демонтажа с отложенным обращением. – ГСП ЧАЭС, 2014. – 161 с.
4. Кузнецов В., Острецов И., Топонов А., Шингаркин М. Доклад «Оценка рисков облучения населения России». [http://www.seu.ru/projects/metal/report_version_5\[0\].doc](http://www.seu.ru/projects/metal/report_version_5[0].doc)
5. ДГН 6.6.1.-6.5.001-98. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97). Державні гігієнічні нормативи. – К.: МОЗ України, 1997.
6. Cost-Benefit Analysis in the Optimization of Radiation Protection. ICRP Publication 37. Ann. ICRP 10 (2-3), 1983.
7. ICRP Publication #55. “Optimization and Decision-Making in Radiological Protection” A report of a Task Group of Committee 4 of the International Commission on Radiological Protection, Oxford, New York-Toronto, Pergamon Press, 1988. – 60 p.
8. Commission of the european communities, ALARA: From Theory Towards Practice, Rep. EUR 13796, CEC, Luxembourg, 1991.
9. National council on radiation protection and measurements, Dose Control at Nuclear Power Plants, NCRP Rep. No. 120, NCRP, Bethesda, MD (1994).
10. ПК-1. ЛП-6. Защитное сооружение с технологическими системами жизнеобеспечения и необходимой инфраструктурой. Т. 5. Обращение с РАО и решения по дезактивации оборудования и конструкций. SIP-N-KP-22-E06__TEN-050_01/99-925.100.011.OT05.
11. Шульга Н.А., Блинова И.В., Соколова И.Д. Технология дезактивации оборудования при выводе из эксплуатации ядерных установок //Атомная техника за рубежом. – 2007. – № 7. – С. 3 – 8.
12. Мутин Т.Ю. Лазерная дезактивация металлических поверхностей: автореф. ... канд. техн. наук. - СПб., 2012. – 18с.
13. Програма науково-технічного супроводу на етапах введення в експлуатацію та експлуатації НБК-ОУ, ДСП ЧАЕС, ТВ. Інв. № 16 від 22.12.2016 р.

Д. В. Городецкий, В. В. Деренговский, Л. И. Павловский

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Кирова, 36а, Чернобыль, 07270, Украина

ПРОБЛЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ДЕЗАКТИВАЦИИ РАДИОАКТИВНО ЗАГРЯЗНЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ПРЕВРАЩЕНИИ ОБЕКТА «УКРЫТИЕ» В ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНУЮ СИСТЕМУ И ПУТИ ЕЕ РЕШЕНИЯ

Проанализировано состояние проблемы целесообразности дезактивации радиоактивно загрязненных объектов, образовавшихся во время аварии на ЧАЭС, которые будут образовываться в ходе деятельности по преобразованию объекта «Укрытие» в экологически безопасную систему, снятия с эксплуатации ЧАЭС. Целесообразность их дезактивации определяется для каждого отдельного случая на основании многих факторов, в том числе на результатах анализа «доз - расходов - выгоды». Важным фактором, который может существенно

влиять на решение о целесообразности дезактивации радиоактивно загрязненных объектов, является применение для ее выполнения новых, более эффективных и экономичных технологий дезактивации.

Ключевые слова: зона отчуждения, дезактивация, радиоактивно загрязненные объекты, НБК-ОУ.

D. V. Gorodetskiy, V. V. Derengovskiy, L. I. Pavlovsky

Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, Kirova str., 36a, Chornobyl, 07270, Ukraine

ISSUES FEASIBILITY OF DECONTAMINATION OF RADIOACTIVELY CONTAMINATED OBJECTS WHEN CONVERTING OBJECT "UKRYTTYA" INTO ECOLOGICALLY SAFE SYSTEM AND ITS SOLVING

Radioactively contaminated objects (RZO) - Building materials and constructions, technical equipment and tools that are contaminated by Chernobyl contamination or characterized, formed as a result of its former normal operation, and need organizing environmentally friendly treatment of after removal. RZO formation is the result of three major areas of modern activities in the exclusion zone aimed at clearing its territory of radioactive materials anthropogenic and putting them in a controlled state, namely the transformation of the "Ukryttya" into an ecologically safe system; decommissioning of Chernobyl; work to minimize the consequences. RZO total amount that will be generated during the conversion activities of "Ukryttya" into an environmentally safe system, as well as activities on decommissioning Chernobyl, are difficult to predict and account for tens of thousands of tons of different origin and extent of radioactive contamination of materials. Much of RZO is a valuable industrial raw materials and ensuring the decontamination of reusable industry is an important scientific and technical problem. In addition, partial deactivation RZO potentially fall into the category of long-lived high-level radioactive waste, will lead to significant cost savings for their subsequent storage by transfer to less hazardous category of radioactive waste. The problem of determining the feasibility of implementation of decontamination RZO is that a positive decision to analyze a large number of radiological, technical and economic factors which, given the diversity of origins and properties RZO have wide amplitude values. You must also consider the fact that over a long period of work on the transformation of "Ukryttya" (several decades) possible improvements in cost performance as deactivation due to introduction of new technologies, and by improving and reducing the cost of already known. The work is dedicated to the definition and analysis of a list of initial data necessary for the formalization of the decision on the feasibility of implementation of decontamination RZO to be formed during the transformation of the "Ukryttya" into an environmentally safe system, as well as activities on decommissioning Chernobyl.

Keywords: radioactively contaminated objects, Exclusion Zone, decontamination, radioactively contaminated objects, NSC-SO.

REFERENCES

1. 14.50.420.120-01.57. Summary report on the results of complex engineering and radiation surveys of power unit № 1. – SSE ChNPP, 2000. (Rus)
2. 14.50.420.300-01.53. Consolidated summary report on the results of complex engineering and radiation surveys of power units No. 2, 3 of the Chernobyl NPP. – SSE ChNPP, 2005. (Rus)
3. SIP09-2-001 NI 03 RPT 038 03. Analysis of conceptual design solutions for the "early" dismantling of unstable OS structures, taking into account two options for "integrated dismantling/handling" and dismantling with deferred treatment. – SSE ChNPP, 2014. – 161 p. (Rus)
4. Kuznetsov V., Ostretsov I., Toponov A., Shingarkin M. The report "Assessment of Risks of Irradiation of the Russian Population". [http://www.seu.ru/projects/metal/report_version_5\[0\].doc](http://www.seu.ru/projects/metal/report_version_5[0].doc) (Rus)
5. ДГН 6.6.1.-6.5.001-98. Norms of Radiation Safety (NRBU-97). – Kyiv: The Ministry of Health of Ukraine, 1997. (Ukr)
6. Cost-Benefit Analysis in the Optimization of Radiation Protection. ICRP Publication 37. Ann. ICRP 10 (2-3), 1983.
7. ICRP Publication #55. "Optimization and Decision-Making in Radiological Protection" A report of a Task Group of Committee 4 of the International Commission on Radiological Protection, Oxford, New York-Toronto, Pergamon Press, 1988. – 60 p.
8. Commission of the European communities, ALARA: From Theory Towards Practice, Rep. EUR 13796, CEC, Luxembourg, 1991.
9. National council on radiation protection and measurements, Dose Control at Nuclear Power Plants, NCRP Rep. No. 120, NCRP, Bethesda, MD (1994).
10. SC-1. LP-6. A protective structure with technological life support systems and the necessary infrastructure. Vol. 5. Management of radioactive waste and solutions for decontamination of equipment and structures. SIP-N-KP-22-E06_TEN-050_01/99-925.100.011.OT05. (Rus)
11. Shulga N. A., Blinova I. V., Sokolova I. D. Technology of decontamination of equipment during decommissioning of nuclear installations // Atomnaya tekhnika za rubezhom. – 2007. – № 7. – P. 3. – 8. (Rus)
12. Mutin T. Yu. Laser decontamination of metal surfaces: avtoref. kand. techn. nauk. – Sankt-Peterburg, 2012. – 18 p. (Rus)
13. The program of scientific and technical support at the stages of commissioning and operation of NSC-OC, ChNPP TV Inv. № 16 from 22.12.2016. (Ukr)

Надійшла 17.03.2017

Received 17.03.2017