НАДІЙНІСТЬ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА БЕЗПЕКА ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ І СИСТЕМ

УДК 621.311.183

С.В. ШУЛЬЖЕНКО, канд. техн. наук, ст. наук. співр., **О.Л. РАДЧЕНКО**, канд. техн. наук,
П.В. ТАРАСЕНКО, канд. хім. наук,
Інститут загальної енергетики НАН України,
вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03680, Україна

СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМИ ПОВОДЖЕННЯ З РАДІОАКТИВНИМИ ВІДХОДАМИ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Наведено поточний стан та прогноз утворення радіоактивних відходів (РАВ) в процесі проектної експлуатації атомних електростанцій України. Проаналізовано наявні світові підходи та методи класифікації РАВ, які зумовлюють особливості поводження з ними, зокрема, вимоги до сховищ для їх зберігання або захоронення. Визначено заходи щодо розділення радіоактивних відходів в умовах України для оптимізації кількості та типу сховищ радіоактивних відходів.

Ключові слова: атомні електростанції, проектна експлуатація, радіоактивні відходи, сифікація, сховища радіоактивних відходів.

В світі на атомних електростанціях (АЕС) станом на лютий 2015 р. експлуатували близько 435 ядерних реакторів з сумарною потужністю понад 370 ГВт (ел.). Для забезпечення роботи цих реакторів потрібно щороку близько 78 тис. тонн закису-окису урану, що містять 66 тис. тонн урану [1]. Станом на 31 грудня 2015 р. за даними IAEA в світі експлуатували вже 441 ядерний реактор сумарною потужністю 382,9 ГВт (ел.), що додатково збільшило потребу в ядерному паливі. Використання такої великої кількості радіоактивних матеріалів в роботі АЕС робить їх одним з найбільших джерел радіоактивних відходів (РАВ) в світі. В перспективі в світі можна очікувати нарощування потужностей АЕС та, як наслідок, збільшення обсягів утворення РАВ, оскільки значення середньозваженої собівартості електричної енергії (LCOE), виробленої на АЕС, станом на 2015 р. в світі є конкурентоздатним відносно технологій виробництва електроенергії, що використовують вугілля та природний газ, а в деяких країнах і вітроелектричні установки (ВЕУ) [2] (рис. 1).

© С.В. ШУЛЬЖЕНКО, О.Л. РАДЧЕНКО,
П.В. ТАРАСЕНКО, 2016

В разі збільшення потужностей АЕС на кожен ГВт нових потужностей буде потрібно додатково близько 150 тонн урану на рік і близько 300–450 тонн урану для першого завантаження палива [1].

Станом на 2016 р. в Україні експлуатується чотири АЕС з 15 енергоблоками. За встановленою потужністю енергоблоків АЕС Україна посідає 7 місце в світі. Загальна встановлена потужність діючих українських енергоблоків за даними ДП НЕК Укренерго становить 13835 МВт(ел.). В Україні до 2020 р. закінчуються проектні терміни експлуатації 9 енергоблоків АЕС [3].

Робота атомних електростанцій в Україні регламентована відповідною законодавчою базою, яка відповідно до політичних рішень має поступово гармонізуватись із законодавством ЄС, зокрема, відповідно до Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони (відповідний Закон України ухвалено у 2014 р.). Зокрема гармонізації та імплементації підлягають такі Директиви ЄС:

1. Директива №96/29/Євратом, що встановлює основні стандарти безпеки для захисту здоров'я працівників та населення від небезпеки, що виникає від іонізуючої радіації.

2. Директива №2006/117/Євратом про нагляд та контроль за перевезенням радіоактивних відходів та відпрацьованого ядерного палива.

3. Директива №2003/122/Євратом про контроль за високоактивними законсервованими та покинутими радіоактивними джерелами.

Положення цих директив мають бути впроваджені до 2017 р. включно відповідно до плану, затвердженого розпорядженням Кабінету Міністрів України «Про імплементацію Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським Співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони» № 874-р від 17.09.2014 р.

Зокрема Директивою №2003/122/Євратом визначено заходи щодо контролю за високоактивними законсервованими та покинутими радіоактивними джерелами, спрямовані запобіганню негативного впливу іонізованого випромінювання на людей та довкілля. В Україні вимоги, що затверджені цією Директивою, регулює Закон України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку». Цей закон та Закон України «Про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання» є головними законодавчими актами в цій сфері, які визначають пріоритет безпеки людини та навколишнього природного середовища.

Велику важливість виключення негативного впливу випромінювання радіоактивних джерел для України визначають такі чинники.

У результаті роботи українських АЕС вже утворено і утворюються РАВ, загальний обсяг яких в 2015 р. оцінено в 95833 м^3, а в разі зняття енергоблоків АЕС з експлуатації додатково буде утворено 41445 м^3 РАВ [4]. В процесі експлуатації енергоблоків АЕС утворюється три основні види РАВ: газоаерозольні, рідкі та

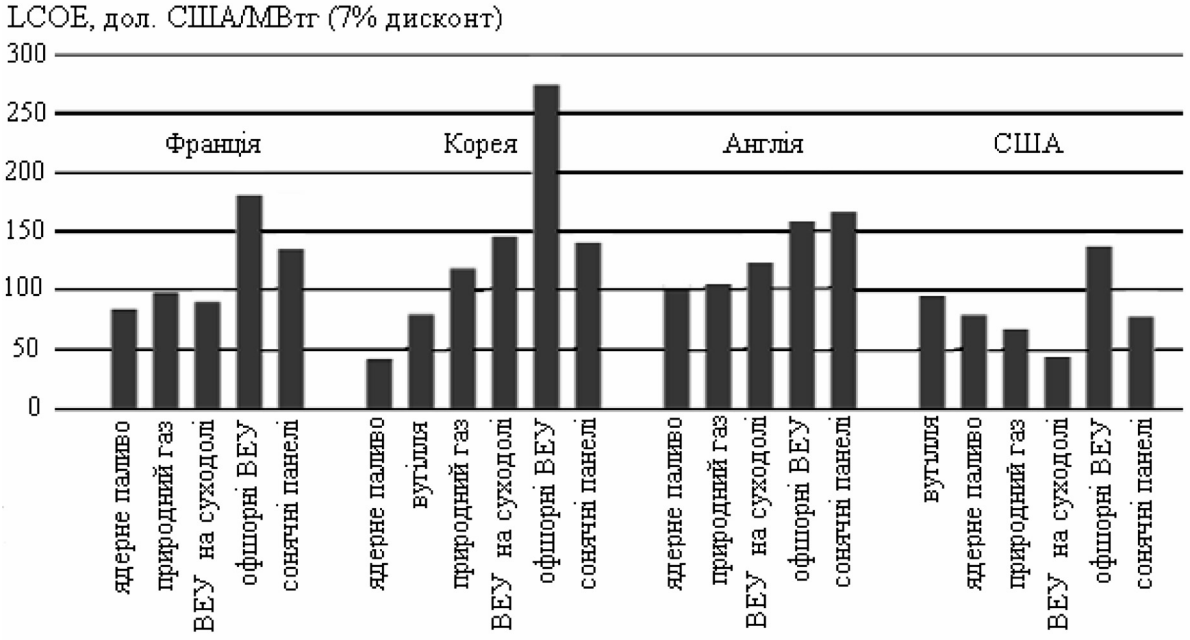

Рис. 1. Порівняння LCOE для різних країн

тверді. В середньому, в залежності від потужності і типу реакторної установки, протягом року на українських АЕС утворюється від 0,15 до 0,35 м^3 рідких і від 0,1 до 0,3 м^3 твердих РАВ на 1 МВт потужності реактора [5] та в середньому на 1 млрд кВт·год виробленої електроенергії 27 і 35,1 м^3 відповідно твердих і рідких РАВ [6]. Пошук ефективних технологій для здійснення заходів з поводження з РАВ ведеться в світі протягом всього часу експлуатації АЕС, але універсальних рішень ще не знайдено.

Газоаерозольні РАВ після їх очищення розсіюють в довкіллі. Досвід експлуатації АЕС свідчить про те, що передбачені при проектуванні АЕС заходи щодо обмеження обсягу газоподібних викидів, дотримання режиму експлуатації очисного обладнання забезпечують дотримання нормативних вимог.

Рідкі РАВ (РРВ) на АЕС утворюються протягом перебігу технологічних процесів експлуатації обладнання та в разі непередбаченого просочування радіоактивних рідин. Система вилучення РРВ на АЕС включає обладнання для їх збору та ємності для тимчасового зберігання. Для переробки РРВ на АЕС використовують термічний, сорбційний і мембранний методи. Через значну кількість радіоактивних і нерадіоактивних рідких забруднювачів, в тому числі через наявність аміаку, мастил, жоден зі згаданих методів очищення окремо не забезпечує очищення РРВ до потрібного ступеня. Тому на АЕС процес очищення РРВ є складною послідовністю операцій, які виконують спеціальні апарати, в котрих реалізують різні методи очищення. Переробка до твердого стану концентратів РРВ відбувається шляхом вміщення їх в зв'язуючі матеріали, які можна поділити на три основні групи: термопластичні (бітум і ін.), термореактивні (смоли поліефірні, карбамідні і ін.), неорганічні (цемент, гіпс, скло та ін.).

Тверді РАВ (ТРВ) утворюються при експлуатації АЕС в процесі запланованих технічного обслуговування і ремонтів енергоблоків. Радіоактивними на енергоблоках АЕС стають частини або деталі обладнання і трубопроводів, інструмент, який використовували при ремонтних роботах, електро- і теплоізоляційні матеріали, одяг, ганчір'я і т. ін.

Перспективність використання ядерної енергії для забезпечення потреб людства було визнано в середині минулого століття. Для досягнення широкого та безпечного застосування цієї енергії ООН було засновано агенцію МАГАТЕ як міжнародну організацію для забезпечення співробітництва у мирному використанні ядерних технологій. Зокрема, МАГАТЕ уповноважена встановлювати норми щодо ядерної та радіаційної безпеки, які можуть застосовувати держави, включаючи в свої відповідні нормативні документи. Одним з напрямів діяльності МАГАТЕ в сфері поводження з РАВ є їх класифікація. Вперше норми МАГАТЕ з класифікації РАВ було опубліковано в 1970 р., а в 2011 р., з урахуванням набутого міжнародного досвіду, було видано Керівництво з безпеки № GSG-1, де викладено нову систему класифікації РАВ [7], яка має рекомендаційний характер. Згідно з цією класифікацією РАВ поділяють на 6 класів відповідно до способу захоронення або зберігання, що дозволяє одразу розподіляти РАВ після їх утворення. Критерієм поділу РАВ за класами є їх активність без надання кількісних характеристик. Ці характеристики має визначати кожна держава індивідуально. Така класифікація може бути використана і в Україні відповідно до можливостей її реалізації замість існуючої, яка має певні недоліки.

За системою класифікації, яка нині діє в Україні, РАВ поділяють на [8]:

– 2 типи за терміном виведення з-під контролю до та після 300 років з початку захоронення;

– 4 групи за показником «рівень вилучення», який визначає значення активності (вимірюється в кБк/кг);

– 3 категорії за показником питомої активності (вимірюється в кБк/кг);

– види – тверді, рідкі, газоподібні.

Такий поділ РАВ не дає однозначної оцінки для обрання способу їх зберігання або захоронення. Крім того, захоронення передбачено відповідно до типу РАВ в трьох різновидах сховищ: поверхневих та приповерхневих (на термін до 300 років) і в стабільних глибоких геологічних формаціях (на термін більше 300 років). Відповідно до класифікації МАГАТЕ, згідно з оцінкою [4], в умовах проектної експлуатації АЕС в Україні будуть утворюватись РАВ 4-х класів (з 3-го по 6-й): дуже низькоактивні, низькоактивні (потребують надійної ізоляції на кілька сотень років), середньоактивні (не потребують або обмежено потребують відве-

дення тепла, потребують захоронення на глибинах від десятків до сотень метрів) та високоактивні (потребують відведення значного обсягу тепла, потребують захоронення на глибинах в сотні та більше метрів у стабільних геологічних формаціях). Для захоронення цих класів РАВ за класифікацією МАГАТЕ будуть потрібні відповідні поверхневі та приповерхневі сховища, сховища в геологічних структурах на проміжній глибині та глибокі. Іншими словами, використовуючи класифікацію МАГАТЕ можна більш детально визначити потреби у створенні сховищ відповідного типу для РАВ. Тому розподіл РАВ відповідно до їх активності за рекомендацією МАГАТЕ є таким, що дозволяє їх групувати ще на стадії переробки відповідно до потенційної небезпечності і дає можливість одразу визначити способи переробки РАВ та їх безпечного ізолювання від довкілля.

Можливості захоронення та/або безпечного зберігання в Україні РАВ, які класифіковано згідно з [7], можна оцінити таким чином. Сховища поверхневі та приповерхневі є такими, що можуть бути спроектовані та піддані відповідним випробуванням з метою визначення їх придатності. Такі роботи вже започатковано для комплексу «Вектор» у Чорнобильській зоні відчуження. Конструкція та експлуатація таких сховищ повинна забезпечити безпечне довгострокове зберігання РАВ з урахуванням набутого досвіду. Наприклад, практичний досвід експлуатації залізобетонних сховищ для РАВ на комбінатах «Радон» свідчить [9], що через 30–40 років після розміщення в них відходів зафіксовано вихід радіонуклідів в довкілля.

Сховища в геологічних формаціях можуть бути створені лише у вже існуючих геологічних структурах за обмежених можливостей визначення їх властивостей. Потенційну спроможність створення в Україні таких сховищ РАВ можна оцінити таким чином. Основною умовою безпечного та довготривалого захоронення РАВ є стабільність структур, в яких здійснено таке захоронення, і які можуть гарантовано забезпечити як радіаційну безпеку навколишнього середовища, так і відсутність негативних наслідків від випромінювання тепла продуктами поділу. Найбільш надійним методом ізоляції радіоактивних матеріалів вважають їх захоронення в кристалічних породах (граніт, базальт), соляних пластах та водонепроникних глинистих структурах. Шари граніту та соляні пласти є поширеними на території України і їх вважають цілком стабільними геологічними структурами. Загалом можна вважати, що в Україні існують потенційні природні можливості для спорудження необхідних сховищ, потрібних для захоронення РАВ, що утворились за умов проектної експлуатації АЕС, в разі врахування класифікації МАГАТЕ.

Організаційні засади щодо створення сховищ РАВ різних типів в Україні можна вважати такими, що визначені. Законом України «Про Загальнодержавну цільову екологічну програму поводження з радіоактивними відходами» визначено заходи з реалізації державної політики у сфері поводження з радіоактивними відходами, спрямованої на захист довкілля, життя і здоров'я населення від дії іонізуючого випромінювання, серед яких передбачено гармонізацію вітчизняного законодавства з законодавством ЄС та врахування рекомендацій МАГАТЕ в сфері ядерної безпеки, проведення пошукових та інших робіт зі створення сховищ РАВ у геологічних структурах. Стратегією поводження з радіоактивними відходами в Україні [6], метою якої є завершення створення та забезпечення ефективного функціонування в Україні цілісної системи поводження з РАВ, затверджено заходи щодо досягнення безпечного поводження (включаючи захоронення) з РАВ всіх типів, які були накопичені в попередні періоди, виникають під час поточного використання ядерної енергії і утворюватимуться у майбутньому, серед яких проектування та будівництво сховищ РАВ, в тому числі і в геологічних структурах.

Головна проблема поводження з РАВ – неможливість скорочення терміну їх негативного впливу на довкілля та організм людини, оскільки цей вплив визначається виключно значенням періоду напіврозпаду радіонукліда та типом іонізуючого випромінювання. Тому контрольованою величиною є концентрація активності РАВ, яка відповідає «рівню вилучення» регламентованого уповноваженими державними органами. Ними є Міністерство охорони здоров'я (МОЗ) та Державна інспекція ядерного регулювання (ДІЯР).

В табл. 1 наведено затверджені наказом МОЗ від 02.02.2005 № 54 граничні питомі активності різних груп радіоізотопів в ТРВ, які визначено як «рівні вилучення».

За наявності у складі РАВ кількох радіоізотопів згідно з наказом ДІЯР від 01.07.2010 № 84 рівень вилучення для такої суміші повинен відповідати умові:

Таблиця 1 – Класифікація ТРВ за критерієм «рівень вилучення»

Група РАВ	Тверді РАВ	Рівень вилучення, кБк/кг
1	Трансуранові α-випромінюючі радіоізотопи	0,1
2	α-випромінюючі радіоізотопи (за виключенням трансуранових)	1
3	β-, γ-випромінюючі радіоізотопи (за винятком віднесених до групи 4)	10
4	^{3}H, ^{14}C, ^{36}Cl, ^{45}Ca, ^{53}Mn, ^{55}Fe, ^{59}Ni, ^{63}Ni, ^{93m}Nb, ^{99}Tc, ^{109}Cd, ^{135}Cs, ^{147}Pm, ^{151}Sm, ^{171}Tm, ^{204}Tl	100

$$\sum_{i=1}^{n}\left(A_i / A_i^{вил}\right) \le 1, \qquad (1)$$

де A_i – фактична питома активність кожного радіоізотопу з суміші на момент вилучення, кБк/кг;

$A_i^{вил}$ – питома активність кожного радіоізотопу, яка є для нього регламентованим значенням рівня вилучення на момент вилучення, кБк/кг.

Згідно з наказом МОЗ від 02.02.2005 № 54 РАВ поділяють за значенням періоду напіврозпаду:

– короткоіснуючі – період напіврозпаду до 30 років, з більш детальним поділом:
- період напіврозпаду до 18 діб;
- період напіврозпаду до 3-х місяців;
- період напіврозпаду більше 3-х місяців;

– середньоіснуючі – період напіврозпаду від 10 до 100 років;

– довгоіснуючі – період напіврозпаду більше 100 років.

За значенням початкової активності (на момент початку спостереження) РАВ поділяють на 3 категорії – низько-, середньо- та високоактивні, але діапазони значень активності для цих категорій включають числові значення, які одночасно відносяться до різних категорій.

Є пропозиції щодо впровадження додаткових категорій РАВ – особливо низькоактивні, довгоіснуючі середньоактивні. В той самий час Законом України «Про поводження з радіоактивними відходами» визначено поділ РАВ на довгоіснуючі (звільнення від контролю після 300 років зберігання) та короткоіснуючі (звільнення від контролю до 300 років зберігання). Такий поділ не має прямого зв'язку зі значеннями періодів напіврозпаду та початковими значеннями активності радіоізотопів. Таким чином, наявну класифікацію РАВ, що запроваджена в Україні, доцільно вдосконалити для забезпечення чіткого усвідомлення предмету та змісту контролю. Наприклад, в Російській Федерації це здійснено шляхом використання різних термінів, а саме – «долгоживущие и короткоживущие» для періоду напіврозпаду та «долгосуществующие и короткосуществующие» з точки зору зняття з регулюючого контролю.

Поділ РАВ за групами, класами і т. ін. не дає можливості визначити спосіб та термін їх зберігання або захоронення. Обов'язковим має бути врахування початкової активності та значення періоду напіврозпаду ізотопів в РАВ, оскільки активність ізотопу визначають за відомими залежностями:

$$A_i(t) = A_i(0)\cdot e^{-\lambda_i t},\ A_i = \\ = \lambda_i \cdot N_i,\ \lambda_i = 0{,}693/T_i, \qquad (2)$$

де T_i – період напіврозпаду i-го ізотопу в одиницях часу, $A_i(0)$ – значення активності i-го ізотопу на момент початку обчислення процесу його розпаду; N_i – кількість ядер i-го радіонукліда.

Зазвичай РАВ є субстанцією, яка містить суміш радіонуклідів з наперед невідомими кількістю та складом. Якщо ці дані відсутні, то нема можливості визначити термін їх зберігання/захоронення з використанням залежностей (1) та (2) і, відповідно, вимоги до захисного бар'єра (типу сховища, організаційних заходів). В табл. 2 наведено характеристики ізотопів, які

Таблиця 2 – Характеристики деяких ізотопів РАВ

№ з/п	Ізотоп	Період напіврозпаду	Початкова активність, Бк/г	Час, потрібний для виведення з-під нагляду (концентрація 1 г ізотопу на 100 кг РАВ), рік	Група РАВ (згідно з табл. 1)
1	^{56}Mn	2,58 год	$8{,}0\cdot10^{17}$	0,01	3
2	^{64}Cu	12,8 год	$1{,}41\cdot10^{17}$	0,05	
3	^{59}Fe	44,5 діб	$1{,}83\cdot10^{15}$	3,75	
4	^{58}Co	70,8 діб	$1{,}17\cdot10^{15}$	5,84	
5	^{54}Mn	312,2 діб	$2{,}85\cdot10^{14}$	24,03	
6	^{134}Cs	2,06 років	$4{,}77\cdot10^{13}$	52,56	
7	^{60}Co	5,27 років	$4{,}17\cdot10^{13}$	133,43	
8*	^{90}Sr+	29,2 років	$5{,}02\cdot10^{12}$	650,11**	
	^{90}Y	64,26 год			
9*	^{137}Cs+	30,0 років	$3{,}2\cdot10^{12}$	648,43**	
	^{137m}Ba	153 сек			
10	^{239}Pu	$2{,}44\cdot10^{4}$ років	$2{,}3\cdot10^{9}$	$3{,}53\cdot10^{5}$	1
11	^{235}U	$7{,}07\cdot10^{8}$ років	$7{,}93\cdot10^{4}$	$2{,}11\cdot10^{9}$	2

* процес розпаду з утворенням «дочірніх» радіонуклідів (вказані після знаку +),
** без урахування «дочірніх» радіонуклідів.

можуть бути в складі ТРВ, отриманих після переробки РАВ з першого циркуляційного контуру реактора ВВЕР-1000 [10], та розрахований за залежністю (2) час, потрібний для виведення їх поодинці з-під нагляду.

Як видно з даних табл. 2, навіть незначна домішка ^{90}Sr, а тим більше ^{239}Pu в складі РАВ, може значно збільшити необхідний термін їх безпечного зберігання, який можливо забезпечити лише в разі захоронення в геологічних структурах. Тому під час переробки різних видів РАВ до отвердженого стану є важливим визначати не тільки їх активність, як запропоновано МАГАТЕ, а і склад ізотопів. Це дасть можливість запобігти в процесі переробки змішуванню РАВ з ізотопами зі значно відмінними термінами очікування виведення їх з-під нагляду, що, в свою чергу, створить умови для оптимізації визначення типів та обсягів сховищ РАВ.

Фінансове забезпечення розроблення сховищ для РАВ має різні оцінки. Проте можна оцінити потребу у фінансуванні проектного забезпечення таких сховищ на тому самому рівні, що і для відпрацьованого ядерного палива. За даними НАЕК «Енергоатом» обсяг фінансування проекту Централізованого сховища відпрацьованого ядерного палива в Чорнобильській зоні відчуження становить 78 млн дол. США. В разі збереження обсягів виробництва електроенергії АЕС України при впровадженому тарифі для них близько 50 коп/кВт·год, зазначений обсяг фінансування проекту збільшить тариф для АЕС України протягом року на 4,6% або 2,3 коп/кВт·год. Враховуючи те, що потреба у фінансуванні проектних робіт може існувати більше року, збільшення тарифу для АЕС буде меншим.

ВИСНОВКИ

1. На сучасному етапі розвитку електрогенеруючих потужностей слід очікувати збільшення потужностей атомних електростанцій та, як наслідок, збільшення обсягів утворюваних ними радіоактивних відходів.

2. Система класифікації радіоактивних відходів, які утворюються під час проектної експлуатації атомних електростанцій в Україні, не в повній мірі дозволяє визначати заходи з поводження з ними та типи сховищ для їх тривалого зберігання або захоронення.

3. Система класифікації радіоактивних відходів, запропонована в Керівництві з безпеки № GSG-1 МАГАТЕ 2011 р., запроваджує розподіл радіоактивних відходів згідно з рівнями їх активності з визначенням типів відповідних сховищ для них, що дозволяє визначати заходи з поводження з цими відходами ще на етапі їх утворення. Кількісні оцінки рівнів активності та конкретні вимоги до сховищ радіоактивних відходів кожна держава має визначати індивідуально.

4. Важливою організаційною та технічною проблемою поводження з радіоактивними відходами є їх класифікація на етапі підготовки до зберігання або захоронення з урахуванням як рівня активності, так і значення періоду напівроспаду для запобігання призначенню невиправдано подовженого терміну їх зберігання або захоронення.

5. Можна вважати, що в Україні існують потенційні природні умови для створення різних типів сховищ радіоактивних відходів на сучасному рівні знань про геологічні структури.

6. Фінансове забезпечення проектних робіт зі створення сховищ радіоактивних відходів в Україні цілком можливе за рахунок збільшення тарифу на електричну енергію для АЕС України на 4,6%.

1. *Uranium* Markets [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/uranium-resources/uranium-markets.aspx.

2. *Projected* Costs of Generating Electricity 2015 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.iea.org/Textbase/npsum/ElecCost2015SUM.pdf.

3. *Доповідь* про стан ядерної та радіаційної безпеки в Україні у 2014 році [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.snrc.gov.ua/nuclear/doccatalog/document?id=285032.

4. *Проскура М.І.* Оцінка ефективності впровадження в Україні нової схеми класифікації радіоактивних відходів / М.І. Проскура, Л.І. Зинкевич, В.М. Шестопалов, Ю.О. Шибецький, З.М. Алєксєєва, К.І. Жебровська // Ядерна та радіаційна безпека. – 2015. – № 1(65). – С. 34 – 40.

5. *Сайт* по вопросам ядерной безопасности, радиационной защиты и нераспространения ядерного оружия (Uatom.org.) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://uatom.org/index.php/ru/obrashhenye-s-radyoaktyvnymy-othodamy-na-dejstvuyushhyh-aes/.

6. *Кабінет* Міністрів України Розпорядження від 19 серпня 2009 р. № 990-р «Про схвалення Стратегії поводження з радіоактивними відходами в Україні» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/990-2009-%D1%80.

7. *Classification* of Radioactive Waste General Safety Guide. IAEA Safety Standards Series No. GSG-1 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1419_web.pdf.

8. *Электроэнергетика* и охрана окружающей среды. Функционирование энергетики в современном мире [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://energetika.in.ua/ru/books/book-5/part-3/section-3/3-3/3-3-5.

9. *Ольховик Ю.О.* Щодо вибору в'яжучих матеріалів для цементування побутового залишку АЕС з реакторами ВВЕР / Ю.О. Ольховик, П.О. Корчагін // Ядерна енергетика та довкілля. – 2014. – №1. – С. 20–23.

10. *Колобашкин В.М.* Радиационные характеристики облученного ядерного топлива: Справочник / В.М. Колобашкин, П.М. Руб-цов, П.А. Ружанский, В.Д. Сидоренко. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 384 с.

Надійшла до редколегії 15.09.2016 року