

Ю. О. Ольховик*Національний авіаційний університет, просп. Любомира Гузара, 1, Київ, 03058, Україна*

Сольовий плав як визначальний чинник розвитку системи кондиціонування рідких радіоактивних відходів

Ключові слова:

радіоактивні відходи,
кубовий залишок,
сольовий плав,
кондиціонування,
питоме утворення

Розглянуто динаміку щорічного утворення рідких і твердих радіоактивних відходів (РАВ) на АЕС України з реакторами типу ВВЕР, нормованого на виробництво електроенергії. Встановлено, що в останні десять років показники питомого утворення РАВ не демонструють значних варіацій. Зроблено висновок щодо вичерпання можливостей впровадження на АЕС організаційно-технічних заходів з метою мінімізації утворення РАВ. Подальша експлуатація енергоблоків із реакторами ВВЕР буде призводити до достатньо стабільного рівня утворення РАВ, що дає підстави для прогнозування об'ємів їхнього накопичення, планування і реалізації відповідних заходів щодо їхнього кондиціонування з подальшим переданням на захоронення. Таким чином, основною метою поводження з РАВ на діючих АЕС України має бути створення ефективних ліній кондиціонування РАВ із використанням референтних технологій. Зазначено, що внесення змін у національні нормативні документи щодо класифікації РАВ і віднесення сольового плаву до твердих РАВ означають відміну вимог щодо додаткового кондиціонування для передачі сольового плаву на захоронення. У свою чергу це дає підстави для створення простої, надійної й економічно прийнятної технології переробки основної маси рідких РАВ АЕС з реакторами ВВЕР у безпечну форму, придатну для захоронення. Зазначена технологія передбачає максимальне застосування обладнання з переробки відходів, яке вже наявне на майданчиках АЕС, шляхом переробки всього вже накопиченого і утвореного в майбутньому кубового залишку до стану сольового плаву. У результаті будуть сформовані упаковки для захоронення РАВ у складі захисного контейнера, чотирьох контейнерів КРО-200 із сольовим плавом із заповненням пустот стійким геополімером, який є цілком прийнятним за радіаційно-захисними властивостями.

Вступ

Атомна електростанція (АЕС) — виробничо-технологічний комплекс, спроектований для виробництва енергії з використанням ядерної установки. Виробництво електроенергії на АЕС ґрунтується на перетворенні енергії поділу ядерного палива спочатку в теплову, а потім в електричну енергію. Цей

технологічний процес супроводжується утворенням радіоактивних відходів (РАВ), що є найбільш значущим екологічним фактором діяльності будь-якої АЕС як на етапі нормальної експлуатації, так і під час зняття ядерної установки з експлуатації. Наразі в Україні діють 4 атомні електростанції з 15 енергоблоками типу ВВЕР зі встановленою потужністю 13 тис. 835 МВт.

© Ю. О. Ольховик, 2022

Технічна політика оператора діючих АЕС України — Державного підприємства «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом» (ДП «НАЕК «Енергоатом») — спрямована на створення сучасної інфраструктури у сфері поводження з РАВ [1], яка повинна забезпечити:

виконання робіт із мінімізації обсягів утворення РАВ;

вивільнення об'ємів у сховищах для тимчасового зберігання РАВ на промайданчиках АЕС шляхом їхньої переробки/кондиціонування;

передавання кондиційованих РАВ далі до спеціалізованого підприємства для захоронення.

Аналіз вихідних даних

Планування та контроль діяльності у сфері поводження з РАВ ґрунтуються на даних щорічної звітності щодо поводження з РАВ АЕС України [2].

За час експлуатації українських АЕС із реакторами типу ВВЕР накопичено значний об'єм твердих (ТРВ) і рідких (РРВ) РАВ різних категорій. Загалом станом на 31.12.2021 р. у сховищах середньоактивних РРВ накопичено 8 783 м³ кубового залишку (КЗ), 1 642 м³ відпрацьованих фільтруючих матеріалів (ВФМ) та зневодненого шламу (ЗШ). Накопичені ТРВ включають 39 347 м³ низькоактивних відходів (НАВ), 2 163 м³ середньоактивних (САВ), 225 м³ високоактивних (ВАВ) і 14 498 м³ сольового плаву (СП) з огляду на зміну його класифікації і віднесення до ТРВ [1].

Розподіл накопичених на АЕС відходів за категоріями наведений на рис. 1.

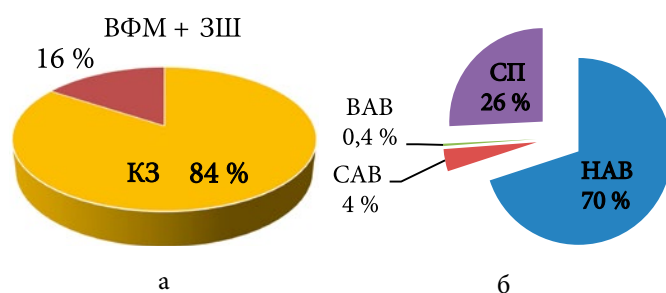


Рис. 1. Розподіл обсягів накопичених РРВ (а) та ТРВ (б) станом на 31.12.2021 р.

Для здійснення єдиної технічної політики, забезпечення безпечного функціонування та удосконалення системи поводження з РАВ на АЕС України введено в дію «Комплексну програму поводження з радіоактивними відходами в ДП «НАЕК «Енергоатом»» ПМ-Д.0.18.174-16 (далі — Комплексна програ-

ма), одним з основних напрямів якої є мінімізація утворення обсягів РАВ під час експлуатації АЕС.

Ключовим елементом для оцінок дієвості заходів, спрямованих на мінімізацію утворення РАВ, є показник питомого утворення кожної категорії РАВ на 1 ГВт · год виробленої електроенергії. Чисельні значення цього показника дозволяють відслідковувати динаміку питомого утворення РАВ на різних станціях і порівнювати показники різних операторів, які експлуатують аналогічні ядерні установки.

Загальна кількість електроенергії, виробленої на АЕС України в період 2005–2020 років, наведена на рис. 2. З огляду на відсутність достовірної інформації щодо обсягів утворення РАВ у більш ранній період на Південноукраїнській АЕС, узагальнені дані щодо показників питомого утворення РАВ для ДП «НАЕК «Енергоатом»» розраховані для КЗ із 2005 року, а для ТРВ з 2010 року.

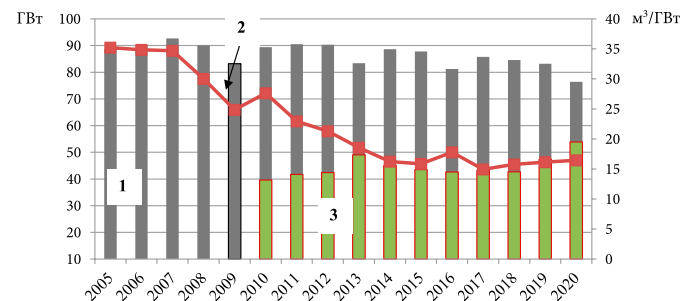


Рис. 2. Щорічне виробництво електроенергії (1) і питомі показники утворення КЗ (2) і ТРВ (3) в цілому для ДП «НАЕК «Енергоатом»». Для даних 2 і 3 використана допоміжна вісь значень

Мета досліджень

Метою роботи є аналіз тенденцій питомого утворення РАВ на діючих АЕС України з формуванням пропозицій щодо оптимальної, економічно прийнятної схеми кондиціонування РРВ до стану, придатного для передання на захоронення. Це завдання передбачає максимальне застосування обладнання з переробки відходів, яке вже наявне на майданчиках АЕС.

Основний матеріал дослідження

Аналіз наведених даних свідчить, що вплив виконаних у відокремлених підрозділах АЕС адміністративних та організаційних заходів, спрямованих на мінімізацію утворення РАВ, практично вичерпався. Питоме утворення низькоактивних ТРВ залишається практично незмінним.

Більш ефективними виявилися заходи щодо зменшення утворення КЗ — з 2005 року цей показник зменшився більш ніж удвічі та з 2014 року є практично сталим.

Детальніший розгляд даних щодо питомого утворення КЗ на АЕС України з реакторами ВВЕР дає підстави стверджувати, що для Запорізької та Хмельницької АЕС зазначений показник є практично незмінним із 2003 року, про що свідчать схожі величини середнього й медіанного значень (табл. 1).

Цікаво порівняти показники питомого утворення РАВ окремих АЕС України і ДП «НАЕК «Енергоатом»» в цілому з аналогічними показниками для ВВЕР Російської Федерації (рис. 3). Помітно, що за питомим утворенням ТРВ реакторні установки мають схожі показники, що підтверджує висновок про низьку ефективність подальших адміністративно-організаційних заходів, спрямованих на мінімізацію утворення цих РАВ. Навпаки, реалізація рішень щодо продовження строку експлуатації енергоблоків, яке супроводжується масштабною заміною обладнання, веде до зростання зазначеного показника. Якщо підвищене утворення ТРВ на Рівненській АЕС у 2003–2004 роках пояснюється добудовою енергоблока № 4, то в 2009 році виконувалися заходи з продовження експлуатації енергоблоків 1 і 2 (рис. 4).

Таким чином, подальші дії щодо поводження з ТРВ мають бути спрямовані на створення ефективних технологічних ліній їхнього кондиціонування з подальшою передачею на захоронення.

На відміну від ТРВ, процес утворення РРВ на АЕС із реакторами типу ВВЕР має індивідуальні особливості, що обумовлено багатьма факторами, серед яких вирізняються водно-хімічний режим експлуатації реакторної установки, хімічний склад і мінералізація води, що застосовується для охолодження, а також герметичність трубопроводів і басейнів витримки ядерного палива. Ці особливості наочно продемонстровано на рис. 5. Кубовий залишок є про-

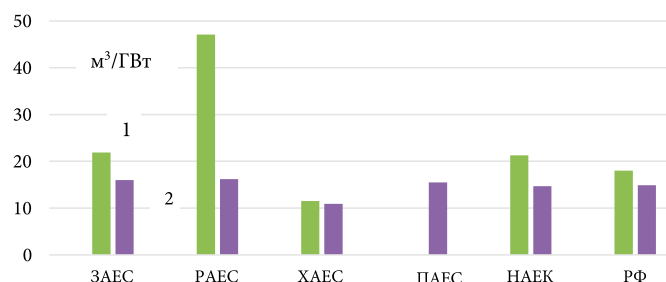


Рис. 3. Порівняння медіани питомого утворення сольового плаву (1) і ТРВ (2) на АЕС України і РФ з реакторами ВВЕР

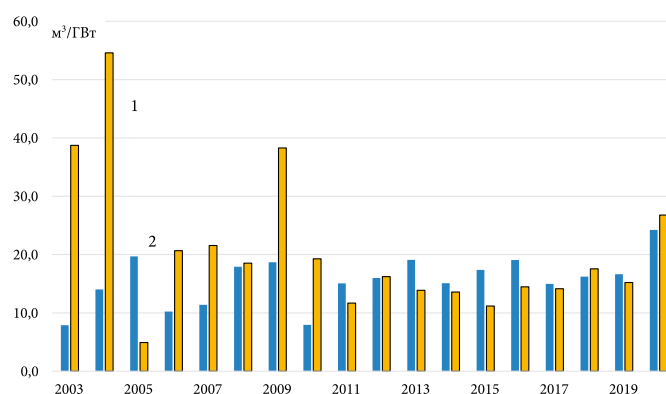


Рис. 4. Порівняння питомого утворення ТРВ на Рівненській (1) і Запорізькій (2) АЕС

дуктом переробки трапних вод на випарних апаратах систем спецводоочищення СВО-3, СВО-7. Звичайно, соленаповнення КЗ на кожній станції може відрізнятися, але багаторічний стабільний режим експлуатації випарних апаратів дає змогу аналізувати відповідні тенденції питомого утворення КЗ. Для Запорізької АЕС чітко прослідковується період стійкого зменшення питомого утворення КЗ з 2003 по 2009 рік, пов'язаний із впровадженням адміністративно-організаційних заходів, після чого процес практично стабілізувався. Для Хмельницької АЕС питоме утворення КЗ практично стабільне, крім періоду

Таблиця 1. Порівняння величин питомого утворення РАВ на діючих АЕС України

АЕС	Питоме утворення, м³/ГВт					
	кубовий залишок			низькоактивні ТРВ		
	середнє	стандартне відхилення	медіана	середнє	стандартне відхилення	медіана
Запорізька	24	5,2	21,9	24,2	4,2	16
Рівненська	52,4	34,9	47,1	20,6	12,1	16,2
Хмельницька	12,5	5,1	11,5	13,1	5,7	10,9
Південноукраїнська	–	–	–	15,5	5,4	15,5

введення в експлуатацію енергоблока Х2. Найбільші зміни помітні для Рівненської АЕС, для якої заходи з реконструкції басейна витримки та заміни стелажів басейна витримки блока № 2 призвели до зниження протікань і, відповідно, до зменшення величини питомого утворення КЗ у 4–5 разів (див. рис. 5).

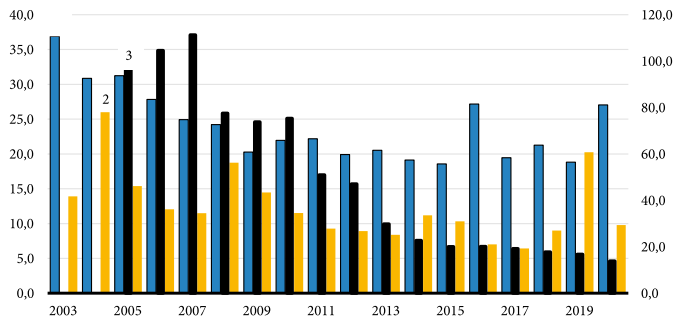


Рис. 5. Порівняння питомого утворення КЗ на Запорізькій (1), Хмельницькій (2) і Рівненській (3) АЕС. Для показників Рівненської АЕС використано додаткову вісь значень

Таким чином, подальша експлуатація енергоблоків із реакторами типу ВВЕР буде призводити до достатньо стабільного рівня утворення РАВ, що дає підстави для прогнозування об'ємів їхнього накопичення і реалізації відповідних заходів щодо їхнього кондиціонування з подальшою передачею на захоронення. Наразі на Запорізькій та Рівненській АЕС уже введені в експлуатацію комплекси з переробки низькоактивних ТРВ, аналогічний комплекс створюється на Хмельницькій АЕС і запроєктований на Південноукраїнській АЕС. Такий підхід обумовлений як значними обсягами накопичених у сховищах АЕС твердих низькоактивних РАВ, так і достатньо простими й апробованими технологіями переробки зазначених відходів (спалювання, пресування, цементування).

Стислий аналіз наявної науково-технічної інформації щодо доступних і економічно доцільних технологій переробки РРВ з урахуванням специфіки їхнього утворення й накопичення, притаманних для діючих українських АЕС, наведений у [3]. Але з моменту зазначеної публікації внесено зміни до «Основних санітарних правил забезпечення радіаційної безпеки України» [4] в частині класифікації сольового плаву і віднесення його до ТРВ.

Зазначені зміни в класифікації РАВ означають відміну вимог щодо додаткового кондиціонування для передавання сольового плаву на захоронення, що, у свою чергу, приводить до висновку щодо недоціль-

ності застосування технології плавлення в індукційному плавнику з формуванням боросилікатного скла.

Рішення про віднесення сольового плаву до ТРВ дає підстави для відмови від застосування для високомінералізованого рідкого середовища зі складним хімічним складом, яким є КЗ, сорбційних технологій очищення. Відомо, що багатокомпонентний склад органічних речовин, присутніх у трапних водах і, відповідно, сконцентрованих у КЗ, негативно впливає на ефективність процесів сорбції, які використовують для очищення РРВ від радіоактивних катіонів. Тому реалізація сорбційних технологій потребує попередньої обробки РРВ, що включає окиснення, фільтрацію осаду, що утворюється під час окиснення, і подальше селективне очищення від радіоактивного цезію ферроціанідними сорбентами і від ^{90}Sr сорбентами на основі гідроксиду марганцю. Наявний досвід застосування у промислових масштабах (АЕС «Пакш», Угорщина; Кольська АЕС, РФ) сорбційних технологій свідчить, що застосоване технологічне обладнання має доволі низьку продуктивність, високу вартість і, відповідно, потребує значних фінансових витрат. Але водночас недорогі селективні сорбенти є невід'ємним і ефективним засобом мінімізації надходження радіонуклідів у навколишнє середовище в разі аварійних ситуацій з утворенням великих об'ємів радіоактивної води [5].

Вищезазначене дає змогу розглядати як найбільш імовірний і економічно доцільний варіант кондиціонування КЗ шляхом глибокого випарювання з формуванням сольового плаву. У цьому випадку поводження з сольовим плавом вимагатиме виконання особливих умов під час захоронення. Такою умовою, що забезпечить ізоляцію радіонуклідів від довкілля протягом 500–600 років, може стати формування упаковки РАВ у складі універсального захисного залізобетонного контейнера УЗЗК ТУ У 29.2-26444970-005, призначеного для перевезення та захоронення низько- і середньоактивних РАВ у приповерхневих сховищах, із розміщенням у ньому чотирьох контейнерів КРО-200 із сольовим плавом.

Таким чином, віднесення сольового плаву до ТРВ дає підстави для створення простої, надійної й економічно прийнятної технології переробки основної маси РРВ АЕС із реакторами типу ВВЕР у безпечну форму, придатну для захоронення. На думку автора, ця схема має передбачати:

переведення всього накопиченого на сьогодні й утвореного в майбутньому КЗ у сольовий плав із застосуванням наявних на АЕС установок глибокого випарювання;

розфасовування сольового плаву в сертифіковані контейнери КРО-200;

розміщення заповнених контейнерів КРО-200 в універсальні захисні залізобетонні контейнери УЗЗК ТУ У 29.2-26444970-005, призначені для перевезення та захоронення низько- і середньоактивних РАВ у приповерхневих сховищах;

заповнення пустот контейнера шлаколужним компаундом, що виступає додатковим інженерним бар'єром, який забезпечить стабільність упаковки й ізоляцію радіонуклідів від довкілля протягом 500–600 років;

крім того, шлаколужний компаунд може бути застосований як стійка матриця для іммобілізації ВФМ, накопичених у сховищах АЕС. Це дає можливість одночасного захоронення в одній упаковці сольового плаву і ВФМ;

тимчасове зберігання упаковок РАВ на майданчику АЕС до моменту транспортування для захоронення у сховищах Центрального підприємства з переробки РАВ.

Наведена схема не потребує створення на майданчиках АЕС нового обладнання, оскільки установки глибокого випарювання на сьогодні впроваджені на всіх станціях, виробництво контейнерів забезпечено виробничими потужностями ДП «НАЕК «Енергоатом»», установку цементування впроваджено у складі комплексу з переробки ТРВ на Рівненській АЕС. Щоправда, виникає проблема транспортування важкого 15-тонного залізобетонного контейнера УЗЗК у виробничих приміщеннях спецкорпусів АЕС.

Створена упаковка буде цілком прийнятною з погляду радіаційно-захисних властивостей навіть у разі розміщення в контейнерах КРО-200 «свіжого» сольового плаву з помітним вмістом (до 20% сумарної активності) радіонукліду ^{60}Co [6].

Безумовно, створення системи кондиціонування РРВ буде пов'язане зі значними фінансовими витратами, адже для розміщення більш як 70 000 накопичених на поточний момент контейнерів типу КРО-200 знадобиться 18 000 залізобетонних контейнерів УЗЗК загальною вартістю орієнтовно 18 млн доларів, і впродовж часу експлуатації енергоблоків із реакторами ВВЕР об'єм сольового плаву у сховищах АЕС буде лише зростати. Саме сольовий плав є головним чинником, що визначає подальший вибір розвитку і впровадження технологій кондиціонування РРВ і, відповідно, об'єми витрат оператора реакторних установок як на закупівлю й експлуатацію

обладнання, так і на логістику перевезень упаковок РАВ до сховищ для захоронення. Вищенаведена схема кондиціонування РРВ АЕС України без сумніву має отримати техніко-економічне обґрунтування з урахуванням перспектив розвитку атомної енергетики України, продовження строків експлуатації діючих енергоблоків, створення нових потужностей і впровадження малих модульних реакторів.

Висновки

1. Вплив виконаних на відокремлених підрозділах АЕС адміністративних та організаційних заходів, спрямованих на мінімізацію утворення РАВ, практично вичерпався. Питоме утворення низькоактивних ТРВ і КЗ з 2009 року залишається практично незмінним.

2. Віднесення сольового плаву до ТРВ дає підстави для створення простої, надійної і економічно прийнятної технології переробки основної маси РРВ АЕС з реакторами ВВЕР у безпечну форму, придатну для захоронення.

3. Накопичений у сховищах АЕС і утворений у майбутньому сольовий плав є головним чинником, що визначає подальший вибір розвитку і впровадження технологій кондиціонування РРВ.

Список використаної літератури

1. Поводження з радіоактивними відходами при експлуатації АЕС ДП «НАЕК «Енергоатом»» (станом на 31.12.2019 р.) [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://www.energoatom.com.ua/uploads/2020/%D0%98%D0%BB%D0%BB.%20%D0%BE%D1%82%D1%87%D0%B5%D1%82_2019.pdf.
2. СОУ НАЕК 019:2015. Поводження з радіоактивними відходами атомних електростанцій України. Види, форми та періодичність звітності.
3. Ольховик Ю. О. Перспективні схеми кондиціонування рідких радіоактивних відходів АЕС України / Ю. О. Ольховик // Ядерна енергетика та довкілля. — 2020. — Вип. 18 (3). — С. 48–56. — doi: 10.31717/2311-8253.20.3.6.
4. Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України: Державні санітарні правила 6.177-2005-09-02 (ОСПУ-2005). — Затверджено наказом МОЗ України № 54 від 02.02.2005.
5. Bondar Yu. V. Synthesis and evaluation of manganese dioxide with layered structure as an adsorbent for selective removal of strontium ions from aqueous solution /

Yu. V. Bondar, S. A. Alekseev // *SN Applied Sciences*. — 2020. — Vol. 2. — Art. 1379.

6. Ольховик Ю. О. Щодо властивостей упаковки для захоронення сольового плаву АЕС України з реакторами ВВЕР у приповерхневих сховищах / Ю. О. Ольховик, Ю. Г. Федоренко, А. М. Розко, Є. В. Рудичев // *Ядерна та радіаційна безпека*. — 2021. — Вип. 90 (2). — С. 65–73.

Yu. O. Olkhovik

*National Aviation University,
1, Liubomyra Huzara ave., Kyiv, 03058, Ukraine*

Salt Melt as a Determining Factor in the Conditioning System Development of Liquid Radioactive Waste of NPPs in Ukraine

The dynamics of annual generation of liquid and solid radioactive waste at Ukrainian nuclear power plants (NPPs) with WWER reactors standardized for electricity production is considered. It is established that in the last ten years the indicators of specific generation of radioactive waste do not show significant variations. The conclusion is made that the possibilities of implementing organizational and technical measures at the NPP in order to minimize the generation of radioactive waste have been exhausted. Further operation of WWER reactors will lead to a fairly stable level of radwaste generation, which provides grounds for forecasting the volume of their accumulation, planning and implementation of appropriate measures for their conditioning with subsequent transfer to landfill. Thus, the main goal of solid radioactive waste management at existing NPPs of Ukraine should be to create efficient solid radiant air conditioning lines using reference technologies. It is noted that the amendments to national regulations on the classification of radioactive waste and the assignment of salt melt to solid radioactive waste mean the abolition of the requirements for additional conditioning for the transfer of salt melt for disposal. In turn, this gives grounds for creating a sim-

ple, reliable and cost-effective technology for processing the bulk of liquid radioactive waste from nuclear power plants with WWER reactors in a safe form suitable for disposal. This technology involves the maximum use of waste processing equipment, which is already available at NPP sites, by processing all already accumulated and formed in the future evaporator bottoms to the state of salt melt. As a result, a package for radwaste disposal will be formed as a part of a protective container, four KRO-200 containers with salt melt with void-filled geopolymer, which is quite acceptable in terms of radiation protection properties.

Keywords: radioactive waste, evaporator bottoms, salt melt, conditioning, specific formation.

References

1. Management of radioactive waste during the operation of NPP of NNEGС “Energoatom” (as of 31.12.2019). Available at: www.energoatom.com.ua/uploads/2020/%D0%98%D0%BB%D0%BB.%20%D0%BE%D1%82%D1%87%D0%B5%D1%82_2019.pdf. (in Ukr.)
2. SOU NNEGС019 : 2015. Management of radioactive waste from nuclear power plants of Ukraine. Types, forms and frequency of reporting. (in Ukr.)
3. Olkhovik Yu. (2020). Perspective schemes of conditioning of liquid radioactive waste of Ukrainian NPPs. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 18, no. 3, pp. 48–56. doi: 10.31717/2311–8253.20.3.6. (in Ukr.)
4. Basic sanitary rules for ensuring radiation safety of Ukraine: State sanitary rules 6.177-2005-09-02 (OSPU-2005). Approved by the Order of the Ministry of Health of Ukraine dated 02.02.2005. (in Ukr.)
5. Bondar Yu. V., Alekseev S. A. (2020). Synthesis and evaluation of manganese dioxide with layered structure as an adsorbent for selective removal of strontium ions from aqueous solution. *SN Applied Sciences*, vol. 2, art. 1379.
6. Olkhovik Yu. O., Fedorenko Yu. G., Rozko A. M., Rudychev Ye. V. (2021). Regarding the properties of package for disposal of salt melt from Ukrainian NPPs with WWER reactors in near-surface disposal facilities. *Nuclear and Radiation Safety*, vol. 90, no. 2, pp. 65–73. (in Ukr.)

Надійшла 27.06.2022

Received 27.06.2022