

Оцінки доз опромінення персоналу, отриманих унаслідок інгаляційного надходження радіоактивних речовин під час спорудження нового безпечного конфайнмента

- **Калиновський Олександр Костянтинович**, канд. техн. наук
Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м. Чорнобиль, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7036-1974>
- **Сізов Андрій Олександрович**, канд. техн. наук, ст. науковий співробітник
Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м. Чорнобиль, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7858-194X>
- **Краснов Віктор Олександрович**
Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м. Чорнобиль, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3774-691X>

Наведено результати розрахунків доз внутрішнього опромінення персоналу, зайнятого на етапі спорудження нового безпечного конфайнмента, за даними моніторингу радіоактивних аерозолів у локальній зоні об'єкта «Укриття». Показано, що максимальні об'ємні активності радіоактивних аерозолів реєструвались у період проведення масштабних земляних робіт, причому річні дози опромінення персоналу, отримані внаслідок інгаляційного надходження радіоактивних речовин (далі – інгаляційні дози), дорівнювали 63 мкЗв/рік, що істотно нижче контрольного рівня 1 мЗв. Основним дозоутворюючим нуклідом у разі внутрішнього опромінення персоналу є ^{241}Am . Обвалення фрагмента покрівлі машзалу об'єкта «Укриття» в 2013 році підтвердило потенційну небезпеку цього об'єкта як потужного джерела радіоактивних аерозолів. Оцінки об'ємних активностей ізотопів ^{241}Am та $^{238-240}\text{Pu}$ в повітрі локальної зони короткочасно (менше двох годин) перевищували їх допустимі середньорічні об'ємні активності для персоналу категорії А – 0,03 Бк/м³. Результати багаторічного моніторингу радіоактивних аерозолів можливо використовувати для ретроспективної оцінки доз опромінення персоналу.

Ключові слова: дози внутрішнього опромінення, об'ємні активності $\Sigma\alpha$ - і $\Sigma\beta$ -довгоіснуючих нуклідів, радіоактивні аерозолі.

© Калиновський О. К., Сізов А. О., Краснов В. О., 2022

Вступ

До забезпечення радіаційної безпеки робіт на Чорнобильській АЕС (ЧАЕС) та об'єкті «Укриття» (ОУ) входить контроль рівня опромінення персоналу станції та підрядних організацій. Для досягнення цієї мети та згідно з вимогами санітарних правил радіаційної безпеки України адміністрацією Державного спеціалізованого підприємства «Чорнобильська АЕС» (ДСП «ЧАЕС») розроблялись контрольні рівні (КР) радіаційної безпеки під час

експлуатації ОУ та на етапах його перетворення в екологічно безпечну систему.

Важливою складовою під час оцінки доз опромінення персоналу є доза внутрішнього опромінення (ДВО) внаслідок інгаляційного надходження радіоактивних речовин, які не піддаються точному інструментальному визначенню, а оцінюються за даними моніторингу об'ємної активності (ОА) $\Sigma\alpha$ - та $\Sigma\beta$ -довгоіснуючих нуклідів (ДІН) у зоні виконання робіт або перебування персоналу. Встановлені КР для ОА $\Sigma\alpha$ - та $\Sigma\beta$ -ДІН у приземному шарі повітря локальної зони забезпечують не перевищення

значення річної ефективної дози внутрішнього опромінення 1 мЗв.

Значення КР ОА радіоактивних аерозолів (РА) та склад контрольованих радіонуклідів в аерозолях періодично переглядалися залежно від розвитку радіаційної ситуації в повітрі локальної зони, розпаду короткоживучих радіонуклідів, технологічної діяльності та радіаційної обстановки, що складалась у місцях виконання робіт.

У 1998 році КР ОА аерозольної суміші α - та β -випромінюючих нуклідів у повітрі локальної зони були на рівні 0,02 та 11 Бк/м³ відповідно. Зважаючи на покращення радіаційної ситуації, після 2000 року КР було переглянуто та знижено за $\Sigma\beta$ -ДІН до 1,5 Бк/м³. Надалі, у 2009 році під час земляних робіт у повітрі локальної зони відбулось погіршення радіаційної ситуації, тому КР для $\Sigma\alpha$ - та $\Sigma\beta$ -ДІН було підвищено до 0,12 і 9 Бк/м³ відповідно. Склад значущих нуклідів чорнобильського генезису (внесок в активність понад 5 %) у суміші РА з 2000 року практично постійний: у $\Sigma\alpha$ -ДІН внесено ізотопи ²³⁸Pu, ²³⁹Pu, ²⁴⁰Pu і ²⁴¹Am, а в $\Sigma\beta$ -ДІН – ізотопи ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr + ⁹⁰Y і ²⁴¹Pu.

Під час розрахунків ДВО необхідно враховувати, по-перше, склад і співвідношення радіонуклідів в аерозолі приземного шару повітря.

По-друге, те, що радіонукліди в аерозолях знаходяться у складі різних хімічних сполук, у різному фізичному стані та належать до різних класів по розчиненню. Так, на початку 2000-х років більше половини активності ¹³⁷Cs (більше 70 %) належало до класу S (важкорозчинні), а друга частина – до класу F (швидкокорозчинні); ⁹⁰Sr частково входив до класу M

(проміжна швидкість розчинення) і, переважно, до класу S; трансуранові елементи (²³⁸⁺³⁹⁺²⁴⁰Pu і ²⁴¹Am) повністю потрапляли до класу S [1], [2].

По-третє, дисперсний склад РА. Дослідження виконані в працях [3]-[5] показали, що медіанний за активністю аеродинамічний діаметр (АМАД) РА чорнобильського генезису варіюється в проміжку 1 – 20 мкм і більше. Виняток – це періоди проведення вогневих робіт (зварювання та різання металу), для яких характерне зростання субмікронної компоненти ¹³⁷Cs. Тому, за консервативної оцінки ДВО, АМАД РА в повітрі локальної зони ОУ приймали рівним 1 мкм.

Матеріали та методи

Моніторинг радіоактивних аерозолів у повітрі локальної зони ОУ. Результати моніторингу РА у приземному шарі повітря локальної зони ОУ на трьох пунктах контролю, розташованих по периметру локальної зони (рисунк 1), є складовою частиною оцінки радіаційної ситуації в приземному шарі повітря. Локальна зона – це територія, прилегла до ОУ, де обов'язкове використання персоналом засобів індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД). РА відбирались прокачуванням повітря аспіраційними установками (АУ) через фільтр ФПП-15-15 площею близько 0,8 м². Період експозиції фільтрів лежав у діапазоні 13 – 17 діб, а під час проведення радіаційно-небезпечних робіт, пов'язаних з підвищенням пилопідійманням, він скорочувався до 4 – 7 діб.



Рисунок 1 — Схема розташування пунктів відбору РА та ділянок проведення окремих заходів у локальній зоні під час спорудження нового безпечного конфайнмента

Визначення складу та ОА нуклідів в аерозолях приземного шару повітря виконувалось на гамма-спектрометричному комплексі [6]. З 2000 року прямі гамма-спектрометричні вимірювання проб аерозолю забезпечували ідентифікацію ^{137}Cs , ^{241}Am та ^{154}Eu . Співвідношення між цими нуклідами вказує на внесок в активність РА паливних частинок та на можливість застосування кореляційного підходу під час оцінки ОА ізотопів $^{238-241}\text{Pu}$ і ^{90}Sr [7]-[11].

Динаміка середньорічних значень ОА $\Sigma\beta$ -ДІН у повітрі локальної зони за період з 1998 року по 2019 рік побудована за результатами аналізу даних багаторічного моніторингу РА та значення КР для ОА $\Sigma\beta$ -ДІН, що діяли на різних етапах перетворення ОУ в екологічно безпечну систему (рисунок 2).

Максимальні середньорічні ОА РА спостерігали в 2010 році, період масштабних та інтенсивних земляних робіт (2009 – 2010 рр.) під час облаштування фундаментних стрічок нового безпечного конфайнмента (НБК), – $\Sigma\beta$ -ДІН досягла 84 мБк/м³, а $\Sigma\alpha$ -ДІН – 0,84 мБк/м³. В окремі літні дні ОА $\Sigma\beta$ -аерозолів у повітрі дорівнювала одиницям Бк/м³ [12], [13]. Зауважимо, що за весь період моніторингу (1998 – 2019 рр.) середньорічні значення ОА $\Sigma\beta$ -ДІН у локальній зоні були істотно нижчими за встановлені КР.

У 2013 році сталася низка подій, які сприяли аномальному зростанню ОА РА в повітрі локальної зони. По-перше, обвал фрагмента покрівлі машзалу 12 лютого 2013 року з утворенням отвору площею близько 60 м². Потім проведення заходів з демонтажу нестабільних конструкцій та закриття отвору протягом шести місяців. По-друге, виконання демонтажу вентиляційної труби (ВТ-2) наприкінці 2013 року (31 жовтня 2013 року почато демонтаж першої секції ВТ-2) з подальшою порізкою фрагментів ВТ2 на майданчику біля 3-го енергоблока ЧАЕС (див. рисунок 1). Аналіз спів-

відношення нуклідів у РА в цей період виявив суттєві зміни у співвідношенні $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$ порівняно з паливним.

Оцінки інгаляційних доз опромінення персоналу. Використовуючи данні моніторингу ОА РА у повітрі локальної зони виконано оцінку ефективної ДВО персоналу E_{int} на різних етапах будівництва НБК, який міг перебувати на межі локальної зони. Розрахунки ґрунтувалися на консервативному підході, без врахування активності ^{90}Y та без застосування ЗІЗОД за алгоритмом,

$$E_{\text{int}} = \sum_i E_{\text{int}}^i, \quad (1)$$

де E_{int}^i – доза, обумовлена інгаляційним надходженням i -радіонукліду всередину організму та обчислювана за формулою:

$$E_{\text{int}}^i = V \cdot k_{\text{и}} \cdot t \cdot \sum_j e_{\tau}^{i,j} \cdot C_{\text{inhal}}^{i,j}, \quad (2)$$

де V – темп дихання, м³/ч (1,5); $k_{\text{и}}$ – коефіцієнт, який враховує інтенсивність праці (2); t – час перебування працівника в робочій зоні, год (1700); $e_{\tau}^{i,j}$ – дозовий коефіцієнт, доза на одиницю інгаляційного надходження активності, зумовлена i -тим радіонуклідом j -того типу поглинання організмом, Зв/Бк [14]; $C_{\text{inhal}}^{i,j}$ – ОА i -того радіонукліду в приземному шарі повітря, Бк/м³.

Результати розрахунків річних ефективних ДВО персоналу E_{int} на межі локальної зони в період реєстрації максимальної ОА РА (2010 рік) наведено в таблиці 1. Під час розрахунків співвідношення нуклідів у $\Sigma\beta$ -ДІН та $\Sigma\alpha$ -ДІН приймалося паливне.

Аналіз отриманих оцінок показав, що доза за інгаляційного надходження $\Sigma\beta$ -ДІН у 2,2 менше, ніж від $\Sigma\alpha$ -ДІН. Максимальний внесок 38 % в сумарну ДВО у 2010 році пов'язаний з ^{241}Am , а мінімальний

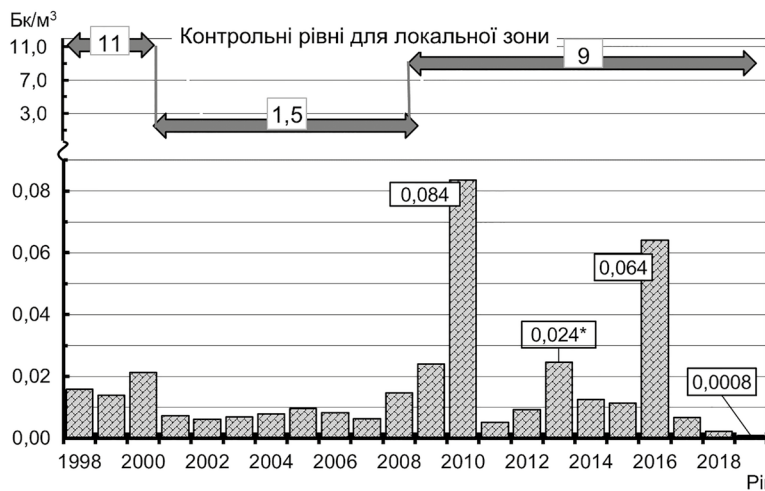


Рисунок 2 – Динаміка середньорічної концентрації $\Sigma\beta$ -ДІН чорнобильського генезису в приземному шарі повітря поблизу ОУ

Таблиця 1 — Річні ефективні ДВО персоналу в 2010 році

Нуклід	Дозовий коефіцієнт, Зв/Бк	Тип розчинності	Об'ємна активність, Бк/м ³	Ефективні дози, Зв/рік
¹³⁷ Cs	3,9E-08	S	2,6E-02	2,6E-06
⁹⁰ Sr	1,5E-07	S	2,2E-02	8,5E-06
²⁴¹ Pu	1,6E-07	S	1,0E-02	4,1E-06
Σβ-ДІН	–		5,8E-02	1,5E-05
ΣPu	1,50E-05	S	3,9E-04	1,5E-05
²⁴¹ Am	1,60E-05	S	4,5E-04	1,8E-05
Σα-ДІН	–		8,4E-04	3,3E-05
ΣДІН			5,9E-02	4,8E-05

внесок – 5,4 % зумовлений ¹³⁷Cs. Річні ефективні ДВО персоналу, який перебував за межею локальної зони або зайнятого під час спорудження конструкції НБК не перевищили 0,048 мЗв/рік, що суттєво (приблизно у 20 разів) нижче за встановлений КР в 1 мЗв/рік. Потужність ДВО персоналу в 2010 році змінювалася в діапазоні від 5,6×10⁻⁷ мЗв/год (у листопаді після завершення основних земляних робіт) до 1×10⁻⁴ мЗв/год (у червні-серпні період інтенсивних робіт з вилучення найбільш радіоактивного шару ґрунту). Крім того, вона також не перевищила потужності дози персоналу 5,9×10⁻⁴ мЗв/год, розрахованої відносно КР.

Низькі ДВО, були одним із факторів, які дозволили адміністрації ДСП «ЧАЕС» та спільному підприємству (СП) «Наварка» у 2012 році полегшити умови роботи персоналу в зоні монтажу конструкції НБК (див. рисунок 1), обмеживши застосування ЗІЗОД лише аварійними ситуаціями.

Потужність дози внутрішнього опромінення персоналу під час демонтажу вентиляційної труби. Після 2010 року в РА локальної зони спостерігалось їх збагачення ¹³⁷Cs, непов'язаним із паливними частками [13]. Середньорічне співвідношення ¹³⁷Cs/²⁴¹Am у 2013 році досягло максимального значення 83, для порівняння, паливне дорівнювало 31 [15].

Це зумовило на перехід розрахунку ОА ⁹⁰Sr в Σβ-ДІН по кореляції з активністю ²⁴¹Am [11]. Актуальність такого переходу особливо помітна під час оцінки ДВО персоналу у процесі виконання вогневих робіт (різання, зварювання тощо) з матеріалами, забрудненими радіонуклідами чорнобильського генезису. Результати розрахунків потужності доз опромінення за даними спостережень РА на АУ-2 з 9 по 22 грудня 2013 року, коли поблизу 3-го енергоблока ЧАЕС відбувалося різання фрагментів ВТ2, наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 — Потужності ДВО персоналу біля АУ-2 у період з 9 по 23 грудня 2013 року

Нуклід	Дозовий коефіцієнт, Зв/Бк	Доля нуклідів в РА під час розрахунків, %	
		за ¹³⁷ Cs	за ²⁴¹ Am
⁹⁰ Sr	1,50E-07	45,0	2,5
¹³⁷ Cs _(конд) *	4,80E-09	–	93,5
¹³⁷ Cs _(пал) *	3,90E-08	54,4	3,0
²⁴¹ Pu	1,60E-07	0,58	1,0
ΣPu	1,50E-05	45	45
²⁴¹ Am	1,50E-05	55	55
Об'ємна активність Σβ-ДІН, Бк/м ³		6,6E-03	3,7E-03
Потужність дози ВО Σβ-ДІН, Зв/год		1,8E-09	1,7E-10
Об'ємна активність Σα-ДІН, Бк/м ³		6,4E-06	
Потужність дози ВО Σα-ДІН, Зв/год		5,6E-10	

Примітка: * ¹³⁷Cs_(конд) – конденсаційна та ¹³⁷Cs_(пал) – паливна форма нукліда.

У цей період співвідношення $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$ у РА досягло 1010, а $^{241}\text{Am}/^{154}\text{Eu}$ залишалося близько паливного 5,8 [15]. Розрахунки ОА ^{90}Sr виконано двома способами: перший – згідно з кореляцією з активністю ^{137}Cs [7], [8], а другий – відповідає розрахунку за кореляцією з ^{241}Am [10], [11].

З наведених даних видно, що під час переходу на розрахунок ОА ^{90}Sr за кореляцією з активністю ^{241}Am величина ОА $\Sigma\beta$ -ДІН знизилася майже в 2 рази. Водночас з'явилася можливість оцінити внесок у $\Sigma\beta$ -ДІН конденсаційної складової ^{137}Cs . У результаті, оцінка потужності ДВО від $\Sigma\beta$ -ДІН під час розрахунку ОА ^{90}Sr за кореляцією з активністю ^{137}Cs , по-перше, перевищує в 10 разів розрахунок за кореляцією з ^{241}Am . По-друге, у 3 рази перевищує потужності ДВО від $\Sigma\alpha$ -ДІН.

Збагачення аерозолів за ^{137}Cs спостерігається і в окремих приміщеннях ОУ, наприклад, у пробах РА з системи «Байпасу», середнє значення відношення $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$ у 2013 році дорівнювало 79, а у 2014 році – 97 [13], [16]. Тобто, частка ^{137}Cs , непов'язаного з паливними частинками, у загальній ОА ^{137}Cs лежала в межах 60 – 70 %.

Оцінки радіаційного впливу на персонал під час обвалу фрагмента покрівлі машзалу. 12 лютого 2013 року відбулося обвалення фрагмента покрівлі машзалу ОУ. Результати розрахунку ОА нуклідів за даними гамма-спектрометричних вимірювань, усереднені за 14-денний період експозиції (з 30 січня по 13 лютого), наведено в таблиці 3. У пробах аерозолів на півдні локальної зони (АУ-3) зареєстрували знижений (близько 10 %) вміст ^{137}Cs . Для локальної зони такі співвідношення рідкісні, вони близькі до співвідношення

радіонуклідів у лавоподібних паливовмісних матеріалах (ЛПВМ). Наприклад, у приміщенні 012/7, де зосереджені значні обсяги ЛПВМ, збіднення аерозолів за ^{137}Cs досягає 50 % [17]. Водночас, на півночі (АУ1, АУ2) співвідношення $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$ в РА були близькі до паливного – збагачення не перевищило 20 %. Паливні співвідношення нуклідів на лютий 2013 року були такими: $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$ – 32; $^{241}\text{Am}/^{154}\text{Eu}$ – 5,4.

Використовуючи дані пункту безперервного радіаційного контролю активності аерозолів (ПБРКАА) ВАВ6 СП «НОВАРКА» [18], що знаходився на відстані близько 100 м у західному напрямку від епіцентру обвалення (див. рисунок 1), можна оцінити час перебування хмари радіоактивної пилу над локальною зоною та коректніше визначити радіаційний вплив на персонал. Так, приблизно в 14:30 12 лютого 2013 року на ПБРКАА ВАВ6 було зафіксовано перевищення КР ОА β -аерозолів (1,5 Бк/м³). Максимальне значення 19 Бк/м³ було зареєстровано близько 16:50, а після 19:30 ОА β -аерозолів опустилася нижче рівня КР. Відтак радіоактивна хмара знаходилася над локальною зоною з 14 години 12 лютого 2013 року протягом 5 годин. З огляду на це, виконано консервативну оцінку ймовірної ОА РА в локальній зоні у разі обвалу покрівлі (таблиця 4).

Розрахункова величина середньої по локальній зоні ОА β -випромінюючих аерозолів 20 Бк/м³ практично збігається з максимальним значенням активності β -аерозолів 19 Бк/м³, зареєстрованим ПБРКАА ВАВ6 [18].

З аналізу отриманих даних (див. таблицю 4) та з того, що співвідношення радіонуклідів у приземному шарі повітря паливне, впливає, що значен-

Таблиця 3 — Результати визначення ОА нуклідів та їх співвідношення в зразках РА, відібраних з 30 січня по 13 лютого 2013 року

Місце відбору	Об'ємна активність, мБк/м ³ ± від. похибка, % (P=0,95)			Співвідношення нуклідів	
	¹⁵⁴ Eu	¹³⁷ Cs	²⁴¹ Am	¹³⁷ Cs/ ²⁴¹ Am	²⁴¹ Am/ ¹⁵⁴ Eu
АУ1	0,10 ± 23	26 ± 20	0,66 ± 20	40	6,3
АУ2	0,15 ± 22	35 ± 20	0,91 ± 20	38	6,1
АУ3	1,4 ± 20	230 ± 19	9,3 ± 19	25	6,6

Таблиця 4 — Оцінки ОА нуклідів у повітрі локальної зони під час проходження радіоактивної хмари

Місце відбору	Об'ємна активність, мБк/м ³				
	¹⁵⁴ Eu	¹³⁷ Cs	²⁴¹ Am	$\Sigma\alpha$ -ДІН	$\Sigma\beta$ -ДІН
АУ1	7,0	1 800	44	81	5 200
АУ2	10	2 300	61	110	6 900
АУ3	94	16 000	620	1 100	49 000
Середнє	37	6 600	240	450	20 000

Таблиця 5 — Потужність ДВО персоналу на півдні локальної зони залежно від співвідношення нуклідів

Нуклід	Частка нуклідів у ДІН під час розрахунків, %	
	за ^{137}Cs	за ^{241}Am
^{90}Sr	36	42
$^{137}\text{Cs}_{(\text{пан})}$	44	40
^{241}Pu	20	18
ΣPu	45	45
^{241}Am	55	55
Об'ємна активність $\Sigma\beta$ -ДІН, Бк/м ³	36	39
ДВО $\Sigma\beta$ -ДІН, Зв/год	6,1E-6	6,4E-6
Об'ємна активність $\Sigma\alpha$ -ДІН, Бк/м ³	1,1	1,1
ДВО $\Sigma\alpha$ -ДІН, Зв/год		2,66E-5
ДВО $\Sigma\text{ДІН}$, Зв/год	3,27E-5	3,30E-5

ня ОА ^{241}Am та ізоотопів плутонію ($^{238} - ^{241}\text{Pu}$) у локальній зоні перевищили КР ($\Sigma\alpha$ -ДІН – 0,12 Бк/м³) і допустиму середньорічну концентрацію в повітрі робочих приміщень для персоналу (категорії А – 0,03 Бк/м³, [19]).

Результати розрахунків ДВО за збіднення РА за ^{137}Cs (біля АУ-3), наведено в таблиці 5. З яких впливає, по-перше, що оцінка ОА $\Sigma\beta$ -ДІН під час розрахунку внеску ^{90}Sr в активність аерозолів за співвідношенням з активністю ^{137}Cs на 15 % менше, ніж під час розрахунку за кореляцією з активністю ^{241}Am . Водночас оцінка потужності дози внутрішнього опромінення занижена, не суттєво, близько 3 %.

По-друге, оцінка потужності ДВО $3,3 \times 10^{-2}$ мЗв/год істотно (приблизно в 50 разів) вище за КР потужності дози $5,9 \times 10^{-4}$ мЗв/год. Зауважимо, що оперативно вжиті заходи, як-то: евакуація персоналу з локальної зони та зони монтажу арки, застосування ЗІЗОД після надходження сигналу про перевищення КР, мінімізували радіаційний вплив. Контроль внутрішнього опромінення за допомогою гамма-спектрометричних комплексів після евакуації не виявив перевищень внутрішнього вмісту радіонуклідів у персоналу.

Оцінки радіаційного впливу на персонал після введення в експлуатацію комплексу НБК-ОУ. Встановлення арки в проєктне положення в грудні 2016 року та подальші роботи з введення в експлуатацію комплексу НБК в 2017 – 2019 рр. сприяли значному зниженню активності РА в повітрі локальної зони. Середньорічні ОА $\Sigma\alpha$ -ДІН в 2019 році дорівнювали $1,8 \times 10^{-5}$ Бк/м³ (^{241}Am – 58 %, ΣPu – 42 %), а $\Sigma\beta$ -ДІН – $7,0 \times 10^{-4}$ Бк/м³ (^{90}Sr – 32 %, $^{137}\text{Cs}_{(\text{конд})}$ – 19 %, $^{137}\text{Cs}_{(\text{пан})}$ – 38 %, ^{241}Pu – 11 %). Оцінки потужності ДВО персоналу в 2019 році не перевищили: для $\Sigma\alpha$ -ДІН – від $1,4 \times 10^{-3}$ мЗв/рік, а для $\Sigma\beta$ -ДІН – від $2,9 \times 10^{-4}$ мЗв/рік. Внесок $\Sigma\alpha$ -ДІН у сумар-

ну ДВО персоналу майже в 5 разів перевищує дозу від $\Sigma\beta$ -ДІН. Максимальний внесок у потужність ДВО зумовлений ^{241}Am і він буде зростати.

Висновки

1. За результатами консервативної оцінки річних ДВО персоналу НБК встановлено, що в період спостереження максимальних концентрацій РА у 2010 році дози, отримані персоналом, який перебував за межами локальної зони, не перевищили 0,048 мЗв/рік, що істотно менше встановленого КР 1 мЗв/рік.

2. Максимальна ДВО серед радіонуклідів, що спостерігались, пов'язана з ^{241}Am , а мінімальна – з ^{137}Cs . Внесок ^{241}Am та ^{137}Cs у сумарну дозу опромінення в 2010 році склав 45 % та 6 % відповідно.

3. Для підвищення достовірності оцінки ДВО персоналу необхідно враховувати збагачення радіоцезієм і розчинність нуклідів у РА. Крім того, під час розрахунків внеску в активність ДІН ізоотопів $^{238} - ^{241}\text{Pu}$ та ^{90}Sr необхідно використовувати, як реперний ^{241}Am .

4. Викид РА під час обвалення покрівлі машзалу НБК підтвердив, що потенційна небезпека ОУ, як джерела РА, зберігається. Особливо це важливо враховувати під час демонтажу нестабільних конструкцій усередині арки, тому що під час виконання таких будівельно-монтажних робіт спостерігається підвищене пилопідіймання, а РА осідають в обмеженому аркою просторі, збільшуючи потенційні ДВО персоналу.

5. Отримані результати моніторингу РА в повітрі локальної зони можуть використовуватись як допоміжний фактор для ретроспективної оцінки доз опромінення персоналу ДСП «ЧАЕС» та підрядних організацій.

Список використаної літератури

1. Одинцов А. А., Огородников Б. И. Изучение растворимости аэрозолей объекта «Укрытие» в жидкостях различного химического состава. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*. 2011. Вип. 15. С. 85–95.
2. Гаргер Е. К., Одинцов А. А., Шинкаренко В. К., Tschiersch J. Поведение «горячих» аэрозольных частиц из объекта «Укрытие» в имитаторах легочной жидкости. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*. 2013. Вип. 21. С. 43–52.
3. Гаргер Е. К., Кашпур В. А., Корнеев А. А., Курочкин А. А. Результаты исследований выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие». *Проблеми Чорнобиля*. 2002. Вип. 10, ч. 2. С. 60 – 71.
4. Огородников Б. И., Сухоручкин А. К., Будыка А. К. и др. Радиоактивные аэрозоли объекта «Укрытие» (обзор). Часть 3. Дисперсность радиоактивных аэрозолей. Чернобыль, 2004. 60 с. (Препр. / НАН Украины. ИПБ АЭС; 04-4).
5. Гаргер Е. К., Кашпур В. А., Скоряк Г. Г., Шинкаренко В. К. Физико-химические характеристики аэрозоля 30-километровой зоны ЧАЭС в 1986 – 2013 гг. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*. 2014. Вип. 23. С. 54–65.
6. Калиновский А. К. Выбор оптимального полупроводникового гамма-детектора при определении содержания радионуклидов чернобыльского генезиса». *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*. 2014. № 23. С. 119–123.
7. Бегичев С. Н., Боровой А. А., Бурлаков Е. В. и др. Топливо реактора 4-го блока ЧАЭС. Краткий справочник. Москва, 1990. 21 с. (Препр. / Ин-т атомной энергии им. И. В. Курчатова; 5268/3).
8. Выполнение работ по анализу неорганизованных выбросов из объекта «Укрытие»: (Отчет). ГР № 0198U007454. Чернобыль : МНТЦ «Укрытие» НАН Украины, 1998. 67 с.
9. Кашпаров В. О., Лундін С. М., Зварич С. І. та ін. Викид та забруднення території радіонуклідами у складі паливних часток. *Бюлетень екологічного стану зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення*. К.: Чорнобильінтерінформ, 2002. № 2. С. 22–32.
10. Контроль неорганизованных выбросов из объекта «Укрытие» и аэрозольной обстановки во время строительства НБК: (Отчет). ГР № 0114U006202. Чернобыль : ИПБ АЭС НАН Украины., 2014. 215 с.
11. Калиновский А. К., Одинцов А. А., Чикур Л. Б. Фракционирование радионуклидов в аэрозолях локальной зоны объекта «Укрытие» по результатам радиохимического выделения. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*. 2016. Вип. 26. С. 90–96.
12. Калиновский А. К., Огородников Б. И., Краснов В. А. Радиоактивные аэрозоли в локальной зоне объекта «Укрытие» в 2009 – 2010 гг. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*. 2011. № 17. С. 106–111.

13. Kalynovskyi O. K., Krasnov V. O., Filippov O. V. Radioactive Aerosols Monitoring of the Surface Air near the Shelter Object within 1998–2019. *Nuclear Power and the Environment*. 2021. № 3 (22). С. 78–83. doi: 10.31717/2311–8253.21.3.9.
14. ICRP, 2012. Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. Ann. ICRP 41(Suppl.).
15. Контроль неорганизованных выбросов из объекта «Укрытие»: Отчет. ГР № 0113U003958. Чернобыль : ИПБ АЭС НАН Украины, 2013. 186 с.
16. Хан В. Е., Огородников Б. И. Калиновский А. К., Краснов В. А. Контроль выбросов радиоактивных аэрозолей из объекта «Укрытие» в 2014 г. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*. 2015. Вип. 24. С. 100-109.
17. Огородников Б. И., Хан В. Е., Ковачук В. П. Аэрозоли – свидетели разрушения лавообразных топливосодержащих материалов в объекте «Укрытие». *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*. 2013. Вип. 20. С. 94-106.
18. Отчет о расследовании аномального события. Инв. № 09 от 26.02.2013. Архив ПТС ЧАЭС. Чернобыль, 2013.
19. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97) : державні гігієнічні нормативи. Київ, 1997. 121 с.

References

1. Odintsov, O., Ogorodnikov, B. (2011). The study of solubility of object «Ukrytyta» aerosols in liquids of different chemical composition. *Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl*, 15, 85–95.
2. Garger, E., Odintsov, O., Shinkarenko, V., Tschiersch, J. (2013). Behavior of “hot” aerosol particles from object “Ukrytyta” in simulators of a pulmonary liquid. *Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl*, 21, 43-52.
3. Garger, E., Kashpur, V., Korneiev, A., Kurochkin, A. (2002). Results of examination of radioactive aerosol releases from the Shelter. *Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl*, 10, 60-71.
4. Ogorodnikov, B., Suhoruchkin, A., Budyka, A. (2004). Radioactive aerosols of the Shelter (review). Volume 3. Dispersion of radioactive aerosols. *Preprint of ISP NPP of NAS of Ukraine*, 04-4, Chornobyl, 60 p.
5. Garger, E., Kashpur, V., Skorjak G. H., Shynkarenko, V. (2014). Physical and chemical characteristics of the aerosol of the 30 km zone of ChNPP in 1986–2013. *Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl*, 23, 54-65.
6. Kalynovsky, O. (2014). Optimal choice of semiconductor gamma detector for determining radionuclide content genesis of Chornobyl. *Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl*, 23, 119–123.
7. Begichev, S., Borovoi, A., Burlakov, Ye., Havrilov, S. (1990). Reactor fuel of ChNPP Unit 4: short guide. Moscow, USSR Academy of Sciences, IAE preprint-5268/3, 23 p.
8. Fulfillment of activities on the analysis of fugitive emissions from the Shelter. Report. (1998). ISTC Shelter of NASU, registration No. 0198U007454, Chornobyl, 67 p.

9. Kashparov, V., Lundin, S., Zvarych, S. (2002). Release and contamination of the territory with radionuclides in the composition of fuel particles. Bulletin of the ecological state of the exclusion zone and the zone of unconditional (mandatory) resettlement. Kyiv, Chornobylinterinform, 2, 22-32.

10. The control of fugitive emissions from the Shelter and aerosol environment during NSC construction. Report. (2014). ISP NPP of NASU. Chornobyl, 218 p.

11. Kalynovsky, O., Odintsov, O., Chikur, L. (2016). Fractionation of radionuclides in aerosols local area object "Ukryttya" by results of radiochemical separation. *Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl*, 26, 90–96.

12. Kalynovsky, O., Krasnov, V., Ogorodnikov, B. (2011). Radioactive aerosols in the local area of "Ukryttya" object during 2009–2010. *Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl*, 17, 106–112.

13. Kalynovsky, O., Krasnov, V., Filippov, O. (2021). Radioactive aerosols monitoring of the surface air near the Shelter object within 1998–2019. *Nuclear Power and the Environment*, 22, 78–83.

14. ICRP, 2012. Compendium of dose coefficients based on ICRP Publication 60. ICRP Publication 119. Annals of the ICRP, 41(Supplement).

15. The control of fugitive emissions from the Shelter. Report. (2013). ISP NPP of NASU, registration No. 0113U003958. Chornobyl, 186 p.

16. Khan, V., Ogorodnikov, B., Kalynovsky, O., Krasnov, V. (2015). Control of releases of radioactive aerosols from object "Ukryttya" in 2014. *Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl*, 24, 100-109.

17. Ogorodnikov, B., Khan, V., Kovalchuk, V. (2013). Aerosols as evidences of destruction of lava-like fuel containing materials in the "Ukryttya" object. *Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl*, 20, 94–106.

18. Report on abnormal event investigation (2013). Inventory No. 09 of 26 February 2013. Archive of ChNPP PTS, Chornobyl, 16 p.

19. Radiation safety standards of Ukraine (NRBU-97): state health and safety standards, Kyiv, 1997, 121.

Assessments of Personnel Exposure Doses Resulting from the Intake of Radioactive Particles by Inhalation during the Construction of the New Safe Confinement

O. Kalynovskyi, A. Sizov, V. Krasnov

Institute for Safety Problems of NPPs of the National Academy of Sciences of Ukraine, Chornobyl, Ukraine

The results of calculating the internal exposure doses of personnel employed for the construction of the new safe confinement (NSC) based on radioactive aerosol (RA) monitoring data in the local area of the Shelter are presented. It was shown that the maximum volumetric activity (VA) of RA was recorded during the main earthworks, at the same time, annual personnel exposure doses due to inhalation of radioactive substances (inhalation doses) did not exceed 63 $\mu\text{Sv}/\text{year}$. It is significantly below the established reference level of 1 mSv. The main dose-forming nuclide for personnel internal exposure is ^{241}Am . The collapse of a part of the Shelter turbine hall roof in 2013 has shown a potential hazard of the Shelter as a powerful RA source. At the same time, the VA estimates of ^{241}Am and plutonium isotopes in the air of the local area during the passage of the formed radioactive cloud briefly (less than two hours) exceeded the annual averaged permissible VA in the air for personnel of 0.03 Bq/m^3 . The results of long-term RA monitoring can be used in the retrospective assessment of exposure doses.

Keywords: volumetric activity of $\Sigma\alpha$ - and $\Sigma\beta$ -long-lived nuclides, internal exposure doses, radioactive aerosols.

Отримано 27.07.2022