

В. К. Шинкаренко, В. О. Кашпур, **Г. Г. Скоряк**, П. В. Сабенін

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, Київ, 03028, Україна

До сплеску активності ^{137}Cs в повітрі під об'єктом «Арка» 17 жовтня 2019 р.

Ключові слова:
об'єкт «Укриття»,
«гарячі» частки,
авторадіографія,
питома активність повітря

Наведено результати досліджень аерозольних фільтрів, експонованих у ближній зоні Чорнобильської АЕС до і після сплеску активності в повітрі під об'єктом «Арка» 17 жовтня 2019 р. Авторадіограми фрагментів цих фільтрів демонструють значне (≈ 2 порядки) зростання числа «гарячих» часток (ГЧ) безпосередньо після падіння бетонного фрагмента перекриття у приміщенні 402/3. Дисперсійний аналіз виявлених після обвалу ГЧ свідчить про істотний внесок у загальну активність великого числа дрібних малоактивних часток ($0,005 \div 5$ Бк), а низький рівень співвідношення $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$ — про їхню паливну природу. Визначений за допомогою імпактора внесок часток з аеродинамічними діаметрами менше 10 мкм не перевищував 20 % від загальної β -активності аерозолю.

Вступ

Добре відомо, що створення об'єкта «Укриття» повністю не ліквідувало проблему викидів радіоактивних матеріалів у навколишнє середовище [1–3]. Будівництво нового безпечного конфайнмента (НБК) стало одним з основних етапів перетворення 4-го енергоблока Чорнобильської атомної електростанції (ЧАЕС) на екологічно безпечну систему, покликану забезпечити безпеку персоналу, населення та довкілля [4]. Крім завдання ізоляції 4-го енергоблока від навколишнього середовища будівництво НБК повинно дати змогу безпечного проведення робіт із залишками енергоблока, при цьому проектом допускаються досить високі рівні об'ємної активності радіоактивних аерозолів усередині НБК — до 210 Бк/м³ за загальною β -активністю [5].

У цьому плані різке підвищення об'ємної активності повітря в ряді приміщень об'єкта «Укриття» та в просторі під об'єктом «Арка», що відбувалось 17–19 жовтня 2019 р., можна розглядати як свого роду спонтанний тест систем НБК.

Нижче наведена хронологія динаміки об'ємної активності згідно з актом службового розслідування [6]:
17 жовтня 2019 р.

14:03 — відбулося спрацювання попереджувальної сигналізації приміщення 3.30 об'єкта «Укриття» (об'ємна активність α -аерозолів 0,126 Бк/м³, β -аерозолів 1,0 Бк/м³).

19:20 — значення об'ємної активності в основному об'ємі (ОО) НБК досягли аварійного рівня (АР): активність α -аерозолів 3,2 Бк/м³, β -аерозолів 170 Бк/м³, по іншому каналу реєстрації — активність α -аерозолів 3,0 Бк/м³, β -аерозолів 206 Бк/м³.

19:40 — значення об'ємної активності досягли АР по витяжній вентиляції ОО НБК (активність α -аерозолів 1,9 Бк/м³, β -аерозолів 112 Бк/м³).

23:00 — на майданчику в районі модернізованої системи пилопригнічення (МСПП) об'ємна активність β -аерозолів 78 Бк/м³.

23:45 — об'ємна активність у приміщенні Г-615/2 об'єкта «Укриття» становила для α -аерозолів 7,352 Бк/м³ і β -аерозолів 304,1 Бк/м³.

© В. К. Шинкаренко, В. О. Кашпур, **Г. Г. Скоряк**, П. В. Сабенін, 2021

18 жовтня 2019 р.

01:30 — у районі МСПП об'ємна активність β -аерозолів 45 Бк/м³.

01:45 — об'ємна активність β -аерозолів у приміщенні Г-615/2 об'єкта «Укриття» по AIR010 знизилася нижче АР (88 Бк/м³).

04:15 — об'ємна активність β -аерозолів у приміщенні Г-615/2 об'єкта «Укриття» знизилася нижче проектних рівнів (ПР).

06:35 — об'ємна активність α -аерозолів у приміщенні Г-615/2 об'єкта «Укриття» знизилася нижче ПР.

07:45 — значення об'ємної активності β -аерозолів досягли у витяжній вентиляції ОО НБК 44 Бк/м³, а у вентиляційній трубі НБК — 70 Бк/м³.

08:35 — об'ємна активність у приміщенні Г-615/2 об'єкта «Укриття» була для α -аерозолів 0,5 Бк/м³, для β -аерозолів 1,6 Бк/м³.

09:10 — згідно з даними системи радіаційного контролю нової витяжної труби викид становив по β -аерозолях 6,1 МБк/добу, по α -аерозолях 0,077 МБк/добу.

10:40 — зафіксовано зниження об'ємної активності викиду β -аерозолів через вентиляційну трубу НБК до 39 Бк/м³.

11:00 — у приміщеннях Г-615/2 об'єкта «Укриття» зафіксовано по α -аерозолях 12 Бк/м³, по β -аерозолях 24 Бк/м³; 101 прибудови входу в об'єкт «Укриття» — по α -аерозолях 0,7 Бк/м³, по β -аерозолях 11 Бк/м³; на вході в прибудову входу в об'єкт «Укриття» — по α -аерозолях 0,38 Бк/м³, по β -аерозолях 0,8 Бк/м³.

15:00 — активності об'ємного викиду у вентиляційну трубу НБК становили для α -аерозолів 0,001 Бк/м³, для β -аерозолів 1,0 Бк/м³.

19 жовтня 2019 р.

00:58 — аерозольна активність в ОО НБК знизилася нижче АР.

07:30 — радіаційні параметри комплексу НБК-об'єкт «Укриття» знизилися нижче ПР.

Згідно з [6] безпосередньою причиною збільшення аерозольної активності в просторі під аркою НБК став радіоактивний пил, піднятий з бетонних і металевих поверхонь приміщення 402/3 (вісь 44 ряд Г) у результаті падіння о 14:35 17 жовтня 2019 р. невеликого бетонного фрагмента монолітної ділянки перекриття приміщення 402/3, що частково зруйнувалося. Саме в цей час датчики вібрації опор балки «Мамонт» зафіксували незначне збільшення показів. Відзначимо, що ріст об'ємної активності в деяких приміщеннях об'єкта «Укриття» почався дещо раніше (о 14:03), що може бути пояснене падінням дрібних

уламків на початку процесу руйнування. Зазначимо, що дещо схожа ситуація зі стрімким ростом об'ємної активності повітря спостерігалась у 2013 р. під час часткового обвалу даху машинного залу [7].

У разі інгаляційного надходження радіоактивних речовин в організм людини початкове відкладення радіоактивних аерозолів у різних відділах дихального тракту визначається аеродинамічним діаметром аерозольних часток [8]. При цьому для оцінки ефективної дози на все тіло використовують відповідні дозові коефіцієнти, що дозволяють перейти від активності частинок радіоактивного аерозолю, осаджених у відділах дихального тракту, до ефективної дози іонізуючого випромінювання. Ці коефіцієнти залежать від нуклідного складу, класу розчинності та медіанного за активністю аеродинамічного діаметра (АМАД) аерозолю. Згідно з даними, наведеними в Публікації 68 МКРЗ [9], дозовий коефіцієнт може істотно змінюватися залежно від величини АМАД радіоактивного аерозолю. Так, для α -випромінюючих нуклідів (урану, плутонію, америцію) величина дозового коефіцієнта росте при зменшенні АМАД, зміна АМАД у межах 0,1–10 мкм може змінювати дозовий коефіцієнт майже на порядок. Отже, визначення дисперсного складу радіоактивних аерозолів, особливо це стосується промислових аерозолів, має першорядне значення для оцінки дози опромінення.

Метою роботи є дослідження динаміки радіоактивних аерозолів, а також дисперсійного складу ГЧ під накриттям об'єкта «Арка» та в приземному шарі атмосфери ближньої зони ЧАЕС.

Матеріали та методика експерименту

Відповідно до програми контролю радіаційного забруднення приземного шару атмосфери поблизу об'єкта «Укриття» в цей час у неперервному режимі працювали чотири фільтровентиляційні установки (ФВУ): ФВУ-1 «Ventmesa» — розташована на схід від санпропускника СП-1430 приблизно за 500 м від південно-західного кута машинного залу; ФВУ-2 «Тайфун» — знаходиться на відстані 1,4 км, біля адміністративного корпусу (АК) об'єкта «Укриття»; ФВУ-3 «Град-1.8» — була розміщена безпосередньо перед південною стіною машинного залу (ряд А, вісь 42, відмітка висоти +9). Після монтажу об'єкта «Арка» ця ФВУ виявилась усередині НБК, де і продовжує працювати. ФВУ-4 «Град-1.0» розташована з північної сторони 4-го енергоблока (рис. 1). Поряд з ФВУ-3 розташований імпактор РМ₁₀ (Anderson). Його каска-

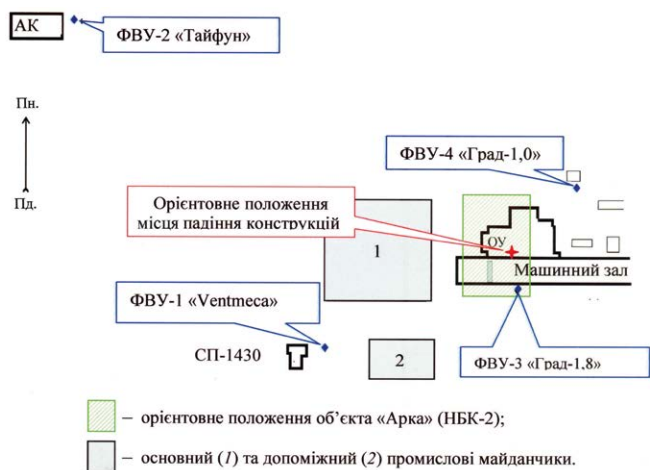


Рис. 1. Схема розташування ФВУ в ближній зоні об'єкта «Укриття»

ди збирають та сортують частки за аеродинамічними діаметрами: 10,0–4,9; 4,9–2,3; 2,3–1,4; 1,4–0,8 і менше 0,8 мкм. Основні характеристики приладів наведено в таблиці. Матеріал повітряних фільтрів — тканина Петрянова ФПП-15–1,5. Періодичність зміни фільтрів ФВУ — 7 діб, імпаکتора — 14 діб. Вимірювання активності ^{137}Cs на повітряних фільтрах проводили за допомогою напівпровідникового γ -спектрометра. Заміна фільтрів була проведена безпосередньо перед обвалом — 17 жовтня 2019 р. о 12:30. Схема розташування ФВУ-3 під аркою НБК наведена на рис. 2.

Авторадіографічні дослідження згідно з [12, 13] проводили з використанням медичної рентгенівської плівки. Цифрові денситограми авторадіографічних плям отримували за допомогою сканування у режимі відбивання, сканер Epson Perfection 1670, роздільна здатність 600 точок на дюйм. Визначення параметрів радіографічних плям проводили за допомогою пакета обробки зображень Image-Pro Plus 6.0. Для визначення β -активності¹ часток за параметрами їхніх радіографіч-

них зображень будували калібрувальну залежність, отриману за даними авторадіографії лінійки часток з відомою активністю. Свого часу (2002–2003 рр.) ці частки були ізолювані з повітряних фільтрів, експонованих поблизу об'єкта «Укриття»; β -активності відібраних часток були визначені за допомогою низькофонового пропорційного лічильника LB-720 (Bekman).

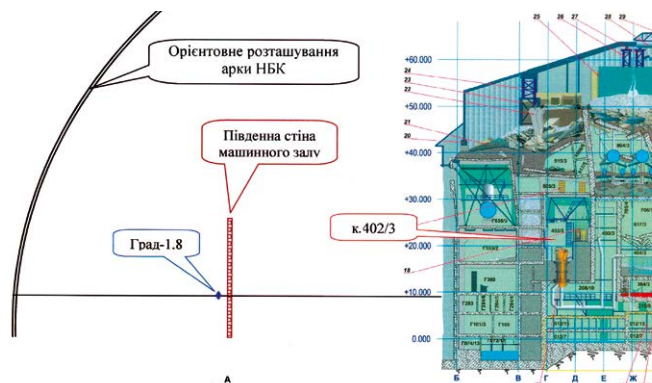


Рис. 2. Схема розташування арки НБК, приміщень об'єкта «Укриття» та ФВУ «Град 1.8». Схема вертикального розрізу об'єкта «Укриття» (зображення справа) взята з роботи [10]

Результати та їхнє обговорення

Динаміка об'ємної активності ^{137}Cs в повітрі поблизу розташування ФВУ-3 наведена на рис. 3. Часу обвалення відповідає різкий сплеск активності до 5 Бк/м^3 . Необхідно відзначити, що таке високе значення до цього спостерігалось лише під час демонтажу перекриття машинного залу в ході будівництва НБК у 2016 р. [14]. Зауважимо, що мова йде про усереднені за тиждень об'ємні активності. При цьому пікова активність могла бути на 1–2 порядки більшою. На інших ФВУ, розташованих поза межами НБК, протягом вересня – грудня 2019 р. подібні сплески активності не спостерігались.

Основні технічні характеристики приладів по відбору проб повітря

Характеристика ФВУ	ФВУ-1	ФВУ-2	ФВУ-3	Імпаکتор	ФВУ-4
	«Ventmeca»	«Тайфун»	«Град-1.8»		PM ₁₀
Широта місцезнаходження	51°23'13.0"	51°23'39.9"	51°23'17.9"		51°23'26.8"
Довгота місцезнаходження	30°05'31.4"	30°04'50.8"	30°05'52.4"		30°06'09.2"
Висота відбирання проби, м	1,0	2,5	1,8	1,5	1,0
Продуктивність, м ³ /год	300	4500	450	72	450
Площа фільтра, м ²	0,36	0,78	0,56	0,075*	0,56

* Площа фільтра останнього каскаду.

¹ Авторадіографічні зображення ГЧ формують переважно β -частинки, іонізуюча здатність яких, залежно від енергії, у $10^2 \div 10^3$ разів вища, ніж γ -квантів та рентгенівського випромінювання [11].

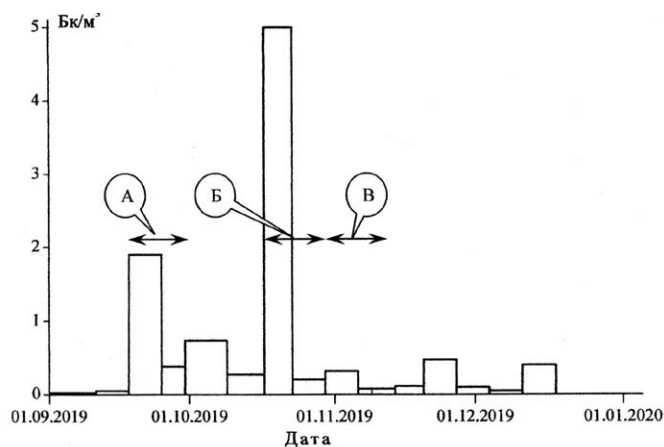


Рис. 3. Динаміка об'ємної активності ^{137}Cs в повітрі під аркою НБК на ФВУ-3. Стрілки з літерами вказують згадані в подальшому тексті інтервали роботи імпактора

Авторадіограма повітряного фільтра, що був експонований під час обвалу на ФВУ-3, виявилась майже засвіченою незважаючи на відносно малий час експозиції (2 доби). Але при цьому на ній не вдається знайти плям від ГЧ з β -активностями вище 5–10 Бк. Більш точному визначенню активностей таких часток заважає суцільний фон почорніння, причиною появи якого, можливо, є присутність на фільтрі великої кількості дрібних ГЧ, зображення яких зливаються між собою. Для перевірки цього припущення та дослідження ГЧ малої активності було проведено їхнє просторове розділення. Для цього фрагмент експонованого під час обвалу фільтра площею 6 см^2 був розчинений у тетрагідрофурані, а одержана суспензія нанесена на поверхню алюмінієвої фольги площею близько 400 см^2 . Після висушування та експозиції протягом 28 діб на авторадіограмі (рис. 4) вдалося ідентифікувати окремі частки з мінімальною β -ак-

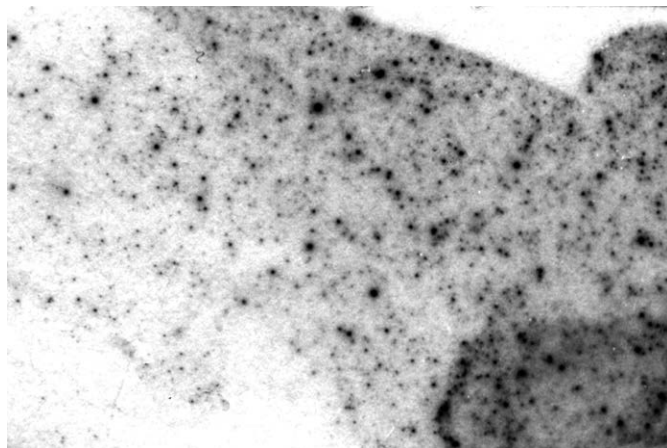


Рис. 4. Фрагмент авторадіограми розведеної суспензії фільтра від 17–23 жовтня 2019 р.

тивністю порядку 0,005 Бк. Це також підтверджує припущення про те, що згадане вище суцільне почорніння обумовлене зливанням великої кількості дрібних плям від малоактивних ГЧ.

Виходячи з припущення, що основна частина ГЧ — це дрібні частки опроміненого палива, можна оцінити мінімально можливий діаметр ГЧ. На сьогодні серед усіх радіоактивних речовин у зоні ЧАЕС опромінене паливо має найбільшу об'ємну активність. Відповідно частки з іншим складом і меншою об'ємною активністю матимуть більші розміри. Виходячи з ізотопного складу паливних ГЧ [15, 16] та часу з моменту аварії, питома β -активність A_m на 20 жовтня 2019 р. становила близько $1,21 \cdot 10^9 \text{ Бк/г } \text{UO}_2$, відповідно для об'ємної β -активності A_v маємо $\approx 1,21 \cdot 10^{10} \text{ Бк/см}^3$ (густина опроміненого палива $\rho \approx 10 \text{ г/см}^3$). Знаючи активність частки A та об'ємну активність матеріалу A_v для сфери з даною активністю легко отримати величину діаметра в мікрометрах:

$$d = 10^4 \cdot \sqrt[3]{\frac{6A}{\pi A_v}} \approx 1,24 \cdot 10^4 \sqrt[3]{\frac{A}{A_v}}. \quad (1)$$

Аеродинамічний діаметр d_{ae} паливної сферичної частки з густиною $\rho_{\text{ч}} \approx 10 \text{ г/см}^3$ може бути знайдений із співвідношення

$$d_{ae} = d \cdot \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}}}, \quad (2)$$

де d — геометричний діаметр частки, $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1 \text{ г/см}^3$ — щільність води.

Таким чином, з аналізу авторадіограм маємо оцінку діапазону активностей ГЧ $0,005 < A < 10 \text{ Бк}$. Згідно з виразом (1) йому відповідає діапазон мінімально можливих діаметрів ГЧ $0,92 < d < 11,6 \text{ мкм}$ і відповідно до виразу (2) — діапазон аеродинамічних діаметрів $2,91 < d < 36,7 \text{ мкм}$.

При цьому не слід забувати, що проведена оцінка мінімальної активності лише ілюструє можливість методу авторадіографії за даної експозиції, на фільтрі напевне присутні і ГЧ менших розмірів, невидимі за допомогою цього методу. Проте наявність дрібних ГЧ на авторадіограмі ще не означає, що всі ці частки мають саме мінімальні аеродинамічні діаметри, як і того, що в аерозолі вони перебувають у вигляді поодиноких часток. Адже цілком можливе утворення агломератів ГЧ із частками звичайного пилу (так звані частки-наїзники), що збільшує аеродинамічні діаметри часток.

Отже, радіографічні дослідження дають інформацію лише про активності окремих ГЧ, а не про їхні геометричні чи аеродинамічні діаметри. Небезпека ж від вдихання ГЧ, як вже було зазначено вище, пов'язана як з рівнем активності, так і з аеродинамічним діаметром часток, що визначає ймовірність потрапляння ГЧ у нижні відділи дихального тракту [8, 9].

У зв'язку з цим інформація про дисперсний склад радіоактивних аерозолів украї потрібна, особливо в умовах НБК і об'єкта «Укриття». Таку інформацію можна одержати завдяки більш широкому застосуванню імпакторів — приладів, які в процесі відбору сортують частки пилу за їхніми аеродинамічними діаметрами, збираючи відповідні фракції на окремих пластинах-колекторах. Основним недоліком використання імпакторів (крім, власне, дефіциту таких приладів) порівняно з ФВУ є суттєво нижчі рівні накопичення радіоактивного пилу внаслідок нижчої продуктивності та поділу зібраного пилу по кількох каскадах. За малих об'ємних активностей аерозолів, як, наприклад, у ближній зоні НБК, використання імпакторів втрачає сенс унаслідок занадто малих для вимірювання активностей, накопичених на пластинах-колекторах їхніх каскадів. Але всередині НБК, особливо при виконанні робіт, що супроводжуються зростанням аерозольної активності, імпакторні вимірювання не лише можливі, а з огляду на важливість інформації, що може бути одержана, більш ніж доречні.

Так, на рис. 5 залежно від середніх аеродинамічних діаметрів часток, що збираються на колекторах каскадів імпактора, представлено: об'ємні активності ^{137}Cs в пробах повітря (а) та відповідні співвідношення $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$ (б) для трьох інтервалів часу роботи імпактора. З рис. 5, а видно, що максимум розподілу об'ємної активності ^{137}Cs в повітрі в усіх трьох випадках припадає на інтервал 1,5–2 мкм. Відзначимо, що аерозольні частки з аеродинамічними діаметрами 5–10 мкм при вдиханні затримуються в трахеї і гортані, 2–5 мкм — у середніх і дрібних бронхах, 0,5–2 мкм — в альвеолах. Порівнюючи рис. 5 та 3 бачимо також, що обумовлена частками з аеродинамічним діаметром менше 10 мкм сумарна об'ємна активність ^{137}Cs в повітрі (сумарно по всіх каскадах імпактора) суттєво менша за загальну об'ємну активність, визначену за допомогою ФВУ. Для трьох інтервалів часу, позначених літерами А, Б, В, частка цієї активності по відношенню до загальної становить 11,6; 17,2 і 16,8 % відповідно. Пояснення такого розходження досить просте. На відміну від імпактора ФВУ захоплює всі частки незалежно від розмірів. Вище, за даними авторадіографії, ми вже

оцінили діапазон аеродинамічних діаметрів паливних часток $2,91 < d < 36,7$ мкм. Ясно, що не всі з таких часток пройдуть каскад попереднього відбору імпактора (паливна частинка з аеродинамічним діаметром 10 мкм має β -активність 0,203 Бк). Крім того, будуть відсіяні і дрібні ГЧ меншої активності, що ввійшли до складу агломератів з більш крупними частками пилу (частки-наїзники). Отже, більш ніж 80 % активності ^{137}Cs припадає на частки з аеродинамічними діаметрами більше 10 мкм.

Як відомо, при ідентифікації радіоактивних аерозолів і визначенні джерел їхнього походження важливу роль відіграє співвідношення радіонуклідів.

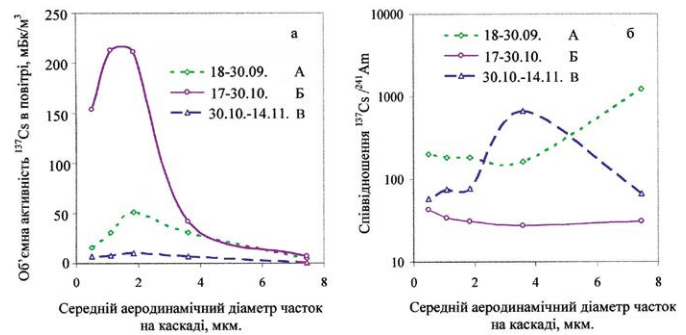


Рис. 5. Залежності від середніх аеродинамічних діаметрів часток на каскадах імпактора: а — об'ємних активностей ^{137}Cs в пробах повітря, б — співвідношень $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$. Літерами позначено інтервали роботи імпактора, відмічені на рис. 3. А — сплеск до обвалу, Б — під час обвалу, В — після обвалу

Так, завдяки відмінностям у співвідношенні між β -та γ -випромінювачами було показано наявність різних за природою частинок у приміщеннях об'єкта «Укриття», що містять залишки опроміненого палива [17]. У роботах [18, 19] за допомогою авторадіограм повітряних фільтрів, експонованих у різних приміщеннях об'єкта «Укриття», було проведено розділення ГЧ за активностями й показано, що на тому самому фільтрі можуть знаходитись ГЧ різного генезису — практично нерозчинні в імітаторі легеневої рідини паливні частки та суттєво більш розчинні частки, збагачені ^{137}Cs . Співвідношення $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$ для перших часток сягало 53, для групи збагачених цезієм часток ця величина була порядку 500 і вище [18]. Аналогічні результати спостерігалися в роботі [19], де були описані збіднені ^{137}Cs паливні частки зі співвідношенням $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am} \approx 26,5$.

З рис. 5, б бачимо, що для часток, відібраних до обвалу (крива А), як і в роботі [18] для імпакторних проб, характерне збагачення ^{137}Cs . Зазначимо, що відбір ім-

пакторних проб у даній роботі здійснювався тим же імпактором і на тому ж самому місці, що й у роботі [18]. А ось крива Б, яка відноситься до експозиції під час обвалу, демонструє несподівано значне збільшення вмісту в повітрі паливних часток. Експозиція після обвалу — крива В — відповідає певній релаксації системи.

Як уже було зазначено, на фільтрі ФВУ-3 присутні ГЧ з активностями не більше $5 \div 10$ Бк, їхні аеродинамічні діаметри не перевищують 40 мкм. Відсутність на фільтрі більш крупних ГЧ можна пояснити дією двох факторів.

1. Рух аерозольної хмари від місця обвалу до ФВУ супроводжувався гравітаційним осіданням більш крупних часток.

2. Стіна машинного залу, що відокремлює основний простір під аркою НБК від ФВУ-3, утворює свого роду відстійник — більш крупні ГЧ її не перелітають. Зрозуміло, що працюють обидва фактори, для оцінки внеску кожного з них не вистачає даних. З огляду на це бажано мати хоча б один імпактор усередині простору НБК.

Рис. 6 демонструє динаміку напрямків вітру протягом першої доби після обвалу. Бачимо, що переміщення мас повітря протягом принаймні 15 год після обвалу проходило повз трьох інших ФВУ. При цьому швидкість вітру коливалася в межах $1,1 \div 1,7$ м/с. Отже, відсутність піків активності в місцях розташувань ФВУ ще не означає відсутності викиду актив-

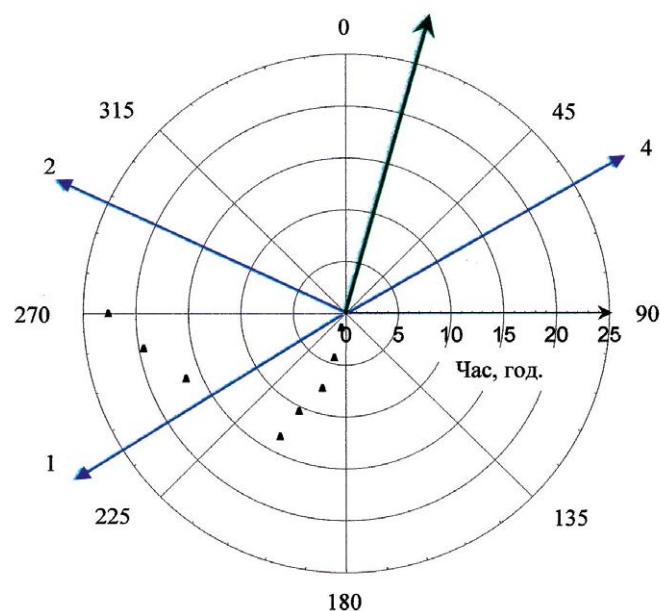


Рис. 6. Зміна напрямків вітру поблизу ЧАЕС у першу добу після обвалу. Стрілки 1, 2, 4 вказують напрямок до відповідних ФВУ, стрілка без номера вказує середній напрямок переміщення повітря за перші 15 год

ності за межі НБК. Але згідно з [6] зовнішні датчики об'єкта «Укриття» теж не зареєстрували піків активності, що свідчить про відсутність виходу радіоактивних продуктів за встановлені межі. Захисна споруда НБК підтвердила свої локалізуючі властивості щодо запобігання розповсюдження радіоактивного забруднення. Фільтри НЕРРА, за результатами аналізу динаміки зміни активності аерозольного викиду, у роботу не вводилися через відсутність загрози перевищення проектних контрольних рівнів та допустимого викиду радіонуклідів НБК [6].

Висновки

У результаті падіння о 14:35 17 жовтня 2019 р. бетонного фрагмента монолітної ділянки перекриття приміщення 402/3 в просторі під об'єктом «Арка» зафіксовано викид дрібнодисперсного радіоактивного аерозолю з високим вмістом паливних часток, що підтверджується низьким рівнем співвідношення $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$ імпакторних проб.

У місцях розташувань ФВУ поза межами НБК відповідні піки активності не були зареєстровані, хоча з огляду на динаміку вітрів можливий викид за межі НБК мав пройти повз точок розташування наявних ФВУ. Але зовнішні датчики об'єкта «Укриття» теж не зареєстрували піків активності, що свідчить про відсутність виходу радіоактивних продуктів за встановлені межі. Захисна споруда НБК підтвердила свої локалізуючі властивості щодо запобігання розповсюдження радіоактивного забруднення.

ФВУ-3 та імпактор РМ₁₀, унаслідок дещо ізольованого свого розташування, можуть спотворювати дані відносно дисперсного складу радіоактивного аерозолю. З огляду на це бажано мати хоча б одну додаткову точку спостережень усередині простору НБК.

Список використаної літератури

1. Физико-химические характеристики аэрозоля 30-километровой зоны ЧАЭС в 1986–2013 гг. / Е. К. Гаргер, В. О. Кашпур, Г. Г. Скоряк, В. К. Шинкаренко // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. — 2014. — Вип. 23. — С. 54–65.
2. Огородников Б. И. Радиоактивные аэрозоли объекта «Укрытие»: 1986–2006 гг.: монография / Б. И. Огородников, Э. М. Пазухин, А. А. Ключников. — Чернобыль: ИПБ АЭС НАН Украины, 2008. — 456 с.
3. Огородников Б. И. Состав и свойства радиоактивных аэрозолей объекта «Укрытие» Чернобыльской АЭС:

- 2000–2015 гг. / Б. И. Огородников // Журнал физической химии. — 2018. — Т. 92, № 6. — С. 1006–1017.
4. Закон України «Про загальні засади подальшої експлуатації і зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення зруйнованого четвертого енергоблока цієї АЕС на екологічно безпечну систему» від 11.12.1998 р. № 309-XIV // Відомості Верховної Ради України. — 1999. — № 4. — С. 33.
 5. Документ з безпеки в рамках концепції проекту ПК-1 НБК / SIP-N-LI-22-A500_CDS-001-01. Revision 1-Appendix. — 2008. — 63 с.
 6. Акт № 18/8–113 ЦРБ от 11.11.2019 служебного расследования причин увеличения аэрозольной активности в подарочном пространстве НБК 17.10.2019.
 7. Шинкаренко В. К. Результаты исследований аэрозольных фильтров, экспонированных до, во время и после разрушения крыши машинного зала 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС / В. К. Шинкаренко, В. А. Кашпур, Г. Г. Скоряк // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. — 2014. — Вып. 23. — С. 45–53.
 8. ICRP Publication 66. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. — Oxford : Pergamon Press, 1996. — 484 p.
 9. ICRP Publication 68. Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers // Annals of the ICRP. — 1994. — Vol. 24, № 4.
 10. Бойд Дж. Авторадиография в биологии и медицине / Дж. Бойд. — Москва : Изд-во иностранной литературы, 1957. — 360 с.
 11. Ядерное топливо в объекте «Укрытие» Чернобыльской АЭС / Р. В. Арутюнян, Л. А. Большов, А. А. Боровой [и др.] — Москва : Наука, 2010. — 240 с.
 12. Шинкаренко В. К. К определению активности «горячих» частиц радиографическим методом / В. К. Шинкаренко // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. — 2008. — Вып. 9. — С. 130–139.
 13. Шинкаренко В. К. К вопросу о погрешностях определения β -активности горячих частиц методом авторадиографии / В. К. Шинкаренко // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. — 2018. — Вып. 30. — С. 109–118.
 14. Assessment of aerosol radiation environment in short-range region of ChNPP during building of the new safe confinement / E. K. Garger, V. K. Shynkarenko, V. A. Kashpur [et al.] // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. — 2017. — Вып. 29. — С. 78–84.
 15. Топливо реактора 4-го блока ЧАЭС: краткий справочник / С. Н. Бегичев, А. А. Боровой, Е. В. Бурлаков [и др.] — Москва, 1990. — 23 с. — (Препр. / АН СССР; ИАЭ-5208/3).
 16. Форма и характеристики частиц топливного выброса при аварии на Чернобыльской АЭС / С. А. Богатов, А. А. Боровой, Ю. В. Дубасов, В. В. Ломоносов // Атомная энергия. — 1990. — Т. 69, вып. 1. — С. 36–40.
 17. Исследование характеристик аэрозолей в содержащих топливо помещениях объекта «Укрытие» / В. П. Бадковский, А. А. Ключников, Т. А. Кравчук [и др.] // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. — 2009. — Вып. 12. — С. 103–112.
 18. Гаргер Е. К. Оценка степени растворения радиоактивных аэрозольных частиц из объекта «Укрытие» / Е. К. Гаргер, А. А. Одинцов, В. К. Шинкаренко // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. — 2009. — Вып. 12. — С. 125–136.
 19. Поведение «горячих» аэрозольных частиц из объекта «Укрытие» в имитаторах легочной жидкости / Е. К. Гаргер, А. А. Одинцов, В. К. Шинкаренко, J. Tschiersch // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобиля. — 2013. — Вып. 21. — С. 43–52.

V. K. Shynkarenko, V. A. Kashpur, G. G. Skorjak, P. V. Sabenin

Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, NAS of Ukraine, 12, Lysogirska st., Kyiv, 03028, Ukraine

To a Burst of ^{137}Cs Activity in the Air under the “Arch” Object on October 17, 2019

The construction of a New Safe Confinement (NSC) is one of the main stages in the transformation of the Chornobyl nuclear power plant 4th power unit into an ecologically safe system. On the one hand, this system is designed to ensure the safety of personnel, the population and the environment, on the other — to allow safe work with the remnants of the unit. At the same time, the project allows quite high levels of bulk activity of radioactive aerosols inside the NSC — up to 210 Bq/m³ for total β -activity. The sharp increase in the volumetric air activity, observed on October 17–19, 2019 in a number of rooms of the Shelter object and in the space under the “Arch” object in the absence of a burst of activity outside these objects, can be considered as a successful kind of spontaneous test of the NSC isolation systems.

The chronology of the dynamics of volume activity according to the act of official investigation of the precedent is given. The results of studies of aerosol filters exposed in the near zone of the Chornobyl NPP before and

after the burst of activity in the air under the “Arch” object are presented. Autoradiograms of fragments of these filters demonstrate a significant (≈ 2 orders of magnitude) increase in the number of hot particles immediately after the fall of the concrete fragment of the floor in the room 402/3. The analysis of features of the hot particles after the collapse indicates a significant contribution to the total activity of a large number of low-activity particles ($0.005 \div 5$ Bq), and the low $^{137}\text{Cs}/^{241}\text{Am}$ ratio that indicates their fuel nature. Based on the assumption about the fuel nature of hot particles, their minimum possible aerodynamic diameters were calculated, which are in the range $2.91 < d < 36.7 \mu\text{m}$, which does not exclude the presence of smaller hot particles on the filter that are not visible using this method. The contribution of particles with aerodynamic diameters less than $10 \mu\text{m}$, determined using the impactor, did not exceed 20 % of the total beta activity of the aerosol.

Keywords: Shelter object, hot particles, autoradiography, specific air activity.

References

- Garger E. K., Kashpur V. A., Skorjak G. G., Shynkarenko V. K. (2014). *Fiziko-himicheskie harakteristiki aerozolya 30-kilometrovoy zony ChAES v 1986–2013 gg.* [Physical and chemical characteristics of the aerosol of the 30 km zone of ChNPP in 1986–2013]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsiy i Chornobylya* [Problems of nuclear power plants safety and of Chornobyl], vol. 23, pp. 54–64. (in Ukr.)
- Ogorodnikov B. I., Pazukhin E. M., Kliuchnykov A. A. (2008). *Radioaktivnye aerozoli obekta “Ukrytie”: 1986–2006 gg.* [Radioactive aerosols of the Shelter object: 1986–2006]. Chornobyl: ISP NPP NAS of Ukraine, 456 p. (in Russ.)
- Ogorodnikov B. I. (2018). *Sostav i svoystva radioaktivnykh aerozolei obekta “Ukrytie” Chernobyl’skoi AES: 2000–2015 gg.* [Composition of Radioactive Aerosols in the Shelter Construction of the Chernobyl Nuclear Power Plant in 2000–2015]. *Zhurnal fizicheskoy himii* [Russian Journal of Physical Chemistry], vol. 92, no 6, pp. 1006–1017. (in Russ.)
- The Law of Ukraine “On General Principles of Further Operation and Decommissioning of Chornobyl NPP and Transformation of Ruined Fourth Power Unit of This NPP into Ecologically Safe System”. Approved by Supreme Council of Ukraine, 1999, no. 4, p. 33. (in Ukr.)
- NSC CS-1 Concept Design Safety Document. SIP-N-LI-22-A500-CDS-001. Revision 1-Appendix, 2008, 63 p.
- Act of the official investigation of the reasons for the increase in aerosol activity in the space under the NSC on 17.10.2019. Act of the RSC no. 18/8–113, dated 11.11.2019, 8 p. (in Russ.)
- Shynkarenko V. K., Kashpur V. A., Skorjak G. G. (2014). *Rezultaty issledovaniya aerozol’nykh fil’trov, eksponirovannykh do, vo vremia i posle razrusheniya kryshi mashinnogo zala 4-go energobloka Chernobyl’skoj AEES.* [Results of studies of the aerosol filters exposed before, during and after the destruction of the roof of the machine hall of Chernobyl NPP 4-th block]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsiy i Chornobylya* [Problems of nuclear power plants safety and of Chornobyl], vol. 23, pp. 45–53. (in Russ.)
- ICRP (1994). *Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection.* ICRP Publication 66. Ann. ICRP 24 (1–3).
- ICRP (1994). *Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers.* ICRP Publication 68. Ann. ICRP 24 (4).
- Arutyunian R. V., Bol’shov L. A., Borovoi A. A., Velihov E. P., Kliuchnikov A. A. (2010). *Yadernoe toplivo v obiekte “Ukrytie” Chernobyl’skoi AES* [Nuclear fuel in the Shelter object of the Chornobyl NPP]. Moscow: Nauka Publ., 240 p. (in Russ.)
- Boyd G. A. (1955). *Autoradiography in biology and medicine.* New York: Academic Press, 414 p.
- Shynkarenko V. K. (2008). *K opredeleniiu aktivnosti “goryachih” chastits radiograficheskim metodom.* [To definition of activity of hot particles by a radiographic method]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsiy i Chornobylya* [Problems of nuclear power plants safety and of Chornobyl], vol. 9, pp. 130–139. (in Russ.)
- Shynkarenko V. K. (2018). *K voprosu o pogreshnostyah opredeleniya β -aktivnosti goryachih chastits metodom avtoradiografii.* [To problems of hot particles β -activity determination errors by the autoradiography method]. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsiy i Chornobylya* [Problems of nuclear power plants safety and of Chornobyl], vol. 30, pp. 109–118. (in Russ.)
- Garger E. K., Shynkarenko V. K., Kashpur V. A., Skorjak G. G., Kalinovsky A. K. (2017). Assessment of aerosol radiation environment in short-range region of ChNPP during building of the new safe confinement. *Problemy bezpeky atomnykh elektrostantsiy i Chornobylya* [Problems of nuclear power plants safety and of Chornobyl], vol. 29, pp. 78–84.
- Begichev S. N., Borovoi A. A., Burlakov E. V., Gavrilov S. L., Dovbenko A. A., Levina L. A., Markushev V. M., Marchenko A. E., Stroganov A. A., Tataurov A. L. (1990). *Toplivo reaktora 4-go bloka ChAES: Kratkii spravochnik.* [Reactor fuel of the 4th unit of the ChNPP: A short guide]. Moscow: USSR Academy of Sciences, IAE preprint-5208/3, 23 p. (in Russ.)

16. Bogatov S. A., Borovoi A. A., Lomonosov V. V. (1990). Form and parameters of the particles of the fuel ejection in the Chernobyl reactor accident. *Atomic Energy*, vol. 69, no. 1, pp. 595–601.
17. Badovsky V. P., Kliuchnikov O. O., Kravchuk T. A., Melenevsky A. E., Shcherbin V. M. (2009). *Issledovaniye kharakteristik aerorozley v soderzhashchikh toplivo pomeshcheniyakh obiyekta "Ukrytiye"*. [Aerosol characteristic researching in basic fuel-containing premises at object "Ukryttya"]. *Problemy bezpeky atomnyh elektrostantsiy i Chornobylya* [Problems of nuclear power plants safety and of Chornobyl], vol. 12, pp. 103–112. (in Russ.)
18. Garger E. K., Odintsov A. A., Shynkarenko V. K. (2009). *Otsenka stepeni rastvoreniya radioaktivnykh aerorozol'nykh chastits iz obiyekta "Ukrytiye"*. [Estimation of the degree of dissolution radioactive aerosol particles from Shelter object]. *Problemy bezpeky atomnyh elektrostantsiy i Chornobylya* [Problems of nuclear power plants safety and of Chornobyl], vol. 12, pp. 125–136. (in Russ.)
19. Garger E. K., Odintsov A. A., Shinkarenko V. K., Tschiersch J. (2013). Behaviour of "hot" aerosol particles from object "Ukryttya" in simulators of a pulmonary liquid. *Problemy Bezpeky Atomnykh Elektrostantsiy i Chornobylya* [Problems of nuclear power plants safety and of Chornobyl], vol. 21, pp. 43–52. (in Russ.)

Надійшла 07.04.2021

Received 07.04.2021