

РОЗРОБКА, ОРГАНІЗАЦІЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ПРОГРАМИ МОНІТОРИНГУ РАДІОАКТИВНИХ АЕРОЗОЛІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПЕРСОНАЛЬНИХ ПРОБОВІДБІРНИКІВ АЕРОЗОЛІВ ТА ІМПАКТОРІВ ПРИ ПРОВЕДЕННІ РОБІТ НА ОБ'ЄКТІ «УКРИТТЯ»

П.Б.Арясов, С.Ю. Нечасєв, Н.Я.Циганков

Науково-дослідний інститут радіаційного захисту (НДІ РЗ)
Академії технологічних наук України, м. Київ, Україна,
e-mail: aryaspin@rpi.kiev.ua

У роботі наведено радіаційно-гігієнічні характеристики радіоактивних аерозолів "Об'єкта "Укриття" (ОУ). Представлено структуру розробленої та впровадженої спеціальної програми моніторингу радіоактивних аерозолів із застосуванням персональних пробовідбірників аерозолів (ППА) та персональних імпакторів (ППА). Реалізація даної програми моніторингу на практиці дозволяє отримати повний набір реальних натурних даних щодо характеристик радіоактивних аерозолів безпосередньо в зоні дихання персоналу в залежності від різних типів робіт.

Вступ

Протягом 2004-2008 років у рамках виконання Плану Здійснення Заходів (ПЗЗ) на об'єкті "Укриття" (ОУ) проводилися роботи зі стабілізації нестабільних конструкцій ОУ. Більшість робіт, що виконуються всередині та на майданчиках ОУ, супроводжуються підвищенням концентрації радіоактивних аерозолів у повітрі. Відповідно до регулюючих документів України [1] контроль внутрішнього опромінення при практичній діяльності регламентується лише єдиним шляхом надходження (та пов'язаної з ним дози внутрішнього опромінення) радіонуклідів – інгаляційним. Так, окрему увагу має бути приділено аналізу основних факторів, що формують дозу внутрішнього опромінення персоналу для умов об'єкта ОУ за рахунок інгаляційного надходження, та розробці спеціальної програми моніторингу радіоактивних аерозолів із наведенням результатів її впровадження.

До основних факторів, що впливають на формування дози внутрішнього опромінення при інгаляційному надходженні, належать: радіонуклідна композиція, розподіл активності за аеродинамічним діаметром (АД) та тип системного надходження (фізико-хімічні параметри) радіоактивних аерозолів [2,3].

Аналіз основних факторів, що формують дозу внутрішнього опромінення

На сьогодні встановлено [2,6], що в умовах ОУ доза внутрішнього опромінення формується переважно трансураними елементами (ТУЕ).

Як можна бачити з рис. 1, близько 1% сумарної активності, яку мають альфавипромінюючі ТУЕ, формує більше 70% дози внутрішнього опромінення при одноразовому інгаляційному надходженні всієї радіонуклідної суміші. У той же час, ^{137}Cs і ^{90}Sr , сумарна активність яких складає біля 88%, визначають внесок у дозу

внутрішнього опромінення на рівні менше ніж 12%.

На рис.2 наведена залежність дози внутрішнього опромінення на одиницю

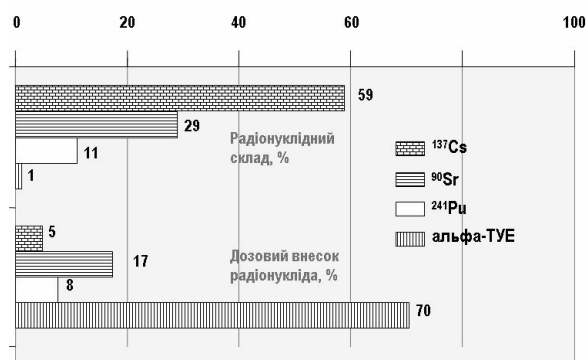


Рис. 1. Внесок до дози внутрішнього опромінення при інгаляційному надходженні в залежності від радіонуклідів аерозолів ОУ

надходження від розподілу радіоактивних аерозолів за аеродинамічним діаметром (АД). Аналіз цієї залежності для аерозолів типу системного надходження S, що містять ^{239}Pu , демонструє наявність максимуму (в області 0.06 мкм АД), величина якого у 5-10 разів перевищує коефіцієнт переходу „одиниця надходження - доза”.

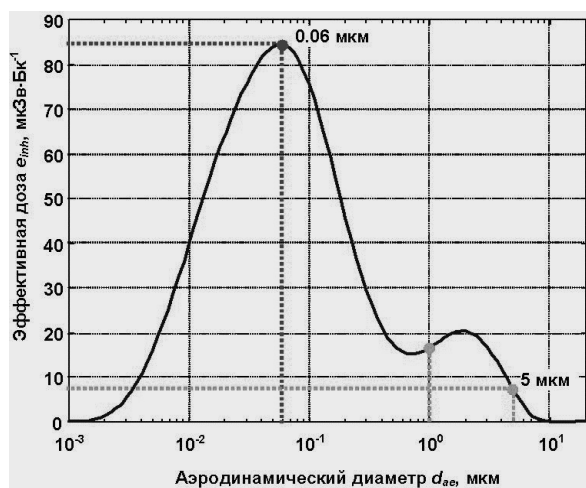


Рис. 2. Залежність дози на одиницю надходження e_{inh} від АД (d_{ae}) при однократному інгаляційному надходженні аерозолів, що містять ^{239}Pu (тип системного надходження - S, фізичне навантаження - легке, тип дихання – нормальний).

Це відповідає референтному активному медіанному аеродинамічному діаметру (АМАД) (5 мкм для персоналу категорії

А) і зазвичай рекомендуються Міжнародною комісією радіаційного захисту (МКРЗ) для розрахунків при відсутності фактичних даних про конкретні параметри радіоактивних аерозолів на робочому місці.

Таким чином, теоретично, в залежності від реального розподілу аерозолів доза внутрішнього опромінення може бути на порядок вищою за розрахункове значення, що отримане для референтних параметрів. Такий високий внесок до дози внутрішнього опромінення від субмікронних аерозолів може бути обґрунтований тим, що частки розміром менш, ніж 1 мкм ефективно проникають до альвеолярного відділу респіраторного тракту [2] та, відповідно, опромінюють більшу кількість клітин-мішеней. Фактично, врахування натурального розподілу аерозолів призводить до суттєво відмінних коефіцієнтів „одиниця надходження - доза” у порівнянні з референтними значеннями, рекомендованими МКРЗ.

Іншим важливим параметром, що визначає дозоформуючі властивості аерозолів є тип системного надходження радіоактивних аерозолів. В залежності від типу системного надходження відбувається метаболізм радіонукліду в організмі людини та, як результат – визначається результуюча ефективна доза [2].

Таблиця 1. Стандартні дозові коефіцієнти радіонуклідів при інгаляційному надходженні в залежності від типу системного надходження (МКРЗ-68, АМАД 1 мкм)

Радіонуклід	Дозовий коефіцієнт, мкЗв·Бк ⁻¹		
	S	M	F
^{239}Pu	15	47	–
^{241}Am	–	39	–
^{90}Sr	0.15	–	0.024
^{137}Cs	–	–	0.005

Аналіз таблиці 1 свідчить, що порівняння дозових коефіцієнтів радіонуклідів при інгаляційному надходженні в залежності від типу системного надходження для плутонію показує їх підвищення у 3-4 рази при переході від класу S до класу M.

Результати подібних досліджень тим більш важливі, що в умовах робіт на ОУ частки можуть мати різний тип системного надходження до організму людини в залежності від аеродинамічного розміру аерозолів.

Аналізуючи вищенаведене, можна зробити висновок, що наявність реальних (натурних) даних, які характеризують радіоактивні аерозолі при єдиному можливому інгаляційному шляху надходження радіонуклідів для персоналу, має важливе значення для коректної подальшої інтерпретації даних моніторингу виробничого середовища та дозових оцінок.

Спеціальна програма моніторингу радіоактивних аерозолів

Враховуючи, що основним об'єктом дослідження є радіоактивні аерозолі ОУ, було розроблено спеціальну програму моніторингу радіоактивних аерозолів, що утворюються як під час виконання робіт, так і за умови їх відсутності. Було розроблено та успішно запроваджено повний цикл експериментальних досліджень щодо характеристик радіоактивних аерозолів для умов ОУ, враховуючи усі процедури: від підготовчих робіт до проведення експериментів безпосередньо всередині ОУ та аналізу й інтерпретації отриманих результатів [5].

Основною метою було розробити та практично впровадити програму моніторингу радіоактивних аерозолів із застосуванням персональних пробовідбірників аерозолів (ППА) та персональних пробовідбірників аерозолів імпакторного типу (ППАІ - персональних імпакторів) для отримання комплексу характеристик аерозолів, як-то: розподіл аерозолів за аеродинамічним діаметром, концентрація та радіонуклідний склад як безпосередньо у зоні дихання персоналу під час виконання робіт на ОУ, так і для зон виконання робіт. Розроблена спеціальна програма мо-

ніторингу включає до себе чотири основних напрямки:

- I. Підготовчі та організаційні процедури;
- II. Експериментальна частина;
- III. Радіометричні вимірювання;
- IV. Програма контролю якості.

Загальна схема програми наведена на Рис. 3. Фактично, кожна з наведених вище складових є окремими субпрограмами зі своїми власними структурами та параметрами. Зокрема, в той час, коли перші три складові програми мають ієрархічне підпорядкування, програма контролю якості охоплює всі складові програми як по окремих напрямках, так і в цілому.

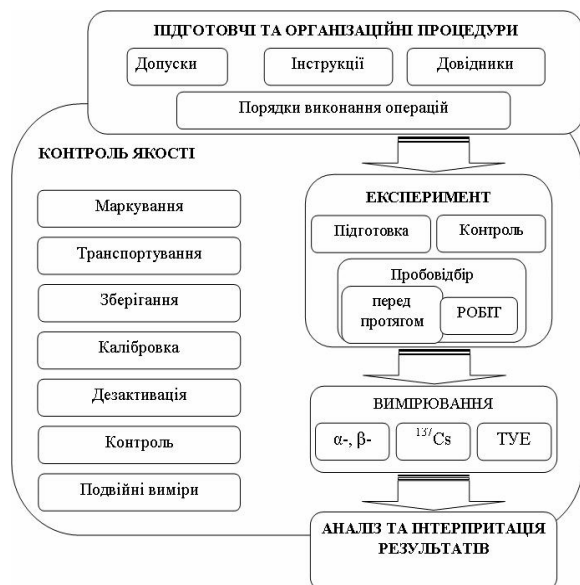


Рис. 3. Загальна структурна схема спеціальної програми моніторингу радіоактивних аерозолів.

Після розгляду та аналізу робіт, що планувалися до виконання на ОУ, їх було поділено на 5 основних груп. Кожній групі було присвоєно відповідний класифікатор. У таблиці 2 наведено опис робіт кожної групи та їх класифікатори. Фактично усі радіаційно-небезпечні роботи з підвищеною ймовірністю генерації радіоактивних аерозолів були охоплені програмою моніторингу.

Таблиця 2. Опис радіаційно-небезпечних робіт із підвищеною ймовірністю генерації радіоактивних аерозолів та їх класифікатор

Опис роботи	Тип
Роботи із застосуванням електрозварювального обладнання	1
Монтування елементів (роботи, не пов'язані з типами 1, 4, 5)	2
Підготовка робочих місць	3
Роботи із застосуванням бурильного обладнання та дрилів	4
Роботи із застосуванням абразивної різки металу	5

Основне обладнання для експериментів

Як основне обладнання для отримання зразків повітряних проб було використано шести- та восьмикаскадні (відповідно моделі 296 та 298) персональні імпаکتори серії Marple-290. Модель МР-298 відрізняється від моделі МР-296 наявністю двох додаткових каскадів для розділу

крупнодисперсної фракції аерозолів. Ці каскади мають маркування «1» і «2» в таблиці 3 та відсутні у моделі МР-296. На рис. 4 наведено зовнішній вигляд проведення експериментів з визначення дисперсного складу радіоактивних аерозолів безпосередньо у зоні дихання персоналу під час виконання робіт на ОУ.



Рис. 4. Проведення пробовідбору за допомогою персонального імпактору під час виконання робіт на ОУ. Приміщення – 635/3 відм. + 24, Тип робіт – 2

Для забезпечення постійної швидкості прокачування повітря під час проведення експериментів використовувалось два ти-

пи повітряних помп разом з персональними імпакторами: “Gil Air-5” та “Gilian 3500”. Швидкість прокачування

повітря було встановлено на рівні, що рекомендується технічними умовами обладнання [4], та становила $2 \text{ л}\cdot\text{хв}^{-1}$. Рівні відсікання за каскадами імпакторів наведено у таблиці 3. Як можна бачити з таблиці 3, вказане обладнання дозволяє отримати максимально повну інформацію щодо дисперсного складу радіоактивних аерозолів у всьому діапазоні інгалібельної фракції.

Таблиця 3. Рівні відсікання АД за каскадами імпакторів серії Marple 290, мкм, швидкість повітря, що прокачується $2 \text{ л}\cdot\text{хв}^{-1}$

Номер каскаду	Рівень відсікання, мкм
1	21.3 ^a
2	14.8 ^a
3	9.8
4	6
5	3.5
6	1.55
7	0.93
8	0.52
Фінальний фільтр	0

Задля збереження цілісності даних та наявності всієї супроводжувальної технічної інформації для кожного експерименту було розроблено спеціальний „паспорт” на повітряну пробу. На початку та по за-

вершенні виконання роботи в даний „паспорт” була занесена вся необхідна інформація стосовно індивідууму, роботи, що була виконана, умов та характеристик, що супроводжували роботу, як-то:

- дата виконання роботи;
- код-ідентифікатор операції;
- єдиний наряд допуск;
- організація;
- прізвище, ім'я, по-батькові;
- номер приміщення/місце роботи;
- тип робіт;
- час початку роботи;
- час виконання роботи;
- серійний номер імпактора;
- серійний номер повітряної помпи;
- додаткові примітки/несправності.

Для калібрування повітряних pomp та встановлення необхідної швидкості прокачування повітря використовувались два комплекти калібраторів “Gilian”, моделі “Gilibrator-2”, з насадкою “Gilian” (т.з. „кульковий генератор”), що працює на мильному розчині. Калібрувальні процедури проводились безпосередньо перед кожним експериментом із занесенням усіх необхідних даних до робочої документації. Як підкладки на каскади імпактора та вихідного фільтра використовувались скловолкнисті фільтри SEC-290-GF та SEF-290-GF, відповідно.

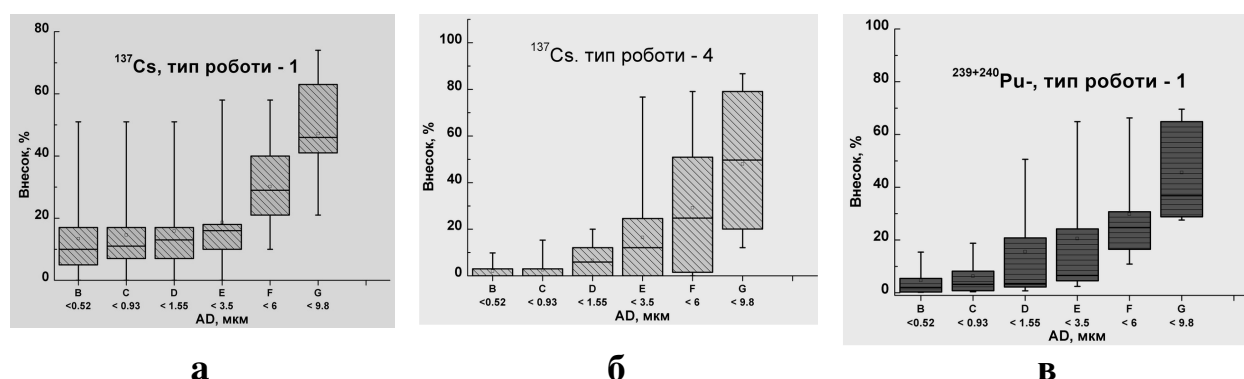


Рис. 5. Кумулятивний розподіл радіоактивних аерозолів, що утворюються під час виконання робіт на ОУ за АД для різних типів робіт; а,б - ¹³⁷Cs, тип робіт - 1, 4, відповідно; в - ²³⁹⁺²⁴⁰Pu, тип робіт - 1.

Для стандартних ППА були використані скловолокнисті фільтри GF.

Результати та обговорення

На даний час робота над програмою моніторингу продовжується, що зумовлено не лише можливістю покращити статистику та достовірність отриманих результатів, а й задля забезпечення радіаційної безпеки персоналу, що виконує роботи, на належному рівні. В тому числі ведеться робота з т.з. „щоденних покращень” всієї програми в цілому. У відповідності до структури програми було проведено більш ніж 300 експериментів із застосуванням імпакторного обладнання. Загалом чисельність повітряних проб, що було отримано та проаналізовано, складає близько 4000 одиниць.

Підготовка до вимірювань та самі вимірювання були виконані «серіями» по мірі доставки зразків повітряних проб з ОУ в лабораторні умови. Після доставки з ОУ, серії фільтрів із відібраною повітряною пробкою були витримані протягом 5 діб (з метою вилучення впливу дочірніх продуктів розпаду радону) перед проведенням вимірювань на вміст сумарної активності альфа - та бета - випромінюючих радіонуклідів. За цей час усі фільтри зі зразками повітряних проб були задокументовані, сфотографовані та зареєстровані в базі даних, включаючи занесення всієї супроводжувальної інформації з паспортів повітряних проб. Подальші радіометричні процедури були поділені на три кроки:

1. Всі отримані повітряні проби спочатку були досліджені на вміст сумарної активності альфа- та бета-випромінюючих радіонуклідів;
2. Після селекції окрема частина досліджувалась на вміст ^{137}Cs ;
3. Для тих зразків, що пройшли другий крок, проведено радіохімічне виділення $^{239+240}\text{Pu}$ та ^{241}Am з подальшим виміром вмісту вказаних ТУЕ.

За допомогою розробленої програми моніторингу було отримано дані щодо концентрацій, радіонуклідного складу та розподілу радіоактивних аерозолів за АД. Дані щодо дисперсності аерозолів було проаналізовано низкою стандартних методів [5].

Як приклад отриманих результатів на рис. 5 у вигляді кумулятивного розподілу наведено первинні дані щодо дисперсного складу радіоактивних аерозолів, що утворюються під час виконання робіт ($^{239+240}\text{Pu}$ та ^{137}Cs).

Аналіз розподілу ^{137}Cs для типів робіт 2-5 показав, що, зазвичай, ^{137}Cs знаходиться в крупній фракції аерозолів. У більшості випадків вміст ^{137}Cs було зареєстровано для частинок розміром 3.5 мкм та вище. В той же час, вклад фракції аерозолу розміром 3.5 мкм та менше не перевищує 25% до загальної активності ^{137}Cs . Отримані експериментальні результати добре описуються лог-нормальним законом. Активність ^{137}Cs може бути представлена як лог-нормальний розподіл із наступними параметрами: діапазон АМАД 5.5-12 мкм зі стандартним геометричним відхиленням (σ_g) 1.4-3.4. Проте, тип робіт „1” (роботи з застосуванням електрозварувального обладнання) викликає особливу увагу. Отримані дані для ^{137}Cs щодо цього типу робіт варіюються у дуже великому діапазоні. В той же час можна впевнено стверджувати, що активність ^{137}Cs в залежності від АД не може бути описано одно-модальним лог-нормальним розподілом внаслідок суттєвого (інколи до 40%) внеску субмікронної компоненти (фінальний фільтр, що характеризується АД 0-0.5 мкм) в загальну активність. Даний факт знаходить пояснення у специфіці цього типу робіт та пов'язаний з термічною сублімацією ^{137}Cs при високих температурах.

На відміну від ^{137}Cs , розподіл $^{239+240}\text{Pu}$ для будь-якого типу робіт 1-5 не має такої особливості та може бути описаний лог-нормальним законом з АМАД 7-12 мкм та σ_g 1.6-3.4 в залежності від типу робіт.

Завдяки структурі розробленої програми моніторингу, а саме: проведення експериментів до, під час та після робіт, стало можливим вивчити зміни концентрацій радіоактивних аерозолів. Дослідження підвищення концентрації радіоактивних аерозолів („коефіцієнт підвищення концентрації” під час виконання робіт) було виконано для вказаних раніше типів робіт. „Коефіцієнт підвищення концент-

рації” визначається як співвідношення між величиною концентрації радіоактивних аерозолів під час проведення робіт до величини концентрації перед початком їх виконання.

У таблиці 4 наведено уточнення щодо фактичних робіт (в рамках вказаних раніше типів), які були виконані під час проведення досліджень.

Таблиця 4. Роботи, що фактично виконувались під час проведення досліджень

Тип робіт	Фактичні роботи
1	Зварювання металоконструкцій та „зв’язків”, оновлення опор
2	Монтаж елементів та лісів, розчищення напливів бетону
4	Свердління отворів у стінах та буріння підлоги і перекриття
5	Підгонка металоконструкцій, різка проїомів, зачищення

Таблиця 5. Результати аналізу зміни величини концентрації радіонуклідів під час виконання робіт в залежності від типу робіт, що виконувались. Прим. 553/2, 635/3.

Тип робіт	Коефіцієнт підвищення концентрації ^{137}Cs		
	Максимум	Середнє	Медіана
1	1340	287	222
2	142	110	95
4	1520	260	95
5	3490	943	139

Отримані результати свідчать, що роботи 4-го та 5-го типу належать до найбільш небезпечних з точки зору підвищення концентрації радіоактивних аерозолів.

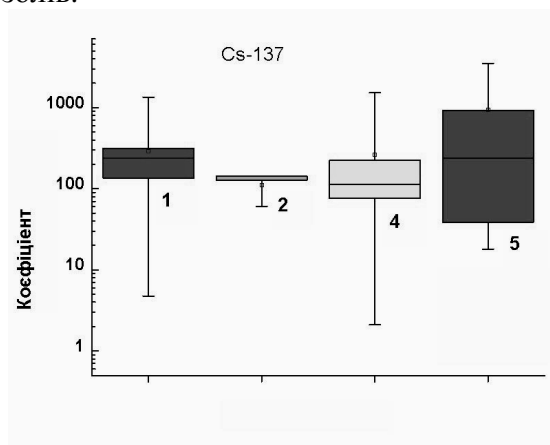


Рис. 6. Коефіцієнт підвищення концентрації в залежності від типу робіт для ^{137}Cs . (По осі абсцис – тип робіт).

Високі значення коефіцієнту підвищення концентрації, з максимальною величиною більш ніж 4500 для $^{239+240}\text{Pu}$, можуть бути обґрунтовані специфікою цих типів робіт. Так, для робіт 4-го типу більшість досліджень проводилась із високо-забрудненим бетоном, що був укладений в 1986 (під час ліквідації аварії). Роботи 5-го типу переважно виконувались з метою прибрати/демонтувати конструкції з металу, що мають високий рівень радіаційного забруднення внаслідок безпосередньо аварії та їх подальшого існування з 1986 року. На Рис. 6 наведено залежність коефіцієнта підвищення концентрації для ^{137}Cs від типу робіт для приміщень 635/3, 553/3. У таблиці 5 наведено чисельні значення коефіцієнта під-

вищення концентрації радіоактивних аерозолів для вказаних вище умов.

Висновки

Розроблено та запроваджено спеціальну програму моніторингу радіоактивних аерозолів, що супроводжують роботи на ОУ. Успішне впровадження програми дозволило сформуванню інфраструктури для виконання подальшого аналізу характеристик радіоактивних аерозолів як-то: залежність дисперсного та радіонуклідного складу, концентрацій радіоактивних аерозолів від типів та місць проведення робіт, що виконуються на ОУ. Отримано узагальнені результати з характеристик радіоактивних аерозолів ОУ.

Встановлено, що для робіт, виконаних без застосування електрозварювального обладнання, радіонукліди переважно містяться у крупній фракції аерозолів. Для аерозолів, що містять $^{239+240}\text{Pu}$, отримані результати добре описуються логнормальним законом з наступними пара-

метрами: АМАД 6-11 мкм, σ_g – 1.6-3.4, в залежності від типу робіт.

Для зварювальних робіт вклад субмікронної компоненти (0-0.5 мкм) ^{137}Cs у сумарну активність може досягати 40%, що обумовлено специфікою цього типу робіт, та пов'язано з сублімацією ^{137}Cs при високих температурах.

Встановлено величини та залежність коефіцієнта підвищення концентрації радіоактивних аерозолів від типу робіт для умов ОУ. На основі отриманих експериментальних даних було визначено найбільш небезпечні типи робіт для умов ОУ з точки зору підвищення концентрації радіоактивних аерозолів.

Отримані в рамках проведення дослідження результати мають велике значення для високоякісних дозових оцінок, забезпечення радіаційної безпеки та подальшого планування та оптимізації заходів з протирадіаційного захисту.

Література

1. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97).- Київ: МОЗ України, 1997.- 121 с.
2. Annals of the ICRP. ICRP Publication 66. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection.- Vienna: Pergamon Press, 1993, P. 65-80.
3. US DOE, Implementation Guide, G – 10CFR835/C1 – Rev. 1, Internal Dosimetry Program.
4. Instruction Manual. Series 290 Marple Personal Cascade Impactor. P/N 100065-00.
5. Aryasov P., Nechaev S., Tsygankov N., Dmitrienko A. Aerosol monitoring during work inside the “object shelter”: Analysis of dispersion and concentration for different work types. Journal of Alloys and Compounds. - (2007) 483–485.
6. Bondarenko O.A., Aryasov P.B., Melnichuk D.V., Medvedev S.Y. Analysis of aerosol distribution inside the object “shelter” at the chornobyl nuclear reactor site, Health Phys. 81 (2) (2001) 114–123.

**DEVELOPMENT, ORGANIZATION AND
IMPLEMENTATION OF THE PROGRAM OF
RADIOACTIVE AEROSOL MONITORING USING
PERSONAL AIR SAMPLERS AND IMPACTORS
DURING THE MAINTENANCE OF THE *SHELTER*
OBJECT**

P.B.Aryasov, S. Yu. Nechaev, N.Ya. Tsygankov

Radiation Protection Institute of Ukraine.
Academy of Technological Science of Ukraine. Kiev, Ukraine,
e-mail: aryaspin@rpi.kiev.ua

Results regarding the radiation-hygienic characteristics of the radioactive aerosol of the *Shelter* Object during its maintenance are presented. The structure of the developed and implemented special program of radioactive aerosol monitoring using personal air samplers and personal impactors is presented in the paper. Realization of the monitoring program in practice enable one to obtain the whole set of actual data regarding the characteristics of the radioactive aerosol directly in the breathing zone of the personnel depending on the work being performed.

