

О. В. Михайлов<sup>1</sup>, М. В. Савельєв<sup>1,2</sup>, М. А. Пантін<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Кірова, 36а, Чорнобиль, 07270, Україна

<sup>2</sup> Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, просп. Академіка Глушкова, 42, Київ, 03680, Україна

## Результати контролю потужності еквівалентної дози $\gamma$ -випромінювання у приміщеннях об'єкта «Укриття» ЧАЕС

### Ключові слова:

Чорнобильська АЕС,  
новий безпечний конфайнмент,  
об'єкт «Укриття»,  
стаціонарна система  
радіаційного контролю,  
потужність еквівалентної дози  
 $\gamma$ -випромінювання,  
динаміка

Проведено аналіз даних щодо потужності еквівалентної дози (ПЕД)  $\gamma$ -випромінювання у приміщеннях об'єкта «Укриття», отриманих упродовж 2018–2023 рр. за допомогою стаціонарної системи радіаційного контролю (ССРК) інтегрованої автоматизованої системи контролю (ІАСК). Зроблено висновки щодо загальної тенденції в динаміці ПЕД  $\gamma$ -випромінювання у приміщеннях об'єкта «Укриття» після введення в експлуатацію комплексу нового безпечного конфайнмента та об'єкта «Укриття» (комплекс НБК-ОУ). Проведено аналіз відповідності підконтрольних ССРК приміщень об'єкта «Укриття» експлуатаційним межах (ЕМ) безпечної експлуатації комплексу НБК-ОУ за значенням ПЕД. Відповідно до регламентованих значень ЕМ для ПЕД  $\gamma$ -випромінювання підконтрольні приміщення було розподілено на чотири групи. Для кожної групи приміщень об'єкта «Укриття» проведено порівняння середньорічної швидкості зменшення ПЕД  $\gamma$ -випромінювання зі швидкістю розпаду радіонукліда  $^{137}\text{Cs}$ .

### Вступ

У рамках здійснення Плану заходів на об'єкті «Укриття» і побудови комплексу «Новий безпечний конфайнмент — об'єкт «Укриття»» (комплекс НБК-ОУ) була створена стаціонарна система радіаційного контролю (ССРК), що є частиною інтегрованої автоматизованої системи контролю (ІАСК) [1]. Основне призначення ССРК — безперервний автоматизований контроль радіаційного стану в приміщеннях об'єкта «Укриття» та на території проммайданчика комплексу НБК-ОУ [1, 2]. ССРК забезпечує контроль таких параметрів радіаційного стану: ПЕД  $\gamma$ -випромінювання, об'ємна активність (ОА)  $\alpha$ -,  $\beta$ -аерозолів у повітрі приміщень об'єкта «Укриття»; ПЕД  $\gamma$ -випромінювання, ОА  $\alpha$ -,  $\beta$ -аерозолів у повітрі на території проммайданчика комплексу НБК-ОУ. Система містить такі датчики контролю: 39 датчиків вимірю-

вання ПЕД  $\gamma$ -випромінювання (35 — у приміщеннях об'єкта «Укриття», 4 — на проммайданчику комплексу НБК-ОУ); 14 датчиків вимірювання ОА  $\alpha$ -,  $\beta$ -аерозолів (10 — у приміщеннях об'єкта «Укриття», 4 — на проммайданчику комплексу НБК-ОУ); 2 датчики вимірювання ОА  $\alpha$ -,  $\beta$ -аерозолів у повітрі на лінії «байпаса» системи витяжної вентиляції та газоочищення об'єкта «Укриття»; 2 датчики контролю витрати повітря через «байпас» системи витяжної вентиляції та газоочищення об'єкта «Укриття» в новій вентиляційній трубі з датчиком контролю температури й вологості. Детальний опис складу ССРК, схеми побудови її архітектури та характеристики задіяного вимірювального обладнання можна знайти в [3, 4].

Основними завданнями ССРК є: контроль радіаційної ситуації під час експлуатації об'єкта «Укриття»; зниження ризику переопромінення персоналу; підвищення аварійної готовності. Для виконання цих

© О. В. Михайлов, М. В. Савельєв, 2024. Ліцензія CC BY 4.0

завдань ССРК має такі основні функції: контроль викиду радіоактивності за межі об'єкта «Укриття»; контроль радіаційних параметрів у приміщеннях об'єкта «Укриття» та навколишньої території, де ведуться роботи й відбувається пересування персоналу; контроль радіаційних параметрів у межах зон радіаційного контролю (санітарні шлюзи, пропускники, бар'єри тощо); виявлення перевищення контрольних та допустимих рівнів параметрів, що характеризують радіаційний стан; видача аварійних сигналів.

ССРК належить до систем, важливих для безпеки об'єкта «Укриття», і спроектована з метою виконання функції радіаційного захисту персоналу та населення, контролю виходу радіоактивних речовин та іонізуючого випромінювання за встановлені межі. З метою неперевищення допустимих рівнів ПЕД  $\gamma$ -випромінювання та ОА  $\alpha$ -,  $\beta$ - аерозолів у повітрі встановлено експлуатаційні межі (ЕМ) та межі безпечної експлуатації комплексу НБК-ОУ, що визначають граничні значення параметрів контролю для трьох груп приміщень: постійного перебування персоналу; періодичного перебування персоналу (напівобслуговані); обмеженого перебування персоналу [2].

Упродовж останніх років було опубліковано декілька робіт, присвячених дослідженню особливостей багаторічної динаміки потужності експозиційної дози  $\gamma$ -випромінювання та щільності потоку нейтронів у бетоні навколо зони локалізації ядерно-небезпечного скупчення паливовмісних матеріалів (ЯНС ПВМ) у підреакторному приміщенні 305/2 після введення комплексу НБК-ОУ в експлуатацію, наприклад у роботах [5–7]. Регресійний аналіз даних, отриманих системою контролю ядерної безпеки (СКЯБ) ІАСК, дозволив кількісно описати наявні тренди середньодобових значень параметрів контролю на різному віддаленні від границь ЯНС ПВМ. Щодо результатів вимірювань потужності еквівалентної дози (ПЕД)  $\gamma$ -випромінювання у приміщеннях об'єкта «Укриття», що знаходяться в зонах виконання робіт або на шляху переміщень персоналу державного спеціалізованого підприємства «Чорнобильська АЕС» (ДСП «ЧАЕС») та інших установ, детальний аналіз накопиченого багаторічного масиву даних ССРК досі не виконувався. Тому проведення аналізу накопиченої інформації щодо рівнів ПЕД  $\gamma$ -випромінювання у приміщеннях об'єкта «Укриття» є актуальним завданням не тільки з наукової точки зору, але й у площині підготовки необхідних даних для планування робіт та оцінки часу, коли в умовах високих дозових навантажень такі ро-

боти можуть бути виконані персоналом у місцях їхнього проведення.

Метою роботи є узагальнення даних, отриманих за допомогою ССРК ІАСК щодо визначення ПЕД  $\gamma$ -випромінювання у приміщеннях об'єкта «Укриття» після введення НБК в експлуатацію.

### Загальна характеристика обладнання ССРК для вимірювання ПЕД $\gamma$ -випромінювання та застосованих додаткових програмних засобів обробки даних вимірювань

Для визначення рівнів ПЕД  $\gamma$ -випромінювання у приміщеннях об'єкта «Укриття» у складі ССРК передбачено блоки детектування (БД) типу БДБГ-09 (рис. 1), призначені для реєстрації енергій  $\gamma$ -квантів від 0,05 до 3 MeV і ПЕД (потужності амб'єнтного еквівалента дози)  $\gamma$ -випромінювання в діапазоні вимірювання від 0,04 до  $10^7$  мкЗв · год<sup>-1</sup> [4]. До складу БД входять мікроконтролер, високочутливий детектор, низькочутливий детектор, формувач напруг живлення і вузол інтерфейсу RS-485. Робота БД ґрунтується на принципі перетворення  $\gamma$ -випромінювання в послідовність імпульсів напруги на виході детекторів. Як детектори в БД застосовані високочутливий і низькочутливий лічильники Гейгера — Мюллера.

Станом на 2023 р. ССРК в автоматичному режимі отримує дані щодо ПЕД  $\gamma$ -випромінювання у приміщеннях за допомогою 34 вимірювальних каналів (ВК), побудованих на використанні БД БДБГ-09 (табл. 1).

Для проведення регресійного аналізу масивів даних ССРК було залучено прикладне програмне забезпечення, розроблене та апробоване на даних СКЯБ ІАСК [6]. Оцінку ступеня відповідності використаної

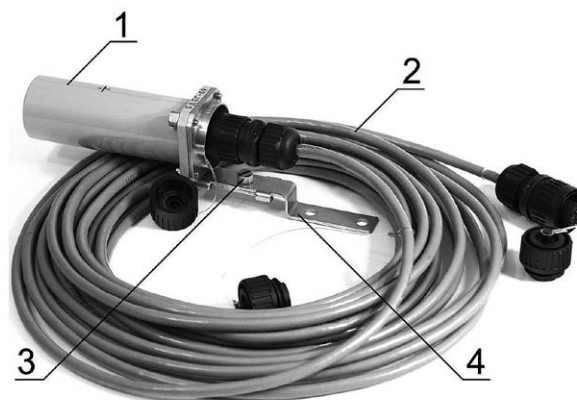


Рис. 1. Зовнішній вигляд БД БДБГ-09 (1) зі з'єднувальним кабелем (2), фіксатором (3) і кронштейном кріплення до стіни (4)

Таблиця 1. Розташування точок контролю ПЕД  $\gamma$ -випромінювання засобами ССРК у підконтрольних приміщеннях об'єкта «Укриття»

Позначення ВК		Приміщення, назва блоку, висотна позначка, м	Координата розташування БД		
Повне	Скорочене		Вісь	Ряд	Висота над підлогою, м
SRMS-DAU-GDR002-GDR001	GDR 1	006/2, Б, 0,00	50	Е	1,8
SRMS-DAU-GDR001-GDR002	GDR 2	009/4, Б, 0,00	50	Ж	1,7
SRMS-DAU-GDR001-GDR003	GDR 3	01/3, Б, +1,25	49	Т	2,0
SRMS-DAU-GDR001-GDR004	GDR 4	01/3, Б, +1,25	50 <sub>+2000</sub>	Т	3,0
SRMS-DAU-GDR001-GDR005	GDR 5	101/2, Б, +3,00	50 <sub>+3000</sub>	Е <sub>+1000</sub>	1,8
SRMS-DAU-GDR004-GDR006	GDR 6	Г-109/3, Г, +1,00	55 <sub>+1000</sub>	В <sub>-4000</sub>	2,0
SRMS-DAU-GDR004-GDR007	GDR 7	Г-111/2, Г, +1,00	57 <sub>+2000</sub>	В <sub>-4000</sub>	2,4
SRMS-DAU-GDR006-GDR009	GDR 9	Г-107, Г, +1,00	45 <sub>+1000</sub>	В <sub>-4000</sub>	2,0
SRMS-DAU-GDR001-GDR010	GDR 10	207/5, Б, +8,00	50	К	3,0
SRMS-DAU-GDR001-GDR011	GDR 11	207/4, Б, +6,00	50	Ж	1,8
SRMS-DAU-GDR002-GDR012	GDR 12	208/10, Б, +9,00	47	Д <sub>-3000</sub>	1,5
SRMS-DAU-GDR004-GDR013	GDR 13	Г-262, Г, +5,80	54 <sub>+500</sub>	В'	1,5
SRMS-DAU-GDR004-GDR015	GDR 15	Г-268, Г, +5,80	56 <sub>+2000</sub>	В <sub>-1000</sub>	1,5
SRMS-DAU-GDR004-GDR016	GDR 16	Г-284/4, Г, +5,80	52	В	1,8
SRMS-DAU-GDR002-GDR017	GDR 17	318/2, Б, +9,00	44	Ж	2,0
SRMS-DAU-GDR005-GDR018	GDR 18	Г-347, Г, +10,00	55 <sub>+3000</sub>	В'	2,0
SRMS-DAU-GDR005-GDR019	GDR 19	Г-350, Г, +10,00	66	Б	2,0
SRMS-DAU-GDR005-GDR020	GDR 20	3.8, Г, +10,00	61 <sub>+2000</sub>	В	1,8
SRMS-DAU-GDR006-GDR021	GDR 21	3.24, Г, +10,00	44	Б <sub>+3000</sub>	1,5
SRMS-DAU-GDR006-GDR022	GDR 22	3.30, Г, +10,00	40 <sub>+3000</sub>	В <sub>-5000</sub>	2,0
SRMS-DAU-GDR003-GDR023	GDR 23	427/2, Б, +12,50	50 <sub>+4000</sub>	Л	1,7
SRMS-DAU-GDR003-GDR024	GDR 24	401/2, Б, +12,50	50 <sub>+3000</sub>	И <sub>-3000</sub>	1,9
SRMS-DAU-GDR002-GDR025	GDR 25	406/2, Б, +12,50	44 <sub>-3000</sub>	К <sub>+3000</sub>	1,8
SRMS-DAU-GDR005-GDR026	GDR 26	Г-557, Г, +16,40	54	В <sub>+2000</sub>	2,0
SRMS-DAU-GDR005-GDR027	GDR 27	Г-557, Г, +16,40	66	В	2,0
SRMS-DAU-GDR003-GDR028	GDR 28	502/8, Б, +19,50	51 <sub>+2000</sub>	И	2,0
SRMS-DAU-GDR002-GDR029	GDR 29	515/3, Б, +19,50	43	И <sub>-500</sub>	1,5
SRMS-DAU-GDR003-GDR030	GDR 30	605/2, Б, +24,00	50	К <sub>+3000</sub>	1,8
SRMS-DAU-GDR005-GDR031	GDR 31	Г-632, Г, +24,27	63 <sub>+2000</sub>	В <sub>+2000</sub>	2,0
SRMS-DAU-GDR005-GDR032	GDR 32	Г-632, Г, +24,27	54 <sub>+2000</sub>	В <sub>+2000</sub>	2,0
SRMS-DAU-GDR004-GDR033	GDR 33	вхід «брудний», Г, +5,80	59 <sub>+2000</sub>	В' <sub>+3000</sub>	1,8
SRMS-DAU-GDR001-GDR039	GDR 39	206/2, Б, +6,00	50	Л	2,0
SRMS-DAU-GDR001-GDR040	GDR 40	206/2, Б, +6,00	50 <sub>+3000</sub>	Е	1,5
SRMS-DAU-GDR005-GDR041	GDR 41	Г-360, Г, +10,00	58	В	2,0

**Таблиця 2. Результати оцінки середнього за рік значення ПЕД  $\gamma$ -випромінювання ( $m \pm \text{std}$ , мкЗв  $\cdot$  год<sup>-1</sup>) та середньорічної швидкості його зміни в точках контролю ССРК**

Скорочена назва ВК	Рік спостережень						$V_g, \%/рік$
	2018	2019	2020	2021	2022	2023	
GDR 1	315,8 ± 3,0	309,9 ± 2,3	304,3 ± 2,9	297,0 ± 2,2	289,0 ± 2,8	282,6 ± 2,2	-2,20
GDR 2	3900 ± 40	4043 ± 17	3982 ± 24	3903 ± 27	3824 ± 24	3755 ± 20	-1,83
GDR 3	69,4 ± 1,0	72,9 ± 1,0	72,0 ± 0,8	70,4 ± 1,4	68,5 ± 0,9	66,9 ± 0,9	-2,12
GDR 4	118,4 ± 1,2	117,1 ± 1,3	115,1 ± 1,2	112,6 ± 1,3	110,0 ± 1,3	107,8 ± 1,1	-1,85
GDR 5	6,9 ± 0,2	6,8 ± 0,2	6,7 ± 0,2	6,6 ± 0,2	6,5 ± 0,2	6,4 ± 0,2	-1,58
GDR 6	1,44 ± 0,06	1,40 ± 0,05	1,37 ± 0,05	1,35 ± 0,05	1,34 ± 0,04	1,32 ± 0,05	-1,98
GDR 7	0,40 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,38 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,38 ± 0,02	-0,89
GDR 9	0,41 ± 0,02	0,41 ± 0,02	0,40 ± 0,02	0,40 ± 0,02	0,39 ± 0,02	0,39 ± 0,02	-1,39
GDR 10	1863 ± 83	1757 ± 15	1710 ± 21	1604 ± 72	1495 ± 23	1468 ± 10	-4,63
GDR 11	1295 ± 10	1248 ± 26	1202 ± 9	1174 ± 10	1146 ± 7	1125 ± 8	-2,76
GDR 12	586,0 ± 7,9	571,1 ± 7,1	554,8 ± 5,4	540,2 ± 5,4	529,5 ± 3,5	520,1 ± 4,0	-2,36
GDR 13	9,1 ± 0,2	8,8 ± 0,2	8,7 ± 0,2	8,5 ± 0,2	8,3 ± 0,2	8,1 ± 0,2	-2,14
GDR 15	4,4 ± 0,2	4,3 ± 0,2	4,2 ± 0,2	4,0 ± 0,2	4,1 ± 0,1	4,0 ± 0,1	-1,88
GDR 16	2,0 ± 0,1	2,1 ± 0,1	2,1 ± 0,1	2,0 ± 0,1	2,0 ± 0,1	2,0 ± 0,1	-1,35
GDR 17	146,3 ± 1,7	143,7 ± 1,6	140,4 ± 1,6	137,4 ± 1,4	134,1 ± 1,5	131,4 ± 1,4	-2,12
GDR 18	36,2 ± 0,5	35,7 ± 0,6	35,0 ± 0,6	34,3 ± 0,5	33,6 ± 0,5	33,0 ± 0,5	-1,85
GDR 19	1,95 ± 0,07	1,90 ± 0,06	1,86 ± 0,06	1,82 ± 0,06	1,92 ± 0,07	1,89 ± 0,06	-2,11
GDR 20	1,69 ± 0,06	1,65 ± 0,06	1,61 ± 0,06	1,56 ± 0,06	1,55 ± 0,05	1,52 ± 0,05	-2,07
GDR 21	0,82 ± 0,03	0,81 ± 0,03	0,79 ± 0,03	0,77 ± 0,03	0,75 ± 0,03	0,74 ± 0,03	-1,97
GDR 22	1,64 ± 0,06	1,60 ± 0,06	1,57 ± 0,06	1,53 ± 0,05	1,50 ± 0,05	1,47 ± 0,05	-2,15
GDR 23	89,7 ± 1,0	87,8 ± 1,0	85,7 ± 1,0	83,6 ± 0,9	82,0 ± 1,0	80,3 ± 0,9	-2,20
GDR 24	142,4 ± 1,3	139,5 ± 1,4	136,1 ± 1,4	133,1 ± 1,3	130,0 ± 1,3	127,7 ± 1,2	-2,15
GDR 25	2780 ± 17	2767 ± 18	2711 ± 17	2673 ± 12	2535 ± 17	2396 ± 14	-2,90
GDR 26	310,4 ± 3,1	304,7 ± 2,5	298,8 ± 2,9	290,5 ± 2,7	282,6 ± 4,0	275,6 ± 2,2	-2,35
GDR 27	1,25 ± 0,05	1,23 ± 0,05	1,20 ± 0,04	1,17 ± 0,04	1,15 ± 0,04	1,13 ± 0,04	-2,05
GDR 28	62,4 ± 0,9	61,1 ± 0,8	59,8 ± 0,8	58,7 ± 0,7	57,3 ± 0,8	56,3 ± 0,8	-2,03
GDR 29	143,3 ± 1,4	142,1 ± 1,4	139,3 ± 1,4	136,3 ± 1,3	133,6 ± 1,4	130,8 ± 1,2	-2,05
GDR 30	141,7 ± 1,4	140,2 ± 1,3	137,3 ± 1,3	134,3 ± 1,3	131,5 ± 1,4	128,8 ± 1,3	-2,09
GDR 31	23,4 ± 0,4	22,8 ± 0,4	22,3 ± 0,4	21,8 ± 0,4	21,2 ± 0,6	20,2 ± 0,4	-2,35
GDR 32	5,1 ± 0,1	5,0 ± 0,1	4,9 ± 0,1	4,8 ± 0,1	4,7 ± 0,1	4,6 ± 0,1	-2,15
GDR 33	38,1 ± 0,7	37,2 ± 0,5	36,5 ± 0,6	35,7 ± 0,5	34,9 ± 0,5	34,2 ± 0,5	-2,15
GDR 39	113,4 ± 1,3	111,6 ± 1,2	109,4 ± 1,2	106,4 ± 1,5	103,2 ± 1,2	101,2 ± 1,1	-2,26
GDR 40	72,8 ± 0,8	71,6 ± 0,9	70,0 ± 1,0	73,3 ± 1,4	72,0 ± 1,0	70,6 ± 1,0	-1,91
GDR 41	2,25 ± 0,11	2,18 ± 0,08	2,13 ± 0,07	2,07 ± 0,08	2,05 ± 0,07	2,00 ± 0,07	-2,31

Таблиця 3. Результати регресійного аналізу середньодобових значень ПЕД  $\gamma$ -випромінювання в точках контролю ССРК для двох періодів моніторингу

Скорочена назва ВК	Рівняння регресії $f(x) = A \cdot x + B$ ( $R^2$ )	
	2018–2022 рр.	2020–2023 рр.
GDR 1	$-0,018 x + 320$ (0,91)	$-0,02 x + 308$ (0,99)
GDR 2	$-0,07 x + 3998$ (0,10)	$-0,22 x + 4022$ (0,99)
GDR 3	$-0,0012 x + 72$ (0,10)	$-0,005 x + 73$ (0,94)
GDR 4	$-0,006 x + 120$ (0,97)	$-0,007 x + 116$ (0,99)
GDR 5	$-0,0002 x + 7$ (0,70)	$-0,0003 x + 7$ (0,93)
GDR 6	$-0,0001 x + 1,4$ (0,77)	$-0,00005 x + 1,4$ (0,52)
GDR 7	$-0,00001 x + 0,4$ (0,43)	$-0,000012 x + 0,4$ (0,38)
GDR 9	$-0,000015 x + 0,4$ (0,76)	$-0,000016 x + 0,4$ (0,70)
GDR 10	$-0,24 x + 1907$ (0,93)	$-0,25 x + 1744$ (0,89)
GDR 11	$-0,10 x + 1307$ (0,97)	$-0,07 x + 1216$ (0,99)
GDR 12	$-0,04 x + 593$ (0,98)	$-0,03 x + 560$ (0,98)
GDR 13	$-0,0004 x + 9,1$ (0,74)	$-0,0005 x + 8,8$ (0,89)
GDR 15	$-0,0003 x + 4,5$ (0,73)	$-0,0002 x + 4,2$ (0,43)
GDR 16	$-0,00003 x + 2,1$ (0,30)	$-0,00009 x + 2,1$ (0,84)
GDR 17	$-0,009 x + 148$ (0,98)	$-0,009 x + 142$ (0,98)
GDR 18	$-0,002 x + 36,7$ (0,98)	$-0,002 x + 35,3$ (0,96)
GDR 19	$-0,00006 x + 1,9$ (0,33)	$-0,000045 x + 1,8$ (0,17)
GDR 20	$-0,0001 x + 1,7$ (0,95)	$-0,0001 x + 1,6$ (0,71)
GDR 21	$-0,00005 x + 0,8$ (0,9)	$-0,00004 x + 0,8$ (0,80)
GDR 22	$-0,00008 x + 1,7$ (0,85)	$-0,00009 x + 1,6$ (0,85)
GDR 23	$-0,006 x + 91$ (0,99)	$-0,0005 x + 87$ (0,99)
GDR 24	$-0,009 x + 144$ (0,99)	$-0,008 x + 138$ (0,99)
GDR 25	$-0,15 x + 2839$ (0,51)	$-0,31 x + 2800$ (0,81)
GDR 26	$-0,02 x + 315$ (0,99)	$-0,02 x + 303$ (0,99)
GDR 27	$-0,00008 x + 1,3$ (0,93)	$-0,00007 x + 1,2$ (0,76)
GDR 28	$-0,003 x + 63$ (0,97)	$-0,003 x + 61$ (0,97)
GDR 29	$-0,007 x + 145$ (0,97)	$-0,008 x + 141$ (0,99)
GDR 30	$-0,008 x + 144$ (0,96)	$-0,008 x + 139$ (0,98)
GDR 31	$-0,0015 x + 23,6$ (0,95)	$-0,0019 x + 22,8$ (0,88)
GDR 32	$-0,0003 x + 5,1$ (0,96)	$-0,0003 x + 5,0$ (0,90)
GDR 33	$-0,002 x + 38,5$ (0,98)	$-0,002 x + 37$ (0,98)
GDR 39	$-0,007 x + 115$ (0,97)	$-0,008 x + 111$ (0,99)
GDR 40	$-0,0003 x + 72$ (0,01)	$0,0003 x + 71$ (0,004)
GDR 41	$-0,0002 x + 2,9$ (0,78)	$-0,0001 x + 2,1$ (0,65)

моделі машинної апроксимації даних (тренду) вихідним значенням ПЕД проводили за результатами визначення коефіцієнта достовірності апроксимації ( $R^2$ ). Це дозволяє обґрунтовано зробити висновок щодо прийнятності використання отриманого рівняння регресії для прогнозування рівнів ПЕД у підконтрольному приміщенні впродовж наступних років. Для кожного ВК визначали значення відносної середньорічної швидкості зміни ПЕД  $\gamma$ -випромінювання ( $V_g$ ) для порівняння зі значенням відносної швидкості розпаду радіонукліда  $^{137}\text{Cs}$  ( $V_{Cs} = -2,28\%$ /рік, з огляду на величину періоду напіврозпаду 30,1 року). Величину  $V_g$  розраховували як

$$V_g = \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=2018}^{2023} \left( \frac{N_{i+1} - N_i}{N_i} \right) \cdot 100\%,$$

де  $N_i$  і  $N_{i+1}$  — середньорічне значення ПЕД у попередньому та наступному роках відповідно.

Регламентом [2] визначені параметри, що характеризують вихід радіоактивних речовин та іонізуючих випромінювань за встановлені межі безпечної експлуатації комплексу НБК-ОУ. Для ПЕД  $\gamma$ -випромінювання на висоті 1 м від підлоги, залежно від призначення того чи іншого приміщення з точки зору режиму перебування персоналу, встановлено такі експлуатаційні межі (ЕМ): для приміщень постійного перебування персоналу —  $7,5 \text{ мкЗв} \cdot \text{год}^{-1}$ ; для приміщень періодичного перебування —  $15 \text{ мкЗв} \cdot \text{год}^{-1}$ ; для обмеженого перебування —  $500 \text{ мкЗв} \cdot \text{год}^{-1}$ . З точки зору відповідності встановленим межам безпечної експлуатації комплексу НБК-ОУ всі підконтрольні ССРК приміщення розподіляли на групи, ґрунтуючись на результатах порівняння значення середньорічної ПЕД  $\gamma$ -випромінювання у 2023 р. з відповідним значенням ЕМ, наведеним вище.

### Результати та обговорення

Відповідно до методології аналізу динаміки параметрів контролю [6], за допомогою прикладного програмного забезпечення була проведена машинна обробка даних ССРК, а саме результатів вимірювань ПЕД  $\gamma$ -випромінювання у приміщеннях об'єкта «Укриття». У табл. 2 представлено результати оцінки середньорічного значення ПЕД  $\gamma$ -випромінювання в місцях розташування БД, а також відповідної величини  $V_g$ , розрахованої за формулою, наведеною в попередньому розділі. У табл. 3 наведено результати регресійного аналізу даних ССРК для двох

періодів моніторингу, враховуючи наявність аномальних результатів вимірювань упродовж періоду спостережень.

На рис. 2–5 подано вибіркові результати машинної обробки даних ССРК, що ілюструють приклади типової форми динаміки середньодобових значень ПЕД  $\gamma$ -випромінювання для дуже низьких (фонових), середніх і дуже високих рівнів ПЕД  $\gamma$ -випромінювання у приміщеннях об'єкта «Укриття», а також форму динаміки середньодобових значень ПЕД  $\gamma$ -випромінювання з наявністю аномальних результатів вимірювань. Як видно з наведених ілюстрацій, незалежно від рівня ПЕД  $\gamma$ -випромінювання, у підконтрольних приміщеннях об'єкта «Укриття» спостерігається одна загальна тенденція — стає зменшення середньомісячних значень на фоні сезонних коливань. Лише у двох ВК (див. рис. 5) динаміка ПЕД  $\gamma$ -випромінювання за формою дещо відрізняється від інших ВК. Це пов'язано з тим, що за допомогою ССРК на фоні сталого зменшення середньомісячних значень було зареєстровано значний «стрибок» середньодобового значення ПЕД у місцях встановлення GDR 40 (27.01.2021) і GDR 19 (03.01.2022). За розрахунками амплітуда «стрибка» ПЕД становила 12 і 8 % порівняно з попередніми результатами вимірювань. Однак, як показує рис. 5, у наступний період моніторингу динаміка ПЕД  $\gamma$ -випромінювання знову повернулася до загальної тенденції поступового зменшення середньомісячних значень ПЕД у приміщеннях об'єкта «Укриття» на фоні сезонних коливань.

Дані табл. 2 свідчать про те, що рівні ПЕД у підконтрольних ССРК приміщеннях об'єкта «Укриття» суттєво відрізняються. До того ж є приміщення, в яких за показниками двох БД, розташованих у різ-

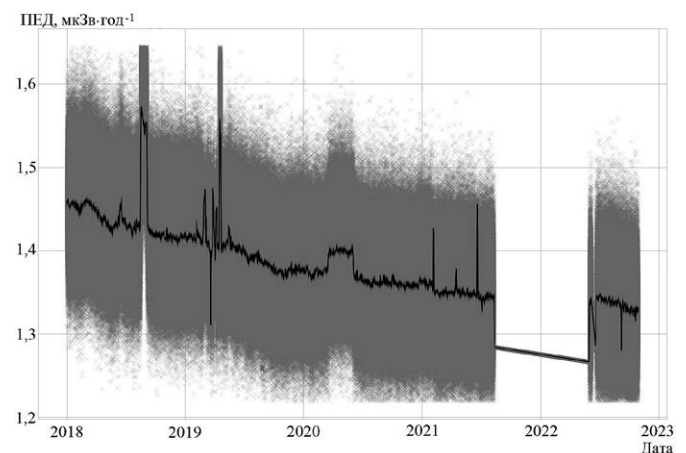


Рис. 2. Приклад динаміки середньодобового значення ПЕД  $\gamma$ -випромінювання. Низький рівень (GDR6)

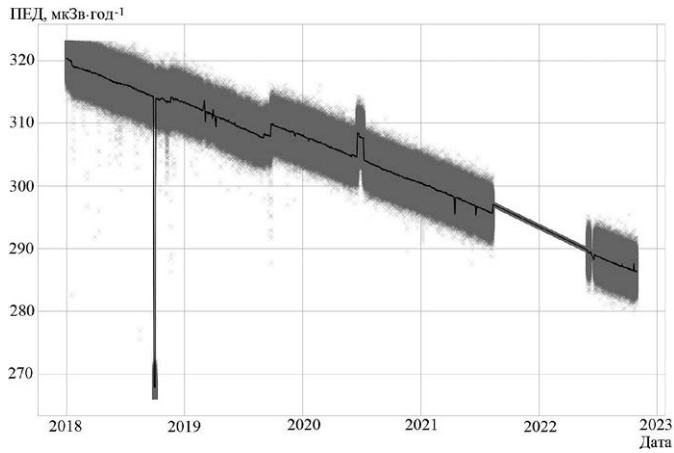


Рис. 3. Приклад динаміки середньодобового значення ПЕД  $\gamma$ -випромінювання. Середній рівень (GDR1)

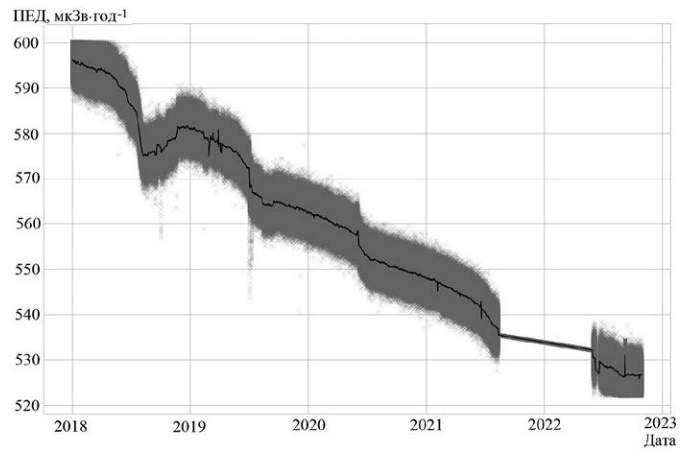
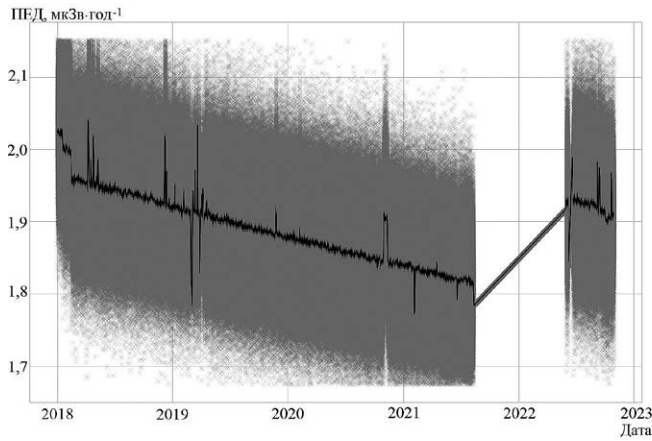
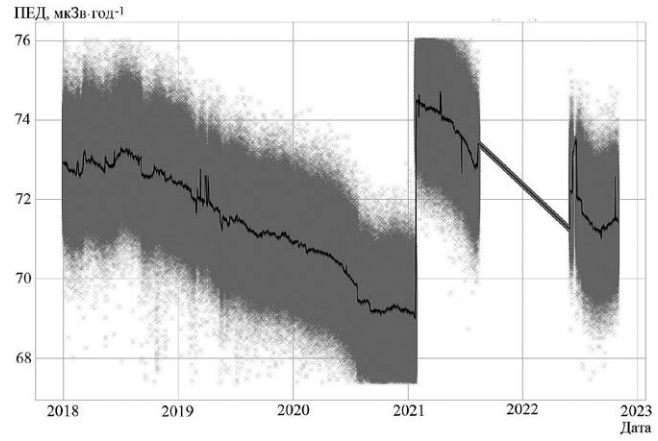


Рис. 4. Приклад динаміки середньодобового значення ПЕД  $\gamma$ -випромінювання. Дуже високий рівень (GDR12)



а



б

Рис. 5. Динаміка середньодобового значення ПЕД  $\gamma$ -випромінювання, зареєстрованих GDR19 (а) і GDR40 (б)

них місцях (див. табл. 1 і 2), ПЕД може відрізнятись від 1,4 до 250 разів. Це приміщення 206/2 у блоці Б (1,4 рази, відстань між БД  $\sim 25$  м); 01/3 у блоці Б (1,6 разів, відстань між БД  $\sim 60$  м); Г-632 у блоці Г (4,3 рази, відстань між БД  $\sim 55$  м) і Г-557 у блоці Г (250 разів, відстань між БД  $\sim 72$  м). Але, як було підкреслено вище, показники ПЕД у всіх ВК, за винятком GDR 19 і GDR 40, за певний період моніторингу підпорядковуються одній загальній тенденції. Крім того, на підставі даних табл. 2 можна зробити висновок, що величина  $V_g$  у точках контролю може знаходитись у діапазоні значень від  $-0,89$  (GDR 7, фоновий рівень ПЕД) до  $-4,63\%$ /рік (GDR 10, дуже високий рівень ПЕД). Середнє значення  $V_g$  для всіх точок контролю разом оцінено як  $-2,12 \pm 0,57\%$ /рік, що в межах 8 % збігається з  $V_{Cs}$ .

У роботі [7], за даними СКЯБ ІАСК, було аналогічно оцінено значення  $V_g$  для потужності експози-

ційної дози в бетоні підреакторної плити на різному віддаленні від границь ЯНС ПВМ. Виявилось, що для переважної більшості точок контролю в період із 2018 по 2022 рр. значення  $V_g$  знаходилося в діапазоні від  $-1,6$  до  $-2,6\%$ /рік, що за розмахом практично збігається з довірчим інтервалом середнього значення  $V_g$  для ПЕД у підконтрольних ССРК приміщеннях об'єкта «Укриття». Визначені відмінності між  $V_g$  та  $V_{Cs}$  обумовлені тим, що в спектрі радіоактивного забруднення бетону в різних місцях об'єкта «Укриття» крім  $^{137}\text{Cs}$  присутні інші  $\gamma$ -випромінюючі радіонукліди, внесок яких у сумарний гамма-фон залежно від періоду їхнього радіоактивного розпаду може призводити чи до збільшення, чи до зменшення значення відносної середньорічної швидкості зміни ПЕД  $\gamma$ -випромінювання ( $V_g$ ).

У технологічному регламенті експлуатації комплексу НБК-ОУ [2] визначено граничні значення ПЕД

**Таблиця 4. Розподіл підконтрольних приміщень об'єкта «Укриття» за групами відповідно до значень ЕМ**

Група	ЕМ, мкЗв/год	Приміщення, назва блоку, висотна позначка, м		Середнє значення $V_g$ за групою приміщень, %/рік (m ± std)
I	7,5	101/2, Б, +3,00 Г-109/3, Г, +1,00 Г-111/2, Г, +1,00 Г-107, Г, +1,00 Г-268, Г, +5,80 Г-284/4, Г, +5,80 Г-350, Г, +10,00	3.8, Г, +10,00 3.24, Г, +10,00 3.30, Г, +10,00 Г-557 Г, +16,40 Г-632, Г, +24,27 Г-360, Г, +10,00	-1,84 ± 0,41
II	15	Г-262, Г, +5,80		-2,14 ± 0,23 (GDR 13)
III	500	006/2, Б, 0,00 01/3, Б, +1,25 318/2, Б, +9,00 Г-347, Г, +10,00 427/2, Б, +12,50 401/2, Б, +12,50 Г-557, Г, +16,40	502/8, Б, +19,50 515/3, Б, +19,50 605/2, Б, +24,00 Г-632, Г, +24,27 «Брудний» вхід, Г, +5,80 206/2, Б, +6,00	-2,11 ± 0,16
IV	–	009/4, Б, 0,00 207/5, Б, +6,00 207/4, Б, +6,00	208/10, Б, +9,00 406/2, Б, +12,50	-2,90 ± 1,05

γ-випромінювання в повітрі для трьох категорій приміщень: постійного перебування персоналу; періодичного перебування персоналу (напівобслуговувані); обмеженого перебування персоналу. У табл. 4 на підставі даних табл. 2 подано розподіл підконтрольних ССРК приміщень об'єкта «Укриття» за критерієм відповідності середньорічної ПЕД γ-випромінювання (станом на 2023 р.) установленим значенням ЕМ: I група — ПЕД < 7,5 мкЗв · год<sup>-1</sup>; II група — 7,5 мкЗв · год<sup>-1</sup> < ПЕД < 15 мкЗв · год<sup>-1</sup>; III група — 15 мкЗв · год<sup>-1</sup> < ПЕД < 500 мкЗв · год<sup>-1</sup>; IV група > 500 мкЗв · год<sup>-1</sup>.

Якщо згрупувати точки контролю за критерієм відповідності ЕМ, як це показано в табл. 4, середнє значення  $V_g$  за групою може становити від -1,84 до -2,9 %/рік. При цьому у приміщеннях, що задовольняють умовам для постійного перебування персоналу (I група), ПЕД за значенням  $V_g$  спадає більш повільно, ніж у приміщеннях періодичного та обмеженого перебування (II та III групи). У приміщеннях, що за ЕМ не задовольняють навіть умовам обмеженого перебування персоналу (IV група), рівні ПЕД за значенням  $V_g$  спадають більш інтенсивно (на 27 %) порівняно зі швидкістю розпаду <sup>137</sup>Cs. Але й варіабельність  $V_g$  порівняно з іншими групами приміщень є найвищою (36 %).

Дані, наведені в табл. 3, свідчать про те, що оцінені тренди щодо зменшення ПЕД є достовірними, за винятком ВК GDR 19 і GDR 40 ( $R^2 < 0,2$ ). Наявність «стрибка» в показниках ВК GDR 19 і GDR 40 (див. рис. 5) не дозволила апроксимувати динаміку ПЕД γ-випромінювання лінійною функцією. Для інших ВК отримана апроксимуюча функція має високий ( $R^2 > 0,7$ ) або достатньо високий ( $R^2 \geq 0,4$ ) ступінь достовірності, що дає підстави робити надійний прогноз щодо подальшої зміни середньодобових значень ПЕД γ-випромінювання практично для всіх підконтрольних ССРК приміщень об'єкта «Укриття». Як видно з даних табл. 3, для таких ВК, як GDR 2, 3, 15, 16, 19 і 25, вибір того чи іншого періоду моніторингу для апроксимації даних може суттєво вплинути на ступінь достовірності обраної апроксимуючої функції.

### Висновки

Відповідно до визначених у регламенті експлуатації комплексу НБК-ОУ граничних значень ПЕД γ-випромінювання в повітрі (експлуатаційних меж) підконтрольні ССРК приміщення розділені на групи залежно від значення середньорічної ПЕД γ-випромінювання станом на 2023 р.



За даними ССРК ІАСК, у приміщеннях об'єкта «Укриття» спостерігається лише один тип динаміки ПЕД  $\gamma$ -випромінювання — стале зменшення середньомісячного значення на фоні явно виражених сезонних коливань. У середньому зменшення ПЕД  $\gamma$ -випромінювання оцінюється як  $-2,12 \pm 0,57$  %/рік, що на 8 % нижче відносної швидкості радіоактивного розпаду  $^{137}\text{Cs}$ . Порівняно з відносною швидкістю радіоактивного розпаду  $^{137}\text{Cs}$  у приміщеннях, що задовольняють умовам для постійного перебування персоналу, ПЕД  $\gamma$ -випромінювання спадає більш повільно, ніж у приміщеннях, віднесених до категорії періодичного та обмеженого перебування. Визначені відмінності обумовлені тим, що в спектрі радіоактивного забруднення бетону в різних приміщеннях об'єкта «Укриття» крім  $^{137}\text{Cs}$  присутні інші  $\gamma$ -випромінюючі радіонукліди, внесок яких у сумарний гамма-фон залежно від періоду їхнього радіоактивного розпаду може призводити чи до збільшення, чи до зменшення відносної середньорічної швидкості зміни ПЕД  $\gamma$ -випромінювання.

Результати, отримані в роботі, дозволяють надійно прогнозувати рівні ПЕД  $\gamma$ -випромінювання у підконтрольних приміщеннях об'єкта «Укриття» і можуть бути використані для планування робіт та оцінки часу перебування персоналу в умовах високих дозових навантажень без додаткового дозиметричного обстеження.

### Список використаної літератури

1. Об'єкт «Укриття»: 30 років після аварії / В. О. Краснов, А. В. Носовський, В. М. Рудько, В. М. Щербін. — Чорнобиль : ППБ АЕС НАН України, 2016. — 512 с.
2. Технологічний регламент експлуатації комплексу «НБК-ОУ». — ДСП «Чорнобильська АЕС», 2021. — 1Е-С-НБК-ОУ. Інв. № 110 від 25.08.2021. — 114 с.
3. Інструкція з експлуатації датчиків стаціонарної системи радіаційного контролю інтегрованої автоматизованої системи контролю об'єкта «Укриття» (ССРК ІАСК). — ДСП «Чорнобильська АЕС», 2023. — 27Е-ЦРБ. Інв. № 80 від 09.05.2023. — 39 с.
4. Блок детектування гамма-випромінювання БДБГ-09. Настанова щодо експлуатування. — ВІСТ.418266.006 НЕ. — 49 с. — Режим доступу: [https://ecotest.ua/wp-content/uploads/2014/08/NE\\_BDBG-09\\_ua\\_zm-3\\_zatu\\_tirazh\\_\\_bez-ris-2\\_\\_F.pdf](https://ecotest.ua/wp-content/uploads/2014/08/NE_BDBG-09_ua_zm-3_zatu_tirazh__bez-ris-2__F.pdf)
5. The nuclear safety monitoring system for fuel-containing materials located in destroyed Unit No. 4 of the Chornobyl NPP and proposals for its modernization / M. V. Saveliev, R. L. Godun, M. A. Pantin [et al.] // Nuclear Physics and Atomic Energy. — 2022. — Vol. 23. — P. 172–181.
6. Савельєв М. В. Аналіз динаміки потужності експозиційної дози  $\gamma$ -випромінювання та щільності потоку нейтронів в об'єкті «Укриття» Чорнобильської АЕС» / М. В. Савельєв, О. В. Михайлов, Д. О. Сущенко // Ядерна енергетика та довкілля. — 2022. — № 3 (25). — С. 24–32.
7. Features of neutron flux density and gamma-radiation exposure dose rate dynamics in ChNPP Shelter object after the New Safe Confinement commissioning / O. V. Mykhailov, M. V. Saveliev, K. O. Sushchenko, V. V. Dmytryshyn // Nuclear Power and the Environment. — 2023. — Vol. 2 (27). — P. 44–55.

**O. V. Mykhailov<sup>1</sup>, M. V. Saveliev<sup>1,2</sup>, M. A. Pantin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, NAS of Ukraine, 36a, Kirova st., Chornobyl, 07270, Ukraine

<sup>2</sup> Institute of Mathematical Machines and Systems Problems NAS of Ukraine, 42, Akademika Glushkova ave, Kyiv, 03680, Ukraine

### Results of Monitoring of Equivalent Dose of $\gamma$ -Radiation in the Shelter Object Rooms

After the construction of the Shelter object (SO), also known as Chornobyl Sarcophagus, several research measurement systems were created to understand and monitor the fuel-containing materials behaviour. Within the framework of the SO, transformation into environmentally safe system by the construction of the New Safe Confinement (NSC), and prior to the protective Arch was set into design position, integrated automated monitoring system (IAMS), was created. One of components of the IAMS is the Stationary Radiation Monitoring System (SRMS), designed for monitoring of such parameters of the radiation situation in the SO rooms and the industrial site as gamma equivalent dose rate (GDR) and volumetric activity of  $\alpha$ -,  $\beta$ - aerosols in the air. This work is devoted to the analysis of the SRMS data in terms of the GDR measurements results.

The analysis of the GDR data in the SO rooms for 34 monitoring point, received during the years 2018–2023, was carried out. It was established that only one type of GDR dynamics is observed in the SO rooms — a constant decrease in the average monthly value against the background of pronounced seasonal fluctuations. The average annual decrease of GDR is estimated as —  $2.12 \pm 0.57$  %/year,

which is 8% lower than the rate of radioactive decay of  $^{137}\text{Cs}$ . Compared to the rate of radioactive decay of  $^{137}\text{Cs}$  in rooms that meet the conditions for permanent staff presence, the GDR decrease more slowly than in rooms categorized as periodic and limited stay.

The results of SRMS data approximation obtained in the work make it possible to reliably predict the GDR levels in the controlled SO rooms and can be used to plan works and estimate the time when, under conditions of high GRD levels, such works can be performed by personnel in the places where they are carried out.

Keywords: Chornobyl NPP, New Safe Confinement, Shelter object, Stationary Radiation Monitoring System, gamma equivalent dose rate, dynamic, regression analysis.

### References

1. Krasnov V. O., Nosovskyi A. V., Rudko V. M., Shcherbin V. M. (2016). *Obiekt "Ukryttya": 30 rokiv pislia avariyi* [The Shelter object: 30 years after the accident]. Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 512 p. (in Ukr.)
2. *Technological regulations for the operation of the NSC-SO complex (1E-S-NSC-SO)*. Slavutych: SSE "Chornobyl NPP", 2021, 114 p. (in Ukr.)
3. *Instructions for the use of sensors of the stationary radiation control system of the integrated automated control system of the Shelter object (SRMS IAMS)*. 27E-RSS. Slavutych: SSE "Chornobyl NPP", 2023, 39 p. (Ukr)
4. *BDBG-09 gamma detection block. Operating guidance*. VIST.418266.006 NE. 49 p. Available at: [https://ecotest.ua/wp-content/uploads/2014/08/ne\\_bdbg-09\\_ua\\_zm-3\\_zatu\\_tirazh\\_\\_bez-ris-2\\_\\_f.pdf](https://ecotest.ua/wp-content/uploads/2014/08/ne_bdbg-09_ua_zm-3_zatu_tirazh__bez-ris-2__f.pdf). (in Ukr.)
5. Saveliev M. V., Godun R. L., Pantin M. A., Skiter I. S., Sushchenko K. O. (2022). The nuclear safety monitoring system for fuel-containing materials located in destroyed Unit No. 4 of the Chornobyl NPP and proposals for its modernization. *Nuclear Physics and Atomic Energy*, vol. 23, pp. 172–181.
6. Saveliev M. V., Mykhailov O. V., Sushchenko D. O. (2022). [Analysis of exposure dose rate and neutron flux density dynamics in the Shelter object of the Chornobyl NPP]. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 25, no. 3, pp. 24–32. (in Ukr.)
7. Mykhailov O. V., Saveliev M. V., Sushchenko K. O., Dmytryshyn V. V. (2023). Features of neutron flux density and gamma-radiation exposure dose rate dynamics in ChNPP Shelter object after the New Safe Confinement commissioning. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 27, no. 2, pp. 44–55.

Надійшла 22.07.2024

Received 22.07.2024