

ІНТЕРКАЛІБРУВАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ДОЗИМЕТРІВ У ЗМІШАНИХ НЕЙТРОННИХ ТА ГАММА-ПОЛЯХ

В.М.Волоський, В.В.Чумак

НДІ радіаційного захисту АТН України, вул. Мельникова, 53, Київ, 04050
e-mail: vit@leed1.kiev.ua

Описано результати дослідження термолюмінесценції стандартних дозиметрів Harshaw типу 8814/7776 та 8806/6776 Albedo Neutron у змішаних нейтронних та гамма-полях, проведеного в рамках міжнародного інтеркалібрування МАГАТЕ. Оцінено здатність окремих видів дозиметрів та дозових алгоритмів оцінювати дози у складних полях опромінення. Отримані результати є актуальними в контексті переоснащення дозиметричних служб України на сучасні автоматичні системи індивідуального моніторингу та розширення номенклатури дозиметричних величин, що визначаються.

Вступ

Проблема індивідуальної дозиметрії нейтронного опромінення є надзвичайно складною, щонайменше, через дві причини. По-перше, відгук існуючих дозиметрів є змінною величиною і суттєво (на порядки величини) залежить від енергії та кута падіння нейтронного випромінювання. По-друге, дозиметричні величини, які використовуються для нормування і контролю опромінення людини (ефективна доза, еквівалентна доза) залежать від т.з. радіаційних зважуючих факторів w_R , які, залежно від енергії нейтронного випромінювання, набувають значення від 5 до 20 [1] (наприклад, w_R для фотонного та електронного випромінювання є незмінним і дорівнює 1). Серйозною практичною проблемою є калібрування нейтронних дозиметрів, оскільки лише найбільш розвинені країни мають відповідне устаткування для калібрування дозиметрів у широкому діапазоні енергій нейтронів. Такі особливості значно ускладнюють визначення доз нейтронного опромінення, особливо при опроміненні у змішаних гамма-нейтронних полях.

З 1991 року Науково-дослідний інститут радіаційного захисту використовує

для індивідуального дозиметричного контролю автоматизовану систему Harshaw 8800 з дозиметрами типу Harshaw 8814. На сьогоднішній день дана система є де-факто світовим стандартом серед автоматизованих термолюмінесцентних (ТЛ) дозиметричних систем, яка задовольняє усі сучасні та перспективні вимоги до дозиметричного контролю персоналу і дозволяє вимірювати дозу зовнішнього опромінення $H_p(10)$, дозу опромінення кристалика ока $H_p(3)$, шкіри $H_s(0.07)$ від гамма-, бета-, рентгенівського та нейтронного опромінення в широкому діапазоні енергій. Ця система дозволяє завантажити й обробити відразу 1400 слайдів дозиметрів зі швидкістю 120 дозиметрів на годину. Результати вимірів відразу передаються у комп'ютер і там зберігаються в електронному вигляді. Наші дозиметри використовуються медичними працівниками, які працюють з джерелами випромінювання, та використовувалися в умовах об'єкта "Укриття" [2].

Матеріали та методи

Стандартний дозиметр складається зі слайда (Рис.1) з чотирма жорстко зафік-

сованими ТЛ елементами на основі ізотопів LiF та корпусу з набором різних дозиметричних фільтрів. Зчитування дозиметрів здійснюється в атмосфері нагрітого газу (азот високого ступеня очистки), що забезпечує високу відтворюваність результатів та довговічність дозиметрів, а завдяки ще й індивідуальному калібруванню кожного елемента дозиметра забезпечується стандартна похибка відтворення вимірювань менше 2 %. Дозиметри мають лінійний діапазон вимірювань в інтервалі 10 мкГр – 10 Гр (1 мрад – 1000 рад), а на ділянці нелінійності – до 20 Гр.

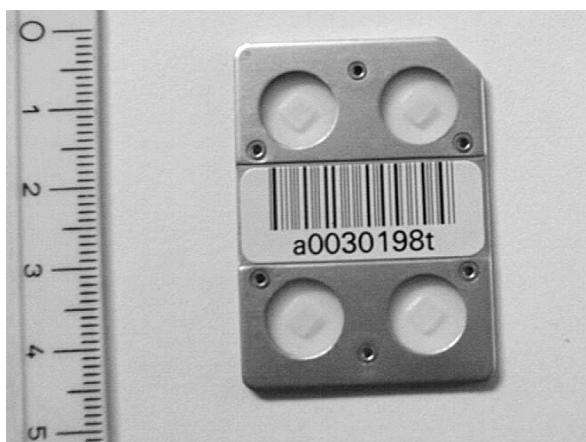


Рис.1. Слайд дозиметра типу Harshaw.

Так, дозиметр-індикатор нейтронного опромінення Harshaw 8814/7776 складається зі слайда, що має 3 ТЛ елементи на основі ^7LiF (ТЛД-700), який є нечутливим до нейтронного опромінення і одного – ^6LiF (ТЛД-600), чутливого до нейтронного опромінення, а також корпусу з 4 фільтрами: 1) пластик АБС (242 мг/см²) і Си (91 мг/см²) – для реєстрації фотонів низької енергії; 2) тканиноеквівалентний пластик АБС+ПТФЕ (1000 мг/см²) – визначення глибинної дози; 3) вікно, закрито майларом (17 мг/см²) – доза на шкіру; 4) пластик АБС (300 мг/см²) – доза на кришталік ока.

Дозиметр іншого типу, призначений для кількісного визначення дози нейтронного опромінення – Harshaw Albedo Neutron 8806/6776 – складається з двох ТЛД-700, двох ТЛД-600 та спеціального аль-

бедного корпусу. Одна пара з різних елементів має фільтр АБС (70 мг/см²) та Cd (395 мг/см²), інша – АБС (300 мг/см²). Наявність нейтронного опромінення визначається за допомогою спеціального алгоритму за різницею між показами детекторів ^7LiF (нечутливого до нейтронного опромінення) та ^6LiF . Особливістю алгоритму є те, що він дозволяє не калібрувати дозиметр в специфічних нейтронних полях (еталони яких відсутні в Україні!), а використовувати для калібрування тільки еталон гамма-випромінювання ^{137}Cs .

У 2003–2005 роках під егідою МАГАТЕ було проведено міжнародне калібрування індивідуальних дозиметрів, покликане оцінити здатність дозиметричних систем різних типів визначати дози гамма- та нейтронного опромінення у змішаних полях. Під час міжнародного інтеркалібрування дозиметри опромінювались у лабораторіях Німеччини (РТВ) та Франції (IRSN) фотонами і нейтронами різних енергій та під різними кутами падіння потоку випромінювання. В інтеркалібруванні брав участь 31 учасник, серед яких 20 використовували термолюмінесцентні дозиметричні (ТЛД) системи; 3 – комбінацію ТЛ дозиметрів та трекові детектори; 2 – радіофотолумінесцентне скло для фотонів та трекові детектори для нейтронів; 1 – тільки трекові детектори; 5 лабораторій не надали інформації про дозиметри.

Роботу було розділено на 2 етапи. Кожен учасник надавав для опромінення по 20 дозиметрів на кожен етап. На першій фазі дозиметри опромінювались в 16 заздалегідь відомих для учасників полях, а саме:

- теплові нейтрони;
- моноенергетичне нейтронне опромінення на прискорювачі з енергіями 70, 144, 565, 1200, 5000 кеВ;
- джерело ^{252}Cf при опроміненні під кутами 0°, 45°, 60°;
- джерело Am-Be;
- джерело ^{60}Co (серія S-Co) з дозами 1, 5 та 50 мЗв;

- рентгенівське опромінення серії ISO W-250;
- змішані поля Cf + S-Co, нейтронне 565 keV + S-Co
- три дозиметри використовувались як транспортно-фонові окремо для кожної з лабораторій, де проводилось опромінення.

На другій фазі проводилося моделювання робочих полів, було опромінено по 10 дозиметрів кожного учасника у таких полях:

- CANEL – модель робочого поля;
- ^{252}Cf (D_2O – moderate) – поле, яке моделює аварію критичності;
- чисті розсіяні поля за тіншовим конусом;
- змішані поля.

При цьому параметри поля опромінення лишалися для учасників невідомими, що, власне, додатково ускладнювало завдання визначення дози.

Результати та обговорення

Як було зазначено вище, на двох етапах інтеркалібрування наша лабораторія брала участь із двома різними типами дозиметрів – індикаторами нейтронного опромінення Harshaw 8814/7776 та вимірювачами Harshaw Albedo Neutron 8806/6776.

На перший етап НДІ РЗ брав участь у інтеркалібруванні з дозиметрами-індикаторами Harshaw зі слайдами 7776 в корпусах типу 8814. Усі дозиметри було опромінено в кінці червня – на початку липня 2003 року. Щойно дозиметри повернулись у лабораторію, їх було зчитано на автоматизованому зчитувачі Harshaw 8800. Розрахунки проводилися за алгоритмом NVLAP [3], а зміна чутливості дозиметра (федінг) коректувалася за алгоритмом Hanford. Результати даних вимірів наведено в таблиці 1. Як видно з таблиці 1 (рядки 1–6) та рис.2, відгук ТЛ елемента на основі ^6LiF дуже сильно залежить від енергії нейтронів. Оскільки дозиметр Harshaw 8814/7776 має тільки один елемент, чутливий до нейтронів, то ми були не в змозі

оцінити енергію падаючих нейтронів та ввести відповідний коефіцієнт поправки. При опроміненні відкритими нейтронними джерелами під різними кутами (таблиця 1, рядки 7–9 та рис. 3) ТЛ дозиметри показали відмінний результат, особливо у порівнянні з фотоплівковими дозиметрами, які використовувались деякими з учасників інтеркалібрування. При інтерпретації результатів слід зважати на те, що через дуже сильну енергетичну залежність відгуку, для визначення дози від кожного з джерел необхідно проводити відповідне калібрування. На практиці таке „ідеалізоване” припущення можливе лише частково, оскільки залежно від умов опромінення на робочому місці та типу джерела при професійному опроміненні можна передбачити типовий спектр нейтронного поля, але сильна енергетична залежність навіть у межах одного класу умов опромінення відбивається у надзвичайно великій похибці оцінки дози нейтронного опромінення.

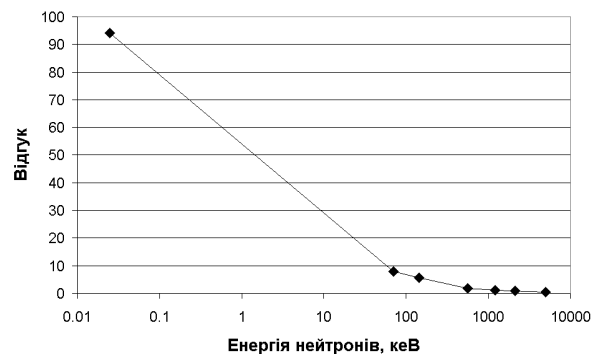


Рис. 2. Залежність відгуку ТЛ елемента на основі ^6LiF від енергії нейтронів. За одиницю взято відгук на нейтронне опромінення ^{252}Cf .

Слід відзначити, що для фотонного та рентгенівського опромінення під різними кутами ми одержали відмінний результат (таблиця 1, рядки 11–14 та рис.3), чим підтвердили результати міжнародного інтеркалібрування у фотонних полях, яке проводилось МАГАТЕ в 1996 – 1998 роках, де наша ТЛД установка Harshaw 8800 (США) з дозиметрами типу 8814/1111 показала найкращий результат серед ТЛД систем та зайняла друге місце серед усіх систем.

Таблиця 1.

Результати першої фази інтеркалібрування для дозиметрів типу Harshaw 8814/7776.

№	Характеристика поля	Еталонне опромінення			Вимірювання			Відгук		
		H_n (мЗв)	H_g (мЗв)	H (мЗв)	M_n (мЗв)	M_g (мЗв)	M (мЗв)	R_n	R_g	R
1	теплові нейтрони	3.19	0.11	3.30	310	0.82	311	97.2	7.34	94.16
2	70 кеВ	0.75	0.01	0.76	10.0	0.04	10.1	13.39	5.33	13.31
3	144 кеВ	1.51	0.02	1.53	7.06	0.11	7.17	4.68	7.28	4.70
4	565 кеВ	2.36	0.02	2.38	3.87	0.07	3.94	1.64	2.97	1.65
5	1.2 МеВ	3.85	0.04	3.89	4.34	0.12	4.46	1.13	3.12	1.15
6	5 МеВ	3.30	0.03	3.33	1.21	0.04	1.25	0.37	1.21	0.38
7	^{252}Cf , 0°	4.00	0.15	4.15	3.99	0.17	4.16	1.00	1.12	1.00
8	^{252}Cf , 45°	4.00	0.15	4.15	3.60	0.62	3.61	0.90	1.08	0.87
9	^{252}Cf , 60°	4.00	0.15	4.15	3.38	0.16	3.54	0.85	1.05	0.85
10	Am-Be	1.50	0.13	1.63	0.88	0.19	1.07	0.59	1.42	0.66
11	W-250		5.00	5.00	0	4.9			0.98	
12	S-Co		1.00	1.00	0	0.98			0.98	
13	S-Co		5.00	5.00	0	5.04			1.01	
14	S-Co		50.00	50.00	0	50.9			1.02	
15	^{252}Cf +S-Co	2.00	2.50	4.50	1.25	1.92	3.17	0.63	0.77	0.70
16	565 кеВ+S-Co	2.25	2.50	4.75	2.45	2.02	4.47	1.09	0.81	0.94

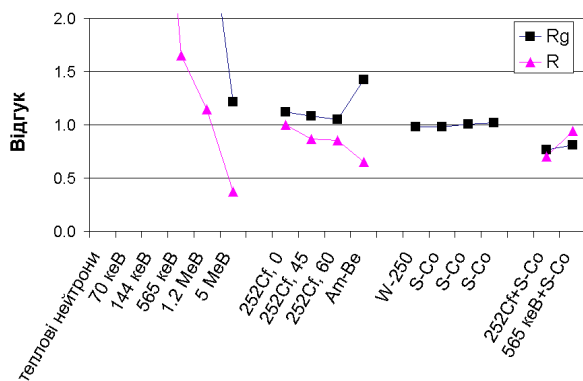


Рис.3. Результати 1-ї фази інтеркалібрування дозиметрів типу Harshaw 8814/7776 для різних умов опромінення, де R_g – відхилення даних вимірювань від еталонного опромінення для дози від гамма-опромінення, R – для сумарної дози від нейтронного та гамма-опромінення. Відгук для окремих серій низькоенергетичних нейтронів виходить за межі діапазону графіка – див. результати в табл. 1 та рис. 2.

На другій фазі, під час якої проводилось моделювання робочих полів, було опромінено по 10 дозиметрів кожного

учасника у досить різноманітних полях, що імітували різні практичні ситуації, наприклад, повністю розсіяне випромінювання у сильно екранованих установках, ситуація аварії критичності тощо.

Для участі у другому етапі інтеркалібрування використовувалися дозиметри обох систем – вимірювачі нейтронної дози Harshaw Albedo Neutron Dosimeter 8806/6776 (результати див. табл. 2 та рис. 4) та індикатори нейтронної дози 8814/7776 (результати див. табл. 3 та рис. 5). Слід зауважити, що завдання визначення індивідуальних доз нейтронного опромінення в задалегідь невідомих полях опромінення у випадку нашої лабораторії ускладнювалось тим, що в Україні відсутні нейтронні еталони з різними енергетичними та кутовими характеристиками. Тому результати зчитування дозиметрів оброблялися за допомогою алгоритму WinAlgorithm 8806, який достатньо було відкалібрувати лише в полі ^{137}Cs . Та-

ким чином, на другій фазі НДІ РЗ виступив у тестах із двома типами ТЛД дозиметрів, один з яких ґрунтується на альбедному принципі, який показав дещо кращий результат завдяки спеціальним фільтрам корпусу дозиметра (рис. 4 та рис. 6) та більш досконалому алгоритму.

Звичайно на практиці вимірювач нейтронної дози Harshaw Albedo Neutron Dosimeter 8806/6776 використовується в парі з універсальним дозиметром Harshaw 8814/7776, що оснащений фільтрами для вимірювання дозиметричних величин $H_p(10)$, $H_p(3)$ та $H_s(0.07)$.

Таблиця 2.

Результати другої фази інтеркалібрування для дозиметрів типу Harshaw 8806/6776.

№	Характеристика поля	Еталонне опромінення			Вимірювання			Відгук		
		H_n (мЗв)	H_g (мЗв)	H (мЗв)	M_n (мЗв)	M_g (мЗв)	M (мЗв)	R_n	R_g	R
1	CANEL / 0°	3.00	0.30	3.30	6.40	1.13	7.53	2.13	3.77	2.28
7	CANEL+W250 / 0°	1.55	2.16	3.71	3.57	2.75	6.32	2.30	1.28	1.71
4	Розсіяні нейтрони/ iso	1.70	0.33	2.03	4.99	0.89	5.88	2.94	2.70	2.90
5	Cf+розс. нейтр. / 0°+iso	1.70	0.29	1.99	3.64	0.65	4.29	2.14	2.26	2.16
2	Cf / 0°	2.00	0.27	2.27	2.04	0.42	2.46	1.02	1.58	1.09
3	Cf / +/-75°	1.30	0.18	1.48	1.01	0.24	1.25	0.78	1.30	0.84
9	Cf+Cs / 60°	0.80	2.13	2.93	0.75	2.09	2.84	0.94	0.98	0.97
10	Cf+Cs / +/-75°	1.30	0.99	2.29	1.28	1.03	2.31	0.98	1.04	1.01
8	W250 / 0°	0.00	3.00	3.00	0.00	3.25	3.25		1.08	1.08
6	Cs+6,6 MeV / 0°	0.00	3.00	3.00	0.00	2.79	2.79		0.93	0.93

Таблиця 3.

Результати другої фази інтеркалібрування для дозиметрів типу Harshaw 8814/7776.

№	Характеристика поля	Еталонне опромінення			Вимірювання			Відгук		
		H_n (мЗв)	H_g (мЗв)	H (мЗв)	M_n (мЗв)	M_g (мЗв)	M (мЗв)	R_n	R_g	R
1	CANEL / 0°	3.00	0.30	3.30	10.15	0.81	10.96	3.38	2.70	3.32
7	CANEL+W250 / 0°	1.55	2.16	3.71	4.99	2.47	7.46	3.22	1.15	2.01
4	Розсіяні нейтрони/ iso	1.70	0.33	2.03	5.62	0.54	6.16	3.31	1.64	3.03
5	Cf+розс. нейтр. / 0°+iso	1.70	0.29	1.99	3.94	0.43	4.37	2.32	1.50	2.20
2	Cf / 0°	2.00	0.27	2.27	2.01	0.29	2.30	1.01	1.09	1.02
3	Cf / +/-75°	1.30	0.18	1.48	0.99	0.21	1.20	0.76	1.14	0.81
9	Cf+Cs / 60°	0.80	2.13	2.93	0.74	2.10	2.84	0.93	0.98	0.97
10	Cf+Cs / +/-75°	1.30	0.99	2.29	1.30	1.01	2.31	1.00	1.02	1.01
8	W250 / 0°	0.00	3.00	3.00	0.00	3.07	3.07		1.02	1.02
6	Cs+6,6 MeV / 0°	0.00	3.00	3.00		2.88	2.88		0.96	0.96

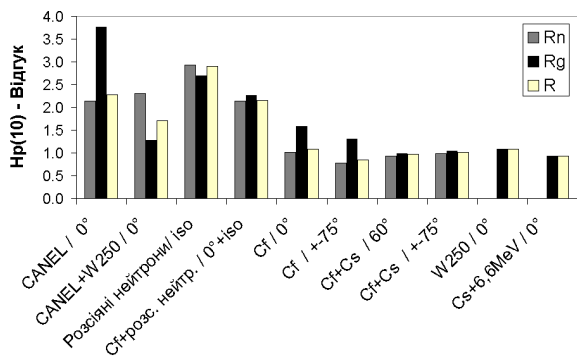


Рис. 4. Діаграма відхилення виміряного дозиметром Harshaw 8806/6776 значення від еталонного опромінення для різних умов опромінення, де R_g – відхилення даних вимірювань від еталонного опромінення для дози від гамма-опромінення, R_n – для дози від нейтронного опромінення, R – для сумарної дози $H_p(10)$ від нейтронного та гамма-опромінення (Див. табл. 2).

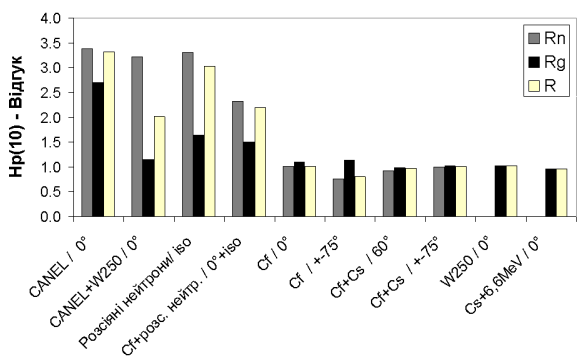


Рис. 5. Діаграма відхилення виміряного дозиметром Harshaw 8814/7776 значення від еталонного опромінення для різних умов опромінення, де R_g – відхилення даних вимірювань від еталонного опромінення для дози від гамма-опромінення, R_n – для дози від нейтронного опромінення, R – для сумарної дози $H_p(10)$ від нейтронного та гамма-опромінення (Див. табл. 3).

Відповідно до вимог МКРЗ результати відхилення вимірних доз (відгуку) на нейтронне опромінення повинні лежати в "трубі похибок", відображеній суцільною лінією, а на фотонне – пунктирною (рис. 6 та рис. 7). З результатів другого етапу інтеркалібрування, видно, що нейтронний дозиметр Harshaw Albedo Neutron Dosimeter 8806/6776 у комбінації з алгоритмом WinAlgorithm 8806 (калібрування на гамма-джерелі ^{137}Cs) дає помірно консервативні результати і задовольняє ви-

моги МКРЗ для більшості типових полів випромінювання, які можна зустріти на робочих місцях. Водночас навіть для досить екзотичних умов опромінення результати виходять за припустимі межі похибки, але є систематично консервативними, тобто ні за яких умов не призводять до недооцінки дійсної дози опромінення.

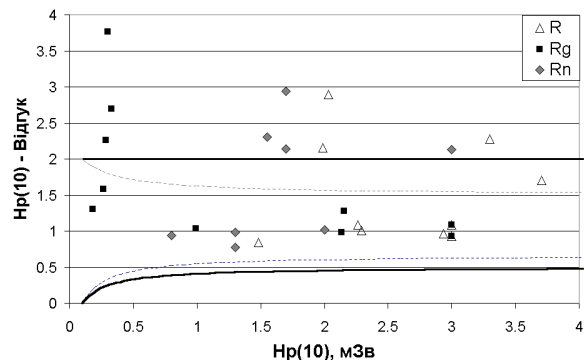


Рис. 6. Результати другої фази інтеркалібрування дозиметрів типу Harshaw 8806/6776 для різних умов опромінення, де R_g – відхилення даних вимірювань від еталонного опромінення для дози від гамма-опромінення, R_n – для дози від нейтронного опромінення, R – для сумарної дози $H_p(10)$ від нейтронного та гамма-опромінення. "Труба похибок", відображена суцільною лінією – межі відхилення показів доз на нейтронне опромінення, а пунктирною – на фотонне (Див. таблицю 2).

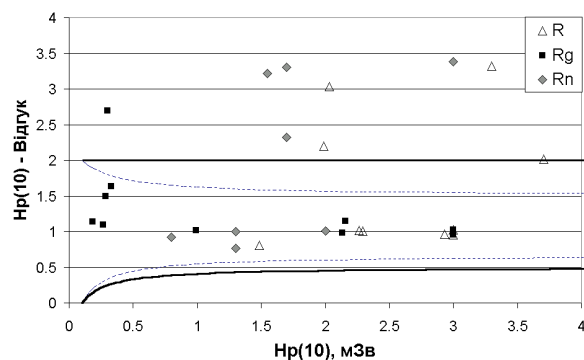


Рис. 7. Результати другої фази інтеркалібрування дозиметрів типу Harshaw 8814/7776 для різних умов опромінення, де R_g – відхилення даних вимірювань від еталонного опромінення для дози від гамма-опромінення, R_n – для дози від нейтронного опромінення, R – для сумарної дози $H_p(10)$ від нейтронного та гамма-опромінення. "Труба похибок", відображена суцільною лінією – межі відхилення показів доз на нейтронне опромінення, а пунктирною – на фотонне (Див. таблицю 3).

Можна помітити, що результати оцінки фотонної компоненти у змішаних фотонно-нейтронних полях типово завищують номінальні значення доз, якими дозиметри опромінювались у калібрувальній лабораторії. Таке явище може бути пояснене як недосконалістю алгоритму, так і фізичними чинниками – виникненням вторинних гамма-квантів під дією нейтронного опромінення. Слід підкреслити, що ці вторинні гамма кванти, досить сильно завищують гамма-складову дозу, що визначається дозиметром, але в сумарну дозу $H_p(10)$ їх вклад незначний. Ретельне вивчення фірмового алгоритму WinAlgorithm 8806 показало, що в алгоритмі для автоматичного розрахунку доз використовується показ тільки одного ТЛ елемента, чутливого до нейтронів, другий нейтронний детектор використовується для визначення дози опромінення тепловими нейтронами, за умови примусового використання цієї опції.

Цікавим є порівняння наших результатів з результатами інших дозиметричних систем. Серед усіх учасників інтеркалібрування найкращий результат показали трекові дозиметри на базі пластику CR-39. Водночас пластик CR-39 має велику кутову залежність дози, а також є нечутливим до теплових нейтронів. Тому нейтронний трековий дозиметр використовують у вигляді збірки, яка включає в себе фільтр з бором для реєстрації теплових нейтронів. Як компроміс можна запропонувати комбінований дозиметр, що включає ТЛД та трековий дозиметр. Вдалим прикладом дозиметра такого типу може бути Harshaw 8816 Albedo Neutron Dosimeter, в одному корпусі якого міститься 4-елементний ТЛ дозиметр та CR-39 пластик.

Висновки

Інтеркалібрування МАГАТЕ, до якого були залучені передові лабораторії дозиметричного стандарту, надало унікальну можливість тестування ТЛ дозиметричних систем, що використовуються в Україні, на спроможність визначати індивідуальні дози нейтронного опромінення.

Дозиметрія у змішаних гамма-нейтронних полях є досить складною проблемою, причому на результати визначення доз справляють великий вплив як параметри поля нейтронного випромінювання, так і співвідношення між фотонною та нейтронною компонентами цього поля.

Інтеркалібрування показало практичну придатність спеціалізованого альbedo- дозиметра Harshaw Albedo Neutron Dosimeter 8806/6776 у комбінації з алгоритмом WinAlgorithm 8806 для визначення індивідуальних доз нейтронного та гамма опромінення, навіть за обмеження у вигляді калібрування на гамма-джерелі ^{137}Cs (замість повноцінного калібрування на нейтронних джерелах різних енергій). Отримані результати задовольняли вимоги точності для більшості практичних ситуацій опромінення (полів на робочих місцях) і були систематично консервативними для решти модельованих робочих полів.

За результатами тесту універсальні дозиметри (вимірювання дозиметричних величин $H_p(10)$, $H_p(3)$ та $H_s(0.07)$) типу Harshaw 8814/7776 у комбінації з алгоритмом NVLAP поступаються альbedo- дозиметрам Harshaw Albedo Neutron Dosimeter 8806/6776. Через це їх не можна рекомендувати для кількісної оцінки індивідуальних доз нейтронного опромінення, а радше використовуватимуться як індикатори нейтронного опромінення.

Через особливості методу альbedoної дозиметрії (наявність тіла людини позаду дозиметра як умови зворотного розсіювання нейтронів) при наявності ймовірності опромінення зі спини з метою коректної оцінки дози опромінення персоналу рекомендується використання додаткового дозиметра, розташованого на спині працівника.

Література

1. ICRP publication 74, Conversion coefficient for use in radiological protection against external radiation, Ed by H. Smith (Pergamon, Oxford–New York–Tokyo, 1995).
2. В.В.Чумак, В.Н. Волоский, Г.Г. Чернышов и др., Опыт использования ТЛД системы HARSHAW для ИДК на объекте “Укрытие”, в кн.: Проблемы Чернобиля (Київ, 2002), Вип.10, Ч.ІІ, С.53–59.
3. M. Moscovitch, K.J. Velbeck, G.M. Bencke. Radiation Protection Dosimetry, 34, 145 (1990).

INTERCALIBRATION OF INDIVIDUAL DOSIMETERS IN MIXED NEUTRON AND GAMMA FIELDS

V.N.Voloskyy, V.V.Chumak

Radiation Protection Institute, Ukr. Acad. Techn. Sci.,
Melnikova st. 53, Kyiv, 04050
e-mail: vit@leed1.kiev.ua

The results of testing of two types of Harshaw TLD dosimeters – 8814/7776 and 8806/6776 Neutron Albedo in mixed neutron-gamma fields are presented. The testing was performed in the framework of IAEA neutron-gamma intercomparison. The ability of these types of dosimeters and dose algorithms for dose evaluation in complicated irradiation fields is estimated. The results seem significant in the context of technical modernization of dosimetry services in Ukraine as well as in the broadening of the scope of dosimetric monitoring to new dosimetric quantities.