

ЕПІДЕМІОЛОГІЧНІ ТА ДОЗИМЕТРИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

УДК 539.16.04:519.245:614.876

В. М. Волоський*, В. В. Чумак, О. В. Баханова

*Державна установа “Національний науковий центр радіаційної медицини
Національної академії медичних наук України”,
вул. Мельникова, 53, м. Київ, 04050, Україна*

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА
МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОЇ
ДОЗИ ТА ВИМІРЮВАННЯ ДОЗ ОРГАНІВ
ЛЮДИНИ В УМОВАХ АЕС**

Проведені експериментальні фантомні дослідження на двох робочих місцях АЕС в момент планового ремонту енергоблоку. Продемонстровано практичне застосування методики оцінки індивідуальної ефективної дози в умовах неоднорідного зовнішнього гамма-опромінення з відомим ступенем анізотропії поля гамма-випромінення. Використання одного конверсійного коефіцієнта переходу від показань ТЛ дозиметра до ефективної дози можливе в умовах опромінення з помірним ($\eta < 5$) ступенем анізотропії, для випадків сильної анізотропії ($\eta > 5$) рекомендовано застосування кількох дозиметрів. Впровадження цієї методики дасть можливість уникнути недооцінки дози опромінення людини у сильно анізотропних полях опромінення, які характерні для окремих робочих місць на АЕС, а також зменшить консервативність оцінки ефективної дози.

Ключові слова: ефективна доза, доза на органи, доза опромінення, фантомні вимірювання, ТЛ дозиметрія, гамма-опромінювання.

Для зовнішнього гамма-опромінювання у широких межах умов опромінення коефіцієнт переходу від показань індивідуального дозиметра (вимірювана величина) до ефективної дози (величина, для якої нормами радіаційної безпеки встановлені основні дозові ліміти) у більшості випадків прирівнюється до одиниці. Вважається, що відповідно відкалібрований дозиметр адекватно вимірює величину $H_p(10)$, тобто еквівалент індивідуальної дози на глибині 10 мм [1], і задовільно оцінює ефективну дозу, виключаючи як її недооцінку, так і значну її переоцінку. Разом з тим, варто мати на увазі, що у деяких випадках $H_p(10)$ може не забезпечувати необхідного консерватизму

* Волоський Віталій Миколайович, e-mail: vit.volosky@gmail.com

© Волоський В. М., Чумак В. В., Баханова О. В., 2012

оцінки ефективної дози, а іноді — істотно занижувати її величину. Такі випадки виникають у неоднорідних полях та у випадку, коли дозиметр екранується від джерела тілом працівника.

Раніш було встановлено, що основним фактором, який має найбільший вплив на спроможність $H_p(10)$ наближувати ефективну дозу E , є анізотропія поля випромінювання [2–3].

Сучасні персональні дозиметри можуть калібруватись у термінах $H_p(10)$ й забезпечувати адекватну оцінку цієї величини у широкому діапазоні умов опромінення (енергій і кутів падіння потоку випромінювання). Але необхідний механізм переходу від показань дозиметра до ефективної дози. Такий механізм був запропонований нами раніше у методиці визначення ефективної дози персоналу АЕС [4]. На етапі впровадження методики було проведено експерименти на типових робочих місцях енергоблоку АЕС, зокрема вимірювання анізотропії та спектрів гамма-випромінювання. За результатами цих експериментів було вибрано два місця для проведення фантомних вимірювань, покликаних надати експериментальний матеріал для перевірки основних положень методики [4].

Метою роботи була експериментальна перевірка методики визначення ефективної дози персоналу за допомогою сумісних вимірювань кількома індивідуальними дозиметрами через фантомні вимірювання на робочих місцях ЮУАЕС та експериментальне встановлення конверсійних коефіцієнтів переходу від показань дозиметра до ефективної дози працівника.

Матеріали та методи досліджень. Для експериментального визначення значення ефективної дози та одержання конверсійних коефіцієнтів на реальних робочих місцях АЕС використовувався стандартний гетерогенний антропоморфний фантом типу RANDO-ALDERSON. Внутрішній устрій фантому відповідає характеристикам “Стандартної людини МКРЗ” [5] і включає кісткову, легеневу та м’які тканини тіла людини. Даний фантом складається з 39 шарів, скріплених стяжним пристроєм. Всередині фантому розміщуються (імплантовані) термолюмінесцентні (ТЛ) детектори, виготовлені з тканиноеквівалентного матеріалу LiF. Фантом може містити до 270 ТЛ детекторів у позиціях, що відповідають розташуванню визначених органів людини.

Для більш точного визначення еквівалентної дози кожного з органів у відповідних йому локалізаціях розташовується по кілька детекторів, показання яких усереднюються. У результаті, дози, отримані детекторами (групами детекторів), з достатньою точністю можна прийняти рівними дозам, отриманим органами реальної людини при опроміненні у заданих умовах.

Суть фантомних вимірювань полягає у тому, що споряджений ТЛ детекторами фантом експонується у полі випромінювання, після експонування показання ТЛ детекторів зчитуються, і за допомогою відповідного усереднення по органах визначаються дози на окремі органи. Потім, відповідно до загальновідомого співвідношення $E = \sum_T w_T H_T$ [5],

де H_T — еквівалентна доза в органі чи тканині, w_T — ваговий множник для тканини T , можна визначити ефективну дозу.

Фантомні виміри відрізняються великою трудомісткістю і звичайно застосовуються вибірково, для перевірки результатів, отриманих модельним шляхом. Очевидно, що однозначна інтерпретація результатів фантомного експерименту можлива лише за умови наявності достатньої інформації про діюче випромінювання, у першу чергу — його спектральний склад і кутові характеристики. При відсутності такої інформації фантомні виміри можуть служити лише для перевірки деяких гіпотез про ймовірну величину коефіцієнта переходу до ефективної дози, однак для більш глибокого аналізу не вистачатиме вихідних даних.

У нашому випадку інтерес становили конверсійні коефіцієнти, тобто зв'язок між дозами, що вимірюються індивідуальними дозиметрами, та ефективної дозою працівника. Тому разом з фантомом у полі випромінювання експонувались ТЛ дозиметри HARSHAW, що закріплювались на його поверхні. Окрім штатних дозиметрів ІДК типу HARSHAW 8814, у експериментальних цілях експонувались також ТЛ дозиметри системи Rados/Alnor.

Загалом, величина конверсійного коефіцієнта C_k переходу від величини, виміряної дозиметрами, до ефективної дози залежить від умов опромінення — енергетичного спектра і кутових характеристик (геометрії) поля випромінювання, а також орієнтації людини в полі опромінювання [2]. Енергетичний спектр випромінювання має порівняно слабкий вплив на величину конверсійного коефіцієнта [6–8], тоді як геометрія опромінення сильно впливає на конверсійний коефіцієнт. При цьому, критичними факторами є анізотропія поля випромінювання¹ [2, 4] й орієнтація тіла людини у полі (при незмінній позі або орієнтації).

¹ Анізотропія поля випромінювання — це ступінь неоднорідності потоків випромінювання, що падають на об'єкт із різних напрямків. Мірою анізотропії поля випромінювання

служить безрозмірна величина, що визначається як
$$h = \frac{\max(I_k)|_{k=1,6}}{\min(I_k)|_{k=1,6}}$$

де I_k — інтенсивність потоку випромінювання в сферичному секторі k , що відповідає одному із шести основних напрямків у декартовій системі координат.

На ЮУАЕС дослідження виконувалися у період проведення планового ремонту енергоблоку № 1. Фантом встановлювався в місцях з високим значенням дози опромінення, при цьому орієнтація фантома співпадала з найбільш імовірною орієнтацією працівника, що виконував дозозатратні роботи на цьому робочому місці. Під час експозиції фантом встановлювався на ящик-імітатор ніг (заповнений поліетиленовими пляшками з водою) та закривався поліетиленом, щоб уникнути можливого зовнішнього забруднення.

Результати та їх обговорення. Було виконано два фантомні вимірювання в приміщеннях боксу парогенератора А406/1 біля головного циркуляційного трубопроводу та теплообмінника аварійного розхолодження 2А002/1 Енергоблоку № 1 ЮУАЕС. Для кожної локалізації попередньо проводилося експериментальні вимірювання інтенсивності поля гамма-випромінювання для визначення параметра анізотропії [2].

Усереднені значення доз для органів, перемножені з ваговим множником, наведені у таблиці 1 разом з сумарною ефективною дозою.

Таблиця 1. Результати фантомних (стаціонарних) вимірювань в приміщеннях А406/1 та 2А002/1 ЮУАЕС

Орган	Ваговий множник, w_T	Вклад органа в дозу, мЗв	
		А406/1	2А002/1
Кістковий мозок	0,12	2,91	0,20
Шлунок	0,12	2,34	0,17
Стравохід	0,12	2,17	0,15
Легені	0,12	2,48	0,18
Молочні залози	0,05	1,19	0,07
Сечовий міхур	0,05	0,90	0,06
Печінка	0,05	1,08	0,07
Стравохід	0,05	1,06	0,09
Щитоподібна залоза	0,05	1,20	0,07
Гонади	0,2	4,30	0,35
Решта органів*	0,07	1,33	0,09
Ефективна доза фантома, мЗв		20,96	1,5
ПД, мкЗв/год		376–382	58
Час експозиції		71 год	27 год 20 хв

* Дози на поверхню кісток та шкіру за допомогою фантома окремо не визначались, тому ці органи віднесені до решти органів.

Значення ефективної дози потім порівнювались з показаннями 12 дозиметрів, що були закріплені на фантомі в найбільш імовірних місцях носіння. Також в таблиці 1 приведена потужність експозиційної дози (ПД) на висоті один метр в місці встановлення фантому та загальний час експозиції.

У табл. 2 наведені результати порівняння експериментальних та теоретичних значень конверсійних коефіцієнтів при використанні одного дозиметра. $C_{k, \text{експ}}$ визначений як відношення значення ефективної дози за результатами фантомних вимірювань до показання дозиметра, розташованого на місці лівої нагрудної кишені. $C_{k, \text{теор}}$ відповідає даному значенню параметра анізотропії, η , згідно з методикою [4], де саме значення C_k визначалося у теоретичний спосіб за допомогою комп'ютерного моделювання. Як бачимо, ми маємо дуже хороший (близько 3%) збіг розрахункових та експериментальних конверсійних коефіцієнтів, що визначені для статичних умов опромінення в відповідних локалізаціях вимірювання. Слід відмітити, що у процесі експонування фантом був зорієнтований грудьми у напрямі найбільш інтенсивного потоку випромінювання (така орієнтація співпадала

Таблиця 2. Порівняння експериментальних та теоретичних значень конверсійного коефіцієнту для фантомних вимірювань. Один дозиметр, що розташований на лівій нагрудній кишені

	Локалізація 1 А406/1, ГЦТ	Локалізація 2 2А002/1, ТОАР
Анізотропія η у точці вимірювання	3,1	6,9
Ефективна доза (експериментальна), мЗв	21,0	1,50
Показання $H_p(10)$ дозиметра на лівій нагрудній кишені, мЗв	23,2	2,19
Конверсійний коефіцієнт, експеримент для даної стаціонарної конфігурації, $C_{k, \text{експ}}$	0,90	0,69
Конверсійний коефіцієнт, розрахунок для даної стаціонарної конфігурації, $C_{k, \text{теор}}$	0,87	0,71
Відхилення $C_{k, \text{теор}}$ відносно $C_{k, \text{експ}}$, $ C_{k, \text{теор}} - C_{k, \text{експ}} / C_{k, \text{теор}}$	3,4%	2,8%
Конверсійний коефіцієнт, універсальний рекомендований (табл. 3.3.)	0,97	1,03*

* Визначення ефективної дози за показанням одного дозиметра незастосовне через велику анізотропію.

з найбільш імовірним положенням тіла працівника), тому реальні значення конверсійних коефіцієнтів дещо нижчі за ефективні значення, що рекомендовані для даного класу анізотропії при довільній орієнтації тіла людини в полі випромінювання. При цьому, ступінь відхилення тим вище, чим більше значення має параметр анізотропії η . Необхідно враховувати, що, відповідно до методики [4], у випадку локалізації 2 ($\eta=6.90$) використання одного дозиметра для визначення ефективної дози неприйнятне.

Для випадків опромінення у полях із значною анізотропією ($\eta > 5$) у методиці було запропоновано представити оцінку ефективної дози E' як лінійну комбінацію показань n дозиметрів $H_{p_k}(10)$:

$$E' = \sum_{k=1,n} a_k H_{p_k}(10) \quad (1)$$

де $H_{p_k}(10)$ — показання відповідного дозиметра; a_k — вагові множники, нормовані наступним чином:

$$\sum_{k=1,n} a_k = 1 \quad (2)$$

При виборі (оптимізації) значень a_k необхідно керуватись принципом консервативності: $E' > E$, тобто оцінка ефективної дози E' повинна бути не менше самої ефективної дози.

Для умов АЕС вагові множники a_k приймають наступні значення:

$$\begin{aligned} a_{\text{груди ліворуч}} &= a_{\text{груди праворуч}} = 0.35 \\ a_{\text{спина ліворуч}} &= a_{\text{спина праворуч}} = 0.15 \end{aligned} \quad (3)$$

Відповідно до методики [4], отримана оцінка величини ефективної дози з імовірністю 95% буде не нижчою за істинне значення E . З табл. 2 видно, що експериментально одержана в умовах АЕС оцінка ефективної дози має помірну консервативність, причому, переоцінка ефективної дози складає лише 5.4%.

Наведені у табл. 3 результати визначення ефективної дози за показаннями чотирьох дозиметрів демонструють правильність такого підходу, особливо для випадків сильно анізотропних полів (локалізація 2).

Висновок

Фантомні експерименти, що проводились в умовах АЕС, показали хороший збіг теоретичних та експериментальних даних та підтвердили припущення, закладені у основу розробки методики визначення ефективної дози персоналу [4]. Продemonстровано практичне застосування методики в умовах неоднорідного зовнішнього опромінення для реаль-

Таблиця 3. Порівняння експериментальних та теоретичних значень конверсійного коефіцієнта для фантомних вимірювань. Чотири дозиметри, що розташовані на рівні грудей

	Локалізація 1 A406/1, ГЦТ	Локалізація 2 2A002/1, ТОАР
Анізотропія в точці вимірювання	3,1	6,9
Ефективна доза в фантомі, визначена по дозам на органи	21,0	1,50
Показання Нр(10) 4-х дозиметрів		
груди зліва	23,2	2,19
груди справа	29,0	2,09
спина зліва	18,6	1,32
спина справа	23,3	1,12
Оцінена ефективна доза за показаннями 4 дозиметрів, згідно з формулами (1), (3)	24,5	1,86
Відношення ефективної дози в фантомі до оціненої ефективної дози — експеримент для даної стаціонарної конфігурації	0,85	0,81
Відношення ефективної дози в фантомі до оціненої ефективної дози — розрахунок для даної стаціонарної конфігурації*	0,84	0,76
Відхилення $C_{\text{теор}} / C_{\text{експ}}$ відносно $C_{\text{експ}}$	1,7%	5,4%
Конверсійний коефіцієнт, універсальний рекомендований при використанні одного дозиметра	0,97	—**

* — Оцінка ефективної дози та доз у дозиметрах, виконана за допомогою моделювання методом Монте-Карло, з урахуванням експериментально визначеної анізотропії поля опромінення [6]. ** — Визначення ефективної дози по показанням одного дозиметра незастосовне із-за великої анізотропії — рекомендовано використання показань 4-х дозиметрів (відповідно до СТП [4]).

них робочих місць АЕС. Використання одного конверсійного коефіцієнта переходу від показань дозиметра до ефективної дози можливе в умовах опромінення з відомим, обмеженим ступенем анізотропії. Для випадків більш сильної анізотропії ($\eta > 5$) рекомендоване використання кількох дозиметрів. Було експериментально підтверджено ефективність впровадження методики [4] для досягнення необхідної точності у визначенні ефективної дози, що дозволяє уникнути недооцінки дози

опромінення людини в сильно неоднорідних полях опромінення, а отже й уникнути серйозних проблем при наближенні рівнів опромінення персоналу АЕС впритул до лімітів дози, встановлених нормами радіаційного захисту при професійному опроміненні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Международные основные нормы безопасности для защиты от ионизирующих излучений и безопасного обращения с источниками излучения // Серия изданий по безопасности № 115. — Вена : МАГАТЭ, 1997. — 382 с.
2. Passive TLD based system for characterization of spectral and angular properties of high dose rate workplace fields / V. Chumak, E. Bakhanova, S. Shylo [et al.] // Radiat. Prot. Dosim. — 2002. — Vol. 101, No 1–4. — P. 589–592.
3. Bartlett D. T. Adequacy of external dosimetry methods and suitability of personal dose-meters for workplace radiation fields / D. T. Bartlett, R. J. Tanner // Health and Safety Executive, Research Report 385. — Sudbury : HSE Books, 2005. — 26 p.
4. СТП НАЕК “Енергоатом” № 0.03.065–2006 “Визначення ефективної дози зовнішнього опромінення персоналу АЕС” (Методичні вказівки).
5. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60 // Ann. ICRP. — 1991. — Vol. 21, N 1–3. — 215 p.
6. Volosky V. Determination of angular distributions of workplace photon fields in a context of effective dose estimation / V. Volosky, E. Bakhanova, V. Chumak // Rad. Prot. Dosim. — 2011. — Vol. 144, N 1–4. — P. 636–639.
7. Chumak V. Characterization of workplace photon fields: implications for assessment of effective dose / V. Chumak, E. Bakhanova, V. Volosky // Proc. the 4th Intern. Workshop on Individual Monitoring of Ionizing Radiation, Oarai (Japan), December 1–2, 2008. — Tokyo : Chiyoda Technol Corporation, 2008. — P. 107–139.
8. Chumak V. Conversion from dosimeter readings to effective dose in individual dosimetric monitoring: effect of anisotropy of photon fields and dosimeter design [Electronic resource] / V. Chumak, E. Bakhanova, V. Volosky // Proc. of the 12th International Congress of the International Radiation Protection Association: Strengthening Radiation Protection Worldwide, October 19–24, 2008. — Buenos Aires, Argentina, 2008. — 1 електрон. опт. диск (CD–ROM); Paper no FP3262; 2008.

Стаття надійшла до редакції 12.06.2012.

В. Н. Волоский, В. В. Чумак, Е. В. Баханова

*Государственное учреждение “Национальный научный центр радиационной
медицины Национальной академии медицинских наук Украины”,
ул. Мельникова, 53, г. Киев, 04050, Украина*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ДОЗЫ И ИЗМЕРЕНИЯ ДОЗ ОРГАНОВ ЧЕЛОВЕКА В УСЛОВИЯХ АЭС

Проведены экспериментальные фантомные исследования на двух рабочих местах АЭС в момент планового ремонта энергоблока. Продемонстрировано практическое применение методики оценки индивидуальной эффективной дозы в условиях неоднородного внешнего гамма-облучения с известной степенью анизотропии поля гамма-излучения. Использование одного конверсионного коэффициента перехода

от показаний ТЛ дозиметра к эффективной дозе возможно в условиях облучения с умеренной ($\eta \leq 5$) степенью анизотропии, для случаев же сильной анизотропии ($\eta > 5$) рекомендовано использование нескольких дозиметров. Внедрение данной методики позволит избежать недооценки дозы облучения человека в сильно анизотропных полях облучения, которые характерны для отдельных рабочих мест на АЭС, а также уменьшит консервативность оценки эффективной дозы.

Ключевые слова: эффективная доза, доза на органы, фантомные исследования, ТЛ дозиметрия, гамма-излучение.

V. M. Voloskyi, V. V. Chumak, O. V. Bakhanova

*State Institution "National Research Center for Radiation Medicine
of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine",
Melnykov str., 53, Kyiv, 04050, Ukraine*

EXPERIMENTAL CHECK OF AN EFFECTIVE DOSE ESTIMATION TECHNIQUE AND MEASUREMENT OF HUMAN ORGAN DOSES IN CONDITIONS OF A NUCLEAR POWER PLANT

Experimental phantom measurements are performed for two workplaces at the nuclear power station during scheduled repair of a power unit. It is shown that practical application of the technique of individual effective dose estimation is possible in case of non-uniform external gamma exposure if angular characteristics of the radiation field are known. Application of a single conversion factor of transition from TL dosimeter readings to the effective dose is possible for the known limited degree of field anisotropy, for the cases of strong anisotropy the use it is recommended to use multiple dosimeters. The implementation of this technique allows avoiding dose underestimation in strongly anisotropic fields of radiation, as well as reducing the conservatism of the effective dose estimation.

Key words: effective dose, organ dose, phantom measurements, TL dosimetry, gamma exposure.