

GAMMA REFERENCE FIELD OF ^{137}Cs SOURCE AT THE MILITARY INSTITUTE OF CHEMICAL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

Nguyen Minh Cong¹, Dinh Tien Hung¹, Cao Van Hiep¹,
Nguyen Ngoc Quynh², Pham Duc Khue², Le Ngoc Thiem^{2*}

¹Military Institute of Chemical and Environmental Engineering

²Institute for Nuclear Science and Technology

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p>Received: 21/4/2022</p> <p>Revised: 26/5/2022</p> <p>Published: 27/5/2022</p>	<p>This paper presents the determination of the conventional true values of dose rates (i.e., ambient dose rate - \dot{H}^*, personal dose rate - \dot{H}_p) in the gamma reference field of a ^{137}Cs source at the Military Institute of Chemical and Environmental Engineering. The conventional true values of \dot{H}^*, \dot{H}_p were determined at various distances from the source center by three different approaches (i.e., by Monte Carlo simulations using MCNP6 code, theoretical calculations based on the ^{137}Cs source activity, and measurements using a calibrated ion chamber). The values of \dot{H}^* and \dot{H}_p obtained from these three approaches show the difference within 12% with the uncertainties within 13%. The establishment of this gamma reference field was complied with the international criteria ISO 4037.</p>
<p>KEYWORDS</p> <p>^{137}Cs</p> <p>MCNP6</p> <p>Conventional true values</p> <p>Reference field</p> <p>Kerma rate</p>	

TRƯỜNG CHUẨN LIỀU BỨC XẠ GAMMA CỦA NGUỒN ^{137}Cs TẠI VIỆN HÓA HỌC MÔI TRƯỜNG QUÂN SỰ

Nguyễn Minh Công¹, Đinh Tiến Hùng¹, Cao Văn Hiệp¹,
Nguyễn Ngọc Quỳnh², Phạm Đức Khuê², Lê Ngọc Thiêm^{2*}

¹Viện Hóa học Môi trường Quân sự

²Viện Khoa học và Kỹ thuật Hạt nhân

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
<p>Ngày nhận bài: 21/4/2022</p> <p>Ngày hoàn thiện: 26/5/2022</p> <p>Ngày đăng: 27/5/2022</p>	<p>Bài báo này trình bày việc xác định giá trị thực quy ước của các đại lượng suất liều (suất liều môi trường - \dot{H}^*, suất liều cá nhân - \dot{H}_p) trong trường bức xạ gamma của nguồn ^{137}Cs tại Viện Hóa học Môi trường Quân sự. Các giá trị \dot{H}^*, \dot{H}_p được xác định tại các khoảng cách khác nhau từ nguồn bức xạ thông qua 03 phương pháp (mô phỏng Monte Carlo sử dụng MCNP6, tính toán lý thuyết từ hoạt độ phóng xạ của nguồn ^{137}Cs, và đo đạc thực nghiệm sử dụng buồng ion hóa chuẩn cấp II). Giá trị \dot{H}^* và \dot{H}_p nhận được bởi ba phương pháp này có sự sai khác trong vòng 12% với độ không đảm bảo đo tiêu chuẩn trong khoảng 13%. Quá trình thiết lập trường chuẩn liều bức xạ gamma này tuân thủ theo bộ tiêu chuẩn quốc tế ISO 4037.</p>
<p>TỪ KHÓA</p> <p>^{137}Cs</p> <p>MCNP6</p> <p>Giá trị thực quy ước</p> <p>Trường chuẩn</p> <p>Suất Kerma</p>	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.5893>

* Corresponding author. Email: LeNgocThiem@vinatom.gov.vn

1. Giới thiệu

Trường chuẩn liều bức xạ gamma của nguồn ^{137}Cs thường được thiết lập phục vụ mục đích khác nhau (hiệu chuẩn các thiết bị đo liều an toàn bức xạ [1], hiệu chuẩn các thiết bị đo liều bức xạ môi trường [2],...). Có thể điểm qua một số hoạt động liên quan trong những năm gần đây như sau: (i) việc hiệu chuẩn thiết bị đo liều an toàn bức xạ trong trường chuẩn gamma của nguồn ^{137}Cs (tại phòng chuẩn cấp II của Sudan) được tổng hợp và đăng tải trong công bố năm 2010 [3]; (ii) nhóm tác giả Trung Quốc đã nghiên cứu và thiết lập một trường chuẩn gamma của nguồn ^{137}Cs trong một không gian nhỏ (kích thước: 1.0 m x 1.0 m x 1.0 m), phục vụ mục đích hiệu chuẩn liều kế cá nhân [4]; và (iii) năm 2019, trong luận văn thạc sỹ của D. C. Vargas, tác giả đã đề cập đến công tác hiệu chuẩn thiết bị đo liều an toàn bức xạ (tại một phòng chuẩn cấp II của Tây Ban Nha) và xây dựng một phần mềm máy tính phục vụ mục đích bán tự động hóa công tác hiệu chuẩn [5]. Tổ chức tiêu chuẩn quốc tế (ISO) cũng đã xuất bản bộ tiêu chuẩn liên quan đến việc thiết lập trường chuẩn gamma phục vụ các mục đích này [6]-[8].

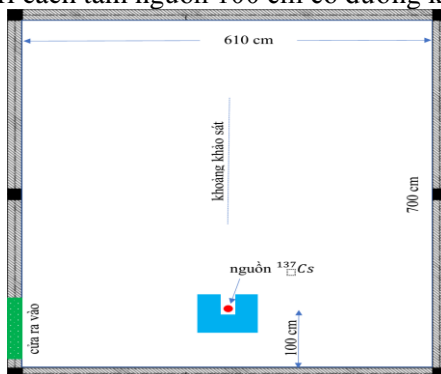
Trong nghiên cứu này, giá trị thực quy ước của đại lượng suất liều (suất liều môi trường (\dot{H}^*) và suất liều cá nhân (\dot{H}_p) [9] trong trường chuẩn gamma của nguồn ^{137}Cs (tại Viện Hóa học Môi trường Quân sự - VHHMTQS, thuộc Binh chủng Hóa học – Bộ Quốc phòng) được xác định bằng ba phương pháp khác nhau: (i) sử dụng mô phỏng Monte Carlo, (ii) tính toán lý thuyết (thông qua hoạt độ nguồn phóng xạ), và (iii) đo đạc thực nghiệm (sử dụng buồng ion hóa chuẩn cấp II). Các kết quả tính toán này được so sánh với nhau và đối chiếu với các tiêu chuẩn quốc tế hiện hành để đảm bảo trường chuẩn gamma của nguồn ^{137}Cs có thể được sử dụng vào công tác hiệu chuẩn thiết bị đo liều gamma cho mục đích an toàn bức xạ. Độ không đảm bảo đo của giá trị \dot{H}^* và \dot{H}_p cũng được đánh giá và thảo luận trong nghiên cứu này.

2. Thiết bị và phương pháp nghiên cứu

2.1. Trường chuẩn liều gamma của nguồn ^{137}Cs và tính toán giá trị thực quy ước

Phòng chuẩn liều gamma của nguồn ^{137}Cs tại VHHMTQS được thiết kế với kích thước 700 cm x 610 cm x 380 cm. Các bức tường và trần được xây dựng bằng gạch đặc và đổ bê tông với chiều dày 22 cm, đảm bảo an toàn bức xạ đối với nhân viên bức xạ làm việc xung quanh, suất liều môi trường bên ngoài phòng lắp đặt nguồn có giá trị $\dot{H}^* < 5 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$.

Nguồn ^{137}Cs có chu kỳ bán rã 30,2 năm, hoạt độ là 203,5 GBq vào năm 1974 (với độ không đảm bảo đo tiêu chuẩn là 12%, dựa theo chứng chỉ chuẩn của Liên bang Nga cung cấp). Cấu trúc của phòng chuẩn và vị trí lắp đặt nguồn ^{137}Cs có thể xem thêm ở Hình 1. Nguồn ^{137}Cs được chứa trong một buồng chì có bề dày thích hợp sao cho khi không hoạt động suất liều môi trường bên ngoài bình chứa có giá trị nhỏ hơn $0,5 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$. Bình chứa có góc mở vừa phải để tạo ra trường chiếu đủ bao trọn thiết bị cần hiệu chuẩn, nhưng đủ nhỏ để giảm ảnh hưởng của tán xạ [6] (kích thước trường chiếu tại vị trí cách tâm nguồn 100 cm có đường kính là 35 cm).



Hình 1. Mặt chiếu bằng của phòng chuẩn liều gamma của nguồn ^{137}Cs

Trong nghiên cứu này, hoạt độ của nguồn ^{137}Cs được sử dụng để tính toán giá trị thực quy ước của các đại lượng suất liều tương ứng, T (trong nghiên cứu này, lần lượt ký hiệu là \dot{H}_{Cal}^* và \dot{H}_{p-Cal}) thông qua biểu thức (1).

$$T = \frac{A \cdot k_{air}}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \cdot h_{\phi} = \frac{A \cdot e^{-\mu \cdot d}}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \cdot h_{\phi} \quad (1)$$

Trong đó:

A : là hoạt độ của nguồn phóng xạ tại thời điểm đo đạc (68×10^9 Bq vào tháng 7 năm 2021);

d : là khoảng cách từ tâm nguồn ^{137}Cs đến điểm khảo sát (đơn vị tính theo cm);

h_{ϕ} : là hệ số chuyển đổi từ suất thông lượng gamma sang đại lượng suất liều T tương ứng, tại giá trị năng lượng 662 keV của ^{137}Cs (giá trị này có thể lấy trong tài liệu tham khảo [9], đơn vị có thể chuyển đổi sang $\text{cm}^2 \cdot \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$);

$k_{air} = e^{-\mu \cdot d}$: là hệ số hiệu chỉnh sự suy giảm của bức xạ gamma từ nguồn ^{137}Cs trong không khí (giá trị này nằm trong khoảng từ 0,96 đến 0,99 khi giá trị d nằm trong khoảng từ 100 cm đến 400 cm);

μ : là hệ số suy giảm tuyến tính của bức xạ gamma từ nguồn ^{137}Cs trong không khí (đơn vị tính theo cm^{-1} , giá trị này có thể lấy từ tài liệu tham khảo [10]).

2.2. Hệ thiết bị chuẩn và đo đạc giá trị thực quy ước

Trong nghiên cứu này, suất Kerma (\dot{K}) gây bởi trường bức xạ của nguồn ^{137}Cs tại các khoảng cách khác nhau được đo đạc bởi hệ đo sử dụng tổ hợp một buồng ion hóa hình trụ với thể tích nhạy 600 cm^3 của hãng Thermo (N.E. Technology, model: NE-2575) và một bộ đo điện Unidos của hãng PTW (model: Webline). Hệ số chuẩn của hệ đo ($N_K = 50 \mu\text{Gy} \cdot \text{nC}^{-1}$) được cung cấp bởi phòng chuẩn cấp II của cơ quan Năng lượng Nguyên tử quốc tế (IAEA), độ ổn định của hệ đo cũng được kiểm tra trong thời gian dài sử dụng (với sự dao động trong khoảng 2%). Trong quá trình đo đạc \dot{K} sử dụng hệ đo này, giá trị đo đạc (số đọc điện tích, đơn vị nC) được lấy trung bình của 05 lần đo, trong đó thời gian của mỗi lần đo được lựa chọn sao cho sai số thống kê của một lần đo nhỏ hơn 1%. Giá trị \dot{K} (đơn vị có thể chuyển đổi sang $\mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$) gây bởi trường bức xạ ^{137}Cs có thể được xác định thông qua số điện tích đo được trong một giờ của hệ đo (R , đơn vị là $\text{nC} \cdot \text{h}^{-1}$). Mối quan hệ này được cho trong biểu thức (2).

$$\dot{K} = R \cdot N_K \cdot k_{P,T} \cdot k_h \quad (2)$$

Trong đó:

$k_{P,T} = \frac{101,3 \times (273,15 + T)}{P \times 293,15}$: là hệ số hiệu chỉnh số đọc của hệ đo về giá trị điều kiện áp suất và nhiệt độ tiêu chuẩn, có thể xem trong tài liệu tham khảo [7]; P : là áp suất của không khí tại thời điểm đo (đơn vị là kPa); T : là nhiệt độ tại thời điểm đo (đơn vị là $^{\circ}\text{C}$);

k_h : là hệ số hiệu chỉnh số đọc của hệ đo về giá trị điều kiện độ ẩm chuẩn (65%), trong nghiên cứu này $k_h = 1$, xem thêm trong [7].

Từ giá trị \dot{K} đo được bởi hệ đo này, chúng ta có thể tính toán được các đại lượng suất liều tương ứng C (trong nghiên cứu này, lần lượt ký hiệu là \dot{H}_{IC}^* và \dot{H}_{p-IC}) bằng cách sử dụng hệ số chuyển đổi sang các đại lượng liều tương ứng (h , có trong tài liệu tham khảo [9]). Mối quan hệ này được biểu diễn thông qua công thức (3).

$$C = \dot{K} \cdot h \quad (3)$$

2.3. Mô phỏng giá trị thực quy ước sử dụng phương pháp Monte Carlo

Trong nghiên cứu này, mô phỏng Monte Carlo sử dụng phần mềm MCNP6 [11] được thực hiện để tính toán suất thông lượng gamma sinh ra tại các khoảng cách khác nhau trong trường chuẩn của nguồn ^{137}Cs . Theo đó, phổ suất thông lượng gamma (phân bố của suất thông lượng

theo năng lượng) tại các khoảng cách khác nhau trong trường chuẩn của nguồn ^{137}Cs được ghi nhận với phân giải phổ 2 keV (từ năng lượng 0 keV đến 700 keV). Kết quả mô phỏng cho ta giá trị suất thông lượng gamma ($\varphi_i(E_i)$, đơn vị là $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) trong từng nhóm năng lượng (E_i) có độ rộng 2 keV. Mô phỏng MCNP6 được thực hiện với số sự kiện đủ lớn sao cho sai số thống kê của từng giá trị $\varphi_i(E_i)$ luôn nhỏ hơn 1%. Từ giá trị $\varphi_i(E_i)$, ta có thể tính toán các đại lượng suất liều tương ứng, S (trong nghiên cứu này, lần lượt ký hiệu là \dot{H}_{Sim}^* và \dot{H}_{p-sim}) thông qua hệ số chuyển đổi từ suất thông lượng gamma sang suất liều tương ứng, $h_\varphi(E_i)$ (giá trị này có thể tìm thấy trong tài liệu tham khảo [9]) và hoạt độ (A) của nguồn ^{137}Cs . Mối quan hệ này được biểu diễn thông qua biểu thức (4).

$$S = [\sum_{i=0}^{700 \text{ keV}} \varphi_i(E_i) \cdot h_\varphi(E_i)] \cdot A \quad (4)$$

2.4. Tán xạ trong trường chuẩn liều gamma của nguồn ^{137}Cs

Trong nghiên cứu này, tỷ số ($R_{Sct/Dir}$) giữa thành phần tán xạ (đóng góp bởi các năng lượng từ 0 keV đến 660 keV) và thành phần trực tiếp (đóng góp của đỉnh năng lượng 662 keV) được xác định theo hai phương pháp: (i) đo đạc sử dụng buồng ion hóa và (ii) tính toán mô phỏng MCNP6.

Để xác định giá trị $R_{Sct/Dir}$ tại một khoảng cách bất kỳ bằng đo đạc sử dụng buồng ion hóa, ta làm như sau: (1) đo đạc giá trị \dot{K} (ký hiệu là \dot{K}_{Dir-IC}) khi điểm hiệu dụng của buồng ion hóa được đặt trên tia trung tâm của trường chiếu; (2) đo đạc giá trị \dot{K} (ký hiệu là \dot{K}_{Sct-IC}) khi điểm hiệu dụng của buồng ion hóa được đặt tại mặt phẳng vuông góc với tia trung tâm của trường chiếu (tại điểm khảo sát) nhưng ở khoảng cách nằm ngang cách tia trung tâm một khoảng bằng hai lần bán kính của trường chiếu cộng với độ rộng vùng nửa tối của trường xạ; (3) tính toán giá trị $R_{Sct/Dir}$ theo công thức (5).

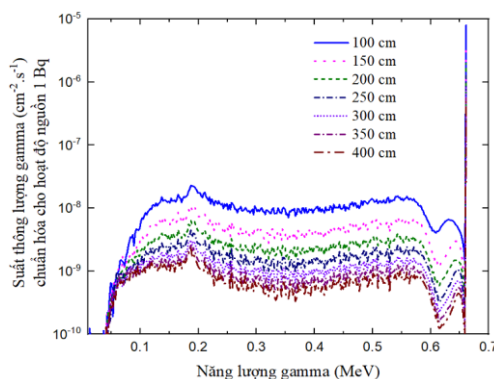
$$R_{Sct/Dir} = R_{Sct/Dir}^{IC} = \frac{\dot{K}_{Sct-IC}}{\dot{K}_{Dir-IC}} \quad (5)$$

Giá trị $R_{Sct/Dir}$ được tính toán dựa trên mô phỏng MCNP6 thông qua công thức (6). Ý nghĩa của các tham số có trong công thức (6) được hiểu giống như trong công thức (4).

$$R_{Sct/Dir} = R_{Sct/Dir}^{Sim} = \frac{\sum_{i=0}^{660 \text{ keV}} \varphi_i(E_i) \cdot h_\varphi(E_i)}{\sum_{i=662 \text{ keV}} \varphi_i(E_i) \cdot h_\varphi(E_i)} \quad (6)$$

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Phổ suất thông lượng gamma



Hình 2. Suất thông lượng gamma trong trường chuẩn của nguồn ^{137}Cs tại một số khoảng cách khác nhau. Kết quả mô phỏng sử dụng MCNP6 được chuẩn hóa cho hoạt độ nguồn ^{137}Cs là 1 Bq

Phổ suất thông lượng gamma tính toán bởi MCNP6 tại một số khoảng cách khác nhau được cho trong Hình 2. Từ Hình 2 cho thấy, phổ suất thông lượng gamma trong trường chuẩn của

nguồn ^{137}Cs chủ yếu xuất hiện đỉnh năng lượng 662 keV (đây là thành phần trực tiếp của trường chuẩn) và một phần ít đóng góp bởi thành phần tán xạ (có năng lượng nhỏ hơn 662 keV). Tính toán theo công thức (6) cho thấy: trường chuẩn gamma của nguồn ^{137}Cs tại VHHMTQS đáp ứng được các yêu cầu của bộ tiêu chuẩn ISO 4037 [6]-[8] (tán xạ nhỏ hơn 5% thành phần trực tiếp).

3.2. Giá trị thực quy ước

Giá trị thực quy ước của các đại lượng suất liều tương ứng: được tính toán (\dot{H}_{Cal}^* , \dot{H}_{p-Cal}) dựa trên hoạt độ nguồn, được đo đặc (\dot{H}_{IC}^* , \dot{H}_{p-IC}) bởi buồng ion hóa, và được mô phỏng (\dot{H}_{Sim}^* , \dot{H}_{p-Sim}) bởi MCNP6 có thể thấy trong Bảng 1. Từ kết quả này cho thấy: tỷ số $\dot{H}_{Cal}^*/\dot{H}_{IC}^*$ và $\dot{H}_{p-Cal}/\dot{H}_{p-IC}$ lần lượt nằm trong khoảng (1,07 đến 1,10) và (1,08 đến 1,12); tỷ số của $\dot{H}_{Sim}^*/\dot{H}_{IC}^*$ và $\dot{H}_{p-Sim}/\dot{H}_{p-IC}$ lần lượt nằm trong khoảng (0,98 đến 1,01) và (1,07 đến 1,12). Điều đó có nghĩa: các giá trị thực quy ước của đại lượng suất liều được tính toán dựa trên hoạt độ nguồn ^{137}Cs hay mô phỏng bởi MCNP6 so với giá trị đo đặc bởi buồng ion hóa có sự khác nhau trong khoảng 7% đến 12%. Một cách tổng quát, có thể thấy sự khác nhau này là có thể chấp nhận được vì hoạt độ của nguồn ^{137}Cs có độ không đảm bảo đo trong khoảng 12% (theo chứng chỉ nguồn).

Trong quá trình hiệu chuẩn thiết bị đo gamma phục vụ mục đích an toàn bức xạ, giá trị thực quy ước của đại lượng suất liều đo đặc bởi buồng ion hóa được lấy làm giá trị chuẩn (do có giá trị phù hợp với các phương pháp đánh giá khác trong vòng sai số của hoạt độ nguồn phóng xạ, buồng ion hóa đã được hiệu chuẩn quốc tế, có độ không đảm bảo đo thấp). Giá trị thực quy ước của suất liều sử dụng trong hiệu chuẩn có thể tính toán thông qua quá trình nội suy, tuy nhiên các giá trị nội suy của suất liều thực quy ước phải đảm bảo nằm trong giới hạn 5% của quy luật giảm theo bình phương khoảng cách [6], [7].

Bảng 1. Giá trị thực quy ước của các đại lượng suất liều tương ứng trong trường chuẩn gamma của nguồn ^{137}Cs tại Viện Hóa học Môi trường Quân sự

Khoảng cách (cm)	Giá trị thực quy ước của suất liều ($\mu\text{Sv/h}$)					
	Suất liều môi trường			Suất liều cá nhân		
	\dot{H}_{Cal}^*	\dot{H}_{IC}^*	\dot{H}_{Sim}^*	\dot{H}_{p-Cal}	\dot{H}_{p-IC}	\dot{H}_{p-Sim}
100	6,18E+03	6,13E+03	6,32E+03	6,18E+03	6,13E+03	6,32E+03
150	2,75E+03	2,65E+03	2,80E+03	2,75E+03	2,65E+03	2,80E+03
200	1,54E+03	1,54E+03	1,56E+03	1,54E+03	1,54E+03	1,56E+03
250	9,89E+02	9,71E+02	9,95E+02	9,89E+02	9,71E+02	9,95E+02
300	6,86E+02	6,80E+02	6,88E+02	6,86E+02	6,80E+02	6,88E+02
350	5,04E+02	4,89E+02	5,05E+02	5,04E+02	4,89E+02	5,05E+02
400	3,86E+02	3,81E+02	3,87E+02	3,86E+02	3,81E+02	3,87E+02

3,3. Độ không đảm bảo đo của giá trị thực quy ước

Bảng 2. Độ không đảm bảo đo tiêu chuẩn ($k=1$) của các đại lượng suất liều và các nguồn gốc gây sai số

Đại lượng	Nguồn gốc	Độ không đảm bảo đo tiêu chuẩn, $k=1$ (%)
Hoạt độ A, chứng chỉ		12,0
h_{ϕ} , công thức (1)		4,0
Khoảng cách, d	công thức (2), (3)	1,0
k_{air}		3,0
\dot{H}_{Cal}^* , \dot{H}_{p-Cal}		13,0
Số đọc, R		1,0
N_K		1,0
$k_{p,T}$	công thức (2)	3,0
h, công thức (3)		4,0
\dot{H}_{IC}^* , \dot{H}_{p-IC}		5,2

<i>Đại lượng</i>	<i>Nguồn gốc</i>	<i>Độ không đảm bảo đo tiêu chuẩn, k=1 (%)</i>
$\varphi_i(E_i)$, công thức (4)		1,0
h_{φ} , công thức (4)		4,0
khác (A, vật liệu, ...)	công thức (4)	12,0
H_{Sim}^* , H_{p-Sim}		12,7

Dựa trên quy luật dẫn truyền sai số của phép đo, độ không đảm bảo đo của giá trị thực quy ước đối với các đại lượng suất liều chuẩn được tính toán và liệt kê trong Bảng 2. Tán xạ cũng là một nguồn gây ra độ không đảm bảo đo của giá trị thực quy ước. Trong nghiên cứu này, tán xạ được đo đặc bởi buồng ion hóa, tính theo công thức (5), có giá trị nhỏ hơn 5% so với thành phần trực tiếp (thỏa mãn tiêu chuẩn ISO 4037 [6]-[8]).

4, Kết luận

Trường chuẩn liều gamma của nguồn ^{137}Cs đã được thiết lập tại Viện Hóa học Môi trường Quân sự tuân thủ theo tiêu chuẩn ISO 4037. Giá trị thực quy ước của các đại lượng suất liều được xác định theo ba phương pháp khác nhau: (i) đo đặc bằng buồng ion hóa chuẩn, (ii) tính toán lý thuyết, và (iii) mô phỏng bởi MCNP6. Sự khác nhau giữa các đại lượng liều tương ứng đối với các phương pháp này nằm trong khoảng 12% (bằng với độ không đảm bảo đo tiêu chuẩn của hoạt độ nguồn trong chứng chỉ chuẩn). Giá trị thực quy ước được đo đặc bởi buồng ion hóa được lấy làm giá trị chuẩn trong quá trình hiệu chuẩn thiết bị (do giá trị này đáng tin cậy nhất thông qua quá trình phân tích, đánh giá các nguồn gốc sai số). Độ không đảm bảo đo của các đại lượng suất liều chuẩn nằm trong khoảng 13%, giá trị này ước tính có thể giảm xuống còn 5% đối với phép đo bởi buồng ion hóa (nếu không tính đến độ không đảm bảo đo của hoạt độ nguồn, 12%). Sự đóng góp của tán xạ có thể được xem là không đáng kể (<5%) trong trường chuẩn liều gamma này, thỏa mãn bộ tiêu chuẩn ISO 4037. Trường chuẩn này có thể được dùng trong quá trình hiệu chuẩn các thiết bị đo liều gamma.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Quốc Phòng với mã số hợp đồng của đề tài là: 2308/2019/HĐKHCN. Nghiên cứu này được thực hiện tại Viện Hóa học Môi trường Quân sự dưới sự chủ quản của Binh chủng Hóa học.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] E. Fernandes, D. Freire, A. C. de Freitas, and C. E. deAlmeida, "The radiation field characteristics of a ^{137}Cs source used for calibration of radiation protection instruments," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 61, pp. 1425-1430, 2004.
- [2] M. Kowatari, H. Yoshitomi, S. Nishino, Y. Tanimura, T. Ohishi, P. Kessler, S. Neumaier, and A. Röttger, "Establishment of a low dose rate gamma ray calibration field for environmental radiation monitoring devices," *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 187, no. 1, pp. 1-8, 2019.
- [3] I.I. Suliman, B. E. Youssif, A. A. Beineen, and M. Hassan, "Calibration of radiation protection area monitoring instruments in Sudan," *Radiation Measurements*, vol. 45, pp. 1578-1581, 2010.
- [4] Y-X. Liu, B. Wei, Y. Xu, M. He, R.-H. Zhuo, D.-Zh. Wen, D.-J. Ding, and B.-J. Mao, "Feasibility study on determining the conventional true value of gamma-ray air kerma in a minitype reference radiation," *Nuclear Science and Techniques*, vol. 28, p. 80, 2017.
- [5] D. C. Vargas, "Calibration of gamma radiation beams of a secondary standards dosimetry laboratory: Programme Feixos19," M.Sc. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), BarcelonaTech, Barcelona, 2019
- [6] International Standard Organization, ISO 4037-1:1996 (E), "X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy - Part 1: Radiation characteristics and production methods," 1996.
- [7] International Standard Organization, ISO 4037-2:1997 (E), "X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of

- photon energy - Part 2: Dosimetry for radiation protection over the energy ranges 8 keV to 1,3 MeV and 4 MeV to 9 MeV," 1997.
- [8] International Standard Organization, ISO 4037-3:1999 (E), "X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy - Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence," 1999.
- [9] International Commission on Radiation Units and Measurements, ICRU Report 95, *Operational Quantities for External Radiation Exposure*, 2020.
- [10] US Department of Commerce, National Bureau of Standards, *Photon Cross Sections, Attenuation Coefficients, and Energy Absorption Coefficients from 10 keV to 100 GeV*, 1969.
- [11] C. J. Werner (ed.), Los Alamos National Laboratory, USA; "MCNP User's Manual, Code Version 6.2," 2017.