

АДУШКИНА Е. С.

КОЭФФИЦИЕНТЫ ВЗАИМОСВЯЗИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМПЛЕКТНОЙ ПОВЕРКИ ТИПОВОЙ УСТАНОВКИ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Аннотация. В статье рассматриваются коэффициенты взаимосвязи, с помощью которых достаточно провести исследования только по одной из величин нейтронного излучения. Далее, используя соответствующие коэффициенты в опорных полях нейтронов по результатам косвенных измерений, можно определить значения мощности поглощенной дозы нейтронов и мощности эквивалентной дозы нейтронов и тем самым обеспечить поверку установки по дозиметрическим величинам. При этом отпадает необходимость применения дозиметрических мобильных эталонных средств измерений для проведения прямых измерений мощности поглощенной дозы нейтронов и мощности их эквивалентной дозы.

Ключевые слова: поверка, нейтронное излучение, средство измерения, мощность поглощенной и эквивалентной дозы нейтронов, плотность потока нейтронов.

ADUSHKINA E. S.

RELATIONSHIP COEFFICIENTS FOR COMPLETE CALIBRATION OF TYPICAL NEUTRON RADIATION UNIT

Abstract. This article considers the relationship coefficients sufficient for testing only one of the values of neutron radiation. Using the appropriate coefficients in reference neutron fields by the results of indirect measurements, one can determine the values of the absorbed neutron dose and the equivalent neutron dose and thereby provide calibration based on dosimetric quantities. This eliminates the need to use standard mobile dosimetry measuring instruments for direct measurements of the absorbed and equivalent neutron dose rates.

Keywords: calibration, neutron radiation, measuring tool, power-Gloden and dose equivalent of neutrons, neutron flux density.

Для поверки средств измерений (СИ) величин нейтронного излучения (НИ) широко используются эталонные установки типов КИС–НРД–МБ, УКПН–1М и им подобные [1]. Основой всех типовых поверочных установок НИ являются радионуклидные источники с изотопами Cf–252 или PuBe. Поля НИ, создаваемые такими источниками в условиях 4П (открытой) и типового коллиматора (закрытой) геометриях характеризуются радиометрическими и дозиметрическими величинами: плотностью потока нейтронов (ППН), мощностью полевой поглощенной или эквивалентной дозы нейтронов (МПДН, МЭДН).

Проанализируем процесс формирования опорных полей нейтронов. Под опорным полем НИ понимают совокупность свободных нейтронов N в пространстве с определенным распределением их по энергии E_n , направлению движения W и времени t .

Для более полного описания поля НИ используется энергетическо-угловая ППН, определяемая как отношение ППН φ_n с энергией от E_n до $E_n + dE_n$, распространяющихся в пределах элементарного угла dW , ориентированного в направлении W , к энергетическому интервалу dE_n и этому телесному углу:

$$\varphi_n(E_n, W) = d^4 N \cdot [dS \cdot dt \cdot dE_n \cdot dW]^{-1}, \quad (1)$$

Другие характеристики поля НИ (энергетическая ППН, ППН, энергетический флюенс, флюенс нейтронов) получают интегрированием этой характеристики по тем или иным параметрам (по направлению движения W , энергии E_n , по поверхности S , по времени t).

Для перевода значения флюенса в значение кермы (керма при энергетическом равновесии равна поглощенной дозе) используют коэффициент, называемый керма-фактор, который для моноэнергетических нейтронов с энергией E_n определяется следующей формулой:

$$k(E_n) = \sum N_i [G_{ij}(E_n) \cdot E_{ср\ ij}(E_n)], \quad (2)$$

где N_i – число ядер типа i в единице массы вещества;

j – характеризует вид ядерного взаимодействия нейтронов;

$G_{ij}(E_n)$ – поперечное сечение j -го вида взаимодействия с ядрами типа i ;

$E_{ср\ ij}(E_n)$ – средняя кинетическая энергия заряженных частиц, которые возникают при j – м виде взаимодействия с ядрами типа i .

Среднее значение керма-фактора k для НИ с энергетическим спектром $\Phi_n(E_n)$ рассчитывают по формуле:

$$k_{ср} = \frac{\int_0^\infty \Phi_n(E_n) \cdot k(E_n) \cdot dE_n}{\int_0^\infty \Phi_n(E_n) \cdot dE_n}, \quad (3)$$

где $\Phi(E_n)dE_n$ – флюенс нейтронов в энергетическом интервале от E_n до $E_n + dE_n$.

В поле НИ керма в тканеэквивалентном материале формируется в основном короткобежными тяжелыми заряженными частицами, что практически обеспечивает условия энергетического равновесия. В этих условиях керма-фактор служит

переводным коэффициентом от флюенса к поглощенной дозе нейтронов (или от ППН к МПДН), т. е. ПДН равна:

$$D_n(E_n) = \Phi(E_n) \cdot k_{\text{ср}}, \quad (4)$$

а МПДН равна:

$$P(E_n) = \varphi_n(E_n) \cdot k_{\text{ср}}, \quad (5)$$

где $\varphi_n(E_n)$ – ППН со спектром $\Phi(E_n)$.

Эквивалентная доза нейтронов $H(E_n)$ определяется как произведение ПДН мягкой биологической ткани стандартного состава на коэффициент качества излучения K_k в данном элементе объема биологической ткани:

$$H(E_n) = D_n(E_n) \cdot K_k, \\ K_k = \frac{1}{D} \int_0^\infty D(L) \cdot K_k(L), \quad (6)$$

где $D(L)$ – распределение ПДН по линейной передаче энергии (ЛПЭ);

$K_k(L)$ – регламентированная зависимость коэффициента качества от ЛПЭ.

Очевидно, что и дифференциальная величина эквивалентной дозы нейтронов – МЭДН связана с МПДН через коэффициент качества K_k .

Анализируя формулы (2, 3, 4, 5, 6) можно сделать вывод о том, что для одинакового спектрального состава НИ и одного вещества (например, для мягкой биологической ткани стандартного состава) коэффициенты перехода (взаимосвязи) физических величин НИ (МПДН, МЭДН, ППН) будут постоянны.

Известно, что поверка дозиметров или радиометров нейтронов согласно требованиям [5; 6; 7] сопряжена с необходимостью определения и учета поправки на смещение эффективного центра источника в коллиматоре ΔR либо в системе «источник – детектор – ΔR_Σ ». При этом показания СИ сравниваются со значением соответствующей физической величины, полученным (рассчитанным) для эффективного расстояния от источника $R_i - \Delta R(R_i - \Delta R_\Sigma)$, где R_i – геометрическое расстояние между центрами источника и детектора.

Величина ΔR определяется графическим способом по методике [2]. По результатам измерений N_i на расстоянии R_i от источника строится график зависимости

$$\frac{1}{\sqrt{N_i}} = f(R_i)$$

и через линейную часть графика проводят прямую до пересечения с осью абсцисс. По пересечению этой прямой с осью абсцисс находится ΔR .

Учитывая, что величина ΔR , определенная по результатам поверки установки по ППН, МПДН или МЭДН, может быть различная, использование в диапазоне расстояний единого значения удельной поглощенной (эквивалентной) дозы $K_{уд.п(э)}$, рассчитанной по формуле (7), связано с внесением в результат измерений дополнительной неучтенной систематической погрешности $\Theta_{уд.п(э)}$.

$$K_{уд.п.} = \frac{P_i}{\varphi_i}, \quad (7)$$

где P_i – мощность поглощенной (эквивалентной) дозы НИ;

φ_i – ППН.

Использование единой величины $K_{уд.п}$ возможно в случае, когда эффективный центр блока детектирования (БД) дозиметрического прибора совпадает с геометрическим, и измерения проводятся только на геометрическом расстоянии $R = 1$ м от источника.

Количественная оценка величины $K_{уд.п}$ и ее значения в диапазоне рабочих расстояний определяются по результатам метрологической аттестации соответствующих вторичных эталонов (ВЭ).

Аттестация ВЭ проводится с помощью СИ и установок, из состава более точного, вышестоящего по государственной поверочной схеме [4] или [5] вторичного эталона.

Значения удельных поглощенных и эквивалентных доз ($K_{уд.п}$, $K_{уд.э}$), рассчитываются по результатам измерений, выполненных на расстоянии 1 м от ^{252}Cf и $^{238}\text{PuBe}$ источников в широких (открытая геометрия) и коллимированных полях НИ ВЭ. Полученные при этом значения $K_{уд.п}$ и $K_{уд.э}$ приведены в таблице 1.

В таблице 2 приведены значения $K_{уд.пi}$ и $K_{уд.эi}$, рассчитанные для коллимированных полей нейтронов в диапазоне расстояний от 50 до 300 см по формулам:

$$K_{уд.п.i} = \frac{A_{\varphi}^2 (R_i - \Delta R_{\varphi})^2}{A_{P_n}^2 (R_i - \Delta R_{P_n})^2}, \quad (8)$$

$$K_{уд.п.i} = \frac{A_{\varphi}^2 (R_i - \Delta R_{\varphi})^2}{A_{P_3}^2 (R_i - \Delta R_{P_3})^2}, \quad (9)$$

где A_{φ} – коэффициент линейной парной регрессии, определенный методом наименьших квадратов из функциональной зависимости $Y_i = A \cdot X_i + B$ (здесь $X_i = R_i$; $Y_i = (\varphi_{ami} e^{-\mu R})^{-1/2}$);

φ_{ami} – значения ППН, полученные при аттестации;

$A_{Pn}, A_{Pэ}$ – коэффициенты линейной парной регрессии, определенные аналогично величине A_ϕ по аттестованным значениям мощностей поглощенных и эквивалентных доз нейтронов соответственно;

μ – линейный коэффициент ослабления нейтронов в воздухе;

$\Delta R_\phi, \Delta R_{Pn}, \Delta R_{Pэ}$ – поправки на смещение эффективного центра источника в коллиматоре установки, аттестованной по ППН, МПДН и МЭДН соответственно.

Таблица 1

Значения $K_{уд.п}$ и $K_{уд.э}$

Тип источника	Коллиматор			Открытая геометрия	
	(Гр · см ²)		(Зв · см ²)	(Гр · см ²)	
²³⁸ PuBe	3,34 · 10 ⁻¹¹	0,80 · 10 ⁻¹¹	29,9 · 10 ⁻¹¹	–	–
²⁵² Cf	2,47 · 10 ⁻¹¹	1,43 · 10 ⁻¹¹	25,2 · 10 ⁻¹¹	2,86 · 10 ⁻¹¹	1,55 · 10 ⁻¹¹

Анализ данных таблицы 1 показал, что значения $K_{уд.п}$ и $K_{уд.э}$, в зависимости от типа радионуклидного источника, различаются между собой на 20 и 35% соответственно. В зависимости от геометрии облучения (коллиматор или открытая геометрия) коэффициенты $K_{уд.п}$ различаются на 16% по нейтронному и на 8% по сопутствующему гамма-излучению.

По данным таблицы 2 рассчитаны средние значения величин $\bar{K}$ и $\bar{K}_i$, которые составили: 21,8 · 10⁻¹¹ Зв · см² и 22,6 · 10⁻¹⁰ Гр · см² для ²⁵²Cf источника; 27,8 · 10⁻¹¹ Зв · см² – для ²³⁸PuBe источника. Использование в диапазоне R_i единого коэффициента $K_{уд.пi}$ или $K_{уд.эi}$ может привести к неучтенной дополнительной погрешности Θ_{Kn} расчет которой следует произвести по формуле:

$$\theta_{Kn} = \frac{|K_{уд.эi} - \bar{K}_{уд.эi}|}{\bar{K}_{уд.эi}} \cdot 100\% \quad (10)$$

Таблица 2

Значения $K_{уд.п}$ и $K_{уд.э}$ в диапазоне рабочих расстояний

Обозначения удельной эквивалентной и поглощенной дозы	Тип источника	Расстояние от источника R_i (см)						Поправка на эффективный центр (см)		
		50	100	150	200	250	300	ΔR_ϕ	$\Delta R_{Pэ}$	ΔR_{Pn}
(Зв · см ²)	²³⁸ PuBe	25,4	27,4	28,1	28,4	28,6	28,8	-5,2	1,8	
	²⁵² Cf	22,2	21,9	21,8	21,7	21,7	21,7	-2,0	2,7	0
(Гр · см ²)		-	22,2	22,7	22,9	-	-			

Таким образом, значения величин $K_{уд.п}$ и $K_{уд.э}$ правильнее определять на эффективном, а не геометрическом расстояниях, что позволит избавиться от неучтенных погрешностей.

По аналогии с таблицей 1, по формулам (11) и (12), произведен расчет значений и для эффективного расстояния ($R_{эф} = 1$ м) по ППН, МПД и МЭД от ^{252}Cf и $^{238}\text{PuBe}$. Полученные данные представлены в таблице 3.

$$K_{уд.п.} = \frac{1}{A_{Pn}^2 \cdot \varphi_{ам_1} (100 - \Delta R_{\varphi})^2}, \quad (11)$$

$$K_{уд.э.} = \frac{1}{A_{Pз}^2 \cdot \varphi_{ам_1} (100 - \Delta R_{\varphi})^2}, \quad (12)$$

где φ_m – значение ППН на геометрическом расстоянии 1 м от источника, полученное при аттестации.

Таблица 3

Значения для эффективного расстояния $R_{эф} = 1$ м

Тип источника	Коллиматор			Открытая геометрия	
	(Гр · см ²)		(Зв · см ²)	(Гр · см ²)	
$^{238}\text{PuBe}$	$2,99 \cdot 10^{-11}$	$0,74 \cdot 10^{-11}$	$23,9 \cdot 10^{-11}$	—	—
^{252}Cf	$3,34 \cdot 10^{-11}$	$1,31 \cdot 10^{-11}$	$19,9 \cdot 10^{-11}$	$2,86 \cdot 10^{-11}$	$1,55 \cdot 10^{-11}$

Доверительная граница погрешности значений, приведенных в таблицах 1–3, определяется погрешностью метрологической аттестации ВЭ ($t_{\Sigma} S_{\Sigma} \leq 3 \cdot 10^{-2}$ при $p = 0,99$ для ППН; $S_{\Sigma} \leq 3 \cdot 10^{-2}$ – погрешность сличения ВЭ с ГЭТ 117–78 для МПДН и МЭДН).

Сравнительный анализ этих данных показал, что значения $K_{уд.п(э)}$, рассчитанные с учетом различий в величинах ΔR_{φ} , ΔR_{P_n} , ΔR_{P_z} и приведенные для эффективного центра источника, на 8–26 % меньше значений аналогичных $K_{уд.п(э)}$, рассчитанных для геометрического центра источника.

Следует отметить, что корректное использование значений $K_{уд.п(э)}$ на практике, сопряжено с необходимостью определения ΔR_{Σ} и расчета ППН для эффективного расстояния $R_1 = 100 - \Delta R_{\Sigma}$.

Таким образом, для обеспечения комплектной поверки типовой установки НИ по ППН, МПДН и МЭДН одновременно, достаточно провести исследования только по ППН. Затем используя соответствующие коэффициенты $K_{уд.п(э)}$ в опорных полях нейтронов по результатам косвенных измерений можно определить значения МПДН и МЭДН и тем самым обеспечить поверку установки по дозиметрическим величинам. При этом отпадает

необходимость применения дозиметрических мобильных эталонных СИ для проведения прямых измерений МПДН и МЭДН.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 8.521–84. ГСИ. Установки поверочные нейтронного излучения. Методика поверки. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 15 с.
2. ГОСТ 8.355-79. ГСИ. Радиометры нейтронов. Методы и средства поверки. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 30 с.
3. ГОСТ 8.207–76 Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 10 с.
4. ГОСТ 8.031–82. ГСИ. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений потока и плотности потока нейтронов. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 6 с.
5. ГОСТ 8.347–79. ГСИ. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений мощности поглощенной и эквивалентной доз нейтронного излучения. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 8 с.
6. Зажигаев А. Е., Кишьян А. А., Романиков Ю. И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. – М.: Атомиздат, 1978. – 232 с.
7. Агупов В. А., Баляева Р. Р., Копейкина Е. С., Меняйло Н. П. Унифицированная методика аттестации типовых эталонных установок нейтронного излучения // Аппаратура и новости радиационных измерений. – 2013. – №1. – С. 21–27.