

Научно-производственное унитарное предприятие



ATOMTEK®

Приборы и технологии для ядерных
измерений и радиационного контроля

www.atomtex.com

Республика Беларусь, г. Минск
©2025

Оценка неопределенности при измерениях дозиметрических характеристик фотонных полей линейных ускорителей электронов

В нижеприведенных статьях рассмотрены методы определения средней мощности амбиентного эквивалента дозы (далее – СМАЭД) в высокоэнергетических полях рентгеновского излучения на ускорителях медицинских электронов и передачи единицы измерения СМАЭД калибруемым средствам измерений (Дозиметр рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1123 и блок-детектирования БДКГ-206):

- [1] Загороднюк А.А., Тараев А.Ю., Лазаренко С.В., Комар Д.И. Влияние свинцового фильтра на среднюю энергию фотонного излучения медицинского линейного ускорителя электронов // АНРИ. 2023. №2(113) С. 13-24.
- [2] Загороднюк А.А., Тараев А.Ю., Лазаренко С.В. О возможности использования медицинских линейных ускорителей электронов в качестве поля эталонного импульсного фотонного излучения // Приборы и методы измерений. 2023. – Т. 14, №3, с.179 – 190.
- [3] Тараев А.Ю., Загороднюк А.А., Богдан М.А., Лазаренко С.В. Оценка характеристик полей фотонного излучения медицинских линейных ускорителей электронов различных производителей // АНРИ. 2023. №4(115). С. 19-31.
- [4] Тараев А.Ю., Загороднюк А.А., Лазаренко С.В., Масюкович М.В. Оценка функционирования дозиметрического оборудования при проведении измерений в полях импульсного микросекундного фотонного излучения с известными характеристиками // АНРИ. 2024. №2(117). С. 17-26.

Однако в данных статьях не было отражено с какой точностью (неопределённостью) была определена СМАЭД в опорных точках (точка калибровки, точка измерений).

Для расчёта неопределённости измерений СМАЭД использовались рекомендации и алгоритмы расчётов указанные в международном стандарте ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008 (Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения).

При измерении СМАЭД в опорной точке использовалось следующие СИ в внесённые в реестр СИ РБ:

**Дозиметр ДКС-АТ5350 с ионизационной камерой ТМ32002;
Термогигрометр ИВА-6-НД.**

Рулетка измерительная металлическая V16

На основании имеющихся данных в свидетельства о калибровке на СИ и в ТНПА и делая допущения, что составляющие неопределённости измерений некоррелированные, был составлен бюджет неопределённости измерений

Величина ^α	Тип ОСН ^α	Формула расчёта ^α	Коэффициент чувствительности ^α	Численное значение, % ^α
M_K ^α	A ^α	$\hat{u}_A(M_K) = \frac{100}{M_0} \cdot \sqrt{\frac{n-1}{n-3}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_{K,i} - \bar{M}_K)^2}{n(n-1)}}$	1 ^α	1,1 ^α
Примечание. Формула ОСН типа А показаний кермы взята из [11]. Приведено максимальное значение ОСН типа А показаний кермы из всех серий измерений на всех режимах всех типов ускорителей ^α				
\hat{C}_K ^α	B ^α	$\hat{u}_B(\hat{C}_K) = \frac{\hat{U}^*(\hat{C}_K)}{k}$	1 ^α	4,5 ^α
Примечание. $\hat{U}^*(\hat{C}_K)$ — неопределённость измерений кермы ионизационной камерой (9 %) и коэффициент расширения $k=2$, взяты из свидетельства о калибровке на ионизационную камеру откалиброванной в высокозенергетических полях в Германском метрологическом институте (PTB) ^α				
\hat{C}_I ^α	B ^α	$\hat{u}_B(\hat{C}_I) = \frac{\hat{U}^*(\hat{C}_I)}{k}$	1 ^α	0,5 ^α
Примечание. $\hat{U}^*(\hat{C}_I)$ — неопределённость измерений тока (заряда) дозиметра (1 %) и коэффициент расширения $k=2$, взяты из свидетельства о калибровке на дозиметр ДКС-АТ5350/1 ^α				

Величина ^α	Тип ОСН ^α	Формула расчёта ^α	Коэффициент чувствительности ^α	Численное значение, % ^α
\hat{C}_K ^α	В ^α	$a'_B(\hat{C}_K) = \left \frac{1 - \hat{C}_K}{\sqrt{3}} \right \cdot 100 \cdot \alpha$	1 ^α	2,3 ^α
<p>Примечание. $\hat{a}'_B(\hat{C}_K)$ — вклад поправочного множителя в неопределённость измерений кермы. $\hat{C}_K = 1,039$ взято максимальное значение в диапазоне энергий 662 кэВ до 6,7 МэВ. Делитель $\sqrt{3}$ здесь и далее принят согласно [12], т.к. неизвестен закон распределения.</p>				
t ^α	В ^α	$a_B(t) = \frac{\hat{U}^*(t)}{k} \cdot \alpha$	$\frac{t}{273+t} = 0,08 \cdot \alpha$	0,0 ^α
<p>Примечание. $\hat{U}^*(t)$ — вклад погрешности температуры в неопределённость измерений кермы (0,2 %) и коэффициент расширения $k=2$, взяты из свидетельства о калибровке на терометр. При расчёте принят максимальный коэффициент чувствительности при проведении серии измерений на ускорителях.</p>				
p ^α	В ^α	$a_B(p) = \frac{\hat{U}^*(p)}{k} \cdot \alpha$	-1 ^α	0,5 ^α
<p>Примечание. $\hat{U}^*(p)$ — вклад погрешности атмосферного давления в неопределённость измерений кермы (0,5 %) и коэффициент расширения $k=2$, взяты из свидетельства о калибровке на терометр. Взята максимальная неопределенность измерений атмосферного давления за все серии измерений на ускорителях.</p>				
T ^α	В ^α	$a_B(T) = \frac{\hat{U}^*(T)}{\sqrt{3}} \cdot \alpha$	1 ^α	0,0 ^α
<p>Примечание. $\hat{U}^*(T)$ — вклад погрешности длительности импульса (0 %) в неопределённость измерений кермы взят из [3]. Пренебрежимо мала т.к. погрешность длительности импульса 0,2 мкс намного меньше времени измерения 60 с.</p>				
ν ^α	В ^α	$a_B(\nu) = \frac{\hat{U}^*(\nu)}{\sqrt{3}} \cdot \alpha$	1 ^α	1,0 ^α
<p>Примечание. $\hat{U}^*(\nu)$ — вклад погрешности частоты импульсов (1,7 % — наибольшее значение) в неопределённость измерений кермы взят из [3].</p>				

Используя данные из таблицы бюджета неопределённости измерений рассчитывается суммарная основная относительная неопределённость измерения мощности кермы в воздухе по формуле

$$\hat{u}_c(\dot{K}) = \sqrt{\hat{u}_A^2(M_K) + \hat{u}_B^2(\hat{C}_K) + \hat{u}_B'^2(\hat{C}_K) + \hat{u}_B^2(t) + \hat{u}_B^2(p) + \hat{u}_B^2(T) + \hat{u}_B^2(v)}$$

Суммарная основная относительная неопределенность измерений СМАЭД рассчитывается по следующей формуле

$$\hat{u}_c(\dot{H}^*(10)) = \sqrt{\hat{u}_C^2(\dot{K}) + \hat{u}_B^2(\hat{C}_h) + \hat{u}_B^2(E)}$$

где $\hat{u}_B(\hat{C}_h)$ - оценка неопределенности значения коэффициента перехода мощности кермы к МАЭД (согласно СТБ ИСО 4037-3-2022 численное значение коэффициента равно 2 % (k=1));

$\hat{u}_B(E)$ - оценка неопределённости коэффициента перехода мощности кермы к МАЭД, обусловленная погрешностью расчета средней энергии фотонного излучения.

Анализ приведенный в работе [3] значения средней энергии фотонного излучения ускорителя электронов при заданных условиях работы (подходящих для калибровки дозиметрического оборудования), можно заметить, что все они расположены в энергетическом интервале 2 МэВ – 6 МэВ (с учетом погрешности моделирования). В данном энергетическом интервале зависимость коэффициента \hat{C}_h от энергии представляет собой монотонно убывающую функцию, значения которой лежат в интервале 1.13 – 1.09 Зв/Гр. Как следствие, оценку верхней границы неопределенности $\hat{u}_B(E)$ можно произвести исходя из граничных значений коэффициента. Для случая, описываемого в настоящей работе, принимая равномерный закон распределения данного типа неопределенности и значение $\hat{u}_B(E) = \frac{4}{\sqrt{3}} = 2,3\%$.

Исходя из выше представленных величин, значение суммарной основной относительной неопределенности измерений СМАЭД $\hat{u}_c(\dot{H}^*(10)) = 6.1\%$

Расширенная относительная неопределённость измерения СМАЭД с коэффициентом охвата k=2 (P=0,95), рассчитывается по формуле

$$U(\dot{H}^*(10)) = 2 * \hat{u}_c(\dot{H}^*(10))$$

и равна будет 12,2 %.

Итог:

Значение расширенной неопределенности измерения СМАЭД 12,2% меньше, чем типичное значение основной относительной погрешности стандартного дозиметрического оборудования и дополнительной погрешности для измерения СМАЭД в высокоэнергетических полях фотонного излучения. Например, дозиметр рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1123, и экспериментальный блок БДКГ-206 имеют пределы допустимой основной относительной погрешности $\pm 15\%$ (дополнительная погрешность для высокоэнергетических полей $\pm 50\%$). В связи с чем можно утверждать, что ускорители электронов медицинские возможно использовать для проверки работоспособности и калибровки дозиметра рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1123 и блока детектирования БДКГ-206 в высокоэнергетических полях импульсного микросекундного фотонного излучения.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Республика Беларусь
220005, Минск, ул. Гикало, 5
Тел./Факс: +375-17-292-81-42

info@atomtex.com
www.atomtex.com