

DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-147-156

УДК: 614.876:616

Радиационный контроль при эксплуатации медицинских ускорителей электронов с использованием дозиметра ДКС-АТ1123

Барковский А.Н.¹, Буланова С.А.², Огородников С.А.²

¹ Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

² Общество с ограниченной ответственностью «Лаборатория Скантроник», Санкт-Петербург, Россия

Для проведения радиационного контроля медицинских ускорителей электронов широко используется дозиметр рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1123, предназначенный для дозиметрии импульсного фотонного излучения с энергией до 10 МэВ. Поскольку максимальная энергия тормозного излучения медицинских ускорителей электронов может значительно превышать эту величину, главной целью настоящей работы был расчет поправочных коэффициентов для компенсации энергетической зависимости чувствительности дозиметра ДКС-АТ1123, позволяющих получать корректные результаты радиационного контроля медицинских ускорителей электронов с энергией электронов до 30 МэВ. Материалы и методы: Для этого авторами были проведены расчеты энергетических спектров тормозного излучения, генерируемого электронами с энергией 10, 15, 20, 25 и 30 МэВ за бетонной защитой толщиной 0,5, 1,0, 1,5 и 2,0 м. Расчеты проводились методом Монте-Карло. С использованием полученных данных были рассчитаны поправочные коэффициенты для компенсации энергетической зависимости дозиметра ДКС-АТ1123 для всех рассматриваемых энергий электронов и толщин бетонной защиты. Результаты исследования и обсуждение: Анализ полученных результатов показал, что поправочные коэффициенты слабо зависят от толщины бетонной защиты. Для толщин от 0,5 до 2,0 м различие полученных поправочных коэффициентов не превышает 8 %. Получены численные значения поправочных коэффициентов, равные 1,29; 1,44; 1,50; 1,56 и 1,60 для максимальной энергии тормозного излучения 10, 15, 20, 25 и 30 МэВ соответственно. Заключение: Использование данных поправочных коэффициентов обеспечивает возможность проведения радиационного контроля медицинских ускорителей электронов с использованием дозиметра ДКС-АТ1123.

Ключевые слова: медицинские ускорители электронов, импульсное тормозное излучение, радиационная защита из бетона, радиационный контроль медицинских ускорителей электронов.

Введение

Одним из важнейших аспектов обеспечения радиационной безопасности при эксплуатации техногенных источников ионизирующего излучения (ИИИ) является проведение радиационного контроля на рабочих местах персонала и в помещениях, смежных с помещением, в котором расположен техногенный ИИИ. Широкое использование в Российской Федерации медицинских ускорителей электронов (МУЭЛ) при лечении пациентов порождает необходимость регулярного проведения радиационного контроля при эксплуатации МУЭЛ. Но ситуация осложняется тем, что тормозное излучение МУЭЛ является импульсным и максимальная энергия тормозного излучения для значительной части используемых МУЭЛ превышает 10 МэВ. В Российской Федерации отсутствуют дозиметрические приборы, предназначенные для дозиметрии такого излучения [1]. В госреестре средств измерений имеется лишь один дозиметр, предназначенный для дозиметрии фотонного излучения с энергией до 20 МэВ – ДКГ-РМ1621 [2]. Но в качестве детектора в нем используется счетчик Гейгера-Мюллера, и

он не предназначен для дозиметрии импульсного фотонного излучения. В работе [2] обосновывается возможность его использования для этой цели, но для практической реализации этого необходимо проведение дополнительных исследований с учетом особенностей конструкции данного прибора. Кроме того, ряд современных МУЭЛ генерируют тормозное излучение с максимальной энергией более 20 МэВ [3]. На практике для этой цели используется дозиметр рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1123 производства фирмы «АТОМТЕХ» (Республика Беларусь) [4]. Он предназначен для дозиметрии импульсного тормозного излучения с энергией до 10 МэВ. Данный прибор, по существу, является единственным доступным российским потребителям прибором для дозиметрии импульсного тормозного излучения. Но, формально, он не позволяет проводить радиационный контроль для тормозного излучения с максимальной энергией более 10 МэВ, что создает патовую ситуацию – контролировать необходимо, но нечем. Необходимость решения этой задачи отмечается и в работе [3].

В работе [5] была получена энергетическая зависимость чувствительности данного прибора к фотонному излучению

Барковский Анатолий Николаевич

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева

Адрес для переписки: 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: ANBarkovski@yandex.ru

с энергией до 50 МэВ и проведена оценка ожидаемой погрешности измерения им мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) тормозного излучения с максимальной энергией 20 МэВ за бетонной защитой различной толщины. Было показано, что прогнозируемое занижение результата измерения МАЭД данным прибором находится в пределах предусмотренной в технической документации энергетической зависимости показаний дозиметра для области энергий 3–10 МэВ, равной 50 %, и практически не изменяется для толщины бетонной защиты более 1 м. Это позволяет разработать методику проведения измерений прибором ДКС-АТ1123 МАЭД тормозного излучения с максимальной энергией, превышающей 10 МэВ, с использованием поправочных коэффициентов, зависящих от толщины бетонной защиты и максимальной энергии тормозного излучения. Такой подход рекомендован и в работе [6] для импульсных источников тормозного излучения высокой энергии. Для получения численных значений корректировочных коэффициентов к показаниям дозиметра ДКС-АТ1123 необходимо выполнить расчеты прогнозируемого занижения результатов измерения МАЭД тормозного излучения данным прибором для набора максимальных энергий тормозного излучения и толщин защиты, перекрывающего большинство встречающихся на практике случаев при использовании МУЭЛ. На основе анализа полученных результатов необходимо обосновать возможность использования ограниченного количества численных значений данных коэффициентов для реализации данного подхода. Решение данной задачи позволит получать корректные результаты радиационного контроля при эксплуатации МУЭЛ с помощью дозиметра ДКС-АТ1123 для максимальной энергии тормозного излучения, в 2–3 раза превышающей предельную энергию по паспорту данного прибора.

С учетом этого авторами были проведены расчеты спектров тормозного излучения, генерируемого вольфрамовой мишени пучком ускоренных электронов с энергией 10, 15, 20, 25 и 30 МэВ, за бетонной защитой толщиной 0,5, 1, 1,5 и 2 м. Диапазон энергий выбран с учетом максимальной энергии ускоренных электронов в имеющихся и перспективных МУЭЛ, а бетон был выбран как основной материал, используемый в конструкциях радиационной защиты каньонов для размещения МУЭЛ.

Цель исследования – расчет поправочных коэффициентов для компенсации энергетической зависимости чувствительности дозиметра ДКС-АТ1123, позволяющих получать корректные результаты радиационного контроля медицинских ускорителей электронов с максимальной энергией тормозного излучения до 30 МэВ.

Материалы и методы

Расчеты энергетических спектров тормозного излучения, генерируемого вольфрамовой мишени пучком ускоренных электронов с энергией от 10 до 30 МэВ, за бетонной защитой проводились авторами с помощью компьютерной программы GEANT4 [7], использующей метод Монте-Карло. Программа GEANT4 позволяет моделировать прохождение фотонов различных энергий через конструкции радиационной защиты. При проведении расчетов рассматривалось прохождение квантов тормозного излучения, генерируемых при падении пучка ускоренных электронов с энергией 10, 15, 20, 25 и 30 МэВ на вольфрамовую мишень полного поглощения, с последующим прохождением их через плоскую

бетонную защиту толщиной 0,5, 1,0, 1,5 и 2,0 м.

Расчеты проводились специалистами ООО «Сканtronик Системс» с использованием следующей геометрии расчета:

- точечный изотропный источник тормозного излучения, генерируемого при падении пучка моноэнергетических электронов с энергией 10, 15, 20, 25 и 30 МэВ на вольфрамовую мишень толщиной 1,5 мм и диаметром 6 мм;

- на расстоянии 50 см за мишенью располагается плоский защитный барьер из бетона толщиной 0,5, 1,0, 1,5 и 2,0 м;

- на расстоянии 10 см за защитой в плоскости, параллельной поверхности защиты, симметрично относительно перпендикулярной к этой плоскости оси, проходящей через центр мишени, расположены два детектора:

- внутренний кольцевой детектор с внутренним диаметром 47 см и внешним диаметром 50 см;

- внешний кольцевой детектор с внутренним диаметром 93 см и внешним диаметром 100 см.

Использовался еще один детектор в виде сферы диаметром 3 см, центр которой расположен на расстоянии 10 см за защитой на оси, проходящей через центр мишени перпендикулярно плоскости защиты.

Результаты расчета были представлены в виде многогрупповых энергетических спектров и представляют собой количество квантов, прошедших через защиту и попавших в детектор, энергия которых попадает в энергетический диапазон, соответствующий данной энергетической группе.

С учетом того, что целью проведения измерений МАЭД является получение незаниженной оценки мощности эффективной дозы (МЭД). Ожидаемая погрешность измерений в данной работе определялась именно по отношению к МЭД.

Результаты и обсуждение

На основе полученных многогрупповых спектров рассчитывались многогрупповые значения МЭД, создаваемой тормозным излучением с данным энергетическим спектром. Полная мощность эффективной дозы, равная сумме полученных многогрупповых значений данной величины, нормировалась на 1. Расчеты многогрупповых значений мощности эффективной дозы (MED_i) проводились с использованием формулы:

$$MED_i = \frac{\Phi_i \cdot K_i^\delta}{\sum_{i=1}^{17} \Phi_i \cdot K_i^\delta}, \quad (1)$$

где MED_i – значение мощности эффективной дозы тормозного излучения фотонов i -й энергетической группы;

Φ_i – флюенс тормозного излучения фотонов i -й энергетической группы;

K_i^δ – среднее значение коэффициента перевода флюенса тормозного излучения в мощность эффективной дозы для i -й энергетической группы фотонов, Зв·см²;

N – используемое в расчете количество энергетических групп фотонов ($N = 17$);

E_i – границы используемых энергетических групп фотонов, МэВ;

i – энергетическая группа. Соответствует энергии фотонов от E_{i-1} до E_i .

Значения ожидаемого вклада фотонов различных энергетических групп в прогнозируемые показания дозиметра ДКС-АТ1123 определялись с использованием выражения:

$$ВПД_i = МЭД_i \cdot ЭД_i , \quad (2)$$

где $ВПД_i$ – относительный вклад в показания дозиметра ДКС-АТ1123 i -го диапазона энергий фотонов для единичного значения мощности дозы тормозного излучения;

$ЭД_i$ – среднее значение эффективности регистрации мощности дозы фотонного излучения дозиметром ДКС-АТ1123 для i -го диапазона энергий фотонов.

При этом сумма значений $ВПД_i$ для всех участвующих в расчете энергетических групп дает величину прогнозируемых показаний дозиметра ($ПД$) для единичного значения

мощности эффективной дозы при проведении радиационного контроля для данной максимальной энергии тормозного излучения и данной толщины бетонной защиты. Эта величина численно равна прогнозируемому занижению показаний дозиметра для указанных условий.

Многогрупповые значения коэффициентов перевода флюенса фотонов в мощность эффективной дозы K_i^{∂} были рассчитаны с использованием данных работы [8]. При этом была выбрана геометрия передне-заднего облучения, для которого значения данного коэффициента наибольшие. Многогрупповые значения энергетической зависимости эффективности регистрации мощности дозы фотонного излучения дозиметром ДКС-АТ1123 $ЭД_i$ были рассчитаны с использованием данных работы [5].

Значения K_i^{∂} и $ЭД_i$ использованные в данной работе, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Использованные в данной работе 17-групповых значений эффективности регистрации мощности дозы фотонного излучения дозиметром ДКС-АТ1123 и коэффициентов перевода флюенса фотонов в мощность эффективной дозы

[Table 1]

The 17-group values of the efficiency of recording the dose rate of photon radiation with the DKS-AT1123 dosimeter and the coefficients of photon fluence conversion into effective dose rate used in this work]

Номер [Number] i	Диапазон энергий, МэВ [Energy range, MeV]	Дозовый коэффициент для передне-заднего облучения, $10^{-12} \text{ Зв}\cdot\text{см}^2$ [Dose coefficient for anterior-posterior irradiation, $10^{-12} \text{ Sv}\cdot\text{cm}^2$]	Энергетическая зависимость показаний дозиметра [Energy dependence of the dosimeter readings]
1	0 – 0,5	1,2	0,95
2	0,5 – 1,0	3,5	1,03
3	1,0 – 1,5	5,3	1,06
4	1,5 – 2,0	6,8	1,03
5	2,0 – 4,0	9,6	0,9
6	4,0 – 6,0	13,4	0,75
7	6,0 – 8,0	16,4	0,67
8	8,0 – 10	19,1	0,62
9	10 – 12	21,7	0,59
10	12 – 14	23,9	0,57
11	14 – 16	26,1	0,56
12	16 – 18	28,1	0,55
13	18 – 20	30,0	0,54
14	20 – 22	31,7	0,54
15	22 – 24	33,1	0,53
16	24 – 27	34,8	0,52
17	27 – 30	36,8	0,51

В таблице 2 приведены рассчитанные по формуле (1) многогрупповые значения МЭД фотонов тормозного излучения с максимальной энергией 10 МэВ за бетонной защитой толщиной 0,5 м, 1,0 м, 1,5 м и 2,0 м, зарегистрированные в сферическом детекторе, и соответствующие им многогрупповые значения ожидаемого вклада в показания дозиметра

ДКС-АТ1123, рассчитанные по формуле (2). Там же представлены ожидаемые показания дозиметра ДКС-АТ1123 ($ПД$) для различных толщин защиты при измерении единичного значения МЭД. В таблицах 3–5 приведены аналогичные результаты для максимальной энергии фотонов тормозного излучения 15, 20, 25 и 30 МэВ соответственно.

Таблица 2

Многогрупповые значения мощности эффективной дозы фотонов тормозного излучения (МЭД_i), многогрупповые значения прогнозируемого вклада в показания дозиметра ДКС-АТ1123 (ВПД_i) и прогнозируемые показания дозиметра (ПД) при измерении единичного значения мощности эффективной дозы фотонов тормозного излучения с максимальной энергией 10 МэВ за бетонной защитой толщиной 0,5 м, 1,0 м, 1,5 м и 2,0 м

Table 2

Multi-group values of the effective dose rate of bremsstrahlung radiation photons (EDR_i), multi-group values of the predicted contribution to the readings of the DKS-AT1123 dosimeter (CRD_i) and the predicted dosimeter readings (PD) when measuring a single value of the effective dose rate of bremsstrahlung radiation photons with a maximum energy of 10 MeV behind the concrete shielding of 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m, and 2.0 m thickness]

№ группы [Number of group] i	Диапазон энергий, МэВ [Energy range, MeV]	Толщина бетонной защиты, м [Thickness of concrete shield, m]							
		0,5		1,0		1,5		2,0	
		МЭД _i [EDR _i]	ВПД _i [CRD _i]	МЭД _i [EDR _i]	ВПД _i [CRD _i]	МЭД _i [EDR _i]	ВПД _i [CRD _i]	МЭД _i [EDR _i]	ВПД _i [CRD _i]
1	0 - 0,5	0,034	0,032	0,022	0,021	0,047	0,045	0,035	0,033
2	0,5 - 1,0	0,051	0,052	0,037	0,038	0,055	0,056	0,050	0,051
3	1,0 - 1,5	0,050	0,053	0,030	0,032	0,054	0,057	0,059	0,063
4	1,5 - 2,0	0,054	0,055	0,041	0,043	0,046	0,047	0,038	0,040
5	2,0 - 4,0	0,253	0,228	0,212	0,191	0,243	0,219	0,240	0,216
6	4,0 - 6,0	0,248	0,186	0,259	0,194	0,198	0,148	0,232	0,174
7	6,0 - 8,0	0,200	0,134	0,253	0,170	0,228	0,153	0,214	0,143
8	8,0 - 10	0,111	0,069	0,145	0,090	0,129	0,080	0,132	0,082
ПД [PD]	0 - 10	-	0,809	-	0,778	-	0,806	-	0,802

Таблица 3

Многогрупповые значения мощности эффективной дозы фотонов тормозного излучения (МЭД_i), многогрупповые значения прогнозируемого вклада в показания дозиметра ДКС-АТ1123 (ВПД_i) и прогнозируемые показания дозиметра (ПД) при измерении единичного значения мощности эффективной дозы фотонов тормозного излучения с максимальной энергией 15 МэВ за бетонной защитой толщиной 0,5 м, 1,0 м, 1,5 м и 2,0 м

Table 3

Multi-group values of the effective dose rate of bremsstrahlung radiation photons (EDR_i), multi-group values of the predicted contribution to the readings of the DKS-AT1123 dosimeter (CRD_i) and the predicted dosimeter readings (PD) when measuring a single value of the effective dose rate of bremsstrahlung radiation photons with a maximum energy of 15 MeV behind concrete shield of 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m and 2.0 m thickness]

№ группы [Number of group] i	Диапазон энергий, МэВ [Energy range, MeV]	Толщина бетонной защиты, м [Thickness of concrete shield, m]							
		0,5		1,0		1,5			
		МЭД _i [EDR _i]	ВПД _i [CRD _i]	МЭД _i [EDR _i]	ВПД _i [CRD _i]	МЭД _i [EDR _i]	ВПД _i [CRD _i]		
1	0 - 0,5	0,019	0,018	0,014	0,013	0,028	0,027		
2	0,5 - 1,0	0,042	0,043	0,027	0,028	0,062	0,063		
3	1,0 - 1,5	0,034	0,036	0,022	0,023	0,044	0,046		
4	1,5 - 2,0	0,031	0,032	0,024	0,025	0,032	0,033		
5	2,0 - 4,0	0,146	0,131	0,100	0,090	0,128	0,115		
6	4,0 - 6,0	0,167	0,125	0,144	0,108	0,116	0,087		
7	6,0 - 8,0	0,161	0,108	0,170	0,114	0,158	0,106		
8	8,0 - 10	0,141	0,088	0,169	0,105	0,140	0,087		
9	10 - 12	0,118	0,070	0,149	0,088	0,144	0,085		
10	12 - 14	0,089	0,051	0,123	0,070	0,111	0,064		
11	14 - 16	0,051	0,029	0,057	0,032	0,038	0,021		
ПД [PD]	0 - 16	-	0,731	-	0,696	-	0,733	-	0,752

Радиационные измерения

Таблица 4

Многогрупповые значения мощности эффективной дозы фотонов тормозного излучения (МЭД_р), многогрупповые значения прогнозируемого вклада в показания дозиметра ДКС-АТ1123 (ВПД_р) и прогнозируемые показания дозиметра (ПД) при измерении единичного значения мощности эффективной дозы фотонов тормозного излучения с максимальной энергией 20 МэВ за бетонной защитой толщиной 0,5 м, 1,0 м, 1,5 м и 2,0 м

Table 4

Multi-group values of the effective dose rate of bremsstrahlung radiation photons (EDR_r), multi-group values of the predicted contribution to the readings of the DKS-AT1123 dosimeter (CRD_r) and the predicted dosimeter readings (PD) when measuring a single value of the effective dose rate of bremsstrahlung radiation photons with a maximum energy of 20 MeV behind concrete shield of 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m, and 2.0 m thickness]

№ группы [Number of group] i	Диапазон энергий, МэВ [Energy range, MeV]	Толщина бетонной защиты, м [Thickness of concrete shielding, m]					
		0,5		1,0		1,5	
		МЭД _р , [EDR _r]	ВПД _р , [CRD _r]	МЭД _р , [EDR _r]	ВПД _р , [CRD _r]	МЭД _р , [EDR _r]	ВПД _р , [CRD _r]
1	0 - 0,5	0,014	0,013	0,011	0,010	0,024	0,023
2	0,5 - 1,0	0,025	0,026	0,025	0,026	0,045	0,046
3	1,0 - 1,5	0,020	0,021	0,014	0,015	0,028	0,029
4	1,5 - 2,0	0,023	0,023	0,016	0,016	0,025	0,026
5	2,0 - 4,0	0,120	0,108	0,078	0,071	0,106	0,095
6	4,0 - 6,0	0,143	0,107	0,109	0,082	0,119	0,089
7	6,0 - 8,0	0,141	0,095	0,132	0,088	0,125	0,083
8	8,0 - 10	0,129	0,080	0,146	0,091	0,123	0,076
9	10 - 12	0,114	0,067	0,136	0,080	0,128	0,075
10	12 - 14	0,097	0,055	0,113	0,064	0,109	0,062
11	14 - 16	0,079	0,044	0,102	0,057	0,079	0,044
12	16 - 18	0,062	0,034	0,079	0,043	0,062	0,034
13	18 - 20	0,033	0,018	0,038	0,020	0,028	0,015
ПД [PD]	0 - 20	-	0,692	-	0,665	-	0,700
							0,705

Таблица 5

Многогрупповые значения мощности эффективной дозы фотонов тормозного излучения (МЭД_р), многогрупповые значения прогнозируемого вклада в показания дозиметра ДКС-АТ1123 (ВПД_р) и прогнозируемые показания дозиметра (ПД) при измерении единичного значения мощности эффективной дозы фотонов тормозного излучения с максимальной энергией 25 МэВ за бетонной защитой толщиной 0,5 м, 1,0 м, 1,5 м и 2,0 м

Table 5

Multi-group values of the effective dose rate of bremsstrahlung radiation photons (EDR_r), multi-group values of the predicted contribution to the readings of the DKS-AT1123 dosimeter (CRD_r) and the predicted dosimeter readings (PD) when measuring a single value of the effective dose rate of bremsstrahlung radiation photons with a maximum energy of 25 MeV behind concrete shield of 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m, and 2.0 m thickness]

№ группы [Number of group] i	Диапазон энергий, МэВ [Energy range, MeV]	Толщина бетонной защиты, м [Thickness of concrete shield, m]					
		0,5		1,0		1,5	
		МЭД _р , [EDR _r]	ВПД _р , [CRD _r]	МЭД _р , [EDR _r]	ВПД _р , [CRD _r]	МЭД _р , [EDR _r]	ВПД _р , [CRD _r]
1	0 - 0,5	0,010	0,009	0,007	0,007	0,023	0,022
2	0,5 - 1,0	0,023	0,024	0,018	0,018	0,051	0,053
3	1,0 - 1,5	0,016	0,017	0,012	0,013	0,040	0,042
4	1,5 - 2,0	0,018	0,019	0,012	0,012	0,027	0,028
5	2,0 - 4,0	0,095	0,086	0,066	0,059	0,099	0,089
6	4,0 - 6,0	0,119	0,089	0,093	0,070	0,089	0,067
7	6,0 - 8,0	0,121	0,081	0,107	0,072	0,110	0,074

Radiation measurements

Окончание таблицы 5

№ группы [Number of group] i	Диапазон энергий, МэВ [Energy range, MeV]	Толщина бетонной защиты, м [Thickness of concrete shield, m]							
		0,5		1,0		1,5		2,0	
		МЭД, [EDR,]	ВПД, [CRD,]	МЭД, [EDR,]	ВПД, [CRD,]	МЭД, [EDR,]	ВПД, [CRD,]	МЭД, [EDR,]	ВПД, [CRD,]
8	8,0 - 10	0,113	0,070	0,120	0,074	0,107	0,066	0,085	0,053
9	10 - 12	0,103	0,061	0,114	0,067	0,100	0,059	0,077	0,045
10	12 - 14	0,091	0,052	0,111	0,063	0,096	0,054	0,088	0,050
11	14 - 16	0,079	0,044	0,094	0,053	0,072	0,041	0,076	0,043
12	16 - 18	0,069	0,038	0,085	0,047	0,067	0,037	0,091	0,050
13	18 - 20	0,057	0,031	0,063	0,034	0,051	0,027	0,046	0,025
14	20 - 22	0,046	0,025	0,055	0,030	0,032	0,017	0,054	0,029
15	22 - 24	0,032	0,017	0,034	0,018	0,029	0,015	0,041	0,022
16	24 - 27	0,008	0,004	0,010	0,005	0,006	0,003	0,011	0,006
ПД [PD]	0 - 27	-	0,666	-	0,641	-	0,695	-	0,694

Таблица 6

Многогрупповые значения мощности эффективной дозы фотонов тормозного излучения (МЭД_i), многогрупповые значения прогнозируемого вклада в показания дозиметра ДКС-АТ1123 (ВПД_i) и прогнозируемые показания дозиметра (ПД) при измерении единичного значения мощности эффективной дозы фотонов тормозного излучения с максимальной энергией 30 МэВ за бетонной защитой толщиной 0,5 м, 1,0 м, 1,5 м и 2,0 м

[Table 6

Multi-group values of the effective dose rate of bremsstrahlung radiation photons (EDR_i), multi-group values of the predicted contribution to the readings of the DKS-AT1123 dosimeter (CRD_i) and the predicted dosimeter readings (PD) when measuring a single value of the effective dose rate of bremsstrahlung radiation photons with a maximum energy of 30 MeV behind concrete shield of 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m, and 2.0 m thickness]

№ группы [Number of group] i	Диапазон энергий, МэВ [Energy range, MeV]	Толщина бетонной защиты, м [Thickness of concrete shield, m]							
		0,5		1,0		1,5		2,0	
		МЭД, [EDR,]	ВПД, [CRD,]	МЭД, [EDR,]	ВПД, [CRD,]	МЭД, [EDR,]	ВПД, [CRD,]	МЭД, [EDR,]	ВПД, [CRD,]
1	0 - 0,5	0,008	0,008	0,006	0,006	0,018	0,017	0,021	0,020
2	0,5 - 1,0	0,020	0,021	0,015	0,015	0,044	0,045	0,046	0,048
3	1,0 - 1,5	0,013	0,014	0,011	0,011	0,025	0,027	0,023	0,024
4	1,5 - 2,0	0,015	0,016	0,011	0,012	0,025	0,026	0,020	0,021
5	2,0 - 4,0	0,080	0,072	0,056	0,050	0,084	0,076	0,078	0,070
6	4,0 - 6,0	0,103	0,078	0,076	0,058	0,088	0,066	0,079	0,059
7	6,0 - 8,0	0,106	0,071	0,095	0,064	0,091	0,061	0,088	0,059
8	8,0 - 10	0,102	0,063	0,102	0,064	0,098	0,061	0,080	0,050
9	10 - 12	0,094	0,056	0,105	0,062	0,090	0,053	0,093	0,055
10	12 - 14	0,084	0,048	0,095	0,054	0,085	0,049	0,085	0,049
11	14 - 16	0,075	0,042	0,085	0,048	0,073	0,041	0,079	0,044
12	16 - 18	0,066	0,037	0,078	0,043	0,070	0,038	0,099	0,054
13	18 - 20	0,057	0,031	0,066	0,036	0,053	0,029	0,055	0,030
14	20 - 22	0,050	0,026	0,057	0,030	0,047	0,025	0,048	0,025
15	22 - 24	0,043	0,022	0,048	0,025	0,032	0,017	0,036	0,018
16	24 - 27	0,053	0,027	0,058	0,029	0,052	0,027	0,042	0,022
17	27 - 30	0,030	0,016	0,037	0,019	0,025	0,013	0,029	0,015
ПД [PD]	0 - 30	-	0,647	-	0,625	-	0,669	-	0,663

Анализ представленных результатов показывает, что равновесный энергетический спектр тормозного излучения, сформированный слоем бетона толщиной 0,5 м, мало изменяется при больших толщинах защиты, и коэффициент ожидаемого занижения показаний дозиметра слабо зависит от толщины защиты. Так, для максимальной энергии 10 МэВ разброс значений составляет от 0,778 до 0,809 (4 %), для 15 МэВ – от 0,696 до 0,752 (8 %), для 20 МэВ – от 0,665 до 0,705 (6 %), для 25 МэВ – от 0,641 до 0,695 (8 %), для 30 МэВ от 0,625 до 0,669 (7 %). По-видимому, это связано с тем, что поглощение фотонов низкоэнергетической части спектра

в защите компенсируется рассеянным излучением фотонов большей энергии.

Аналогичные расчеты были проведены и для энергетических спектров фотонов, зарегистрированных во внутреннем и во внешнем кольцевых детекторах.

В таблице 7 представлены полученные значения прогнозируемых показаний дозиметра ДКС-АТ1123 для единичного значения МЭД для перпендикулярного защите направления излучения (сферический детектор) и двух наклонных направлений излучения (внешний и внутренний кольцевые детекторы).

Таблица 7

Прогнозируемые показания дозиметра ДКС-АТ1123 для единичного значения мощности эффективной дозы в позиции сферического, внутреннего кольцевого и внешнего кольцевого детекторов и значения поправочного коэффициента ПК

[Table 7]

Predicted readings of the DKS-AT1123 dosimeter for a single value of the effective dose rate at the position of the spherical, inner ring and outer ring detectors and values of correction factor CF]

Позиция детектора [Detector position]	Толщина бетонной защиты, м [Thickness of concrete shielding, m]				ПК _{мин} [CF _{min}]	ПК _{макс} [CF _{max}]
	0,5	1,0	1,5	2,0		
Максимальная энергия спектра 10 МэВ [The maximum energy of the spectrum is 10 MeV]						
Сферический детектор [Spherical detector]	0,809	0,778	0,806	0,802	1,24	1,29
Внутренний кольцевой детектор [Inner ring detector]	0,876	0,825	0,819	0,800	1,14	1,25
Внешний кольцевой детектор [Outer ring detector]	0,888	0,851	0,828	0,815	1,13	1,23
Максимальная энергия спектра 15 МэВ [The maximum energy of the spectrum is 15 MeV]						
Сферический детектор [Spherical detector]	0,731	0,696	0,733	0,752	1,33	1,44
Внутренний кольцевой детектор [Inner ring detector]	0,828	0,766	0,764	0,758	1,21	1,32
Внешний кольцевой детектор [Outer ring detector]	0,842	0,800	0,773	0,782	1,19	1,29
Максимальная энергия спектра 20 МэВ [The maximum energy of the spectrum is 20 MeV]						
Сферический детектор [Spherical detector]	0,692	0,665	0,700	0,705	1,42	1,50
Внутренний кольцевой детектор [Inner ring detector]	0,798	0,751	0,740	0,731	1,25	1,37
Внешний кольцевой детектор [Outer ring detector]	0,817	0,791	0,747	0,739	1,22	1,35
Максимальная энергия спектра 25 МэВ [The maximum energy of the spectrum is 25 MeV]						
Сферический детектор [Spherical detector]	0,666	0,641	0,695	0,694	1,44	1,56
Внутренний кольцевой детектор [Inner ring detector]	0,788	0,727	0,741	0,734	1,27	1,38
Внешний кольцевой детектор [Outer ring detector]	0,817	0,770	0,751	0,749	1,22	1,34

Окончание таблицы 7

Позиция детектора [Detector position]	Толщина бетонной защиты, м [Thickness of concrete shielding, m]				ΠK_{\min} [CF _{min}]	ΠK_{\max_c} [CF _{max}]
	0,5	1,0	1,5	2,0		
Максимальная энергия спектра 30 МэВ [The maximum energy of the spectrum is 30 MeV]						
Сферический детектор [Spherical detector]	0,647	0,625	0,669	0,663	1,49	1,60
Внутренний кольцевой детектор [Inner ring detector]	0,785	0,717	0,720	0,717	1,27	1,39
Внешний кольцевой детектор [Outer ring detector]	0,821	0,769	0,730	0,727	1,22	1,38

Как видно из представленных результатов, наибольшее занижение результатов измерения имеет место для позиции сферического детектора, т.е. для зоны наибольшей мощности дозы за защитой, в которой чаще всего и производят радиационный контроль. При наклонных падениях увеличивается вклад низкоэнергетического излучения и значения ПД возрастают. Поэтому целесообразно использовать ПД для сферического детектора, как позиции, наиболее часто используемой для проведения радиационного контроля и обеспечивающей умеренно консервативную оценку. С увеличением максимальной энергии тормозного излучения от 10 МэВ до 30 МэВ величина ПД монотонно уменьшается на 24 %. Зависимость от толщины бетонной защиты менее выражена (не превышает 8 %) и без явной тенденции с минимальным значением для толщины защиты 1 м. Поправочный коэффициент (ΠK), на который необходимо умножить прогнозируемый результат измерения, для получения точного значения мощности эффективной дозы, равен:

$$\Pi K = 1/\Pi D .$$

В таблице 7 представлены полученные значения минимальных (ΠK_{\min}) и максимальных значений (ΠK_{\max_c}) поправочных коэффициентов для различных максимальных энергий тормозного излучения и различных детекторов.

Поскольку целью радиационного контроля является получение незаниженного значения МЭД, выбираем для каждой максимальной энергии тормозного излучения максимальное значение ΠK_{\max_c} для сферического детектора. При этом консерватизм оценки при измерениях в позиции сферического детектора не превысит 8 %, т.е. является вполне приемлемым.

На рисунке более наглядно представлена энергетическая зависимость поправочного коэффициента и показана аппроксимация ее следующим полиномом:

$$\Pi K = -0,0006 \cdot E^2 + 0,0399 \cdot E + 0,962 .$$

Данная аппроксимация может использоваться для максимальных энергий тормозного излучения, отличных от рассмотренных в данной работе.

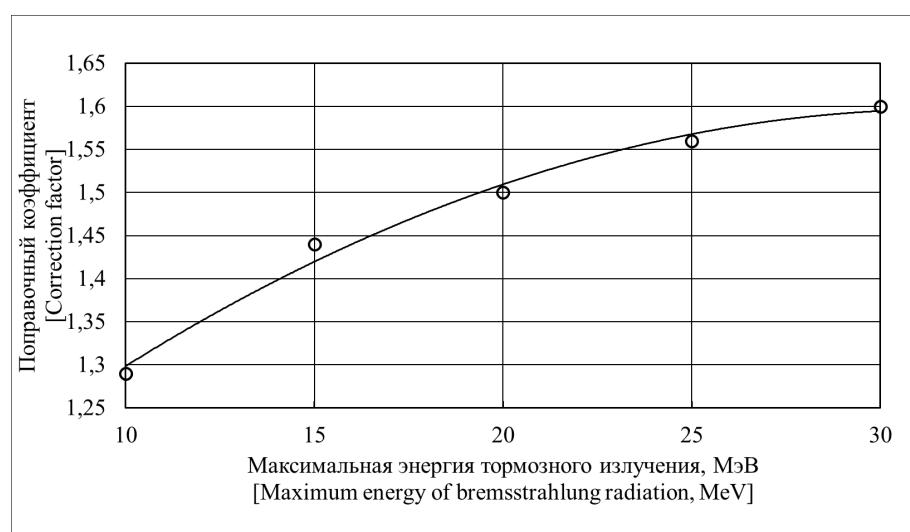


Рис. Энергетическая зависимость максимального значения поправочного коэффициента
[Fig. Energy dependence of the maximum value of the correction factor]

Заключение

В результате проведенного исследования получены по-правочные коэффициенты для результатов измерения МАЭД тормозного излучения с максимальной энергией от 10 до 30 МэВ за бетонной защитой толщиной от 0,5 до 2,0 м с использованием дозиметра рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1123. Численные значения данных коэффициентов составляют 1,29, 1,44, 1,50, 1,56 и 1,60 для максимальных энергий тормозного излучения 10, 15, 20, 25 и 30 МэВ соответственно. Использование данных коэффициентов позволяет скомпенсировать энергетическую зависимость чувствительности данного дозиметра и получить по результатам измерений умеренно консервативную оценку МЭД для максимальных энергий тормозного излучения до 30 МэВ, т.е. для всего диапазона существующих и перспективных МУЭЛ.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Барковский А.Н. – концепция, написание рукописи.
Буланова С.А. – проведение расчетов спектров тормозного излучения за защитой.

Огородников С.А. – участие в анализе полученных результатов.

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сведения об источнике финансирования

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Барковский Анатолий Николаевич – руководитель Федерального радиологического центра, главный научный сотрудник Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: ANBarkovski@yandex.ru

Буланова Софья Андреевна – инженер-физик, Общество с ограниченной ответственностью «Лаборатория Скантроник», Санкт-Петербург, Россия

Огородников Сергей Анатольевич – генеральный директор, Общество с ограниченной ответственностью «Лаборатория Скантроник», Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования: Барковский А.Н., Буланова С.А., Огородников С.А. Радиационный контроль при эксплуатации медицинских ускорителей электронов с использованием дозиметра ДКС-АТ1123 // Радиационная гигиена. 2025. Т. 18, № 3. С. 147–156. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-147-156

Литература

- Мартынюк Ю.Н. Государственный реестр средств измерений. Часть 2. Дозиметры общего назначения, импульсные и специальные // АНРИ. 2020. № 4 (103). С. 3-13.
- Титов Н.В. Возможность применения дозиметров со счетчиком Гейгера-Мюллера для дозиметрии импульсного излучения // Радиационная гигиена. 2019;12(2): 76-80.
- Нурлыбаев К., Мартынюк Ю.Н., Каракаш А.И. и др. Радиационная безопасность в лучевой терапии с использованием ускорителей электронов // АНРИ. 2014. № 1. С. 15-21.
- Описание типа средства измерений. Дозиметры рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1121, ДКС-АТ1123. Приложение к свидетельству № 75466 об утверждении типа средств измерений.
- Барковский А.Н., Огородников С.А. Возможность использования дозиметра ДКС-АТ1123 для радиационного контроля медицинских ускорителей электронов с энергией более 10 МэВ // Радиационная гигиена. 2024. Т. 17, № 2. С. 38-45.
- Мартынюк Ю.Н., Нурлыбаев К., Ревков А.А. Дозиметры импульсного излучения // АНРИ. 2018. № 1 (92). С. 2-11.
- Allison J., Amako K., Apostolakis J., Araujo H., Arce Dubois P., Asai M. et al. Geant4 developments and applications // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2006. 53 No. 1. P. 270-278.
- ICRP Publication 116. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures.

Поступила: 15.07.2025

The possibility of using the DKS-AT1123 dosimeter for radiation monitoring of medical electron accelerators with an energy of more than 10 MeV

Anatoly N. Barkovsky¹, Sofia A. Bulanova², Sergey A. Ogorodnikov²

¹ Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance of Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Saint Petersburg, Russia

² Limited liability company «Laboratory Scantronic», Saint Petersburg, Russia

The X-ray and gamma radiation dosimeter DKS-AT1123, designed for dosimetry of pulsed photon

Anatoly N. Barkovsky

Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev

Address for correspondence: 8, Mira Str., Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: ANBarkovski@yandex.ru

radiation with an energy of up to 10 MeV, is widely used for radiation monitoring of medical electron accelerators. Since the maximum energy of the bremsstrahlung radiation of medical electron accelerators can significantly exceed this value, the main purpose of this work was to calculate correction factors to compensate for the energy dependence of the sensitivity of the DKS-AT1123 dosimeter. It makes possible to obtain correct results of radiation monitoring of medical electron accelerators with an electron energy of up to 30 MeV. Materials and Methods: For this purpose, the authors calculated the energy spectra of bremsstrahlung radiation generated by electrons with energies of 10, 15, 20, 25 and 30 MeV behind concrete shield with a thickness of 0.5, 1.0, 1.5, and 2.0 m. Calculations were performed using the Monte Carlo method. Using the data obtained, correction coefficients to compensate for the energy dependence of the DKS-AT1123 dosimeter for all considered electron energies and concrete shield thicknesses were calculated. Results and Discussion: An analysis of the results showed that the correction factors are weakly dependent on the thickness of the concrete shield. For thicknesses from 0.5 to 2.0 m, the differences in the correction coefficients do not exceed 8 %. Numerical values of correction coefficients equal to 1.29; 1.44; 1.50; 1.56 and 1.60 were obtained for the maximum bremsstrahlung radiation energy of 10, 15, 20, 25 and 30 MeV, respectively. Conclusion: The use of these correction factors makes it possible to conduct radiation monitoring of medical electron accelerators using the DKS-AT1123 dosimeter.

Key words: medical electron accelerators, pulsed bremsstrahlung radiation, radiation shield made of concrete, radiation control of medical electron accelerators.

Authors' personal contribution

Barkovsky A.N. – concept, manuscript writing.

Bulanova S.A. – carrying out calculations of the bremsstrahlung spectra behind the shielding.

Ogorodnikov S.A. – participation in the analysis of the obtained results.

Conflict of interests

The authors have no conflicts of interest to disclose.

Sources of funding

The study had no sponsorship.

References

1. Martynyuk YuN. The State Register of Measuring Instruments. Part 2. General-purpose, pulse and special dosimeters. *ANRI = ANRI*. 2020;4(103): 3-13. (In Russian).
2. Titov NV. The possibility of using dosimeters with a Geiger-Muller counter for dosimetry of pulsed radiation. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2019;12(2): 76-80. (In Russian).
3. Nurlybaev K, Martynyuk YuN, Karakash AI, Sinnikov LL, Lykova EN, Galyautdinova ZZ, et al. Radiation safety in radiation therapy using electron accelerators. *ANRI = ANRI*. 2014;1: 15-21. (In Russian).
4. Description of the type of measuring instrument. X-ray and gamma radiation dosimeters DKS-AT1121, DKS-AT1123. Appendix to Certificate No. 75466 on type approval of measuring instruments. (In Russian).
5. Barkovsky AN, Ogorodnikov SA. The possibility of using the DKS-AT1123 dosimeter for radiation monitoring of medical electron accelerators with the energy of more than 10 MeV. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2024;17(2): 38-45. (In Russian).
6. Martynyuk UN, Nurlybaev K, Revkov AA. Pulse radiation dosimeters. s. *ANRI = ANRI*. 2018;1(92): 2-11. (In Russian).
7. Allison J, Amako K, Apostolakis J, Araujo H, Arce Dubois P, Asai M. Geant4 developments and applications *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2006;53(1): 270-278.
8. ICRP Publication 116. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures.

Received: July 15, 2025

For correspondence: Anatoly N. Barkovsky – Head of the Federal Radiological Center, Chief Researcher, Saint Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing (8, Mira Str., Saint Petersburg, 197101, Russia; E-mail: ANBarkovski@yandex.ru)

Sofia A. Bulanova – Physics Engineer of Scantronic Laboratory LLC, Saint Petersburg, Russia

Sergey A. Ogorodnikov – General Director of Scantronic Laboratory LLC, Saint Petersburg, Russia

For citation: Barkovsky A.N., Bulanova S.A., Ogorodnikov S.A. The possibility of using the DKS-AT1123 dosimeter for radiation monitoring of medical electron accelerators with an energy of more than 10 MeV. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 3. P. 147–156. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-147-156