

Возможность использования дозиметра ДКС-АТ1123 для радиационного контроля медицинских ускорителей электронов с энергией более 10 МэВ

А.Н. Барковский¹, С.А. Огородников²

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

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

В Российской Федерации наблюдается постоянный рост количества используемых радиационных медицинских установок с ускорителями электронов. За последние 4 года их количество возросло в 2,5 раза. Данные установки содержат импульсные ускорители электронов, генерирующие импульсное тормозное излучение с максимальной энергией от 6 до 21 МэВ. В государственном реестре средств измерений Российской Федерации в настоящее время отсутствуют приборы, предназначенные для дозиметрии импульсного фотонного излучения с энергией более 10 МэВ. Наиболее широко используется для проведения радиационного контроля импульсных ускорителей электронов дозиметр рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1123, предназначенный для дозиметрии импульсного тормозного излучения с энергией до 10 МэВ. Цель настоящей работы – оценить возможность использования данного прибора для дозиметрии импульсного тормозного излучения с максимальной энергией до 20 МэВ. Авторами были проведены расчеты энергетических спектров тормозного излучения для точечного источника с максимальной энергией 20 МэВ за плоскими бетонными экранами толщиной 1 м, 2 м и 3 м методом Монте-Карло с использованием расчетной программы GEANT4. Проведена экстраполяция энергетической зависимости эффективности регистрации дозиметра ДКС-АТ1123 в область энергий 10–50 МэВ в керма-приближении, т.е. без учета переноса энергии вторичными электронами. Предполагалось, что она соответствует энергетической зависимости полного массового коэффициента ослабления для поглощенной энергии гамма-квантов в воде. С использованием конверсионных коэффициентов перевода флюенса моноэнергетических фотонов в мощность эффективной дозы для передне-задней геометрии облучения были получены реальные значения мощности дозы, а с использованием энергетической зависимости показаний дозиметра – прогнозируемые результаты измерения дозиметром ДКС-АТ1123 единичной мощности дозы за бетонной защитой толщиной 1, 2 и 3 м. Показано, что максимальное ожидаемое занижение результатов измерений не превысит 40% и практически не зависит от толщины бетонной защиты в диапазоне толщин от 1 до 3 м. Для учета данного занижения необходимо использовать значение дополнительной погрешности измерений за счет энергетической зависимости чувствительности данного прибора для энергии фотонного излучения более 10 МэВ, равное 70%. Это позволяет использовать результаты измерений, полученные с использованием данного дозиметра, для адекватной характеристики состояния радиационной обстановки при эксплуатации импульсных ускорителей электронов с максимальной энергией до 20 МэВ. Для компенсации данного занижения возможно использование поправочного коэффициента к результатам измерений, равного для рассмотренных условий $1,63 \pm 0,04$. Предложенный подход может быть использован для создания методики радиационного контроля медицинских ускорителей электронов с энергией до 20 МэВ с использованием данного дозиметра, при наличии поправочных коэффициентов для встречающихся на практике конфигураций радиационной защиты и энергий излучения.

Ключевые слова: радиационные медицинские установки с ускорителями электронов, импульсное тормозное излучение, дозиметрия импульсного тормозного излучения с максимальной энергией 20 МэВ.

Введение

В Российской Федерации наблюдается постоянный рост количества используемых радиационных медицинских установок с ускорителями электронов (РМУ УЭЛ).

За последние 4 года их количество возросло в 2,5 раза [1, 2]. Важную роль в обеспечении радиационной безопасности при эксплуатации РМУ УЭЛ играет проведение радиационного контроля при их эксплуатации в соот-

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

ветствии с требованиями СанПиН 2.6.1.2573-10¹ и МУК 2.6.1.3805-22².

РМУ УЭЛ содержат импульсные ускорители электронов, генерирующие импульсное тормозное излучение с длительностью импульса несколько микросекунд и частотой следования импульсов около 400 Гц. Поэтому для проведения радиационного контроля при использовании РМУ УЭЛ должны использоваться дозиметры, предназначенные для радиационного контроля импульсного тормозного излучения. Максимальная энергия ускоренных электронов, а следовательно, и максимальная энергия тормозного излучения для различных типов РМУ УЭЛ составляет от 6 МэВ до 21 МэВ.

В государственном реестре средств измерений Российской Федерации в настоящее время имеется три прибора, предназначенные для дозиметрии импульсного фотонного излучения с энергией до 10 МэВ [3]. Их характеристики приведены в таблице 1 [4–6].

Как видно, дозиметр RAM ION имеет минимально измеримую величину мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) фотонного излучения 1 мкЗв/ч, что ограничивает возможность его применения для проведения производственного радиационного контроля РМУ УЭЛ, поскольку значительная часть (до 90%) результатов измерений при проведении данного вида радиационного контроля не превышают данную величину. Кроме того, он предназначен для дозиметрии фотонного излучения с максимальной энергией 10 МэВ. Производство дозиметра ДКС-96 прекращено. В государственном реестре средств измерений Российской Федерации имеется дозиметр ДКГ-РМ1621 со счетчиком Гейгера – Мюллера, предназначенный для дозиметрии фотонного излучения с энергией до 20 МэВ, но он не предназначен для дозиметрии импульсного излучения. В работе [7] обо-

сновывается возможность применения его для дозиметрии импульсного тормозного излучения медицинских ускорителей электронов с максимальной энергией до 20 МэВ, но данный вопрос требует дополнительного обоснования, и этот дозиметр пока не используется на практике для проведения радиационного контроля таких ускорителей.

В настоящее время для радиационного контроля РМУ УЭЛ в подавляющем большинстве случаев используется дозиметр рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1123 производства НПУП «АТОМТЕХ» (Республика Беларусь) [8]. Максимальная энергия тормозного излучения, для дозиметрии которого он предназначен, составляет 10 МэВ. При этом достаточно большое количество эксплуатируемых в настоящее время РМУ УЭЛ имеют максимальную энергию тормозного излучения более 10 МэВ. Но в государственном реестре средств измерений Российской Федерации вообще отсутствуют дозиметрические приборы для дозиметрии импульсного фотонного излучения с энергией более 10 МэВ.

На рисунке 1 приведена энергетическая зависимость чувствительности дозиметра ДКС-АТ1123 относительно гамма-излучения ¹³⁷Cs с энергией 0,662 МэВ [8]. Как видно из представленного рисунка, в области энергий от 3 до 10 МэВ занижение показаний дозиметра составляет до 40%. Для больших энергий данные по энергетической зависимости чувствительности дозиметра ДКС-АТ1123 в его технической документации не приводятся.

Цель исследования – анализ возможности использования данного дозиметра для проведения радиационного контроля при использовании РМУ УЭЛ с максимальной энергией тормозного излучения до 20 МэВ и оценка ожидаемой погрешности получаемых результатов.

Характеристики дозиметров импульсного фотонного излучения

Таблица 1

Characteristics of pulsed photon radiation dosimeters]

[Table 1

Модель [Model]	Тип детектора [Type of detector]	Диапазон энергий, МэВ [Energy range, MeV]	Диапазон МАЭД, мкЗв/ч [ADER range, μSv/h]	Минимальная длительность импульса, нс [Minimum pulse duration, ns]	Основная погрешность, % [The basic error, %]
ДКС-АТ1123	Пластиковый сцинтиллятор [Plastic scintillator]	0,015–10	0,1–10 ⁷	10	30
RAM ION	Ионизационная камера [Ionizing chamber]	0,02–10	1,0–5×10 ⁵	10	30
ДКС-96 с блоком БДКС-966	Пластиковый сцинтиллятор [Plastic scintillator]	0,015 – 10	0,05 – 5×10 ⁶	10	30

¹ СанПиН 2.6.1.2573-10 «Гигиенические требования к размещению и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ». Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 18.01.2010 № 3. Зарегистрированы Министерством юстиции Российской Федерации 17.03.2010, регистрационный № 16641 [SanPiN 2.6.1.2573-10 «Hygienic requirements for the placement and operation of electron accelerators with energy up to 100 MeV». Approved by Resolution No. 3 of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated 01/18/2010. Registered by the Ministry of Justice of the Russian Federation on 03/17/2010, registration No. 16641. (In Russ.)]

² МУК 2.6.1.3805-22 «Проведение радиационного контроля при использовании медицинских ускорителей электронов». Утверждены руководителем Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации А.Ю. Поповой 2 декабря 2022 г. [MUC 2.6.1.3805-22 «Conducting radiation monitoring when using medical electron accelerators». Approved by the Head of the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation A. Y. Popova on December 2, 2022. (In Russ.)]

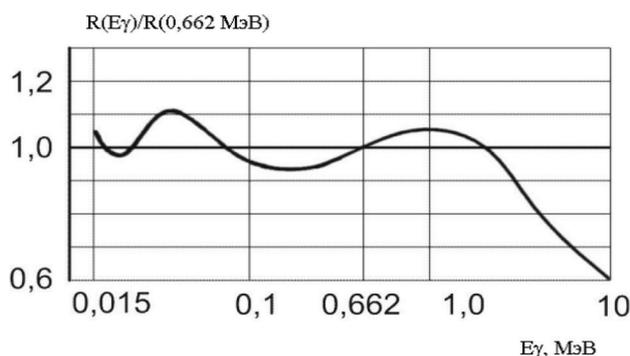


Рис. 1. Энергетическая зависимость чувствительности дозиметра рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1123 относительно гамма-излучения ^{137}Cs с энергией 0,662 кэВ
[Fig. 1.] The energy dependence of the sensitivity of the dosimeter DKS-AT1123 to X-ray and gamma radiation relative to gamma radiation from ^{137}Cs with the energy of 0.662 keV]

Материалы и методы

Проведенный анализ имеющихся в литературе энергетических спектров тормозного излучения, генерируемого пучком электронов с энергией 20 МэВ, показал, что исследовались либо спектры тормозного излучения источника [9–13], либо спектры тормозного излучения в водных фантомах. Спектры тормозного излучения с максимальной энергией более 10 МэВ за радиационной защитой из бетона, который чаще всего используется в конструкциях стационарной радиационной защиты процедурных РМУ УЭЛ, в научной литературе найти не удалось.

Поэтому авторами были проведены расчеты энергетического спектра тормозного излучения, генерируемого пучком ускоренных электронов с энергией 20 МэВ в вольфрамовой мишени до и после прохождения бетонной защиты различной толщины. Использовалась модель точечного источника и плоской защиты. Расчеты были проведены специалистами ООО «Скантроник Системс» с использованием специального программного обеспечения GEANT4 [14], позволяющего проводить статистический расчет дозовых полей тормозного излучения методом Монте-Карло. В программе GEANT4 моделируются процессы взаимодействия гамма-квантов в различных веществах. В GEANT4 рассматривалось распространение квантов тормозного излучения, генерируемых в тормозной мишени линейного ускорителя электронов, с последующим прохождением их через бетонную защиту плотностью 2,3 г/см³.

На рисунке 2 представлены нормированные на единичный источник рассчитанные энергетические спектры тормозного излучения непосредственно за источником и за бетонными барьерами толщиной 1 м, 2 м и 3 м.

Как видно из представленных результатов, в спектре тормозного излучения после прохождения через бетонные барьеры значительно увеличивается доля квантов высоких энергий, которые ослабляются защитой слабее, чем кванты более низкой энергии.

Для количественной оценки показаний дозиметра ДКС-АТ1123 в области энергий до 20 МэВ авторами была проведена экстраполяция представленной на рисунке 1 энергетической зависимости дозиметра ДКС-АТ1123 в область больших энергий фотонов вплоть до 50 МэВ. Расчет был выполнен в керма-приближении, т.е. без учета переноса энергии вторичными электронами. Поскольку показания

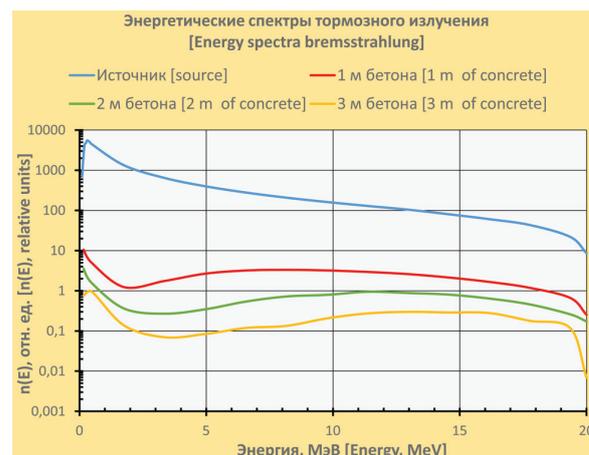


Рис. 2. Нормированные на единичный источник энергетические спектры тормозного излучения непосредственно за источником и за бетонными барьерами толщиной 1 м, 2 м и 3 м
[Fig. 2.] Energy spectra of *bremsstrahlung* normalized for a single source directly behind the source and behind concrete barriers with a thickness of 1 m, 2 m, and 3 m]

дозиметра определяются энергией, выделяемой в датчике прибора при нахождении его в поле контролируемого излучения, энергетическая зависимость его чувствительности должна определяться энергетической зависимостью сечения поглощения энергии фотонного излучения в материале датчика прибора. Поскольку датчик дозиметра ДКС-АТ1123 изготовлен из тканеэквивалентной пластмассы, хорошим приближением к которой является вода, экстраполяция энергетической зависимости чувствительности дозиметра ДКС-АТ1123 была проведена в предположении, что энергетическая зависимость эффективности регистрации данного дозиметра в области энергий 10–50 МэВ соответствует энергетической зависимости полного массового коэффициента ослабления для поглощенной энергии гамма-квантов в воде. На рисунке 3 красным цветом отмечена энергетическая зависимость эффективности регистрации дозы фотонного излучения дозиметром ДКС-АТ1123. Зеленым цветом отмечена экстраполированная часть этой зависимости в область энергий более 10 МэВ. Синие кружки соответствуют энергетической зависимости массового коэффициента ослабления для поглощенной энергии гамма-квантов в воде, нормированного на 1 в точке $E = 2,0$ МэВ. Значения массового коэффициента ослабления для поглощенной энергии гамма-квантов в воде были заимствованы из [15].

Как видно из рисунка 3, энергетическая зависимость эффективности регистрации мощности дозы фотонного излучения дозиметром ДКС-АТ1123 достаточно хорошо совпадает с энергетической зависимостью массового коэффициента ослабления для поглощенной энергии гамма-квантов в воде в области энергий от 2 до 10 МэВ, что позволяет говорить о корректности данной экстраполяции в область энергий более 10 МэВ. На основе этих данных были получены средние значения эффективности регистрации мощности дозы фотонного излучения дозиметром ДКС-АТ1123 для используемых при проведении дальнейших оценок диапазонов энергий фотонов в области от 0 до 20 МэВ.

Для перевода рассчитанных значений флюенса тормозного излучения различной энергии в мощность дозы использовались значения конверсионных коэффици-

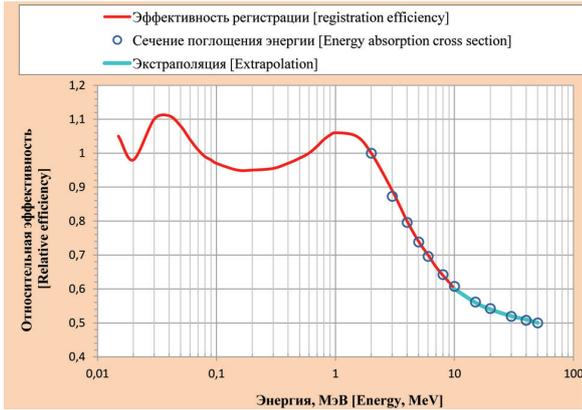


Рис. 3. Энергетическая зависимость эффективности регистрации мощности дозы фотонного излучения дозиметром ДКС-АТ1123, полного массового коэффициента ослабления для поглощенной энергии гамма-квантов в воде и экстраполированной части эффективности регистрации мощности дозы фотонного излучения дозиметром ДКС-АТ1123

[Fig. 3. Energy dependence of the efficiency of recording the dose rate of photon radiation by the DKS-AT1123 dosimeter, the total mass attenuation coefficient for the absorbed energy of gamma quanta in water, and the extrapolated part of the efficiency of recording the dose rate of photon radiation by the DKS-AT1123 dosimeter]

ентов перевода флюенса моноэнергетических фотонов в мощность эффективной дозы для передне-задней геометрии облучения, заимствованные из [16]. На рисунке 4 приведены эти данные для области энергий до 50 МэВ.

На их основе были получены средние значения коэффициентов перевода флюенса фотонов в мощность эффективной дозы для используемых диапазонов энергий фотонов в области от 0 до 20 МэВ.

Полученные средние значения эффективности регистрации мощности дозы фотонного излучения дозиметром ДКС-АТ1123 и средние значения коэффициентов перевода флюенса фотонов в мощность эффективной дозы для используемых при проведении дальнейших оценок диапазонов энергий фотонов приведены в таблице 2.

Результаты и обсуждение

В таблице 3 представлены относительные вклады фотонов различных энергий во флюенс ($B\Phi_i$), в мощность дозы тормозного излучения ($ВМД_i$), генерируемого в вольфрамо-

Средние значения эффективности регистрации мощности дозы фотонного излучения дозиметром ДКС-АТ1123 и средние значения коэффициентов перевода флюенса фотонов в мощность эффективной дозы

Таблица 2

[Table 2

Average values of the efficiency of recording the dose rate of photon radiation with the DKS-AT1123 dosimeter and the average values of the coefficients of conversion of photon fluence into effective dose rate]

Номер [Number] <i>i</i>	Диапазон энергий, МэВ [Energy range, MeV]	Дозовый коэффициент для передне-заднего облучения $10^{-12} \text{ Зв}\times\text{см}^2$ [Dose coefficient for anterior-posterior irradiation $10^{-12} \text{ Sv}\times\text{cm}^2$]	Энергетическая зависимость показаний дозиметра [Energy dependence of the dosimeter readings]
1	0–0,5	1,2	0,95
2	0,5–1	3,5	1,03
3	1–1,5	5,3	1,06
4	1,5–2	6,8	1,03
5	2–4	9,6	0,9
6	4–6	13,4	0,75
7	6–8	16,4	0,67
8	8–10	19,1	0,62

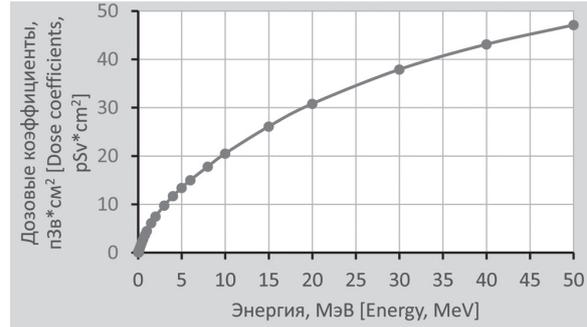


Рис. 4. Энергетическая зависимость конверсионных коэффициентов перевода флюенса моноэнергетических фотонов в мощность эффективной дозы для передне-задней геометрии облучения

[Fig. 4. The energy dependence of the coefficients of the conversion of the fluence of monoenergetic photons into the effective dose rate at the anterior-posterior irradiation geometry]

вой мишени толщиной 1 мм при падении на нее пучка ускоренных электронов с энергией 20 МэВ, после прохождения через плоские бетонные барьеры толщиной 1 м, 2 м и 3 м и в показания дозиметра ДКС-АТ1123 ($ВПД_i$) с учетом экстраполированной энергетической зависимости его эффективности регистрации мощности дозы фотонного излучения.

$$B\Phi_i = \frac{\int_{E_{i-1}}^{E_i} \Phi(E)dE}{\int_0^{E_N} \Phi(E)dE} \tag{1}$$

$$ВМД_i = \frac{B\Phi_i \cdot K_i^o}{\sum_{i=1}^N B\Phi_i \cdot K_i^o} \tag{2}$$

$$ВПД_i = ВМД_i \cdot ЭЗПД_i \tag{3}$$

где: $\Phi(E)$ – рассчитанный дифференциальный энергетический спектр плотности потока тормозного излучения, $1/(\text{см}^2\times\text{с}\times\text{МэВ})$;

$B\Phi_i$ – относительный вклад во флюенс тормозного излучения *i*-го диапазона энергий фотонов;

$ВМД_i$ – относительный вклад в мощность дозы тормозного излучения *i*-го диапазона энергий фотонов;

Номер [Number] i	Диапазон энергий, МэВ [Energy range, MeV]	Дозовый коэффициент для передне-заднего облучения $10^{-12} \text{Зв}\times\text{см}^2$ [Dose coefficient for anterior-posterior irradiation $10^{-12} \text{Sv}\times\text{cm}^2$]	Энергетическая зависимость показаний дозиметра [Energy dependence of the dosimeter readings]
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

Таблица 3

Вклады во флюенс, в мощность дозы и в показания дозиметра ДКС-АТ1123 фотонов различных энергий за плоской бетонной защитой толщиной 1 м, 2 м и 3 м для тормозного излучения, генерируемого в вольфрамовой мишени толщиной 1 мм электронами с энергией 20 МэВ

[Table 3

Contributions of photons of various energies to the fluence, dose rate and dosimeter readings of DKS-AT1123 behind a flat concrete shield with a thickness of 1 m, 2 m. and 3 m for bremsstrahlung generated in a 1 mm thick tungsten target by electrons with an energy of 20 MeV]

Диапазон энергий, МэВ [Energy range, MeV]	1 м бетона [1 m concrete]			2 м бетона [2 m concrete]			3 м бетона [3 m concrete]		
	ВФ	ВМД	ВПД	ВФ	ВМД	ВПД	ВФ	ВМД	ВПД
0–0,5	0,090	0,0063	0,0060	0,098	0,0063	0,0060	0,202	0,0142	0,0135
0,5–1	0,028	0,0056	0,0058	0,032	0,0060	0,0062	0,039	0,0081	0,0083
1–1,5	0,015	0,0046	0,0049	0,018	0,0051	0,0054	0,015	0,0047	0,0050
1,5–2	0,026	0,0100	0,0103	0,014	0,0051	0,0053	0,022	0,0086	0,0089
2–4	0,065	0,036	0,0323	0,040	0,0206	0,0186	0,031	0,0173	0,0156
4–6	0,100	0,077	0,0581	0,055	0,0396	0,0297	0,039	0,0303	0,0227
6–8	0,132	0,126	0,0841	0,090	0,0793	0,0531	0,049	0,0474	0,0318
8–10	0,140	0,155	0,0958	0,125	0,128	0,0795	0,071	0,0800	0,0496
10–12	0,123	0,154	0,0909	0,140	0,163	0,0962	0,122	0,155	0,0913
12–14	0,106	0,146	0,0832	0,136	0,175	0,0995	0,137	0,192	0,1096
14–16	0,084	0,126	0,0708	0,120	0,168	0,0942	0,119	0,182	0,1020
16–18	0,061	0,099	0,0544	0,085	0,128	0,0705	0,092	0,152	0,0837
18–20	0,031	0,055	0,0294	0,047	0,076	0,0409	0,061	0,108	0,0584
0–10	0,596	0,420	0,626	0,472	0,290	0,606	0,468	0,211	0,600
10–20	0,404	0,580		0,528	0,710		0,532	0,789	

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

K_i^o – среднее значение коэффициента перевода флюенса тормозного излучения в мощность дозы для i -го диапазона энергий фотонов, $\text{Зв}\times\text{см}^2$;

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

N – количество используемых диапазонов энергий фотонов;

E_i – границы используемых диапазонов энергий фотонов, МэВ.

i -й диапазон энергий соответствует энергии фотонов от E_{i-1} до E_i .

Сумма $ВПД_i$ для всего диапазона энергий тормозного излучения соответствует показаниям дозиметра при измерении единичной мощности дозы тормозного излучения для всех рассматриваемых ситуаций.

Спектр тормозного излучения заметно изменяется после прохождения через защиту, в нем увеличивается доля квантов высоких энергий, которые ослабляются защитой

слабее, чем кванты более низкой энергии. Этот процесс частично компенсируется добавкой в область низких энергий рассеянного излучения, но все же первый процесс превалирует, и происходит ужесточение спектра. Еще более значителен вклад высоких энергий в мощность дозы тормозного излучения за защитой. Сразу после источника максимальный вклад в мощность дозы имеет место для области энергий 0–2 МэВ, за бетонной защитой толщиной 1 м – для области энергий 8–10 МэВ, а за бетонной защитой толщиной 2 и 3 м – для области энергий 12–14 МэВ. Вклад в мощность дозы (во флюенс) фотонов тормозного излучения с энергией от 10 до 20 МэВ составляет 27% (9%) сразу за мишенью, 58% (40%) за бетонной защитой толщиной 1 м, 71% (53%) за бетонной защитой толщиной 2 м и 79% (53%) за бетонной защитой толщиной 3 м. Тем не менее, прогнозируемое занижение результатов измерения мощности дозы тормозного излучения с максимальной энергией 20 МэВ дозиметром ДКС-АТ1123 для рассматриваемых толщин бетонной защиты не превышает 40% и практически не изменяется для диапазона толщин бетонной защиты от 1 м до 3 м. Поправочный коэффициент для измеренных значений в этом случае составляет $1,63\pm 0,04$.

Таким образом, прогнозируемые результаты измерения дозиметром ДКС-АТ1123 единичной мощности дозы за бетонной защитой толщиной 1, 2 и 3 м для источника тормозного излучения, генерируемого пучком ускоренных электронов с энергией 20 МэВ, составляют 0,626, 0,606 и 0,600 соответственно. Т.е. максимальное ожидаемое занижение результата измерений составляет около 40%, причем оно практически не зависит от толщины бетонной защиты, по крайней мере, в диапазоне толщин от 1 до 3 м. Для учета данного занижения необходимо использовать значение дополнительной погрешности измерений за счет энергетической зависимости чувствительности данного прибора для энергии фотонного излучения более 10 МэВ, равное 70%. Это позволит использовать результаты измерений, полученные с использованием данного дозиметра, для адекватной характеристики состояния радиационной безопасности при эксплуатации РМУ УЭЛ с максимальной энергией до 20 МэВ.

Тем не менее, с формальной точки зрения, такой подход нельзя признать полностью легитимным, поскольку данный вид измерений не предусматривается в описании типа средства измерения данного дозиметра.

Проблема разработки и организации серийного производства дозиметров импульсного тормозного излучения с максимальной энергией не менее 20 МэВ по-прежнему чрезвычайно актуальна и требует своего решения. Это отмечено и в «Основах государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу»³. В качестве одного из основных направлений реализации государственной политики в области ядерной и радиационной безопасности в данном документе отмечается необходимость разработки средств измерения импульсных ионизирующих излучений высоких энергий⁴.

Заключение

Проведенное исследование показывает, что при использовании дозиметра ДКС-АТ1123 для радиационного контроля РМУ УЭЛ с максимальной энергией тормозного излучения до 20 МэВ дополнительная погрешность измерений за счет энергетической зависимости чувствительности дозиметра составляет 70%, причем в сторону занижения получаемых результатов. Это занижение слабо зависит от толщины радиационной защиты и может быть учтено поправочным коэффициентом, учитывающим максимальную энергию тормозного излучения источника и реальную толщину защиты. Для получения набора таких поправочных коэффициентов необходимо провести расчеты для максимальных энергий тормозного излучения 10, 15, 20, 25 МэВ и толщин бетонной защиты 30, 50, 80, 100, 200 и 300 см, в том числе после свинцового экрана толщиной 17 см. Этот набор исчерпывает практически все встречающиеся на практике конструкции радиационной защиты процедурных РМУ УЭЛ. Наличие таких данных обеспечит возможность разработки методики радиационного кон-

троля медицинских ускорителей электронов с энергией до 20 МэВ с использованием данного дозиметра с поправочными коэффициентами для всех основных конфигураций радиационной защиты и энергий излучения.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Барковский А.Н. – концепция, написание рукописи.

Огородников С.А. – проведение расчетов спектров тормозного излучения за защитой и анализ полученных результатов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

1. Шевкун И.Г., Степанов В.С., Романович И.К. и др. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2017 год. Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2018. 128 с.
2. Шевкун И.Г., Степанов В.С., Романович И.К. и др. Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2021 год (Радиационно-гигиенический паспорт Российской Федерации). М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2022. 125 с.
3. Мартынюк Ю.Н. Государственный реестр средств измерений. Часть 2. Дозиметры общего назначения, импульсные и специальные // АНРИ. 2020. № 4 (103). С. 3-13.
4. Описание типа средства измерений. Дозиметры рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1121, ДКС-АТ1123. Приложение к свидетельству № 75466 об утверждении типа средств измерений.
5. Описание типа средства измерений. Дозиметры RAM ION. Приложение к свидетельству № 64658 об утверждении типа средств измерений.
6. Описание типа средства измерений. Дозиметры-радиометры ДКС-96. Приложение к свидетельству № 43717 об утверждении типа средств измерений.
7. Титов Н.В. Возможность применения дозиметров со счетчиком Гейгера-Мюллера для дозиметрии импульсного излучения // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 2. С. 76-80.
8. Дозиметры рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1121, ДКС-АТ1121А, ДКС-АТ1123, ДКС-АТ1123А. Руководство по эксплуатации. 69 с.
9. Мордасов Н.Г., Иващенко Д.М., Членов А.М., Астахов А.А. Моделирование методов экспрессного определения энергетического спектра тормозного излучения ускорителей электронов // Журнал технической физики. 2004. Т. 74, вып. 9. С. 108-115.
10. Абибуллаев Н.А., Бегимкулов Х.Х., Салихбаев У.С. Энергетические спектры и угловое распределение тормозного излучения, испускаемого из толстой вольфрамовой мишени электронами с энергией 11,8 МэВ // Атомная энергия. 2002. Т. 92, вып. 3. С. 247-249.
11. 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 с.

³ Утверждены Указом Президента Российской Федерации от 13 октября 2018 г. № 585 [Approved by Decree of the President of the Russian Federation No. 585 dated October 13, 2018. (In Russ.)]

⁴ 18 абзац подпункта а) пункта 13 «Основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу» [18 paragraph of subparagraph (a) of paragraph 13 of the «Fundamentals of state policy in the field of ensuring nuclear and radiation safety of the Russian Federation for the period up to 2025 and beyond». (In Russ.)]

12. Абибуллаев Н.А., Салихбаев У.С. Энергетические спектры и угловые распределения тормозного излучения, испускаемого электронами с энергией 20 МэВ из толстой вольфрамовой мишени // Известия РАН. 2000. Т. 64, № 1. С. 152-160.
13. Сахаров В.К. Спектры тормозного излучения и фотонейтронов из вольфрамовой мишени ускорителя электронов энергией 5 – 90 МэВ // Атомная энергия. 2016. Т. 120, вып. 4. С. 228-231.
14. Allison J., Amako K., Apostolakis J. et al. Geant4 developments and applications // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2006. Vol. 53, No. 1. P. 270-278.
15. Сторм Э., Исраэль Х. Сечения взаимодействия гамма-излучения (для энергий 0,001 – 100 МэВ и элементов с 1 по 100) Справочник. Перевод с английского В.А. Климанова, Е.Д. Чистова. М.: Атомиздат, 1973. 256 с.
16. ICRP Publication 116. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures // Annals of the ICRP. 2010. Vol. 40, No 2-5. P. 1-257. DOI: 10.1016/j.icrp.2011.10.001.

Поступила: 25.01.2024 г.

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

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

Для цитирования: 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. DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-38-45

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

Anatoly N. Barkovsky¹, 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

In the Russian Federation, there is a constant increase in the number of radiation medical installations with electron accelerators. Over the past 4 years, their number has increased 2.5 times. These installations contain pulsed electron accelerators that generate pulsed bremsstrahlung radiation with a maximum energy from 6 to 21 MeV. Currently, there are no devices designed for dosimetry of the pulsed photon radiation with energy of more than 10 MeV in the state register of measuring instruments of the Russian Federation. The most widely used radiation monitoring device for pulsed electron accelerators is the DKS-AT1123 X-ray and gamma radiation dosimeter designed for dosimetry of pulsed bremsstrahlung radiation with an energy of up to 10 MeV. The purpose of this work is to evaluate the possibility of using this device for dosimetry of pulsed bremsstrahlung radiation with a maximum energy of up to 20 MeV. The authors calculated the energy spectra of bremsstrahlung radiation for a point source with a maximum energy of 20 MeV behind flat concrete screens with a thickness of 1 m, 2 m and 3 m by the Monte Carlo method using the GEANT4 calculation program. The energy dependence of the registration efficiency of the DKS-AT1123 dosimeter was extrapolated to the energy range of 10–50 MeV in the kerma-approximation without taking into account the energy transfer by secondary electrons. It was assumed that it corresponds to the energy dependence of the total mass attenuation coefficient for the absorbed energy of gamma quanta in water. Using conversion coefficients for converting the fluence of monoenergetic photons into the effective dose rate at an anterior-posterior radiation incidence on the human body, real dose rates were calculated, and using the energy dependence of the dosimeter readings, the predicted results of measuring the unit dose rate with the DKS-AT1123 dosimeter behind a concrete protection with a thickness of 1, 2 and 3 m were obtained. It is shown that the maximum expected underestimation of the measurement results will not exceed 40% and practically does not depend on the thickness of the concrete shield in the thickness range from

Anatoly N. Barkovsky

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

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

1 to 3 m. To account for this underestimation, it is necessary to use the value of additional measurement error due to the energy dependence of the sensitivity of this device for the photon radiation energy of more than 10 MeV, equal to 70%. This makes it possible to use the measurement results obtained using this dosimeter to adequately characterize the state of radiation safety during operation of pulsed electron accelerators with a maximum energy of up to 20 MeV. It is possible to use a correction factor to the measurement results equal to 1.63 ± 0.04 to compensate for this underestimation. The proposed approach can be used to create a methodology for using this dosimeter for radiation monitoring of medical electron accelerators with the energy of up to 20 MeV, if there are correction factors for radiation protection configurations and radiation energies encountered in practice.

Key words: radiation medical installations with electron accelerators, pulsed bremsstrahlung radiation, dosimetry of pulsed bremsstrahlung radiation with a maximum energy of 20 MeV.

Personal participation of the authors

Barkovsky A.N. – the concept, the writing of the manuscript.

Ogorodnikov S.A. – calculations of the spectra of braking radiation behind the protection and analysis of the results obtained.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

1. Shevkun IG, Stepanov VS, Romanovich IK, Barkovsky AN, Baryshkov NK, Bratilova AA, et al. Results of radiation-hygienic passportization in the subjects of the Russian Federation for 2017 (Radiation-hygienic passport of the Russian Federation). Moscow: Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Well-Being; 2018. 128 p. (In Russian).
2. Shevkun IG, Stepanov VS, Romanovich IK, Barkovsky AN, Baryshkov NK, Bratilova AA, et al. Results of radiation-hygienic passportization in the subjects of the Russian Federation for 2021 (Radiation-hygienic passport of the Russian Federation). Moscow: Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Well-Being; 2022. 125 p. (In Russian).
3. Martinuk U.N. The State Register of Measuring Instruments. Part 2. General-purpose, pulse and special dosimeters. *ANRI = ANRI*. 2020;4(103):3-13. (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. Description of the type of measuring instrument. RUMION dosimeters. Appendix to Certificate No. 64658 on type approval of measuring instruments. (In Russian).
6. Description of the type of measuring instrument. Dosimeters-radiometers DKS-96. Appendix to Certificate No. 43717 on type approval of measuring instruments. (In Russian).
7. 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).
8. X-ray and gamma radiation dosimeters DKS-AT1121, DKS-AT1121A, DKS-AT1123, DKS-AT1123A. User Manual. 69 p. (In Russian).
9. Mordasov NG, Ivaschenko DM, Chlenov AM, Astakhov AA. Modeling of methods for express determination of the energy spectrum of the bremsstrahlung radiation of electron accelerators. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki = Journal of Technical Physics*. 2004;74(9): 108-115. (In Russian).
10. Abibullaev NA, Begimkulov HH, Salihbaev US. Energy spectra and angular distribution of the bremsstrahlung radiation emitted from a thick tungsten target by electrons with an energy of 11.8 MeV. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*. 2002;92(3): 247-249. (In Russian).
11. Nurlybaev K, Martinyuk UN, Karakash AI, Sinnikov LL, Lykova EN, Galjautdinova ZZ, et al. Radiation safety in radiation therapy using electron accelerators. *ANRI = ANRI*. 2014;1: 15-21. (In Russian).
12. Abibullaev NA, Salikhbaev US. Energy spectra and angular distributions of the bremsstrahlung radiation emitted by electrons with an energy of 20 MeV from a thick tungsten target. *Izvestiya RAN = Izvestiya RAS*. 2000;64(1): 152-160. (In Russian).
13. Sakharov VK. Spectra of bremsstrahlung radiation and photoneutrons from a tungsten target of an electron accelerator with an energy of 5 – 90 MeV. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*. 2016;120(4): 228-231. (In Russian).
14. Allison J, Amako K, Apostolakis J, Arajo H, Dubois PA, Asaiet M, et al. Geant4 developments and applications. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2006;53(1): 270-278.
15. Storm E, Israel H. Cross sections of the interaction of gamma radiation (for energies 0.001 – 100 MeV and elements from 1 to 100) Handbook. Translated from English by Candidates of Technical Sciences VA Klimanov, ED Chistova. Moscow: Atomizdat; 1973. 256 p. (In Russian).
16. ICRP Publication 116. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. *Annals of the ICRP*. 2010;40(2-5): 1-257. DOI: 10.1016/j.icrp.2011.10.001.

Received: January 25, 2024

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

Sergey A. Ogorodnikov – General Director of «Scantronic Laboratory» Limited liability company, Saint-Petersburg, Russia

For citation: Barkovsky A.N., Ogorodnikov S.A. 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. Vol. 17, No. 2. P. 38–45. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2024-17-2-38-45