

Влияние свинцового фильтра на среднюю энергию фотонного излучения медицинского линейного ускорителя электронов

В статье рассматривается изменение средней энергии фотонного излучения с верхней границей спектра 6 МэВ, генерируемого медицинским линейным ускорителем электронов (далее – ЛУЭ) при прохождении излучения через свинцовые фильтры различной толщины. Расчет спектра и средней энергии фотонного излучения проводился с использованием Монте-Карло моделирования. Дополнительно производился расчет коэффициентов ослабления фотонного излучения свинцовым фильтром. Особое внимание уделяется влиянию фильтра на форму спектра. Корректность расчета определяется путем сопоставления модельных и экспериментально полученных коэффициентов ослабления по мощности кермы фотонного излучения.

Ключевые слова:

Монте-Карло моделирование, медицинский линейный ускоритель электронов, средняя энергия излучения, коэффициент ослабления по мощности кермы фотонного излучения, FLUKA.

**А.А.Загороднюк, А.Ю.Тараев,
С.В.Лазаренко, Д.И.Комар**

(Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ», г. Минск, Республика Беларусь)

Генерирующие источники импульсного фотонного излучения (далее – генерирующий источник) широко используются в различных областях науки, техники и медицины. По сравнению с обычными радионуклидными источниками, генерирующие источники с точки зрения радиационной безопасности зачастую проще в эксплуатации и обладают более низкими требованиями к физической защите [1]. Важной особенностью генерирующих источников является возможность создания высокоэнергетического фотонного излучения (с граничной энергией более нескольких МэВ) переменной интенсивности. Поэтому в последнее время наблюдается тенденция к росту количества пользователей данных типов источников.

С увеличением объектов применения генерирующих источников растет потребность в приборах дозиметрического контроля (далее – дозиметры), которые способны обеспечивать измерения в полях импульсного излучения, создаваемых этими источниками в соответствии с требованиями стандартов IEC и ISO [2,3]. Для калибровки и поверки такого типа дозиметров необходим эталонный источник импульсного излучения.

Одним из видов генерирующих источников, способных создавать импульсное поле высокоэнергетического фотонного излучения, является медицинский линейный ускоритель электронов (ЛУЭ). Он используется при определенных условиях в качестве эталонной дозиметрической установки.

Основным назначением ЛУЭ является создание больших дозовых нагрузок на органы человека [4]. По этой причине прямое его использование для калибровки и поверки дозиметра является затруднительным. Чтобы иметь возможность использовать ЛУЭ в качестве эталонной дозиметрической установки, необходимо ослабить интенсивность его излучения до значений, не превышающих верхнюю границу диапазона измерений мощности дозы дозиметра. В условиях ограниченного пространства (обычно ЛУЭ располагается в специальном помещении) самым простым и очевидным способом ослабления фотонного излучения ЛУЭ является использование фильтра, расположенного между источником излучения и дозиметром.

Для того, чтобы ЛУЭ мог использоваться в качестве эталонной дозиметрической установки, необходимо провести процедуру измерения мощности дозы, создаваемой ЛУЭ в заданной точке пространства, при помощи эталонного дозиметрического прибора. В качестве такого прибора может быть использован эталонный дозиметр, в состав которого входит ионизационная камера (далее – ИК) [5].

Исходной величиной, измеряемой при этом эталонным дозиметром, является мощность кермы в воздухе. Для перехода от мощности кермы в воздухе к операционной величине, характеризующей дозовые нагрузки (например, AMBIENTНЫЙ ЭКВИВАЛЕНТ ДОЗЫ), необходимо воспользоваться коэффициентом перехода, представленным в публикации [3], который в общем случае зависит от энергии излучения (для случая непрерывного спектра – от средней энергии излучения). Под средней энергией понимается усредненная по интенсивности энергия фотонного излучения, прошедшего через фильтр. Однако прямое измерение спектра и расчет средней энергии импульсного фотонного излучения ЛУЭ является крайне сложной задачей.

Альтернативой прямым измерениям спектра фотонного излучения ЛУЭ, прошедшего через свинцовый фильтр, является Монте-Карло моделирование. Для этого в Монте-Карло программе создается модель излучающего элемента ЛУЭ и воспроизводится геометрия реальных измерений. Такой подход позволяет рассчитать спектр фотонного излучения ЛУЭ, который впоследствии используется при расчете заданных характеристик излучения.

Для проверки результатов моделирования необходимо использовать дополнительную величину, которую можно получить экспериментально. Дополнительной величиной, позволяющей сопоставить результаты моделирования с результатами измерений, является коэффициент ослабления излучения по мощности кермы. Под коэффициентом ослабления по мощности кермы (далее – коэффициент ослабления) понимается величина, численно равная отношению отклика эталонного дозиметра на воздействие излучения при отсутствии фильтра к отклику эталонного дозиметра при наличии фильтра. В настоящей работе для прямых измерений используется эталонный дозиметр ДКС-АТ5350/1 с входящими в его

состав ИК ТМ32002 и ТМ30010 [5]. Для измерения мощности кермы в воздухе в полях высокоэнергетического фотонного излучения (средняя энергия более 2 МэВ) эталонным дозиметром ДКСАТ5350/1 в составе с ионизационными камерами ТМ30010 (объем 0,6 см³) и ТМ32002 (объем 1000 см³) использовались дополнительные колпачки из полиметилметакрилата. Дополнительный колпачок обеспечивает условие электронного равновесия при регистрации ионизационной камерой высокоэнергетического фотонного излучения. Толщина стенки дополнительного колпачка определяется из условия превышения минимального пробега вторичных заряженных частиц в материале фильтра. В настоящей работе толщина стенки дополнительного колпачка, имеющего форму сферы, при использовании ионизационной камеры ТМ32002 составляла 2,3 см. Для ИК ТМ30010 толщина колпачка составляла 4 см.

Целью настоящей работы является расчет средней энергии фотонного излучения ЛУЭ с верхней границей спектра 6 МэВ, прошедшего через свинцовый фильтр заданной толщины. Особое внимание уделяется влиянию фильтра на форму спектра фотонного излучения ЛУЭ. Для проверки результатов моделирования произведен расчет коэффициентов ослабления фотонного излучения ЛУЭ свинцовым фильтром. В работе исследуется зависимость средней энергии и коэффициента ослабления фотонного излучения ЛУЭ от толщины фильтра, а также влияние толщины фильтра на форму спектра излучения ЛУЭ.

Описание алгоритма расчета средней энергии и коэффициентов ослабления фотонного излучения фильтром

Алгоритм расчета средней энергии и коэффициентов ослабления фотонного излучения ЛУЭ свинцовым фильтром при помощи Монте-Карло моделирования описывается следующим образом:

1. В Монте-Карло программе *FLUKA* [6,7] создается модель, состоящая из источника фотонного излучения, фильтра и ионизационной камеры (рис.1). В качестве источника фотонного излучения используется модель излучателя ЛУЭ *CLINAC 2300 C/D* (рис.2) для средней энергии первичного электронного пучка, равной 6 МэВ. Фильтр представляет собой конструкцию, состоящую из держателя (передняя стенка – алюминий толщиной 1 см, задняя стенка – сталь толщиной 2 мм), в который вставляются свинцовые пластины. На расстоянии 255 см от источника излучения располагается ИК, которая представляет собой воздушную сферу радиусом 7 см, окруженную слоем полиметилметакрилата толщиной 2,3 см. Толщина слоя полиметилметакрилата подобрана таким образом, чтобы выполнялись условия электронного равновесия.

2. При постепенном увеличении толщины свинца в фильтре (при фиксированном начальном спектре фотонного излучения) программа рассчитывает энергию, поглощенную внутри активного объема ИК. Дополнительно программа рассчитывает спектр и среднюю энергию фотонного излучения, прошедшего через фильтр.

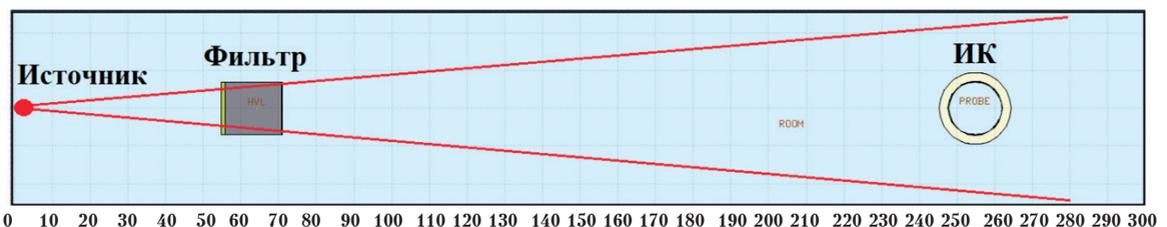


Рис.1. Геометрия Монте-Карло модели расчета коэффициента ослабления спектра фотонного излучения ЛУЭ фильтром. В качестве основной среды для моделирования была использована программа *Fluka* версии 4.2.1.

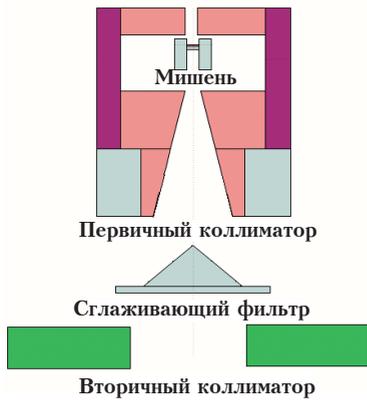


Рис.2. Схематическое изображение излучающей системы ЛУЭ CLINAC 2300 C/D – схема для средней энергии первичного электронного пучка, равной 6 МэВ.

3. Сопоставляя энергию, поглощенную в ИК при заданной толщине фильтра, и нормируя эту энергию на значение, рассчитанное для случая отсутствия фильтра, программа рассчитывает коэффициент ослабления для фиксированного начального спектра фотонного излучения. Также программа рассчитывает на основе модельного спектра среднюю энергию излучения согласно формуле:

$$\langle E \rangle = \frac{\sum_i E_i I_i}{\sum_i I_i}, \quad (1)$$

где $\langle E \rangle$ – средняя энергия излучения, E_i – энергия монолинии, I_i – относительная интенсивность монолинии в спектре.

Верификация модели излучающей системы ЛУЭ

Вкратце процесс генерирования фотонного излучения ЛУЭ можно описать следующим образом. На вольфрамовую мишень направляется параллельный пучок электронов с заданной энергией. За счет торможения электронов в материале мишени генерируется фотонное излучение с непрерывным спектром и граничной энергией, равной энергии электронного пучка. Так как электронный пучок ЛУЭ не является моноэнергетическим, а его спектр имеет форму нормального распределения, граничная энергия фотонного излучения будет выше, чем средняя энергия электронного пучка. Далее по тексту под спектром с граничной энергией 6 МэВ будет подразумеваться спектр

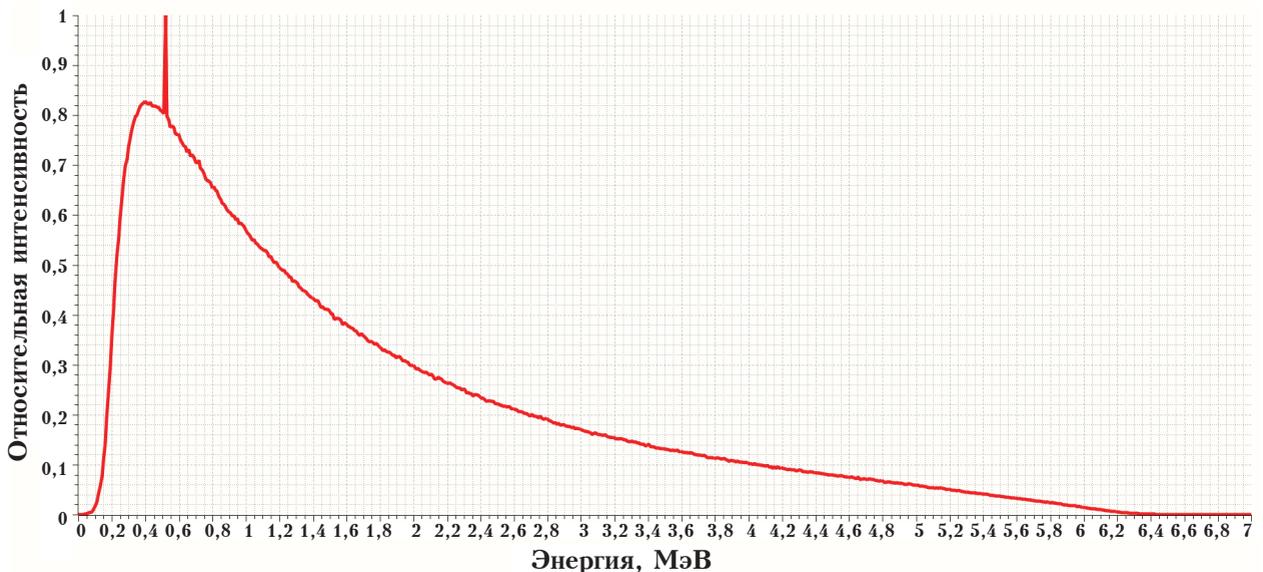


Рис.3. Модельный спектр фотонного излучения медицинского линейного ускорителя электронов CLINAC Varian 2300 C/D, нормированный на максимальное значение интенсивности – спектр с граничной энергией равной 6 МэВ.

Табл.1. Сопоставление расчетных и табличных величин, характеризующих проникающую способность фотонного излучения ЛУЭ CLINAC Varian 2300 C/D в водном фантоме.

Расчетная величина	Расчет	Документация
Положение максимума поглощенной дозы, см	1,62±0,10	1,6±0,15
Поглощенная доза на глубине 10 см (в долях от максимума)	0,66±0,10	0,67±0,10

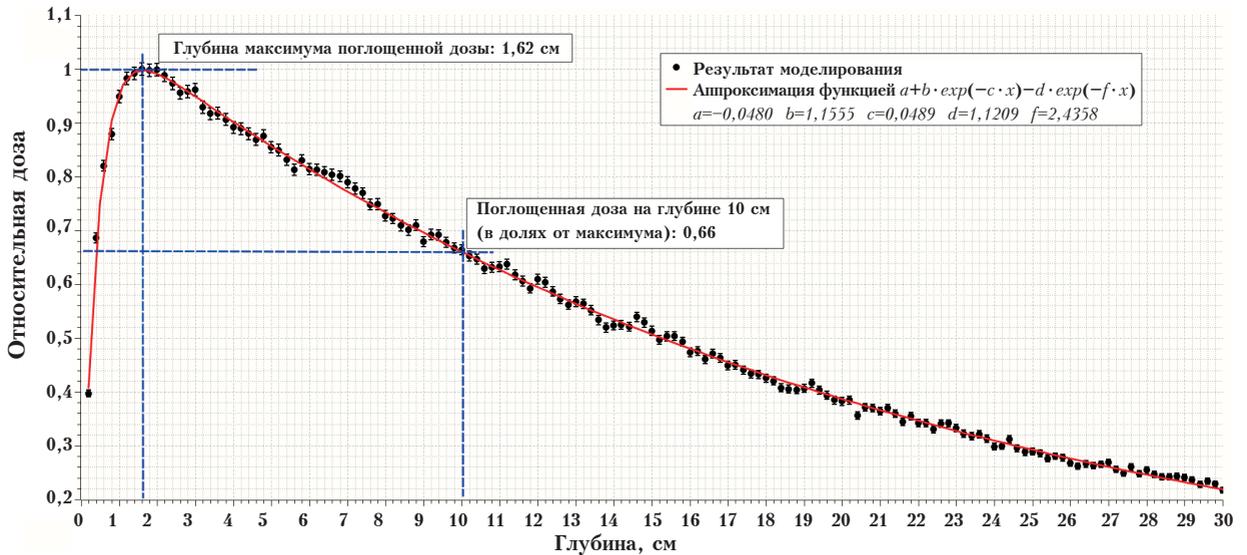


Рис.4. Кривая распределения поглощенной дозы в воде в водном фантоме по глубине (для спектра фотонного излучения с граничной энергией 6 МэВ).

фотонного излучения, генерируемый электронным пучком со средней энергией, равной 6 МэВ.

Первичное фотонное излучение попадает на сглаживающий фильтр, который «выравнивает» его интенсивность в плоскости, перпендикулярной направлению пучка. После фильтра фотонное излучение попадает во вторичную коллимирующую систему. В общем случае эта система представляет собой конструкцию, состоящую из нескольких узлов, которая задает поперечный размер и форму выходного фотонного поля.

Результат моделирования спектра фотонного излучения ЛУЭ представлен на рис.3. Как видно из рисунка, спектр фотонного излучения является непрерывным и имеет характерный пик в области 512 кэВ, соответствующий аннигиляции позитронов, рожденных в процессе образования электрон-позитронных пар.

Средняя энергия фотонного излучения для модельного спектра с граничной энергией 6 МэВ составляет 1,7 МэВ.

Верификация модельных спектров производилась путем расчета величин, характеризующих проникающую способность фотонного излучения ЛУЭ: положения максимума поглощенной дозы в воде и относительной поглощенной дозы на глубине 10 см в воде в водном фантоме. Под относительной поглощенной дозой в воде понимается отношение поглощенной дозы на заданной глубине к максимуму поглощенной дозы. Для расчета этих величин в программе *FLUKA* был создан водный фантом, который облучался модельными спектрами, с последующим построением кривой поглощенной дозы.

Далее кривая поглощения аппроксимировалась функцией вида:

$$D = a + b \times e^{-x \cdot c} - d \times e^{-x \cdot f}, \quad (2)$$

где D – поглощенная доза в воде; x – глубина, на которой рассчитывается поглощенная доза; a, b, c, d, f – коэффициенты аппроксимации.

Результаты моделирования кривой поглощенной дозы представлены на рис.4.

При помощи функции (2) определяется точное положение максимума поглощенной дозы в водном фантоме и относительная величина поглощенной дозы на глубине 10 см. Рассчитанные таким образом значения сравнивались с табличными величинами, приведенными в технической документации ЛУЭ. По размеру отклонения этих расчетных величин от табличных значений [8,9,10] делается вывод о соответствии модельных спектров реальным. Результаты сопоставления расчетных и табличных величин приведены в табл.1.

Анализируя табл.1, можно сделать вывод, что модельный фотонный спектр соответствует реальному фотонному спектру ЛУЭ и может быть использован для дальнейших расчетов.

Сравнение результатов эксперимента с расчетными значениями

Фильтр облучался фотонным излучением со спектром, соответствующим спектру фотон-

ного излучения ЛУЭ с граничной энергией 6 МэВ. Толщина свинца в фильтре варьировалась в пределах от 0 см до 15 см. При определении коэффициента ослабления в качестве опорной величины (значение поглощенной энергии в ИК, при котором коэффициент ослабления принимается равным 1) брался случай, где между источником и ИК отсутствуют любые препятствия. Далее по тексту этот случай обозначается как «zero». Подразумевается, что в этом случае отсутствуют не только свинцовые пластины, но и держатель для них. Случай, при котором между источником и ИК расположен только держатель, далее по тексту обозначается как «0 см».

Помимо точного Монте-Карло расчета с использованием геометрически достоверной модели излучающей системы ЛУЭ, дополнительно был произведен аналитический расчет. Аналитический расчет производился в предположении бесконечно узкого пучка с использованием массовых коэффициентов ослабления [11]. В данном случае ослабление излучения в фильтре происходит согласно формуле:

$$I = I_0 \times e^{-x \cdot \mu \cdot \rho}, \quad (3)$$

где I, I_0 – относительная интенсивность

Табл.2. Результаты моделирования прохождения фотонного излучения ЛУЭ через фильтр и их сравнение с экспериментом.

Толщина фильтра, см	Аналитический расчет		Монте-Карло расчет		Эксперимент
	Коэфф. ослабления	$\langle E \rangle$, кэВ	Коэфф. ослабления ± 3	$\langle E \rangle$, кэВ ± 3	
Zero	1,0	1712	1,0	1712 \pm 26	1,0
0	1,2	1820	1,2 \pm 0,1	1817 \pm 33	1,6
1	2,3	2157	2,2 \pm 0,1	2220 \pm 53	2,6
2	4,0	2360	3,7 \pm 0,2	2390 \pm 79	4,2
3	6,8	2498	6,0 \pm 0,4	2510 \pm 105	6,7
5	19,4	2691	17,1 \pm 1,6	2643 \pm 167	17,2
8	90	2878	74,3 \pm 9,3	2730 \pm 270	70
10	246	2968	216,4 \pm 44	2727 \pm 434	174
12	672	3042	552 \pm 116	2686 \pm 449	414
15	2964	3132	1364 \pm 394	2486 \pm 470	1228

излучения монолинии в спектре до и после прохождения через фильтр, x – толщина фильтра, μ – массовый коэффициент ослабления материала фильтра, ρ – плотность материала фильтра.

При аналитическом расчете коэффициент ослабления рассчитывается как отношение кермы в воздухе, создаваемой излучением до прохождения через фильтр, к керме в воздухе, создаваемой излучением, прошедшим через фильтр.

Экспериментальные значения коэффициентов ослабления фотонного излучения ЛУЭ были рассчитаны на основе измерений, произведенных при помощи эталонного дозиметра ДКС-АТ5350/1 на линейном ускорителе с характеристиками излучения, аналогичными характеристикам излучения Монте-Карло модели для случая спектра с граничной энергией 6 МэВ [12].

Результаты расчета коэффициента ослабления и средней энергии фотонного излучения ЛУЭ, прошедшего через фильтр, представлены в табл.2. Дополнительно в таблице представлены значения коэффициентов ослабления, полученных экспериментально.

Из табл.2 можно сделать вывод, что результаты расчета коэффициента ослабления методом Монте-Карло имеют удовлетворительную сходимость с результатами эксперимента, произведенного при помощи эталонного дозиметра. Максимальное отклонение средних значений для данных коэффициентов не превышает 25%. При нулевой толщине фильтра это может объясняться высокой интенсивностью поля фотонного излучения.

При сопоставлении коэффициентов ослабления, рассчитанных аналитически с результатами Монте-Карло моделирования и полученными экспериментально значениями, можно увидеть, что все три значения имеют хорошую сходимость при толщине фильтра меньшей 5 см. Увеличение расхождения меж-

ду аналитическим расчетом и результатами Монте-Карло моделирования при увеличении толщины фильтра можно объяснить двумя основными процессами. Во-первых, аналитический расчет не учитывает явление перерассеяния, при котором фотоны, рассеянные на материале фильтра, с ненулевой вероятностью могут попасть в детектор. Во-вторых, при значительной толщине фильтра все большую роль начинает играть излучение, прошедшее через вторичный коллиматор ЛУЭ. Для CLINAC 2300 C/D вторичный коллиматор представляет собой четыре бруска вольфрама толщиной 7,8 см каждый. Для спектра с граничной энергией 6 МэВ слой вольфрама толщиной 7,8 см по ослабляющей способности сопоставим со слоем свинца толщиной 12,7 см. При дальнейшем увеличении толщины фильтра вклад излучения, прошедшего через вторичный коллиматор, в суммарную интенсивность излучения возрастает. Можно предположить, что по абсолютному значению этот вклад сильно зависит от конструкции коллимирующей системы конкретного ЛУЭ.

Анализируя изменение средней энергии с ростом толщины фильтра, можно заметить, что в случае аналитического расчета средняя энергия монотонно возрастает с ростом толщины. В то же время в случае Монте-Карло моделирования средняя энергия вначале возрастает с ростом толщины фильтра, и имеет максимум при толщине фильтра, равной 8 см. При последующем увеличении толщины фильтра средняя энергия начинает уменьшаться. Как и в случае с коэффициентом ослабления, такое изменение средней энергии можно объяснить увеличением вклада излучения, прошедшего сквозь вторичный коллиматор ЛУЭ. Для более детального изучения изменения средней энергии излучения с ростом толщины фильтра необходимо проанализировать спектр излучения. Результаты аналитического расчета и Монте-Карло моделирования спектра

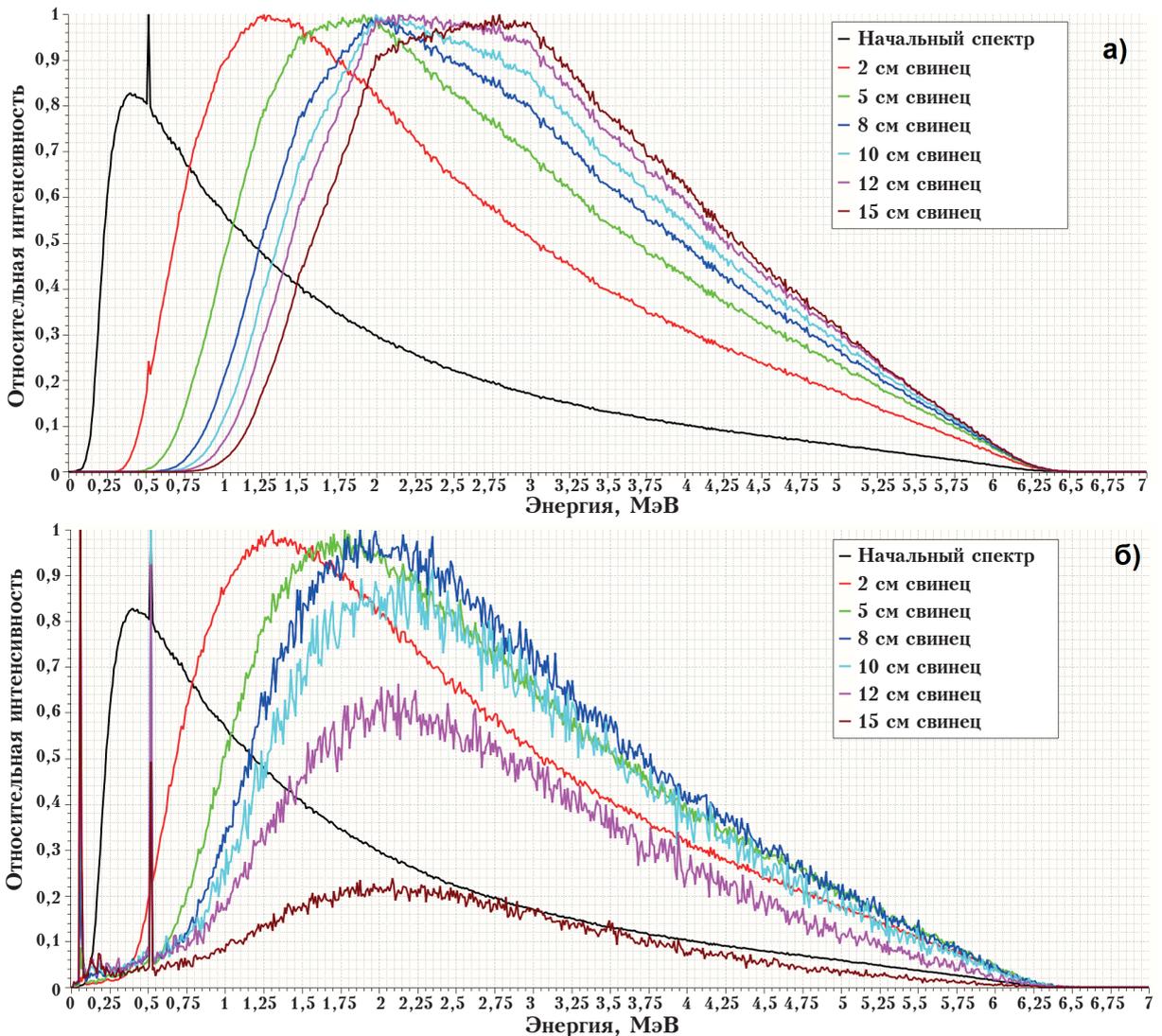


Рис.5. Изменение спектра фотонного излучения ЛУЭ при прохождении через фильтр (случай для спектра с граничной энергией 6 МэВ): а) аналитический расчет; б) Монте-Карло расчет.

фотонного излучения ЛУЭ, прошедшего через фильтр, представлены на рис.5. Дополнительно на рис.6 представлена зависимость массового коэффициента ослабления от энергии излучения для свинца и вольфрама [11].

Можно заметить, что для спектров фотонного излучения, представленных на рис.5, во всех случаях практически весь спектр расположен в энергетической области >100 кэВ. В этом энергетическом интервале (на рис.6 он обозначен как область спектра излучения) массовый коэффициент ослабления как свинца, так и вольфрама имеет локальный минимум в области энергий 2 МэВ – 5 МэВ.

Из этого следует, что интенсивность взаимодействия фотонного излучения с материалом фильтра (и с материалом вторичного коллиматора) падает с увеличением энергии излучения вплоть до 5 МэВ. Далее характер взаимодействия меняется – с ростом энергии фотонного излучения интенсивность взаимодействия начинает расти.

Как видно из рис.5, для спектра с граничной энергией 6 МэВ большая часть интенсивности излучения приходится на энергетический интервал 0,1–5 МэВ, в котором фотоны с большей энергией слабее взаимодействуют с материалом, чем фотоны с меньшей

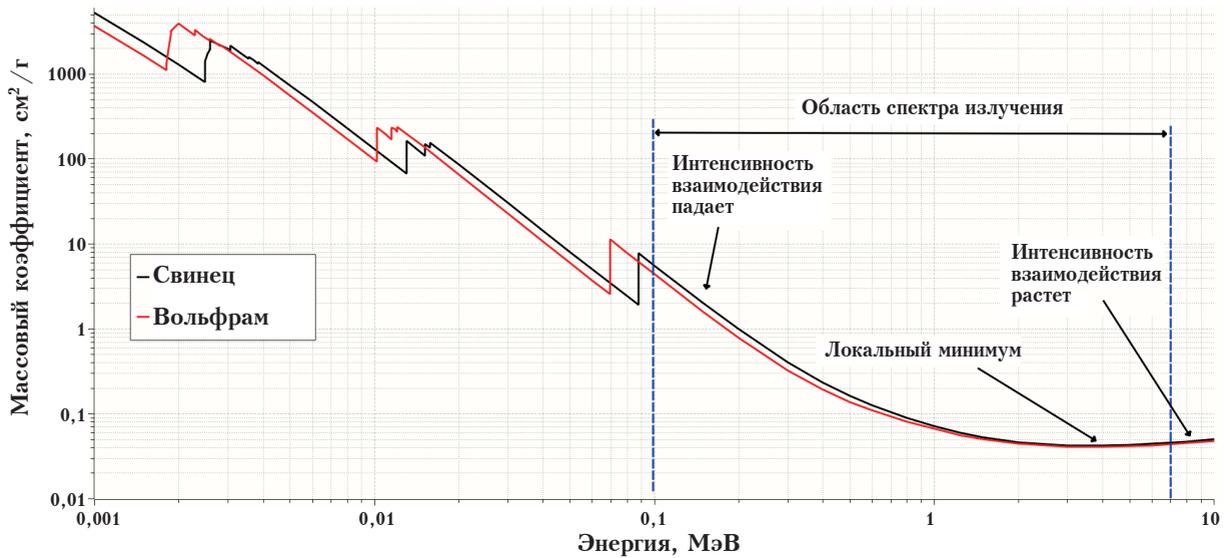


Рис. 6. Массовый коэффициент ослабления фотонного излучения для свинца и вольфрама в энергетическом интервале 1 кэВ – 10 МэВ.

энергией. Под интенсивностью излучения в данном случае понимается площадь под графиком спектра фотонного излучения в заданном энергетическом интервале.

Такое распределение по интенсивности приводит к тому, что излучение при прохождении через заданный материал (свинец или вольфрам) по мере увеличения его толщины начинает становиться жестче – левая часть спектра активнее рассеивается и поглощается в материале фильтра. Это приводит к росту средней энергии с увеличением толщины материала. С другой стороны, это приводит к тому, что максимум интенсивности излучения спектра, даже при прохождении через значительную толщину материала, все равно остается в области 0,1–5 МэВ. Данный вывод справедлив как для случая аналитического расчета, так и для Монте-Карло моделирования. Под максимумом интенсивности в настоящей работе понимается бо́льшая часть площади графика спектра излучения.

С точки зрения расчета средней энергии фотонного излучения, основное различие между аналитическим методом и Монте-Кар-

ло моделированием (этот метод максимально приближен к реальности) заключается во вторичном излучении, прошедшем сквозь вторичный коллиматор (далее – вторичное излучение). В случае аналитического расчета вторичное излучение полностью отсутствует, и спектр определяется только излучением, прошедшим через фильтр (далее – излучение прямого пучка). В случае Монте-Карло моделирования, начиная с некоторой толщины фильтра, интенсивность вторичного излучения становится сопоставимой с интенсивностью прямого пучка. Важной особенностью вторичного излучения в данном случае является его постоянная абсолютная интенсивность при заданных характеристиках ЛУЭ. По мере дальнейшего увеличения толщины фильтра интенсивность излучения прямого пучка начинает становиться меньше интенсивности вторичного излучения. Можно предположить, что, начиная с некоторой толщины фильтра, суммарное излучение ЛУЭ будет определяться исключительно вторичным излучением, которое зависит от конструкции вторичного коллиматора.

Заключение

Моделирование показывает, что свинцовый фильтр позволяет эффективно ослабить по мощности дозы фотонное излучение медицинского линейного ускорителя электронов. Так, свинцовый фильтр толщиной 10 см ослабляет излучение более чем в сто раз. Свинцовый фильтр толщиной 15 см позволяет ослабить излучение более чем в тысячу раз. Было установлено, что средняя энергия фотонного излучения ЛУЭ, прошедшего через фильтр, нелинейно зависит от его толщины. При изменении толщины фильтра в диапазоне 0–15 см средняя энергия излучения меняется в диапазоне 1,7–2,7 МэВ и имеет максимум при толщине фильтра, равной 8 см.

Это можно объяснить тем фактом, что спектр фотонного излучения ЛУЭ является непрерывным, имеет сложную форму и занимает широкий энергетический диапазон. Дополнительно следует отметить, что средняя энергия спектра фотонного излучения лежит в энергетической области, в которой массовый коэффициент ослабления фотонного излучения в случае свинца и вольфрама слабо зависит от энергии излучения. По мере прохождения через материал средняя энергия и максимум интенсивности излучения спектра смещаются в ту область, в которой массовый коэффициент ослабления практически не меняется с ростом энергии излучения.

Аналитический расчет показывает, что наличие в кривой массового коэффициента ослабления локального минимума в энергетическом интервале 2–5 МэВ (далее – точка локального минимума) приводит к тому, что средняя энергия излучения, прошедшего через фильтр, по мере увеличения его толщины, для спектра с граничной энергией 6 МэВ монотонно возрастает. Это можно объяснить тем, что максимум интенсивности излучения, смещаясь на энергетической шкале вправо, в рассматриваемом диапазоне изменения толщины филь-

тра, не пересекает точку локального минимума и всегда расположен от нее слева. Это приводит к тому, что левая часть спектра попадает в энергетические области активного взаимодействия фотонного излучения с материалом фильтра. Из-за этого по мере увеличения толщины фильтра спектр начинает «сжиматься», причем скорость «сжатия» левого края спектра выше, чем у правого края спектра.

Монте-Карло моделирование показывает, что начиная с толщины фильтра, равной 8 см, заметный вклад в выходной спектр излучения ЛУЭ вносит вторичное излучение, прошедшее через вторичный коллиматор.

По мере роста толщины фильтра этот вклад становится сопоставим с вкладом излучения прямого пучка. При этом интенсивность вторичного излучения в основном определяется конструкцией вторичного коллиматора ЛУЭ и является постоянной величиной для заданных параметров работы ускорителя. Аналитический расчет показывает, что ослабление фотонного излучения ЛУЭ вольфрамовым вторичным коллиматором (в случае *CLINAC 2300 C/D* толщина вторичного коллиматора составляет 7,8 см) сопоставимо с ослаблением, которое испытывает фотонное излучение ЛУЭ, прошедшее через слой свинца толщиной 12,7 см. Это приводит к изменению характера зависимости средней энергии излучения ЛУЭ от толщины фильтра. Средняя энергия монотонно возрастает с увеличением толщины фильтра и имеет максимум при толщине, равной 8 см. Далее, по мере увеличения толщины фильтра, средняя энергия начинает монотонно убывать.

В дальнейшем планируется произвести апробацию подхода, представленного в настоящей работе, на ЛУЭ с граничной энергией фотонного спектра, равной 18 МэВ. В теории это позволит производить калибровку и поверку дозиметров в полях импульсного фотонного излучения со средней энергией более 4 МэВ.

Результаты расчета средней энергии и коэффициента ослабления фотонного излучения ЛУЭ, полученные в данной работе, могут быть использованы как отправная точка

на пути к созданию эталонной поверочной дозиметрической установки, в основе которой лежит медицинский линейный ускоритель электронов.

Авторы публикации выражают глубокую благодарность директору предприятия «АТОМТЕХ» к.т.н. Кожемякину В.А. за полезные замечания и рекомендации при ее подготовке.

Литература

1. Мартынюк Ю.Н., Нурлыбаев К., Ревков А.А. Дозиметрия импульсного излучения // АНРИ. 2018. № 1 (92). С. 1-11.
2. IEC TS 63050:2019: Radiation protection instrumentation – Dosimeters for pulsed fields of ionizing radiation.
3. ISO 4037-1:2019: Radiological protection – X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy. Part 3. Calibration of area and personal dosimeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence.
4. J. Karzmac, «A Primer on Theory and Operation of Linear Accelerators in Radiation Therapy», *Medical Physics Pub Corp.*, 56 p., 2018.
5. Дозиметр ДКС-АТ5350/1 URL: <https://atomtex.com/ru/oborudovanie-dlya-kalibrovki-i-poverki-dozimetry-etalonnye/dozimetr-dks-at53501> (дата обращения: 20 декабря 2022 г.).
6. Fluka-4 Manual. URL: <https://flukafiles.web.cern.ch/manual/index.html> (дата обращения: 20 декабря 2022 г.).
7. В.Ж. Giuseppe, В.К. Till, С.А. Francesco, W.C. Pik, E.Q. Salvatore, F.O. Alberto, F.M. Alfredo, «Overview of the FLUKA code», *Annals of Nuclear Energy*, vol. 82, no. 1. pp. 10-18, 2015.
8. Varian High Energy Linear Accelerators Comparison Chart URL: <https://www.oncologysystems.com/resources/linear-accelerator-guides/varian-high-energy-linear-accelerators-comparison-chart> (дата обращения: 20 декабря 2022 г.).
9. В. Bednarz, G. Xu, «Monte Carlo modeling of a 6 and 18 MV Varian Clinac medical accelerator for in-field and out-of-field dose calculations: development and validation», *Phys. Med. Biol.*, vol. 54, no. 4., pp. 43-57, 2009.
10. R. Mohan, K. Jayesh, R. Joshi, «Dosimetric evaluation of 120-leaf multileaf collimator in a Varian linear accelerator with 6-MV and 18-MV photon beams», *J. Med. Phys.*, vol. 33, no. 3. pp. 114-118, 2008.
11. Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements $Z = 1$ to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest. URL: <https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients> (дата обращения: 20 декабря 2022 г.).
12. H.J. Choi, H. Park, C.Y. Yi, «Determining the energy spectrum of clinical linear accelerator using an optimized photon beam transmission protocol», *J. Med. Phys.*, vol. 46, no. 3, pp. 3285-3297, 2019.

Determination of Effect of a Lead Filter on the Average Energy of Photon Radiation of a Medical Linear Electron Accelerator

Zaharadniuk Aliaksei, Taraev Aleksandr, Lazarenko Sergey, Komar Damian (ATOMTEX SPE, Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article considers the change in the average energy of photon radiation with the upper limit of the spectrum of 6 MeV, generated by a medical linear electron accelerator (or *LINAC* for short), when radiation passes through a lead filter of various thicknesses. The calculation of the spectrum and average energy of photon radiation is carried out using Monte Carlo modelling. Additionally, the coefficients of attenuation of photon radiation by a lead filter are calculated. Particular attention is paid to the influence of the filter on the shape of the spectrum. The validation of the calculation is determined by comparing the model and experimentally obtained attenuation coefficients for kerma.

Key words: *Monte Carlo modelling, medical linear electron accelerator, kerma power attenuation coefficient, FLUKA.*

А.А. Загороднюк (инж.), А.Ю. Тараев (вед. инж.), С.В. Лазаренко (вед. инж.), Д.И. Комар (вед. инж.) – Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ», г. Минск, Республика Беларусь.

Контакты: тел. +375 29 171-13-72; e-mail: zaharadniuk_aa@atomtex.com.