

Оценка характеристик полей фотонного излучения медицинских линейных ускорителей электронов различных производителей

В статье представлена оценка характеристик полей импульсного фотонного излучения, генерируемого медицинскими линейными ускорителями электронов Varian Clinac iX, Elekta Infinity, Varian VitalBeam. Их технические характеристики, а именно: средняя энергия излучения, длительность и частота следования импульсов, мощность амбиентного эквивалента дозы в импульсе изучаются с точки зрения использования медицинского линейного ускорителя электронов в качестве источника поля импульсного фотонного излучения, пригодного для калибровки дозиметрического оборудования. Расчет средней энергии фотонного излучения производится при помощи Монте-Карло моделирования. Измерение мощности амбиентного эквивалента дозы, генерируемой ускорителем в заданной точке, обеспечивается эталонным дозиметром ДКС-АТ5350/1. Определение длительности единичного импульса и частоты следования импульсов осуществляется путем прямых измерений блоком детектирования импульсного фотонного излучения БДКГ-206.

Ключевые слова:

Монте-Карло моделирование, линейный ускоритель электронов, импульсное фотонное излучение, FLUKA, частота, длительность импульсов, средняя энергия.

**А.Ю.Тараев, А.А.Загороднюк,
М.А.Богдан, С.В.Лазаренко**

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

В текущий момент в промышленности увеличивается количество оборудования, которое генерирует сопутствующее непрерывное и импульсное фотонное излучение. В связи с этим увеличивается потребность в приборах дозиметрического контроля радиационной обстановки на рабочих местах, способных работать в данных полях.

Приборы радиационного дозиметрического контроля, выпускаемые в настоящее время для работы в полях импульсного фотонного излучения, имеют ряд существенных ограничений как по частоте повторения и длительности импульса, так и по предельной мощности дозы в импульсе. Поэтому для правильной интерпретации результатов измерений необходимо точно знать характеристики полей импульсного излучения, в которых калибруется прибор.

Для корректной калибровки таких приборов необходимы устройства, способные генерировать поля импульсного фотонного излучения с заданными характеристиками. В качестве таких устройств, генерирующих высокоэнергетические поля импульсного фотонного излучения, в работе [1] было предложено использовать медицинские линейные ускорители электронов (далее – ЛУЭ). При этом основной акцент исследования делался на изучение спектрометрических и дозиметрических характеристик ЛУЭ, используемых в качестве источника фотонного излучения. Для уменьшения интенсивности излучения ЛУЭ до значений, попадающих в диапазон измерений дозиметрического оборудования, в работе [1] использовался свинцовый фильтр, который существенно влияет на спектр и среднюю энергию излучения.

Однако для возможности использования ЛУЭ в качестве источника поля импульсного фотонного излучения, пригодного для калибровки дозиметрического оборудования, помимо спектра и средней энергии необходимо также знать длительность импульса излучения и частоту повторения этих импульсов [2-4]. Эти характеристики необходимы для определения мощности дозы в импульсе, генерируемой ЛУЭ в заданной точке пространства (далее – точка измерения). Многие приборы, выпускаемые для работы в импульсных полях, имеют ограничение по этому параметру. Например, дозиметр рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1123 [5] имеет ограничение по мощности дозы в импульсе, равное 1,3 Зв/с.

Целью работы являлось определение основных характеристик поля фотонного излучения ЛУЭ, а именно: средней энергии излучения, длительности импульса излучения, частоты следования импульсов, мощности дозы в импульсе и мощности дозы, генерируемой ЛУЭ в точке измерения для оценки возможности

использования ЛУЭ в качестве источника поля импульсного фотонного излучения при калибровке дозиметрического оборудования. Оценка возможности использования ЛУЭ в качестве источника поля импульсного излучения для калибровки дозиметрического оборудования производилась путем сравнения характеристик поля излучения в точке измерения с техническими характеристиками дозиметра ДКС-АТ1123.

В работе исследовались характеристики поля фотонного излучения ЛУЭ для следующих режимов работы: 6 МВ, 10 МВ, 15 МВ, 18 МВ. Под режимом работы ЛУЭ в настоящей статье понимается номинальное значение ускорительного напряжения первичного электронного пучка, падающего на мишень ЛУЭ. После взаимодействия такого пучка с материалом мишени на выходе ЛУЭ генерируется фотонное излучение с непрерывным спектром и граничной энергией, равной максимальной энергии электронов в первичном пучке.

Прямые измерения длительности импульса и частоты следования импульсов проводились на следующих ЛУЭ: Elekta Infinity (режимы 6 МВ, 10 МВ, 15 МВ), Varian VitalBeam (режимы 6 МВ, 10 МВ, 15 МВ), Varian Clinac iX (режим 18 МВ). Средняя энергия фотонного излучения рассчитывалась при помощи Монте-Карло моделирования в программе FLUKA версии 4.1.3 [6,7].

Расчет средней энергии фотонного излучения ЛУЭ

Расчет средней энергии фотонного излучения ЛУЭ в точке измерения для различных режимов работы ускорителей проводился методом Монте-Карло моделирования в компьютерной программе FLUKA версии 4.1.3.

Средняя энергия фотонного излучения ЛУЭ необходима для определения коэффициента пересчета кермы в воздухе в заданную операционную величину [8] (в настоящей работе

Табл.1. Сопоставление паспортных значений z_{max} и d_{10} ЛУЭ с расчетными данными.

Модель ЛУЭ	Режим работы							
	6 МВ		10 МВ		15 МВ		18 МВ	
	z_{max} , см	d_{10} , %	z_{max} , см	d_{10} , %	z_{max} , см	d_{10} , %	z_{max} , см	d_{10} , %
VitalBeam	1,60 ±0,15	67,0 ±1,0	2,40 ±0,15	74,1 ±1,0	2,90 ±0,15	77,4 ±1,0	3,30 ±0,15	80,2 ±1,0
Clinac iX	1,60 ±0,15	67,2 ±1,0	2,40 ±0,15	74,1 ±1,0	2,90 ±0,15	77,4 ±1,0	3,30 ±0,15	80,2 ±1,0
Elekta Infinity	1,50 ±0,15	67,5 ±1,0	2,10 ±0,15	73,0 ±1,0	2,60 ±0,15	76,5 ±1,0	3,00 ±0,15	78,5 ±1,0
Монте-Карло модель	1,62 ±0,10	66,0 ±2,0	2,20 ±0,15	72,0 ±2,0	2,70 ±0,15	76,5 ±2,0	3,10 ±0,20	80,0 ±2,0

в качестве операционной величины используется амбиентный эквивалент дозы $H^*(10)$.

Одними из основных характеристик качества фотонного излучения ЛУЭ, согласно [9], являются: положение максимума поглощенной дозы в водном фантоме z_{max} и относительная величина поглощенной дозы на глубине 10 см в водном фантоме d_{10} . При схожести данных характеристик у различных ЛУЭ (при условии, что ЛУЭ работают в одинаковом режиме) фотонное излучение будет иметь схожий энергетический спектр. Можно предположить, что фотонное излучение со схожими z_{max} и d_{10} имеет близкие по величине значения средней энергии. Как следствие, одна обобщенная компьютерная модель излучателя при расчете средней энергии фотонного излучения будет описывать все реальные ЛУЭ, значения z_{max} и d_{10} для которых совпадают с расчетными значениями данной модели (при заданном режиме работы ЛУЭ).

В настоящей работе были построены четыре модели излучателя ЛУЭ, соответствующие четырем рассматриваемым режимам работы ускорителя: 6 МВ, 10 МВ, 15 МВ, 18 МВ. Верификация моделей производилась путем определения значений z_{max} и d_{10} с последующим сравнением данных характеристик с паспортными данными ускорителей [10-12]. Результаты сопоставления расчетных и паспортных величин приведены в табл.1.

Анализируя табл.1, можно сделать вывод, что значения z_{max} и d_{10} , рассчитанные при помощи Монте-Карло моделирования, имеют хорошее согласие с паспортными данными ускорителей. Дополнительно следует отметить, что согласно стандарту [8] значения коэффициентов перевода кермы в амбиентный эквивалент дозы α (далее – коэффициент α) в энергетическом интервале 1,5 МэВ – 4,5 МэВ слабо зависят от энергии фотонного излучения (различие в значениях коэффициентов для данного энергетического интервала не превышает 5%). Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что Монте-Карло модели излучателей ЛУЭ, представленные в настоящем разделе, могут быть использованы для расчета средней энергии фотонного излучения и последующего определения коэффициента α .

Расчет средней энергии фотонного излучения ЛУЭ при помощи Монте-Карло моделирования описывается следующим образом:

- в программе FLUKA строится модель излучателя ЛУЭ, состоящая из мишени, сглаживающего фильтра и системы коллиматоров;
- на выходе излучателя располагается модель ослабляющего фильтра, состоящего из свинцового сердечника заданной толщины, расположенного между двумя обкладками держателя (передняя обкладка – алюминий толщиной 1 см, задняя обкладка – сталь толщиной 2 мм);

- на расстоянии 2000 мм от передней плоскости ослабляющего фильтра располагается детектор. Детектор представляет собой цилиндрическую область пространства с радиусом основания, равным 45 мм, и толщиной 2 мм;
- программа рассчитывает спектр фотонного излучения, прошедшего через детектор при заданной толщине ослабляющего фильтра.

Далее спектр излучения усредняется по интенсивности согласно формуле:

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

где E_i – энергия заданного канала спектра; I_i – интенсивность излучения в заданном канале спектра.

Схема Монте-Карло модели представлена на рис.1. Результаты Монте-Карло расчета представлены в табл.2.

Исходя из результатов моделирования, можно сделать вывод, что с ростом толщины свинца средняя энергия прошедшего через фильтр излучения увеличивается. Однако начиная с некоторой толщины свинца, средняя энергия начинает уменьшаться и стремится к постоянному значению. Это связано с тем, что спектр фотонного излучения ЛУЭ имеет широкий энергетический диапазон, а интенсивность взаимодействия фотонного излучения со свинцом имеет выраженную энергетическую зависимость. Как следствие, средняя энергия фотонного излучения ЛУЭ, прошедшего через фильтр, будет определяться интенсивностью взаимодействия его правого и левого края спектра. С ростом толщины свинца в фильтре интенсивность взаимодействия левого края спектра сравнивается с интенсивностью взаимодействия правого края спектра.

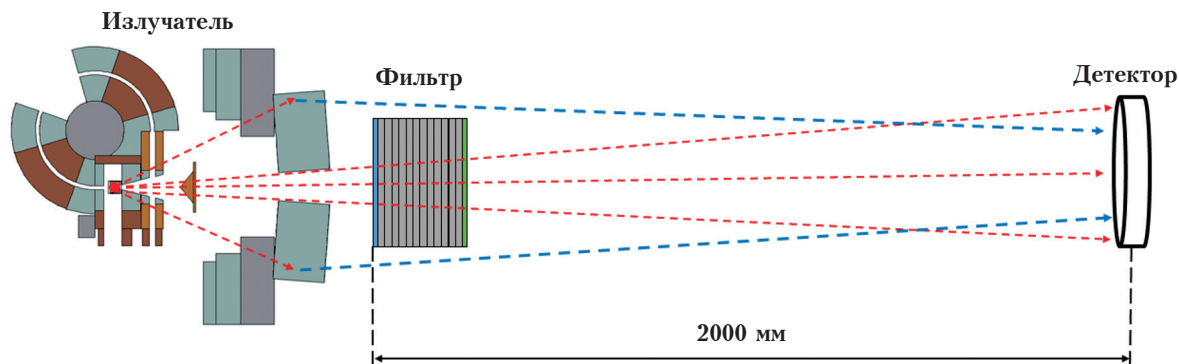


Рис.1. Схема Монте-Карло модели для определения средней энергии фотонного излучения ЛУЭ (на рисунке представлена модель излучателя для режима работы 6 МВ). Красными стрелками обозначено излучение прямого пучка. Синими стрелками обозначено излучение, рассеянное на вторичном коллиматоре.

Табл.2. Результат расчета средней энергии фотонного излучения ЛУЭ, прошедшего через свинцовый фильтр заданной толщины, для различных режимов работы ЛУЭ.

Толщина свинца в фильтре, см	Средняя энергия рентгеновского излучения ЛУЭ, МэВ ± 3σ			
	Режим 6 МВ	Режим 10 МВ	Режим 15 МВ	Режим 18 МВ
0	1712±26	2508±30	3823±39	4217±44
5	2643±167	3562±123	4110±127	4355±139
8	2730±270	3592±220	3907±201	4072±195
10	2727±434	3534±373	3727±320	3852±281
12	2686±449	3376±357	3489±323	3586±273
15	2486±470	2872±347	293±295	3084±231

Это приводит к равномерному «сжиманию» спектра с левого и правого края. Подробный анализ зависимости средней энергии от толщины свинца в фильтре произведен в работе [1].

Вторым механизмом, влияющим на среднюю энергию с ростом толщины свинца в фильтре, является фотонное излучение, рассеянное на вторичном коллиматоре. При стандартном использовании ЛУЭ в качестве медицинского аппарата интенсивность излучения, рассеянного на вторичном коллиматоре, пренебрежимо мала по сравнению с интенсивностью фотонного излучения прямого пучка. Однако при использовании свинцового фильтра, начиная с некоторой его толщины, интенсивность излучения ЛУЭ, прошедшего через фильтр, становится сравнимой с интенсивностью излучения, прошедшего через вторичный коллиматор. Как следствие, начиная с некоторой толщины фильтра, при дальнейшем ее увеличении средняя энергия фотонного излучения будет стремиться к некоторой постоянной величине.

Для подтверждения этого предположения был поставлен следующий эксперимент. В точке измерения на расстоянии 2000 мм от излучателя ЛУЭ, на специальной подставке располагалась ионизационная камера (далее ИК) ТМ32002 (либо ТМ30010, в зависимости от интенсивности излучения), входящая в состав эталонного дозиметра ДКС-АТ5350/1 [13], работающего в режиме измерения мощности кермы в воздухе. Для заданного режима работы ЛУЭ измерялись показания дозиметра в зависимости от толщины фильтра. Было установлено, что для ЛУЭ Elekta Infinity (режим работы 6, 10, 15 МВ) и для ЛУЭ Varian Clinac iX (режим 18 МВ) при толщине свинца в фильтре большем, чем 20 см, показания дозиметра переставали изменяться с ростом толщины фильтра.

Расчет мощности амбиентного эквивалента дозы

Расчет мощности амбиентного эквивалента дозы $\dot{H}^*(10)$ (далее – МАЭД), генерируемого ЛУЭ в точке измерения на расстоянии 2000 мм от излучателя, производился согласно следующей формуле:

$$\dot{H}^*(10) = \dot{K}_{air} \cdot \alpha(E) \cdot \gamma(E), \quad (2)$$

где \dot{K}_{air} – мощность кермы в воздухе, Гр/ч; $\alpha(E)$ – коэффициент перевода кермы в воздухе в амбиентный эквивалент дозы, Зв/Гр; $\gamma(E)$ – поправочный множитель ИК; E – средняя энергия фотонного излучения, МэВ.

Определение мощности кермы в воздухе, генерируемой ЛУЭ в точке измерения, проводилось эталонным дозиметром ДКС-АТ5350/1 с входящими в его состав ИК ТМ32002 и ТМ30010. Измерения проводились для следующих ЛУЭ: Elekta Infinity (режимы: 6 МВ, 10 МВ, 15 МВ), Varian VitalBeam (режимы: 6 МВ, 10 МВ, 15 МВ), Varian Clinac iX (режим 18 МВ). Излучающий элемент ускорителей размещался параллельно полу. Поперечный размер поля фотонного излучения на расстоянии 1 метр от мишени ЛУЭ составлял 15×15 см. Размер поля был выбран таким образом, чтобы излучение прямого пучка ЛУЭ по мере его прохождения через свинцовый фильтр не выходило через его боковую поверхность. Свинцовый фильтр размещался на выходе излучателя ЛУЭ на специальном держателе, закрепленном на излучателе. На расстоянии 2000 мм от излучателя на штативе располагалась ИК, входящая в состав дозиметра ДКС-АТ5350/1. На ЛУЭ выставлялись различные значения мощности дозы в мониторинговых единицах, отдаваемых за минуту. Схема эксперимента представлена на рис.2.

Расчет МАЭД производился для различных толщин свинцового фильтра и различных режимов работы ЛУЭ. В данном случае под режимом работы ЛУЭ понимается не только



Рис.2. Экспериментальное измерение дозиметрических характеристик поля фотонного излучения ЛУЭ, прошедшего через свинцовый фильтр. На рисунке приведен случай для фильтра толщиной 15 см при измерениях на ЛУЭ Elekta Infinity. Аналогичные измерения были произведены на ЛУЭ Varian VitalBeam и Varian Clinac iX.

Табл.3. Результаты расчета МАЭД при различной толщине свинца для заданного режима работы ЛУЭ (минимальная интенсивность излучения).

Толщина свинца в фильтре, см	Elekta Infinity			Varian VitalBeam, Varian Clinac iX			
	6 МВ 40 МЕ, Зв/ч	10 МВ 40 МЕ, Зв/ч	15 МВ 40 МЕ, Зв/ч	6 МВ 60 МЕ, Зв/ч	10 МВ 60 МЕ Зв/ч	15 МВ 60 МЕ, Зв/ч	18 МВ 100 МЕ, Зв/ч
0	3,59	3,17	3,12	6,17	6,33	6,13	10
5	0,23	0,207	0,212	0,359	0,430	0,422	0,6535
8	0,055	0,049	0,050	0,085	0,101	0,100	0,157
10	0,021	0,020	0,020	0,034	0,040	0,039	0,063
12	0,0087	0,0082	0,0083	0,0143	0,0161	0,0162	0,0273
15	0,0026	0,0026	0,0026	0,0049	0,0049	0,0052	0,0105

номинальное значение ускорительного напряжения первичного пучка, но и мощность дозы, отпускаемая ЛУЭ. Под мощностью дозы, отпускаемой ЛУЭ, понимается значение, выраженное в мониторных единицах (далее – МЕ) в минуту, которое показывает контрольная ИК, встроенная в излучатель ЛУЭ. Под мониторной единицей понимается доза, поглощенная в водном фантоме на расстоянии 1 метр от излучателя и на глубине 10 см от поверхности при его облучении излучением ЛУЭ, выраженная в сантигреях (сГр) и равная 1 сГр [14]. Результаты расчета МАЭД с указанием режима работы и мощности дозы, отпускаемой ЛУЭ, приведены в табл.3 для

минимальной интенсивности излучения (при отпускаемой мощности дозы <100 МЕ в минуту) и в табл.4 для максимальной интенсивности излучения (при отпускаемой мощности дозы >600 МЕ в минуту).

Результаты расчета показывают, что свинцовый фильтр позволяет эффективно ослаблять излучение по мощности амбиентного эквивалента дозы, генерируемой ЛУЭ в точке измерения до значений, которые попадают в диапазон измерения дозиметра ДКС-АТ1123. Согласно техническим характеристикам, диапазон измерения МАЭД у данного дозиметра составляет 0,1 мкЗв/ч – 10 Зв/ч. Из табл.3 можно сделать вывод, что МАЭД, генерируемая

Табл.4. Результаты расчета МАЭД при различной толщине свинца для заданного режима работы ЛУЭ (высокая интенсивность излучения).

Толщина свинца в фильтре, см	Elekta Infinity			Varian VitalBeam, Varian Clinac iX			
	6 МВ 640 МЕ, Зв/ч	10 МВ 640 МЕ, Зв/ч	15 МВ 640 МЕ, Зв/ч	6 МВ 600 МЕ, Зв/ч	10 МВ 600 МЕ, Зв/ч	15 МВ 600 МЕ, Зв/ч	18 МВ 600 МЕ, Зв/ч
0	61,32	50,29	49,38	61,71	63,33	61,36	60,42
5	3,85	3,19	3,33	3,46	4,11	4,06	3,92
8	0,911	0,751	0,789	0,849	0,998	0,994	0,934
10	0,361	0,310	0,319	0,340	0,399	0,393	0,376
12	0,146	0,126	0,130	0,142	0,161	0,160	0,161
15	0,043	0,040	0,042	0,049	0,49	0,052	0,063

Табл.5. Результаты измерения длительности импульса и частоты следования импульсов для ЛУЭ Elekta Infinity.

Мощность дозы, МЕ/мин	Частота следования импульсов, Гц		
	6 МВ Длительность импульса 1,8±0,2 мкс	10 МВ Длительность импульса 2,1±0,2 мкс	15 МВ Длительность импульса 2,2±0,2 мкс
40	26,5±0,2	12,0±0,1	12,3±0,1
80	51,5±0,5	24,0±0,2	24,5±0,2
160	101,5±1,0	48,0±0,5	49,5±0,5
320	203,0±2,0	96,5±1,0	99,0±1,0
640	405,0±4,0	194±2,0	198,5±2,0

ЛУЭ, в точке измерения для всех рассматриваемых режимов работы при отпускаемой мощности дозы <100 МЕ в минуту попадает в этот диапазон. Из данных табл.4 следует, что при отпускаемой мощности дозы >600 МЕ в минуту производить измерения дозиметром ДКС-АТ1123 можно только при использовании свинцового фильтра толщиной от 5 см. Однако, как будет показано далее, без учета импульсного характера излучения ЛУЭ, этот вывод является некорректным.

Измерение длительности и частоты импульсов фотонного излучения ЛУЭ

Экспериментальное определение длительности импульса и частоты следования импульсов фотонного излучения ЛУЭ осуществлялось путем прямых измерений при помощи блока детектирования БДКГ-206. Технические характеристики блока позволяют проводить такие

измерения при условии, что сигналы периодические. Блок регистрирует импульсы и измеряет их длительность с точностью 34 нс за период измерения 200 мс и выводит полученные значения на ПК. Компаратор, определяющий сигнал, настроен на 50%-й уровень амплитуды импульса. Пример осциллограммы измерения длительности импульса представлен на рис.3. Результаты измерений – в табл. 5 и 6.

Для подтверждения полученных данных измерения частоты следования импульсов фотонного излучения ЛУЭ дополнительно для нескольких выбранных режимов работы ускорителей были проведены аналогичные измерения с помощью устройства детектирования гамма-излучения УДКГ-37 [15], работающего в токовом режиме фотovoltaического канала, который позволяет эффективно измерять среднюю мощность дозы импульсного излучения. Измерение зарегистрированной УДКГ-37

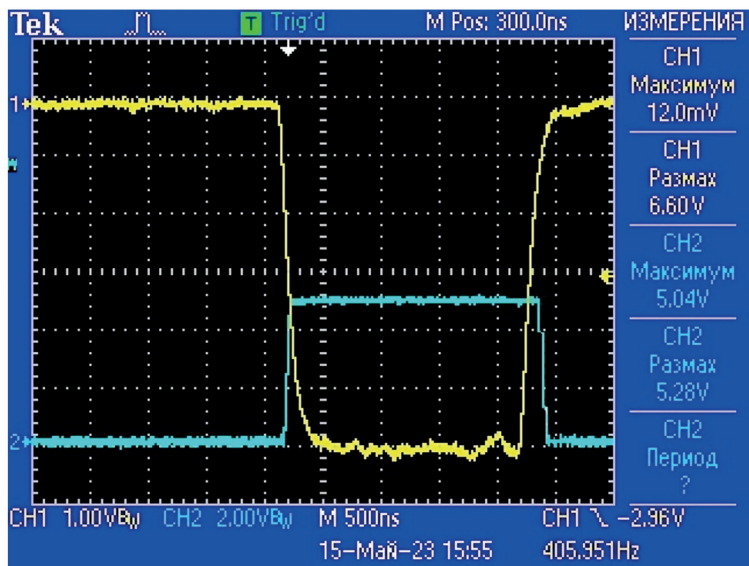


Рис.3. Осциллограмма измеряемого импульса (желтый канал) и полученного сигнала с компаратора (синий канал).

частоты импульсов осуществлялось с помощью осциллографа на первичной интегрирующей цепи измерительного канала при постоянной времени интегрирования 4 мс. Таким образом, возможно точно определить частоту следования импульсов до 25 кГц, а также длительность импульсов не менее 4 мс. Данное ограничение в УДКГ-37 позволяет анализировать лишь частоту повторения импульсов

ЛУЭ, так как длительность их импульсов составляет единицы микросекунд. Следует отметить, что на сегодняшний день существует крайне малое количество приборов, способных измерять длительности импульсов менее микросекунды, так как это требует высокоскоростной обработки сигнала. Это актуальный вопрос, но в большей степени касается измерения параметров других установок

Табл.6. Результаты измерения длительности импульса и частоты следования импульсов для ЛУЭ Varian VitalBeam, Varian Clinac iX.

Мощность дозы, МЕ/мин	Частота следования импульсов, Гц		
	6 МВ и 10 МВ (VitalBeam) Длительность импульса 3,3±0,3 мкс	15 МВ (VitalBeam) Длительность импульса 3,4±0,3 мкс	18 МВ (Clinac iX) Длительность импульса 3,4±0,3 мкс
5	3,0±0,1	-	-
10	6,0±0,1	-	-
15	9±0,1	-	-
20	12,0±0,1	6,0±0,1	-
40	23,0±0,2	12,0±0,1	-
60	36,0±0,4	18,0±0,2	-
100	60,0±0,5	30,0±0,3	29,7± 0,3
200	119,0±1,0	60,0±0,5	59,7±0,5
300	179,0±1,5	89,0±1,0	89,6±1,0
400	239,0±2,0	119,0±1,0	119,3±1,0
500	320,0±3,0	149±1,5	149±1,5
600	358,0±4,0	179,0±1,5	179±1,5

Табл.7. Результаты измерения частоты следования импульсов для ЛУЭ Elekta Infinity и Varian Clinac iX для заданных режимов работы с помощью устройства детектирования гамма-излучения УДКГ-37.

Мощность дозы, МЕ/мин	Частота следования импульсов, Гц			
	Elekta Infinity 6 MB	Elekta Infinity 10 MB	Elekta infinity 15 MB	Vatian CLINAC iX 18 MB
40	25	12,2	12,5	-
80	50	24,3	25	-
100	-	-	-	30
160	100	48,6	50	-
300	-	-	-	90
320	200	97,3	100	-
600	-	-	-	180
640	400	194,6	200	-

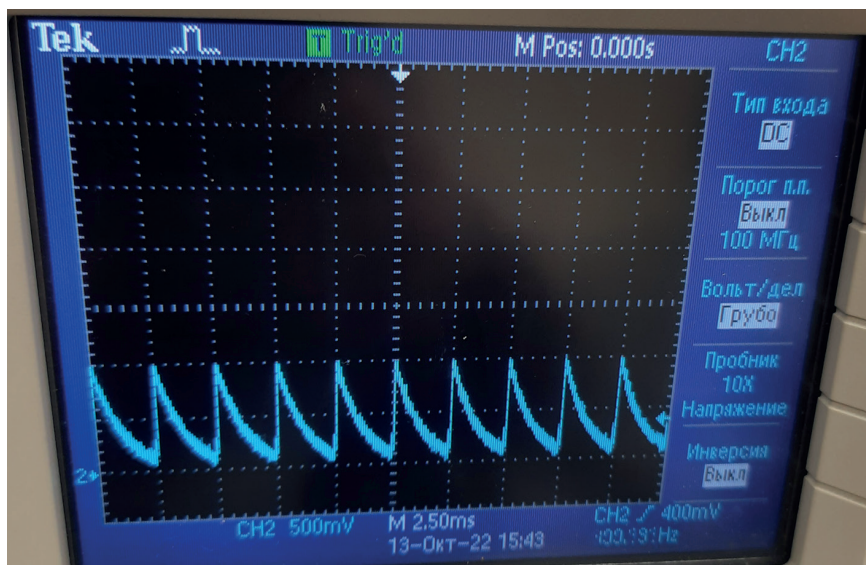


Рис.4. Осциллограмма частоты следования импульсов ЛУЭ Elekta Infinity в режиме работы 6 MB при мощности дозы 640 МЕ/мин, снятая с помощью устройства детектирования гамма-излучения УДКГ-37.

импульсного действия, таких как рентгеновские аппараты, генерирующие наносекундные импульсы. Осциллограмма одного из измеряемых импульсов, снятая с помощью устройства детектирования гамма-излучения УДКГ-37, представлена на рис.4. Результаты измерения частоты следования импульсов для ЛУЭ Elekta Infinity и Varian Clinac iX с помощью устройства детектирования гамма-излучения УДКГ-37 представлены в табл.7.

Анализируя результаты измерения частоты следования импульсов, представленные в табл. 5–7, можно сделать вывод о том, что

значения, измеренные с помощью БДКГ-206 и УДКГ-37 при одинаковых режимах работы ЛУЭ имеют хорошее согласие. Измеренные значения частот ЛУЭ при мощности отпускаемой дозы большей, чем 40 МЕ/мин, попадают в диапазон измерений, отвечающий техническим характеристикам дозиметра ДКС-АТ1123. Для данного дозиметра нижняя граница измерения импульсного излучения составляет 10 Гц.

Анализ измеренных значений длительности и частоты следования импульсов на ЛУЭ различных производителей показывает их разли-

Табл. 8. МАЭД в импульсе для различных значений примененного свинцового фильтра на расстоянии 2000 мм от излучателя.

Толщина свинца в фильтре, см	Electa Infinity			Varian VitalBeam, Varian Clinac iX			
	6 МВ, Зв/с	10 МВ, Зв/с	15 МВ, Зв/с	6 МВ, Зв/с	10 МВ, Зв/с	15 МВ, Зв/с	18 МВ, Зв/с
0	22,4	41,1	33,7	14,7	14,8	28,6	27,5
5	1,418	2,395	2,252	0,845	0,996	1,907	1,789
8	0,337	0,573	0,536	0,203	0,239	0,458	0,428
10	0,132	0,234	0,216	0,081	0,094	0,181	0,172
12	0,054	0,094	0,087	0,033	0,037	0,073	0,074
15	0,016	0,029	0,028	0,012	0,011	0,024	0,028

чие при одних и тех же установленных значениях отпущаемой мощности дозы (МЕ/мин). Так как конструкции основных внутренних узлов излучателей ЛУЭ у каждого производителя для различных моделей схожи между собой, то можно с большой долей вероятности полагать, что частоты и длительности фотонного излучения будут одинаковы для модельного ряда одного производителя.

Определение МАЭД в импульсе

Опираясь исключительно на результаты, приведенные в табл. 3 и 4, можно сделать вывод о том, что ЛУЭ можно использовать для калибровки дозиметрического оборудования без использования свинцового фильтра. Однако данный вывод будет неверным ввиду того, что результаты табл. 3 и 4 не учитывают импульсный характер излучения ЛУЭ. Учет импульсного характера излучения ЛУЭ может быть сделан путем расчета дополнительной величины, а именно мощности амбиентного эквивалента дозы в импульсе.

Расчет МАЭД в импульсе в точке измерения на расстоянии 2000 мм от излучателя производился согласно формуле:

$$\dot{H}_i = \frac{\dot{H}^*(10)}{f \cdot \tau \cdot 3600}, \quad (3)$$

где $\dot{H}^*(10)$ – мощность амбиентного эквивалента дозы, генерируемая ЛУЭ в точке измерения, Зв/ч; f – частота следования импульсов, Гц; τ – длительность импульса, с.

Расчитанные таким образом значения МАЭД в импульсе сравнивались с указанными техническими характеристиками дозиметра ДКС-АТ1123 и блока детектирования БДКГ-206. Эти приборы предназначены для работы, в том числе и в импульсных полях, при МАЭД в импульсе до 1,3 Зв/с. Результаты расчета приведены в табл. 8.

Анализируя результаты, приведенные в табл. 8, можно сделать вывод, что без использования фильтра и при толщине фильтра менее 5 см для ряда режимов работы ЛУЭ значение МАЭД в импульсе, генерируемое ускорителем в точке измерения, превышает 1,3 Зв/с, что выходит за границы диапазона измерений дозиметра ДКС-АТ1123.

Это показывает на практике необходимость использования свинцового фильтра при калибровке дозиметрического оборудования в фотонных полях, генерируемых ЛУЭ, а также определения параметров импульсного излучения для корректной интерпретации получаемых измерений.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что МАЭД в импульсе является фиксированной величиной, которая зависит от ускорительного напряжения ЛУЭ и используемых в излучателе сглаживающих фильтров и не зависит от частоты следования импульсов.

Дополнительно следует отметить, что при использовании ЛУЭ в качестве источника

поля импульсного излучения при калибровке дозиметрического оборудования измерения характеристик поля излучения, приведенные в настоящей статье, необходимо проводить для каждого конкретного ускорителя. Это обусловлено тем фактом, что значения данных характеристик, приведенные в литературе, не всегда совпадают с реальными значениями для заданного ЛУЭ. Так, значения длительности импульса, приведенные в обзорной статье [4] и стандарте [2], могут отличаться в 1,5 раза от измеренных значений на конкретном ускорителе и при конкретном режиме работы ускорителя, что значительно влияет на точный расчет МАЭД в импульсе и, как следствие, может привести к недостоверным результатам при калибровке импульсных дозиметров. Данное замечание касается также и частоты следования импульсов, которая в общем случае зависит от режима работы ускорителя.

Заключение

В работе представлена оценка возможности использования ЛУЭ в качестве источника поля импульсного фотонного излучения для калибровки дозиметрического оборудования. Для этого был произведен расчет характеристик поля высокоэнергетического фотонного излучения медицинских линейных ускорителей электронов различных производителей: Elekta Infinity, Varian VitalBeam, Varian Clinac iX. Были определены следующие основные характеристики поля излучения ЛУЭ в точке измерения: средняя энергия излучения, длительность импульса, частота следования импульсов, МАЭД и МАЭД в импульсе. Значения этих характеристик сравнивались с паспортными значениями рабочих характеристик дозиметра ДКС-АТ1123.

Установлено, что средняя энергия фотонного излучения ЛУЭ в точке измерения зависит как от режима работы ускорителя, так и от толщины свинцового фильтра, который

необходим для уменьшения интенсивности излучения. Показано, что с ростом толщины фильтра средняя энергия излучения вначале возрастает, после чего начинает уменьшаться, стремясь к некоторому постоянному значению. При использовании фильтра толщиной 8 см значения средней энергии фотонного излучения ЛУЭ в зависимости от режима работы лежат в интервале 2,7 МэВ – 4,1 МэВ. При использовании фильтра толщиной 15 см значения средней энергии расположены в интервале 2,4 МэВ – 3,1 МэВ. В данных энергетических диапазонах коэффициент перевода кермы в воздухе в AMBIENTНЫЙ эквивалент дозы согласно стандарту ISO 4037-3:2019 изменяется не более, чем на 2% и находится в интервале 1,11 Зв/Гр – 1,13 Зв/Гр.

Анализ длительности единичного импульса показал, что его значение практически не зависит от режима работы ЛУЭ, однако его величина является различной для ускорителей различных производителей (для ускорителей одного производителя эти значения совпадают). Так, для ЛУЭ Elekta Infinity значение длительности импульса составляет 1,8 мкс, для ЛУЭ Varian VitalBeam и ЛУЭ Varian Clinac iX значение длительности импульса составляет 3,3 мкс.

Определено, что мощность дозы, выдаваемая ЛУЭ в МЕ, регулируется частотой следования импульсов при фиксированной длительности импульса. В то же время МАЭД в импульсе не зависит от количества МЕ, отпускаемых ЛУЭ, и определяется исключительно режимом работы ЛУЭ, а именно ускорительным напряжением первичного электронного пучка, а также мишенью и применяемым сглаживающим фильтром излучателя.

Показано, что МАЭД в точке измерения может регулироваться как режимом работы ЛУЭ, так и толщиной используемого свинцового фильтра, который эффективно ослабляет излучение ЛУЭ по МАЭД до значений,

попадающих в диапазон измерения дозиметра ДКС-АТ1123.

Расчет среднего значения МАЭД и МАЭД в импульсе показал, что ЛУЭ может быть использован в качестве источника поля импульсного фотонного излучения при калибровке дозиметра ДКС-АТ1123 при использовании свинцового фильтра толщиной более 8 см

и при условии, что точка измерения будет расположена на расстоянии 2000 мм от излучателя.

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

Литература

1. Загороднюк А.А., Тараев А.Ю., Лазаренко С.В., Комар Д.И. Влияние свинцового фильтра на среднюю энергию фотонного излучения медицинского линейного ускорителя электронов // АНРИ. 2023. № 2(113). С. 13-24.
2. IEC TS 62743:2012. Radiation protection instrumentation – Electronic counting dosimeters for pulsed fields of ionizing radiation.
3. U. Ankerhold et. al., «Deficiencies of active electronic radiation protection dosimeters in pulsed fields», *Rad. Prot. Dosimetry*, vol. 135, no. 3, 2009.
4. Мартынюк Ю.Н., Нурлыбаев К., Ревков А.А. Дозиметрия импульсного излучения // АНРИ. 2018. № 1(92). С. 2-11.
5. Дозиметры рентгеновского и гамма-излучения ДКС АТ-1121, ДКС АТ-1123. URL: <https://atomtex.com/ru/dozimetry-rentgenovskogo-i-gamma-izlucheniya-dks-at1121-dks-at1123> (дата обращения: 20.08.2023).
6. Fluka-4 Manual. URL: <https://flukafiles.web.cern.ch/manual/index.html> (дата обращения: 20.12.2022).
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.
8. ISO 4037-3:2019: 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.
9. Е.В. Podgorsak, «Radiation Oncology Systems: a handbook for teachers and students», *International Atomic Energy Agency*, pp. 658, 2005.
10. VitalBeam System Specifications. URL: <https://protech-solutions.com.ua/assets/files/varian-vitalbeam.pdf> (дата обращения: 20.08.2023).
11. Clinac iX accelerator. System specifications. URL: <https://protech-solutions.com.ua/assets/files/varian-clinac-ix.pdf> (дата обращения: 20.08.2023).
12. Elekta Medical Linear Accelerator. Site Planning Construction Information. Elekta Limited, 2014, 112 p.
13. Дозиметр ДКС-АТ5350/1. URL: <https://atomtex.com/ru/oborudovanie-dlya-kalibrovki-i-poverki-dozimetry-etalonnye/dozimetr-dks-at53501> (дата обращения: 20.08.2023).
14. L.W. Brady, Т.Е. Yaeger, *Encyclopedia of Radiation Oncology*, Springer, 2013, 1015 p.
15. Богдан М.А., Курдя Ю.Ф., Карайкоза Т.М., Лукашевич Р.В., Лазаренко С.В. Широкодиапазонное устройство детектирования для дозиметрии непрерывного и импульсного фотонного излучения в жестких условиях эксплуатации // АНРИ. 2021. № 1(104). С. 21-30.

Evaluation of the Characteristics of Photon Radiation Fields of Medical Linear Electron Accelerators of Different Manufacturers

Taraev Aleksandr, Zaharadniuk Aleksei, Bogdan Mikhail, Lazarenko Sergey
(ATOMTEX SPE, Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article presents an assessment of the characteristics of pulsed photon radiation fields generated by medical linear electron accelerators (or CLINAC for short), namely: Varian Clinac iX, Elekta Infinity, Varian VitalBeam. Their technical characteristics, namely: average radiation energy, pulse duration and repetition rate, ambient dose equivalent rate in a single pulse are studied from the point of view of using a CLINAC as a source of pulsed photon radiation field suitable for calibration of dosimetric equipment. The average photon radiation energy is calculated using Monte Carlo modeling. Measurement of the ambient dose equivalent rate generated by the CLINAC at a given point is performed by the reference dosimeter DKS-AT5350/1. Determination of single pulse duration and pulse repetition rate is performed by direct measurements using the pulsed photon radiation detection unit BDKG-206.

Key words: Monte Carlo modelling, medical linear electron accelerator, pulsed photon radiation, FLUKA.

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

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