



**I Международная
научно-практическая
конференция
ЯДЕРНЫЕ ЗНАНИЯ В XXI ВЕКЕ
Сборник научных трудов**

**26 ноября 2025 года
Минск, Беларусь**



ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЕЙ ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МЕДИЦИНСКИХ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ПРОВЕРКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

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 [1] было предложено использовать медицинские линейные ускорители электронов (далее – ЛУЭ). Для уменьшения интенсивности излучения ЛУЭ до значений, попадающих в диапазон измерений дозиметрического оборудования, 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 их повторения [2], [3], [4]. Эти характеристики необходимы для определения мощности дозы в импульсе (далее – МАЭД 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 средней мощности дозы, генерируемой ЛУЭ в точке измерения (далее – СМАЭД) 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].

Дополнительно была произведена непосредственная оценка работы дозиметра ДКС-АТ1123 (далее – дозиметр) и блока детектирования БДКГ-206 (далее – БД) в полях фотонного излучения, генерируемых ЛУЭ, основные значения характеристик которых не превышают паспортных значений приборов. Оценка работы дозиметра и БД производилась путем прямых измерений СМАЭД, генерируемой ЛУЭ в заданной точке, с последующим сопоставлением полученных результатов измерения с опорными величинами. Под опорной величиной понимается значение СМАЭД в заданной точке, измеренное при помощи высокоточного эталонного дозиметра ДКС-АТ5350 [8] в составе с ионизационной камерой компании PTW-Freiburg (Германия) ТМ30010 (наперстковая ИК с активным объемом 0,6 см³) и ТМ32002 (сферическая ИК с активным объемом 1000 см³).

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 амбиентный 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 мониторных единицах (далее – 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 СМАЭД в точке измерения может регулироваться как режимом работы ЛУЭ, так и толщиной используемого свинцового фильтра, который эффективно ослабляет излучение ЛУЭ по СМАЭД до значений, попадающих в диапазон измерения дозиметра ДКС-АТ1123.

При прямых измерениях было установлено, что для минимизации отклонений показаний дозиметра и БД от опорных величин, необходимо, чтобы значение МАЭД в импульсе, генерируемое ЛУЭ в точке измерения не превышало 0.2 Зв/с. При заданных условиях измерения (установленный режим работы ЛУЭ, точка измерения расположена на расстоянии 2 м от излучателя) значение МАЭД в импульсе <0.2 Зв/с достигается путем использования свинцового фильтра толщиной 100 мм. При этом максимальное отклонение измеренных величин от опорных не превышает 10%.

На основании полученных результатов можно сделать следующий вывод: линейный ускоритель электронов может быть использован в качестве источника поля эталонного импульсного микросекундного фотонного излучения для калибровки и проверки работоспособности дозиметра ДКС-АТ1123 и блока детектирования БД-206. Также следует отметить, что дозиметр ДКС-АТ1123 и блок детектирования БДКГ-206 могут быть использованы для работы в таких полях, однако неопределенность результатов при таких измерениях в значительной степени зависит от МАЭД в импульсе.

Литература

1. Bednarz, B. Monte Carlo modelling of a 6 and 18 MV Varian Clinac medical accelerator for in-field and out-field dose calculations: development and validation / B. Bednarz, X. Xu // Phys. Med. Biol. – 2009. – №. 54. – P. 43–57.
2. IEC TS 62743:2012. Radiation protection instrumentation – Electronic counting dosimeters for pulsed fields of ionizing radiation. – 30 p.
3. U. Ankerhold et.al, Deficiencies of active electronic radiation protection dosimeters in pulsed fields, Rad.Prot.Dosimetry, Vol. 135, no. 3, 2009. – P. 149–153.
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-АТ1121, ДКС-АТ1123. URL: <https://atomtex.com/ru/dosimetry-rentgenovskogo-i-gamma-izlucheniya-dks-at1121-dks-at1123> (accessed August 20, 2023).
6. Fluka-4 Manual. URL: <https://flukafiles.web.cern.ch/manual/index.html> (accessed December 20, 2022).

7. B. J. Giuseppe et al.: Overview of the FLUKA code / B. J. Giuseppe, B. K. Till, C. A. Francesco, W. C. Pik, E. Q. Salvatore, F. O. Alberto, F. M. Alfredo // *Annals of Nuclear Energy*. – 2015. - vol. 82 № 1. P. 10–18.

8. Дозиметр ДКС-АТ5350/1. URL: <https://atomtex.com/ru/oborudovanie-dlya-kalibrovki-i-poverki-dozimetry-etalonnye/dozimetr-dks-at53501> (accessed August 20, 2023).