

Оценка неопределенности при измерениях дозиметрических характеристик фотонных полей линейных ускорителей электронов

В статье рассмотрены основные компоненты бюджета неопределенности при измерении средней мощности амбиентного эквивалента дозы $\dot{H}^*(10)$ (далее – СМАЭД), генерируемого медицинским линейным ускорителем электронов (далее – ЛУЭ). Бюджет неопределенности СМАЭД составлен для случая проверки работоспособности дозиметрического оборудования в полях импульсного микро-секундного фотонного излучения, генерируемых ЛУЭ согласно методике, описанной в работах [1,2,3,4]. Оценка неопределенности СМАЭД, генерируемой ЛУЭ в точке измерения, производилась по процедуре, описанной в ГОСТ 34100.3.2-2017 [5]. Согласно данной схеме, на первом этапе происходило определение базовой дозиметрической величины – мощности кермы в воздухе (далее – мощность кермы), генерируемой ЛУЭ в заданной точке, путем измерений эталонным дозиметром ДКСАТ5350/1 в составе с ионизационной камерой ТМ32002 (далее – ИК). На втором этапе был произведен перерасчет мощности кермы в СМАЭД с помощью переходного коэффициента (который в общем случае зависит от энергии излучения) согласно СТБ ИСО 4037-3-2022 [6]. Оценка неопределенности после каждого этапа происходила исходя из явного вида выражения, связывающего входные и выходные параметры (ток – мощность кермы для первого этапа, мощность кермы – СМАЭД для второго этапа). Установлено, что неопределенность измерения СМАЭД, генерируемой ЛУЭ в точке измерения, рассчитанная согласно выше описанной схеме, не превышает 13% для всех режимов работы ЛУЭ.

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

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

Ключевые слова:

линейный ускоритель электронов, импульсное фотонное излучение, калибровка дозиметра, неопределенность измерений.

В 2019 году вышел обновленный стандарт МЭК IEC/TS 63050:2019 «Radiation protection instrumentation – Dosimeters for pulsed fields of ionizing radiation» [7], регламентирующий требования к дозиметрическому оборудованию, предназначенному для работы в полях импульсного фотонного излучения. Дополнительно в 2019 году был пересмотрен и продлен стандарт ISO/TS 18090-1:2019 «Radiological protection – Characteristics of reference pulsed radiation. Part 1: Photon radiation» [8], регламентирующий требования к параметрам референсного (эталонного) импульсного фотонного излучения, пригодного для калибровки дозиметрического оборудования.

В выше упомянутых стандартах регламентируются такие характеристики полей импульсного фотонного излучения, как мощность кермы, СМАЭД, мощность амбиентного эквивалента дозы в единичном импульсе, частота следования импульсов, длительность единичного импульса, которые необходимо определить перед тем как проводить калибровку дозиметрического оборудования в данных полях. Однако стандарты не регламентируют тип источников импульсного фотонного излучения, которыми должны создаваться такие поля.

В цикле статей [1,2,3] в качестве источника поля импульсного фотонного излучения, способного создавать поля, пригодные для калибровки дозиметрического оборудования, было предложено использовать медицинский линейный ускоритель электронов. Для этого был разработан алгоритм оценки основных энергетических и частотных характеристик поля, создаваемых ЛУЭ в точке измерения, а именно: средней энергии излучения, длительности импульса, частоты следования импульсов. Дополнительно был предложен метод перерасчета базовой дозиметрической величины (мощности кермы), генерируемой ЛУЭ в точке измерения, в СМАЭД. Под базовой дозиметрической величиной в настоящей работе понимается дозиметрическая величина, на основе которой рассчитываются все последующие производные от нее дозиметрические величины. На основе данного метода в статьях [1,2,3] была выполнена оценка СМАЭД и мощности амбиентного эквивалента дозы в единичном импульсе (далее – МАЭД в импульсе), генерируемых ЛУЭ в точке измерения при заданном режиме работы. Практическое применение алгоритма было проверено в работе [4] путем прямых измерений с использованием дозиметрического оборудования методом сличения показаний дозиметра с опорными величинами.

Под опорной величиной в данных статьях понималось значение СМАЭД, генерируемой ЛУЭ в заданной точке, рассчитанное на основе базовой дозиметрической величины – мощности кермы, измеренной при помощи эталонного дозиметра ДКСАТ5350/1 в составе с ИК ТМ32002. Следует отметить, что ИК эталонного дозиметра не измеряет мощность кермы напрямую. Выходной величиной, прямо измеряемой ИК дозиметра, является электрический ток, значение которого пересчитывают в мощность кермы согласно методике [9] при помощи коэффициентов пересчета. Однако ввиду того, что ИК дозиметра предварительно калибруется в поле эталонного излучения (под калибровкой понимается определение калибровочных коэффициентов, позволяющих пересчитать ток в мощность кермы), можно сказать, что выходной величиной, измеряемой дозиметром при заданных условиях, является мощность кермы, измеренная с заданной неопределенностью. При таком подходе, происходит передача единицы эталона базовой дозиметрической величины от средства измерения (эталонного дозиметра, откалиброванного в эталонном поле) полю, создаваемому ЛУЭ в точке измерения при заданном режиме работы. В публикации [4] было экспериментально показано, что ЛУЭ может быть использован в качестве источника поля для проверки работоспособности дозиметрического оборудования.

Однако для того, чтобы ЛУЭ в совокупности с заданной методикой расчета опорной дозиметрической величины мог быть использован для проверки работоспособности и калибровки дозиметрического оборудования, необходимо дополнительно иметь алгоритм расчета расширенной неопределенности измерения опорной дозиметрической величины (в данном случае СМАЭД), генерируемой таким источником. Под неопределенностью измерений в настоящей работе понимается параметр, относящийся к результату измерения и характеризующий разброс значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой величине. Неопределенность измерений чаще всего применяется в виде расширенной неопределенности измерений $\pm U$, которая

является произведением коэффициента охвата k и суммарной стандартной неопределенности измерений u_c . Суммарная стандартная неопределенность u_c – суммарный вклад оценки (неопределенностей) типа А и В (u_A, u_B).

Целью настоящей работы является оценка неопределенности измерений при расчете значения опорной величины СМАЭД на основе пересчета базовой дозиметрической величины (мощности кермы), генерируемой ЛУЭ в точке измерения. Дополнительно исследовались воспроизводимость и повторяемость значений СМАЭД, генерируемых ЛУЭ.

Алгоритм расчета СМАЭД, генерируемой ЛУЭ в точке измерения

В общем случае построение алгоритма расчета СМАЭД, генерируемой ЛУЭ в точке измерения в заданном режиме работы, можно разбить на несколько этапов. На первом этапе происходит подготовка ЛУЭ к измерениям:

- излучатель ускорителя поворачивается на 90 градусов относительно вертикали;
- на излучатель устанавливается свинцовый фильтр заданной толщины, необходимый для ослабления интенсивности излучения до значений, попадающих в диапазон измерения дозиметрического оборудования. Расчет толщины свинцового фильтра и его влияние на среднюю энергию и спектр фотонного излучения детально описаны в публикациях [1,2,3];
- ионизационная камера ТМЗ2002, на которую предварительно надет акриловый колпачок, обеспечивающий электронное равновесие при заданных условиях облучения [1], устанавливается в точку измерения (рис.1); точка измерения выбирается таким образом, чтобы минимизировать вклад рассеянного излучения как от свинцового фильтра, так и от стен помещения;
- в точке размещения ИК измеряется температура окружающего воздуха, влажность и атмосферное давление. Данные значения необходимы для расчета поправки на плотность воздуха при измерении мощности кермы ионизационной камерой.

Далее после предварительных приготовлений задается режим работы ЛУЭ. Под режимом работы ускорителя в настоящей статье понимается значение ускорительного напряжения первичного электронного пучка, падающего на мишень ЛУЭ [3].

На втором этапе происходит определение мощности кермы в воздухе, которая является базовой дозиметрической величиной [10]. Для каждого заданного режима работы ЛУЭ производилось 5 последовательных измерений мощности кермы.

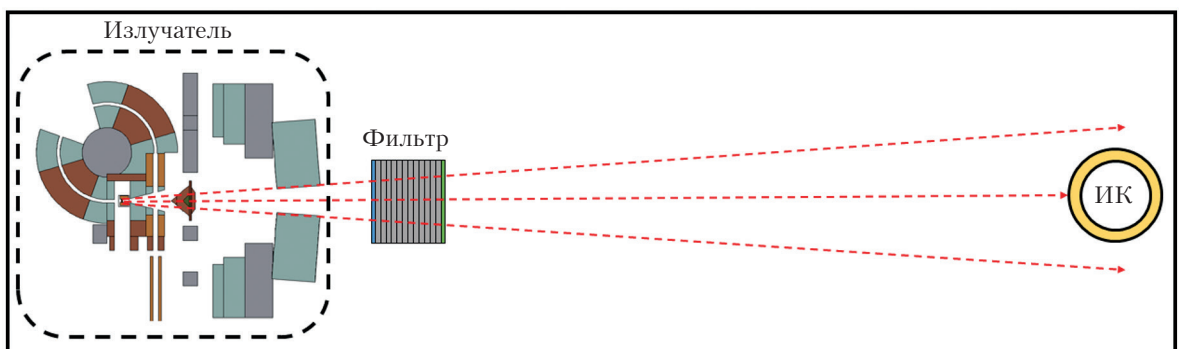


Рис.1. Схематическое изображение расположения ИК с акриловым колпачком относительно излучателя ЛУЭ.

Общую форму расчёта мощности кермы можно представить в виде:

$$\dot{K} = \frac{3600 \cdot \overline{M}_K \cdot \hat{C}_K \cdot \hat{C}_{tp} \cdot \hat{C}_{pol} \cdot \hat{C}_{rec} \cdot \hat{C}_T \cdot \hat{C}_v}{\tau}, \quad (1)$$

где 3600 – пересчет кермы за время измерений τ в мощность кермы, выраженную в Гр/ч; \overline{M}_K – среднее арифметическое показаний кермы эталонного дозиметра ДКС-АТ5350/1; \hat{C}_K – поправочный множитель на ионизационную камеру (берется из свидетельства на калибровку (поверку) ионизационной камеры (дозиметра ДКСАТ5350/1)); \hat{C}_{tp} – поправочный множитель на плотность воздуха, который зависит от температуры воздуха t и атмосферного давления p , рассчитывают по формуле:

$$\hat{C}_{tp} = \frac{(273+t) \cdot 101,32}{293 \cdot p}, \quad (2)$$

\hat{C}_{pol} – поправочный множитель на эффект полярности, который рассчитывался согласно [9]; \hat{C}_{rec} – поправочный множитель на рекомбинацию ионов, который рассчитывался согласно [9]; \hat{C}_T – поправочный множитель на погрешность длительности импульса рентгеновского излучения, при расчетах принимался равным 1; \hat{C}_v – поправочный множитель на погрешность частоты рентгеновского излучения, при расчетах принимался равным 1.

На третьем этапе происходит расчет опорной дозиметрической величины СМАЭД на основе ранее определенного значения мощности кермы согласно формуле (3):

$$\dot{H}^*(10) = \hat{C}_h \cdot \dot{K}, \quad (3)$$

где \hat{C}_h – коэффициент перехода от мощности кермы к МАЭД.

Алгоритм оценки неопределенности расчета СМАЭД

Исходя из формулы (1), расчет суммарной основной относительной неопределенности измерения мощности кермы можно представить следующим выражением:

$$\hat{u}_c(\dot{K}) = \sqrt{\hat{u}_A^2(M_K) + \hat{u}_B^2(\hat{C}_K) + \hat{u}_B^2(\hat{C}_{tp}) + \hat{u}_B^2(t) + \hat{u}_B^2(p) + \hat{u}_B^2(T) + \hat{u}_B^2(v)}. \quad (4)$$

Слагаемые, входящие в формулу (4), являются оценками неопределенности соответствующих величин, входящих в формулу (1). Явный вид формул, необходимых для расчета данных слагаемых, приведен в табл.1.

Подставляя численные значения, приведенные в табл.1, в формулу (4), получаем значение величины суммарной относительной неопределенности измерения мощности кермы, равное

$$\hat{u}_c(\dot{K}) = 5,3\%.$$

Суммарную основную относительную неопределенность измерений СМАЭД, исходя из формулы (3), можно представить следующим выражением:

$$\hat{u}_c(\dot{H}^*(10)) = \sqrt{\hat{u}_c^2(\dot{K}) + \hat{u}_B^2(\hat{C}_h) + \hat{u}_B^2(E)}, \quad (5)$$

где $\hat{u}_B(\hat{C}_h)$ – оценка неопределенности значения коэффициента перехода мощности кермы к МАЭД (согласно [6], численное значение коэффициента равно 2% ($k=1$)); $\hat{u}_B(E)$ – оценка неопределенности коэффициента перехода мощности кермы к МАЭД, обусловленная погрешностью расчета средней энергии фотонного излучения.

Табл.1. Явный вид выражений для определения неопределенностей, входящих в формулу (4).

Величина	Тип ОСН	Формула расчета	Коэффициент чувствительности	Численное значение, %
M_K	A	$\hat{U}_A(M_K) = \frac{100}{M_Q} \cdot \sqrt{\frac{n-1}{n-3}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_{K,i} - \bar{M}_K)^2}{n(n-1)}}$	1	1,1
Примечание. Формула ОСН типа А показаний кермы взята из [11]. Приведено максимальное значение ОСН типа А показаний кермы из всех серий измерений на всех режимах всех типов ускорителей				
\hat{C}_K	B	$\hat{U}_B(\hat{C}_K) = \frac{\hat{U}^*(\hat{C}_K)}{k}$	1	4,5
Примечание. $\hat{U}^*(\hat{C}_K)$ – неопределенность измерений кермы ионизационной камерой (9%) и коэффициент расширения $k = 2$ взяты из свидетельства о калибровке на ионизационную камеру откалиброванной в высокоэнергетических полях в Германском метрологическом институте (PTB).				
\hat{C}_I	B	$\hat{U}_B(\hat{C}_I) = \frac{\hat{U}^*(\hat{C}_I)}{k}$	1	0,5
Примечание. $\hat{U}^*(\hat{C}_I)$ – неопределенность измерений тока (заряда) дозиметра (1%) и коэффициент расширения $k = 2$ взяты из свидетельства о калибровке на дозиметр ДКС-АТ5350/1.				
\hat{C}_K	B	$\hat{U}'_B(\hat{C}_K) = \left \frac{1 - \hat{C}_K}{\sqrt{3}} \right \cdot 100$	1	2,3
Примечание. $\hat{U}'_B(\hat{C}_K)$ – вклад поправочного множителя в неопределенность измерений кермы. $\hat{C}_K = 1,039$, взято максимальное значение в диапазоне энергий от 662 кэВ до 6,7 МэВ. Делитель $\sqrt{3}$ здесь и далее принят согласно [12], т. к. неизвестен закон распределения.				
t	B	$\hat{U}_B(t) = \frac{\hat{U}^*(t)}{k}$	$\frac{t}{273+t} = 0,08$	0,0
Примечание. $\hat{U}^*(t)$ – вклад погрешности температуры в неопределенность измерений кермы (0,2%) и коэффициент расширения $k = 2$ взяты из свидетельства о калибровке на теромогигометр. При расчете принят максимальный коэффициент чувствительности при проведении серии измерений на ускорителях.				
p	B	$\hat{U}_B(p) = \frac{\hat{U}^*(p)}{k}$	-1	0,5
Примечание. $\hat{U}^*(p)$ – вклад погрешности атмосферного давления в неопределенность измерений кермы (0,5%) и коэффициент расширения $k = 2$ взяты из свидетельства о калибровке на теромогигометр. Взята максимальная неопределенность измерений атмосферного давления за все серии измерений на ускорителях.				
T	B	$\hat{U}_B(T) = \frac{\hat{U}^*(T)}{\sqrt{3}}$	1	0,0
Примечание. $\hat{U}^*(T)$ – вклад погрешности длительности импульса (0%) в неопределенность измерений кермы, взят из [3]. Пренебрежимо мала, т. к. погрешность длительности импульса 0,2 мкс намного меньше времени измерения 60 с.				
ν	B	$\hat{U}_B(\nu) = \frac{\hat{U}^*(\nu)}{\sqrt{3}}$	1	1,0
Примечание. $\hat{U}^*(\nu)$ – вклад погрешности частоты импульсов (1,7% – наибольшее значение) в неопределенность измерений кермы взят из [3]				

Неопределенность значения коэффициента перехода от мощности кермы к СМАЭД, обусловленная погрешностью расчета средней энергии фотонного излучения, связана с тем фактом, что, согласно стандарту [6], коэффициент \hat{C}_h зависит от значения энергии фотонного излучения и в табличном виде определен для ряда энергий. При этом подразумевается, что выбор коэффициента для энергий, попадающих в интервал между табличных значений, производится путем линейной интерполяции. При выборе коэффициента \hat{C}_h для случая непрерывного спектра фотонного излучения стандарт [6] подразумевает использование среднего арифметического взвешенного значения энергии.

Прямое измерение истинного фотонного спектра излучения ЛУЭ с последующим расчетом его средней энергии является крайне сложным и трудоемким процессом, требующим наличия специализированного оборудования. Поэтому в настоящей работе спектр фотонного излучения ЛУЭ и расчет его средней энергии производился при помощи Монте-Карло моделирования. Детальное описание Монте-Карло моделирования спектра излучения ЛУЭ с рассчитанными значениями средней энергии приведены в работе [3]. Исходя из выше сказанного, можно сделать вывод, что получение формулы для оценки неопределенности $\hat{u}_B(E)$ для коэффициента \hat{C}_h в явном виде крайне затруднительно.

Однако анализируя приведенные в работе [3] значения средней энергии фотонного излучения ЛУЭ при заданных условиях работы (подходящих для калибровки дозиметрического оборудования), можно заметить, что все они расположены в энергетическом интервале 2÷6 МэВ (с учетом погрешности моделирования). В данном энергетическом интервале зависимость коэффициента \hat{C}_h от энергии представляет собой монотонно убывающую функцию, значения которой лежат в интервале 1,13÷1,09 Зв/Гр. Как следствие, оценку верхней границы неопределенности $\hat{u}_B(E)$ можно произвести, исходя из граничных значений коэффициента. Для случая, описываемого в настоящей работе, принимая равномерный закон распределения данного типа неопределенности, получаем значение $\hat{u}_B(E) = 4/\sqrt{3} = 2,3\%$.

Исходя из выше представленных величин, значение суммарной основной относительной неопределенности измерений СМАЭД $\hat{u}_c(\dot{H}^*(10)) = 6,1\%$.

Расширенную относительную неопределенность измерения СМАЭД с коэффициентом охвата $k = 2$ ($P = 0,95$) можно рассчитать согласно следующей формуле:

$$U(\dot{H}^*(10)) = 2 \cdot \hat{u}_c(\dot{H}^*(10)). \quad (6)$$

Согласно формуле (6), значение расширенной относительной неопределенности измерения СМАЭД, создаваемой ЛУЭ в заданной точке, равно 12,2%. Эта величина меньше, чем типичное значение основной относительной погрешности стандартного дозиметрического оборудования. Например, дозиметр рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1123 и экспериментальный блок БДКГ-206 имеют пределы допустимой основной относительной погрешности $\pm 15\%$. В связи с этим можно утверждать, что ЛУЭ возможно использовать для проверки работоспособности и калибровки дозиметра рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1123 и блока детектирования БДКГ-206 в высокоэнергетических полях импульсного микросекундного фотонного излучения.

Заключение

В работе представлен алгоритм, позволяющий использовать линейный ускоритель электронов для проверки работоспособности и калибровки дозиметрического оборудования в полях импульсного фотонного излучения.

Приведен алгоритм расчета расширенной неопределенности измерений мощности амбиентного эквивалента дозы $U(\dot{H}^*(10))$, генерируемой ЛУЭ в точке измерения. В явном виде приведены формулы, необходимые для оценки неопределенности величин, входящих в формулу пересчета тока, измеряемого ИК эталонного дозиметра в мощность кермы, и в формулу пересчета мощности кермы в СМАЭД.

Согласно полученным результатам, максимальная расширенная неопределенность измерений СМАЭД $U(\dot{H}^*(10))$ при использовании ЛУЭ в качестве источника полей импульсного микросекундного фотонного излучения для проверки работоспособности и калибровки дозиметрического оборудования не превышает 13% с коэффициентом охвата 2 ($P = 0,95$) и при использовании ионизационной камеры ТМ32002, калиброванной с неопределенностью измерений мощности кермы в воздухе не более 9%.

Авторы публикации выражают глубокую благодарность директору предприятия «АТОМТЕХ», к.т.н. В.А.Кожемякину 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. Загороднюк А.А., Тараев А.Ю., Лазаренко С.В. О возможности использования медицинских линейных ускорителей электронов в качестве поля эталонного импульсного фотонного излучения // Приборы и методы измерений. 2023. Т. 14, № 3. С. 179-190.
3. Тараев А.Ю., Загороднюк А.А., Богдан М.А., Лазаренко С.В. Оценка характеристик полей фотонного излучения медицинских линейных ускорителей электронов различных производителей // АНРИ. 2023. № 4(115). С. 19-31.
4. Тараев А.Ю., Загороднюк А.А., Лазаренко С.В., Масюкович М.В. Оценка функционирования дозиметрического оборудования при проведении измерений в полях импульсного микросекундного фотонного излучения с известными характеристиками // АНРИ. 2024. № 2(117). С. 17-26.
5. ГОСТ 34100.3.2-2017. Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. Дополнение 2. Обобщение на случай произвольного числа выходных величин. Введ. 2018-09-01. М., 2018. 72 с.
6. СТБ ИСО 4037-3-2022. Защита радиологическая. Эталонные рентгеновские и гамма-излучения для калибровки дозиметров и измерителей мощности дозы и определения их отклика как функции энергии фотона. Часть 3. Калибровка дозиметров окружающей среды и индивидуальных дозиметров и измерение их отклика в зависимости от энергии и угла падения излучения. Введ. 22-11-01. Мн., 2022. 58 с.
7. IEC/TS 63050:2019. Radiation protection instrumentation – Dosimeters for pulsed fields of ionizing radiation.

8. ISO/TS 18090-1:2019. Radiological protection – Characteristics of reference pulsed radiation. Part 1: Photon radiation.
9. Technical Report Series no. 398. Absorbed Dose. Determination in External Beam Radiotherapy. IAEA. Vienna. 2000.
10. Кутьков В.А. Величины в радиационной защите и безопасности // АНРИ. 2007. № 3(80). С. 2-25.
11. РМГ 115-2019. Калибровка средств измерений. Алгоритмы обработки результатов измерений и оценивания неопределенностей. Введ. 2020-09-01. М., 2019. 32 с.
12. Ефремова Н.Ю. Оценка неопределенности в измерениях. Практическое пособие. Мн.: БелГИМ, 2003. 50 с.

Estimation of Uncertainty in Measurements of Dosimetric Characteristics of Photon Fields Generated by Linear Electron Accelerators

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

Abstract. The article considers the main components of the uncertainty budget when measuring the average ambient dose equivalent rate $H^*(10)$ (or ADE for short) generated by a medical linear electron accelerator (or LINAC for short). The budget of the ADE uncertainty is made for the case of assessment of the performance of dosimetric equipment in the fields of pulsed microsecond photon radiation generated by LINAC according to the method described in [1,2,3,4].

The estimation of the ADE uncertainty generated by LINAC at the measurement point was performed according to the procedure described in GOST 34100.3.2-2017 [5]. According to this scheme, at the first stage the determination of the basic dosimetric quantity – kerma rate in air (or kerma rate for short), generated by LINAC at a given point, was performed by using the reference dosimeter DKS AT5350/1 in combination with the ionization chamber TM32002. At the second stage, the kerma rate was converted to the ADE using the conversion coefficient according to STB ISO 4037-3-2022 [6].

The uncertainty estimation after each stage was based on the explicit form of the expression linking the input and output parameters (current – kerma rate for the first stage, kerma rate – ADE for the second stage). It was found that the uncertainty of the ADE generated by the LINAC at the measurement point, calculated according to the above described scheme, does not exceed 13% for all operating modes of the LINAC.

Keywords: LINAC, pulsed photon radiation, dosimeter calibration, uncertainty.

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

Контакты: тел. +375 29-557-45-27; +375 29-171-13-72;
Lazarenko_sv@atomtex.com; zaharadniuk_aa@atomtex.com