

УДК [621.384.64:539.1.089.6]: 615.849.1

Методика определения ошибки в опорном значении дозы при калибровке радиационного выхода линейного ускорителя. Часть 3. Зависимость от характеристик радиационного пучка

Титович Е.В.¹, Тарутин И.Г.¹, Киселев М.Г.²

¹РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова,
223040, а.г. Лесной, Минский район, Беларусь

²Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь

Поступила 28.01.2016

Принята к печати 09.06.2016

Для обеспечения радиационной безопасности пациентов, получающих лучевую терапию, требуется обеспечить постоянство характеристик медицинских линейных ускорителей электронов, которые влияют на точность подведения дозы. С этой целью осуществляются процедуры их контроля качества, в число которых входит калибровка радиационного выхода линейного ускорителя, ошибка в установлении опорного значения дозы которой не должна превышать 2 %. Целью работы являлась разработка методики определения ошибки при установлении этой величины в зависимости от характеристик радиационного пучка ускорителя. Для решения поставленных задач были проведены измерения дозовых распределений ускорителя «Трилоджи» № 3567, на основании которых получены зависимости отклонения в опорном значении дозы от мощности дозы излучения, точности определения проникающей способности излучения и коэффициентов радиационного выхода, симметрии и равномерности радиационного поля, угловой зависимости радиационного выхода. Установлено, что наибольшее влияние на ошибку в дозе оказывает ошибка в определении коэффициентов радиационного выхода ускорителя (до 5,26 % для обеих энергий фотонов – 6 и 18 МэВ). Ошибки, обусловленные изменением мощности дозы излучения, достигали 1,6 % для 6 МэВ и 1,4 % для 18 МэВ. Ошибки, вызываемые неточностями в установлении проникающей способности излучения, достигали 1,1 % для 18 МэВ и 0,3 % для 6 МэВ. Ошибки, обусловленные остальными характеристиками, не превышали 1 %. Таким образом, имеется возможность на основании результатов процедуры калибровки радиационного выхода выразить результаты контроля качества линейного ускорителя в единицах дозы и использовать их при проведении комплексной оценки возможности его клинического использования для облучения пациентов.

Ключевые слова: калибровка радиационного выхода линейного ускорителя, ошибки в опорном значении дозы, дозиметрические характеристики радиационного пучка.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-203-210

Адрес для переписки:

Титович Е.В.
РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова,
223040, а.г. Лесной, Минский район, Минская область, Беларусь
e-mail: e.v.titovich@gmail.com

Address for correspondence:

Titovich E.V.
N.N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus,
223040, Lesnoy, Minsk District, Belarus
e-mail: e.v.titovich@gmail.com

Для цитирования:

Титович Е.В., Тарутин И.Г., Киселев М.Г.
Методика определения ошибки в опорном значении дозы при калибровке радиационного выхода линейного ускорителя. Часть 3. Зависимость от характеристик радиационного пучка. Приборы и методы измерений. 2016. – Т. 7, № 2. – С. 203–210.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-203-210

For citation:

Titovich E.V., Tarutin I.G., Kiselev M.G.
[The method of determination of error in the reference value of the dose during the linear accelerator radiation output calibration procedure. Part 3. The dependence of the radiation beam characteristics].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements]. 2016, vol. 7, no. 2, pp. 203–210 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-203-210

The method of determination of error in the reference value of the dose during the linear accelerator radiation output calibration procedure. Part 3. The dependence of the radiation beam characteristics

Titovich E.V.¹, Tarutin I.G.¹, Kiselev M.G.²

¹*N.N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus,
223040 Lesnoy, Minsk District, Belarus*

²*Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus*

Received 28.01.2016

Accepted for publication 09.06.2016

Abstract. To ensure the radiation protection of oncology patients is needed to provide the constancy of functional characteristics of the medical linear accelerators, which affect the accuracy of dose delivery. For this purpose, their quality control procedures are realized including calibration of radiation output of the linac, so the error in determining the dose reference value during this procedure must not exceed 2 %. The aim is to develop a methodology for determining the error in determining this value, depending on the characteristics of the radiation beam. Dosimetric measurements of Trilogy S/N 3567 linac dose distributions have been carried out for achievement of the objectives, on the basis of which dose errors depending on the dose rate value, the accuracy of the beam quality and output factors determination, the symmetry and uniformity of the radiation field, the angular dependence of the linac radiation output were obtained. It was found that the greatest impact on the value of the error has the error in the output factors determination (up to 5.26 % for both photon energy). Dose errors caused by changing dose rate during treatment were different for two photon energies, and reached 1.6 % for 6 MeV and 1.4 % for 18 MeV. Dose errors caused by inaccuracies of the beam quality determination were different for two photon energies, and reached 1.1 % for 18 MeV and –0.3 % for 6 MeV. Errors caused by the remaining of the characteristic do not exceed 1 %. Thus, there is a possibility to express the results of periodic quality control of the linear accelerator in terms of dose and use them to conduct a comprehensive assessment of the possibility of clinical use of a linear accelerator for oncology patients irradiation on the basis of the calibration of radiation output.

Keywords: linear accelerator radiation output calibration, error in the reference value of the absorbed dose, radiation beam characteristics.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-203-210

Адрес для переписки:

Титович Е.В.
РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова,
223040, а.г. Лесной, Минский район, Минская область, Беларусь
e-mail: e.v.titovich@gmail.com

Address for correspondence:

Titovich E.V.
N.N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus,
223040, Lesnoy, Minsk District, Belarus
e-mail: e.v.titovich@gmail.com

Для цитирования:

Титович Е.В., Тарутин И.Г., Киселев М.Г.
Методика определения ошибки в опорном значении дозы при калибровке радиационного выхода линейного ускорителя. Часть 3. Зависимость от характеристик радиационного пучка. Приборы и методы измерений. 2016. – Т. 7, № 2. – С. 203–210.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-203-210

For citation:

Titovich E.V., Tarutin I.G., Kiselev M.G.
[The method of determination of error in the reference value of the dose during the linear accelerator radiation output calibration procedure. Part 3. The dependence of the radiation beam characteristics].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements]. 2016, vol. 7, no. 2, pp. 203–210 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-203-210

Введение

В работах [1, 2] предложены методики определения ошибки в полученном при калибровке радиационного выхода (РВ) медицинских линейных ускорителей (ЛУ) опорном значении дозы в зависимости от технико-дозиметрических характеристик ЛУ. С целью осуществления комплексной оценки целесообразности клинического использования линейного ускорителя для облучения пациентов на основании значения интегральной ошибки калибровки РВ ЛУ и результатов измерения значения дозы в точке калибровки (опорной точке измерительного детектора) необходимо провести анализ влияния дозиметрических характеристик радиационного пучка на полученное значение РВ ускорителя [3–5].

Цель работы – разработка методики определения отклонения в полученном при калибровке РВ медицинских ЛУ опорном значении дозы в зависимости от мощности дозы излучения, точности определения проникающей способности излучения и коэффициентов радиационного выхода (КРВ), симметрии и равномерности радиационного поля, угловой зависимости радиационного выхода. В работах [6–9] показано, что эти параметры радиационного пучка существенно влияют на ошибки при калибровке радиационного выхода ЛУ. При этом результаты периодического контроля качества (КК) этих устройств ЛУ, проводимого в соответствии с [10], должны быть выражены в единицах поглощенной дозы. Это позволит использовать единые дозовые критерии для оценки результатов КК любого медицинского ЛУ и практически исключить возможность превышения предельно допустимого отклонения дозы, доставляемой пациенту радиационными пучками, возникшего вследствие ошибки при определении РВ линейного ускорителя.

Методика эксперимента

На основании методов дозиметрических измерений, изложенных в инструкции¹, авторами с использованием трехмерного анализатора дозового поля проведены измерения дозовых распределений ЛУ «Трилоджи» № 3567. В частности, измерены процентно-глубинные дозовые распре-

деления (ПГД) для радиационных полей размерами 8×8 см, 10×10 см и 12×12 см, коэффициенты радиационного выхода (КРВ) для квадратных радиационных полей со стороной от 8 до 12 см с шагом 1 см, а также профильные дозовые распределения на опорной глубине ($d = 100$ мм) для поля 40×40 см [1, 2]. С целью установления угловой зависимости РВ для ЛУ «Трилоджи» проведено облучение дозой 200 мониторинговых единиц (МЕ) дозиметрической системы, состоящей из дозиметра *Unidos* и ионизационной камеры *PTW31010* для полного оборота штатива ускорителя ($0-360^\circ$ шкала *IEC*) с шагом 45° . Опорная точка измерительного детектора располагалась в изоцентре вращения штатива в воздухе. Для определения зависимости РВ ЛУ «Трилоджи» от мощности дозы излучения согласно методике измерений из инструкции¹ проведено облучение дозой 200 МЕ ионизационной камеры *PTW 31010*, подключенной к дозиметру *PTW Unidos*, в стандартных условиях (см. инструкцию¹) с использованием значений мощности дозы радиационных пучков фотонов с номинальными энергиями 6 и 18 МэВ в диапазоне от 1 до 6 Гр/мин с шагом 1 Гр/мин (опорная мощность дозы 3 Гр/мин). Для оценки величины случайных погрешностей было проведено 10 серий экспериментальных измерений каждой дозиметрической характеристики. Измерения проводились в 10 различных дней с независимой установкой фантома и параметров ЛУ «Трилоджи». Установлено отсутствие случайных погрешностей при определении значений этих характеристик с точностью 0,1 % для исследуемого диапазона экспериментальных данных.

Количество МЕ, необходимое для доставки известного значения поглощенной дозы на глубину максимума ионизации (ME_{cal}), определялось согласно [1]. С использованием национального протокола КК ЛУ [10] авторами определены дозиметрические характеристики радиационных пучков, отклонение значений которых от опорного может привести к возникновению ошибки при калибровке РВ ЛУ и таким образом повлиять на точность доставки дозы онкологическим пациентам:

- зависимость радиационного выхода линейного ускорителя от мощности дозы;
- точность определения проникающей способности фотонного излучения;
- симметрия радиационного поля;
- равномерность радиационного поля;
- угловая зависимость РВ ЛУ;
- точность определения КРВ.

¹ Титович, Е.В. Методы дозиметрического сопровождения высокотехнологичной лучевой терапии / Е.В. Титович, И.Г. Тарутин, Г.В. Гацкевич // Инструкция по применению № 092-0914, утверждена Минздравом 23.12.2014.

Все расчеты проводились для наиболее используемых при облучении онкологических пациентов (более 99 % случаев) режимов тормозного излучения (фотонов с номинальными энергиями 6 и 18 МэВ) линейного ускорителя «Трилоджи» № 3567 в условиях гомогенности среды и симметричности радиационных полей.

Результаты исследований

Зависимость радиационного выхода ускорителя от мощности дозы

При генерации ЛУ излучения с различными мощностями дозы могут наблюдаться ошибки в дозе, отпускаемой ускорителем [5], что приведет к возникновению ошибок при определении опорного значения поглощенной дозы ввиду изменения D_{ref} вызванного изменением показаний дозиметра в единицах электрического заряда M (см. инструкцию¹). На основании результатов экспериментальных исследований установлено, что при изменении мощности дозы линейного ускорителя «Трилоджи» от 1 до 6 Гр/мин показания дозиметра в единицах электрического заряда (M_{drcal}) изменяются от 1,016 до 0,995 для фотонов 6 МэВ и от 1,014 до 0,998 для 18 МэВ по отношению к показаниям дозиметра ($M_{drcalref}$) для опорной мощности дозы. Согласно методологии, изложенной в работе [1], определена величина изменения опорного значения поглощенной дозы ЛУ при изменении мощности дозы радиационного пучка по отношению к таковому значению при опорной мощности дозы (ME_{drcal}). Результаты исследований представлены на рисунке 1.

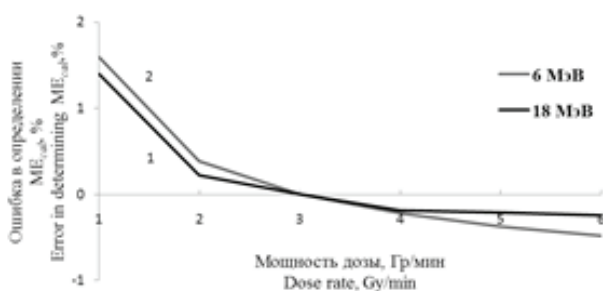


Рисунок 1 – Зависимость ошибки в определении опорного значения дозы от мощности дозы излучения фотонов с энергиями 18 МэВ (1) и 6 МэВ (2)

Figure 1 – Dependence of the error in the dose reference value from the dose rate value for photons with energies of 18 MeV (1) and 6 MeV (2)

Таким образом, отклонение ME_{cal} имеет сложную зависимость от мощности дозы при

калибровке радиационного выхода и отличается для двух энергий фотонов. Основной вклад в его величину вносит изменение показаний дозиметра в единицах электрического заряда при его облучении дозой 200 МЕ с мощностью дозы радиационного пучка, отличной от опорной. Максимальное отклонение дозы ЛУ «Трилоджи» составило 1,6 % для фотонов 6 МэВ и 1,4 % для фотонов 18 МэВ при мощности дозы 1 Гр/мин. В случае, когда лучевое лечение онкологических пациентов проводится только при одной мощности дозы, при которой проводится калибровка РВ ЛУ, ошибки в определении опорного значения дозы при калибровке РВ исключены.

Точность определения проникающей способности излучения

Определение проникающей способности радиационного пучка фотонов ($TPR_{20,10}$) производится в соответствии с методикой, изложенной в документе МАТАГЭ [11]. Ошибки в установлении $TPR_{20,10}$ приведут к отклонениям определяемых на их основании значений k_Q , а следовательно, D_{ref} (см. инструкцию¹) и ME_{cal} [1]. Для установления зависимости дозы от ошибки в $TPR_{20,10}$ с использованием измеренных экспериментально ПГД для ЛУ «Трилоджи» № 3567 для радиационных полей размерами 10×10 см определены опорные значения $TPR_{20,10}$ для фотонов с номинальными энергиями 6 и 18 МэВ. На основании этих значений $TPR_{20,10}$ с использованием актуальных для ионизационной камеры PTW 31010 рассчитанных значений k_Q [11], путем интерполяции получены значения этого коэффициента для случаев ошибки при определении проникающей способности фотонного излучения ($k_{Qprerrcal}$) из диапазона ± 4 % от опорного значения $TPR_{20,10}$ с шагом 0,1 %. С использованием коэффициентов $k_{Qprerrcal}$ установлены значения D_{ref} (см. инструкцию¹) при ошибках в определении $TPR_{20,10}$, что позволило определить радиационный выход для этих случаев ($ME_{tperrcal}$) [1]. Результаты исследований представлены на рисунке 2.

Таким образом, установлено, что ошибка в определении ME_{cal} имеет практически линейную зависимость от величины ошибки в определении проникающей способности излучения фотонов и отличается для двух энергий фотонов. Основной вклад в величину ошибки вносит коэффициент k_{Qprerr} . Максимальное значение ошибки для ЛУ «Трилоджи» составило 0,33 % для номинальной

энергии фотонов 6 МэВ и –1,13 % для энергии 18 МэВ.

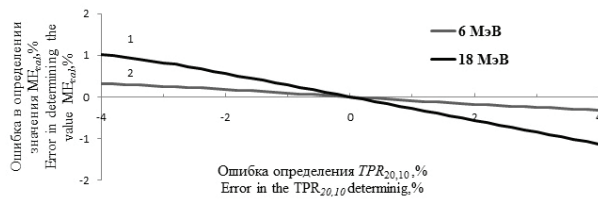


Рисунок 2 – Зависимость ошибки опорного значения дозы линейного ускорителя от величины ошибки определения проникающей способности радиационного пучка фотонов с энергиями 18 МэВ (1) и 6 МэВ (2)

Figure 2 – Dependence of the error in the reference dose value of linac on the error in the determination of the beam radiation quality for photons with energies of 18 MeV (1) and 6 MeV (2)

Таким образом, установлено, что ошибка в определении ME_{cal} имеет практически линейную зависимость от величины ошибки в определении проникающей способности излучения фотонов и отличается для двух энергий фотонов. Основной вклад в величину ошибки вносит коэффициент k_{Operr} . Максимальное значение ошибки для ЛУ «Трилоджи» составило 0,33 % для номинальной энергии фотонов 6 МэВ и –1,13 % для энергии 18 МэВ.

Симметрия и равномерность радиационного пучка

Симметрия радиационного пучка (Sym) – характеристика поля облучения, определяет расхождение между измеренными значениями поглощенных доз в двух любых точках, симметрично расположенных относительно центральной оси пучка излучения, взятых в области равномерного поля облучения, которые не должны превышать предельно допустимой величины и, согласно национальному протоколу КК ЛУ [10], определяется по формуле (1):

$$Sym = \left(\frac{D_{(x)}}{D_{(-x)}} \right)_{MAX} \times 100 \%, \quad (1)$$

где Sym – симметрия радиационного пучка;
 $D_{(x)}$ – значение поглощенной дозы в точке x ;
 $D_{(-x)}$ – значение поглощенной дозы в точке $-x$, симметричной точке x относительно оси радиационного пучка.

Равномерность радиационного пучка (Fl) – характеристика поля облучения, определяет рас-

хождения между максимальным и минимальным измеренными значениями поглощенных доз в двух любых точках, расположенных в области равномерного поля облучения [12], которые не должны превышать предельно допустимую величину и, согласно протоколу КК ЛУ, утвержденному МЗ РБ [10], определяется по формуле (2):

$$Fl = \frac{D_{MAX}}{D_{MIN}}, \quad (2)$$

где Fl – равномерность радиационного пучка;
 D_{MAX} – максимальное значение поглощенной дозы в рассматриваемой области;
 D_{MIN} – минимальное значение поглощенной дозы в рассматриваемой области.

При проведении процедуры калибровки радиационного выхода линейного ускорителя согласно инструкции¹ измерение значения поглощенной дозы проводится в точке пересечения центральных осей радиационного пучка, и симметрия, а также равномерность радиационного поля практически не оказывают влияния на опорное значение дозы, вследствие того что профильные распределения поглощенной дозы нормализуются на эту точку.

Таким образом, установлено, что ошибка в определении ME_{cal} практически не зависит от симметрии и равномерности радиационного поля для процедуры калибровки РВ ЛУ согласно методологии, изложенной в инструкции¹.

Точность определения коэффициентов радиационного выхода

В настоящее время определение КРВ в медицинских учреждениях Республики Беларусь, осуществляющих лучевую терапию с применением ЛУ, производится в соответствии с инструкцией¹. Ошибки при определении КРВ приведут к отклонениям опорного значения поглощенной дозы ввиду изменения величины $OF(r_{sq})_{cal}$ [1]. Для установления зависимости ошибки в дозе при калибровке радиационного выхода линейного ускорителя от точности определения коэффициентов радиационного выхода установлено количество мониторинговых единиц линейного ускорителя, необходимое для доставки запланированного значения поглощенной дозы при проведении калибровки радиационного выхода линейного ускорителя для случаев ошибки в определении КРВ ($ME_{scpercal}$). Значения $ME_{scpercal}$ получены для случаев ошибки при определении значений $OF(r_{sq})_{cal}$

в диапазоне $\pm 5\%$ от опорного значения с шагом 1% . Установлено, что $ME_{scpercal}$ практически не зависит от размера поля при определении КРВ для которого обнаружена ошибка.

Результаты исследований представлены на рисунке 3.

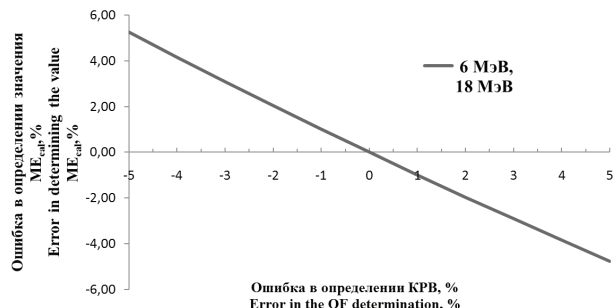


Рисунок 3 – Зависимость ошибки в определении опорного значения дозы линейного ускорителя от ошибки в установлении коэффициентов радиационного выхода ускорителя для фотонов с энергиями 6 и 18 МэВ

Figure 3 – Dependence of the error in determining of the reference dose value of linac on the error in the output factors determination for photons with energies of 6 and 18 MeV

Таким образом, установлено, что отклонение ME_{cal} имеет практически линейную зависимость от ошибки при определении коэффициентов радиационного выхода ЛУ и не отличается для номинальных энергий фотонов 6 и 18 МэВ. Значение отклонения в дозе ЛУ «Трилоджи» изменялось от $-4,76\%$ до $5,26\%$ при ошибках в определении $OF(r_{sq})_{cal}$ в диапазоне $\pm 5\%$ от опорного значения КРВ. В случаях, когда размер опорного поля во время измерений КРВ при конфигурации алгоритма расчета дозовых распределений фотонов для компьютерной системы планирования облучения практически равен размеру опорного поля при калибровке РВ ускорителя, ошибки в определении опорного значения дозы исключены, поскольку доза нормируется на одно значение.

Угловая зависимость радиационного выхода линейного ускорителя при вращении штатива

При генерации линейными ускорителями излучения может наблюдаться изменение их РВ для различных углов наклона штатива [5], что приведет к возникновению ошибок при определении ME_{cal} ввиду изменения D_{ref} [1], вследствие изменения показаний дозиметра в единицах электрического заряда M (см. инструкцию¹). Зависимость

РВ от угла вращения штатива является индивидуальной для каждого ЛУ и энергии облучения.

На основании результатов экспериментальных исследований установлено, что при изменении положения штатива ЛУ «Трилоджи» от 0° до 360° показания дозиметра в единицах электрического заряда ($M_{grotmecal}$) изменяются от 0,9969 до 1,001 для фотонов с номинальной энергией 6 МэВ и от 0,9911 до 1 для 18 МэВ по отношению к показаниям дозиметра ($M_{grotmecalref}$) для угла штатива, при котором проводится калибровка радиационного выхода (0° в РНПЦ ОМР). С использованием методологии [1] определено опорное значение поглощенной дозы ЛУ для рассматриваемых случаев ($ME_{grotmecal}$). Результаты исследований представлены на рисунке 4.

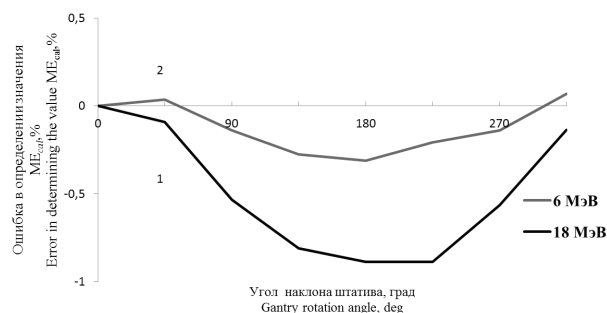


Рисунок 4 – Зависимость ошибки в определении опорного значения дозы линейного ускорителя, возникающей при наклоне штатива ускорителя, от угла наклона штатива для фотонов с энергиями 18 МэВ (1) и 6 МэВ (2)

Figure 4 – Dependence of the error in determining of the dose reference value of the linear accelerator that occurs with accelerator's gantry inclination on the gantry rotation angle for photons with energies of 18 MeV (1) and 6 MeV (2)

Таким образом, ошибка в определении ME_{cal} имеет сложную форму зависимости от отклонений радиационного выхода ЛУ, вызванных поворотом штатива ЛУ, и отличается для двух энергий фотонов. Основной вклад в величину ошибки вносят показания дозиметра в единицах электрического заряда $M_{grotmecal}$. Максимальное значение ошибки составило $-0,81\%$ для энергии 18 МэВ при наклоне штатива на угол 225° и $-0,31\%$ для энергии 6 МэВ при наклоне штатива на угол 180° . В случае, когда дозиметрические измерения для конфигурации расчета дозы проводятся при положении штатива, при котором проводится калибровка РВ ЛУ, ошибки в определении опорного значения дозы при проведении калибровки РВ исключены.

Заключение

Разработаны методики определения ошибки в опорном значении дозы при калибровке радиационного выхода линейных ускорителей, возникающей при изменении мощности дозы, определении проникающей способности излучения, установлении коэффициентов радиационного выхода, а также вследствие зависимости радиационного выхода от угла наклона штатива ускорителя.

С использованием разработанных методик и результатов проведенных экспериментальных измерений получены зависимости возникающей ошибки в опорном значении дозы от мощности дозы радиационного пучка; величины ошибки при определении проникающей способности излучения, установлении коэффициента радиационного выхода, отклонений в симметрии и равномерности радиационного поля, отклонений радиационного выхода линейного ускорителя, вызванных поворотом штатива ускорителя.

На основании анализа полученных зависимостей показано, что на ошибку в дозе при калибровке радиационного выхода линейного ускорителя оказывают влияние отклонения от опорного значения указанных ниже характеристик радиационного пучка линейного ускорителя, которые приведены в порядке убывания их влияния. В частности, установлено следующее:

- ошибка имеет практически линейную зависимость от погрешности при определении коэффициентов радиационного выхода линейного ускорителя в диапазоне ± 5 % от опорного значения коэффициента радиационного выхода, практически не отличается для двух энергий фотонов и составляет от $-4,76$ до $5,26$ %;

- ошибка имеет сложную зависимость от мощности дозы при калибровке радиационного выхода в диапазоне от 1 до 6 Гр/мин, отличается для двух энергий фотонов и достигает 1,6 % для фотонов 6 МэВ и 1,4 % для фотонов 18 МэВ при мощности дозы 1 Гр/мин;

- ошибка имеет практически линейную зависимость от погрешности в определении проникающей способности фотонного излучения из диапазона ± 4 % от опорного значения $TPR_{20,10}$, отличается для двух энергий фотонов и достигает 0,33 % для номинальной энергии фотонов 6 МэВ и $-1,13$ % для энергии 18 МэВ;

- ошибка имеет сложную зависимость от отклонений радиационного выхода линейного

ускорителя, вызванных поворотом штатива линейного ускорителя для всего диапазона углов вращения, отличается для двух энергий фотонов и достигает $-0,81$ % для энергии 18 МэВ при наклоне штатива на угол 225° и $-0,31$ % для энергии 6 МэВ при наклоне штатива на угол 180° ;

- ошибка практически не зависит от симметрии и равномерности радиационного поля для процедуры калибровки радиационного выхода линейного ускорителя согласно методологии, изложенной в инструкции¹.

Список использованных источников

1. Титович, Е.В. Методика определения ошибки в опорном значении дозы при калибровке радиационного выхода линейного ускорителя. Часть 1. Зависимость от механических параметров штатива / Е.В. Титович, М.Г. Киселев // Приборы и методы измерений. – 2015. – Т. 6, № 2. – С. 230–238.
2. Титович, Е.В. Методика определения ошибки в опорном значении дозы при калибровке радиационного выхода линейного ускорителя. Часть 2. Зависимость от характеристик коллиматора, указателя расстояния источник-поверхность, радиационного поля, лазерных центраторов, терапевтического стола / Е.В. Титович, И.Г. Тарутин, М.Г. Киселев // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 1. – С. 85–94. DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-85-94
3. Determination of Absorbed Dose in a Patient Irradiated by Beams of X or Gamma rays in Radiotherapy Procedures, International Commission On Radiation Units And Measurements. – Washington, D.C: ICRU, 1976. – Rep. 24
4. Mijnheer, B.J. Reply to precision and accuracy in radiotherapy / B. J. Mijnheer // Radiotherapy and Oncology. – 1989. – Vol. 14, no. 2. – P. 163–167.
5. Khan, F.M. The Physics of Radiation Therapy / F.M. Khan. – 4th ed. – Philadelphia : Lippincott Williams & Wilkins, 2010. – 531 p.
6. Klein, E.E. Task Group 142 report: quality assurance of medical accelerators / E.E. Klein, J. Hanley, J. Bayouth [et al.] // Medical physics. – 2009. – Vol. 36, no. 9. – P. 4197–212.
7. Swiss Society of Radiobiology and Medical Physics, Quality control of medical electron accelerators. – SSRMP, 2003, recommendation No. 11. – P. 1–31.
8. Steenhuisen, J. EP-1388 Delivery accuracy of treatment plans for dose painting by numbers / J. Steenhuisen [et al.] // Radiotherapy & Oncology. – 2012. – Vol. 103, Suppl. no. 1. – P. S527.
9. World Health Organization, Quality Assurance in Radiotherapy. – Geneva : WHO, 1988.
10. Тарутин, И.Г. Контроль качества медицинских ускорителей электронов / И.Г. Тарутин, А.Г. Страх, Г.В. Гацкевич // Контроль качества в лучевой терапии и лучевой диагностике : сб. / под ред.

Г.В. Гацкевича, И.Г. Тарутина. – Минск : Полипринт, 2009. – С. 31–66.

11. Absorbed dose determination in external beam radiotherapy/ An international Code of Practice for Dosimetry Based on standards of Absorbed dose to Water // IAEA. Technical Report Series. – No. 398. – Vienna, 2000.

12. Medical Electrical Equipment. Part 1: Medical Electron Accelerators. Functional characteristics // IEC. Publ. IEC-60976-99. – Geneva, 1999.

References

1. Tsitovich Y.V., Kiselev M.G. [Technique of estimate of error in the reference value of the dose during the linear accelerator radiation output calibration procedure. Part 1. Dependence on the mechanical parameters of linac's gantry]. *Pribory i metody izmerenij* [Devices and Methods of Measurements], 2015, vol. 6, no. 2, pp. 230–238 (in Russian).

2. Tsitovich Y.V., Tarutin I.G., Kiselev M.G. [Technique of estimate of error in the reference value of the dose during the linear accelerator radiation output calibration procedure. Part 2. Dependence on the characteristics of collimator, optical source-distance indicator, treatment field, lasers and treatment couch]. *Pribory i metody izmerenij* [Devices and Methods of Measurements]. 2016, vol. 7, no. 1, pp. 85–94 (in Russian). DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-85-94.

3. International Commission On Radiation Units And Measurements. Determination of Absorbed Dose

in a Patient Irradiated by Beams of X or Gamma rays in Radiotherapy Procedures. *Washington, D.C.: ICRU*, 1976, rep. 24.

4. Mijnheer B.J. Reply to precision and accuracy in radiotherapy. *Radiotherapy and Oncology*, 1989, vol. 14, no. 2, pp. 163–167.

5. Khan F.M. The Physics of Radiation Therapy. 4th ed. Philadelphia : Lippincott Williams & Wilkins, 2010, 531 p.

6. Klein E.E., Hanley J., Bayouth J. et al. Task Group 142 report: quality assurance of medical accelerators. *Medical physics*, 2009, vol. 36, no. 9, pp. 4197–212.

7. Swiss Society of Radiobiology and Medical Physics, Quality control of medical electron accelerators. SSRMP, 2003, recommendation no. 11, pp. 1–31.

8. Steenhuijsen J. Delivery accuracy of treatment plans for dose painting by numbers. *Radiotherapy & Oncology*, 2012, vol. 103, suppl. no 1, pp. S527.

9. World Health Organization. Quality Assurance in Radiotherapy. Geneva: WHO, 1988.

10. Tarutin I.G., Gackevich G.V. *Kontrol'kachestva v luchevoj terapii i luchevoj diagnostike* [Quality control of radiation therapy and medical imaging]. Minsk, Polyprint Publ., 2009, pp. 31–66 (in Russian).

11. IAEA. Absorbed dose determination in external beam radiotherapy. An international Code of Practice for Dosimetry Based on Gantrydards of Absorbed dose to Water. *Technical Report Series. no. 398*. Vienna, 2000.

12. IEC. Medical Electrical Equipment. Part 1: Medical Electron Accelerators. Functional characteristics. *Publ. IEC-60976-99*. Geneva, 1999.