

УДК 53.089.68

Создание полей рентгеновского излучения с низкой мощностью дозы для исследования энергетической зависимости чувствительности дозиметрических средств измерений на основе сцинтилляционных блоков детектирования

А.В. Новиченко, Р.В. Лукашевич, К.Г. Сеньковский

Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ»,
ул. Гикало, 5, г. Минск 220005, Беларусь

Поступила 20.03.2019

Принята к печати 24.05.2019

Измерение мощности дозы на уровне естественного радиационного фона является важным элементом радиационного мониторинга окружающей среды. Проверка энергетической зависимости показаний высокочувствительных дозиметрических средств измерений на основе неорганических сцинтилляционных детекторов в области низких энергий возможна при создании эталонных полей рентгеновского излучения с низкими уровнями мощности дозы (до 5 мкЗв/ч). Целью данной работы являлось создание и исследование эталонных полей рентгеновского излучения с низкой мощностью дозы и узким спектром в диапазоне энергий от 15 до 250 кэВ с использованием фильтров из особо чистых металлов в составе формирователя поля рентгеновского излучения установки УПР-АТ300.

Для определения основных характеристик созданных полей рентгеновского излучения использовались разработанные в УП «АТОМТЕХ» высокочувствительные блоки-компараторы фотонного излучения на основе сцинтилляционных NaI(Tl) детекторов. Проверка энергетической зависимости блока-компаратора осуществлялась с помощью эталонного дозиметра ДКС-АТ5350/1 и ионизационной камеры ТМ32003 с чувствительным объемом 10000 см³.

Исследованы характеристики полей рентгеновского излучения, полученные на поверочной установке рентгеновского излучения УПР-АТ300 с целью проверки энергетической зависимости показаний высокочувствительных дозиметрических средств измерений на основе сцинтилляционных блоков детектирования. Показана возможность калибровки высокочувствительных дозиметрических средств измерений на основе сцинтилляционных детекторов в энергетическом диапазоне до 250 кэВ в пучках рентгеновского излучения.

Ключевые слова: мощность дозы, блок-компаратор, сцинтилляционный детектор, энергетическая зависимость, рентгеновская трубка.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-2-128-137

Адрес для переписки:

А.В. Новиченко
УП «АТОМТЕХ»,
ул. Гикало, 5, г. Минск 220005, Беларусь
e-mail: Novichenko_AV@atomtex.com

Address for correspondence:

A.V. Novichenko
SPE «ATOMTEX»,
Gikalo str., 5, Minsk 220005, Belarus
e-mail: Novichenko_AV@atomtex.com

Для цитирования:

А.В. Новиченко, Р.В. Лукашевич, К.Г. Сеньковский.
Создание полей рентгеновского излучения с низкой мощностью дозы для исследования энергетической зависимости чувствительности дозиметрических средств измерений на основе сцинтилляционных блоков детектирования.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 2. – С. 128–137.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-2-128-137

For citation:

A.V. Novichenko, R.V. Lukashevich, K.G. Senkovsky.
[Low Dose Rate X-Ray Radiation Fields Implementation for Study of Energy Response of the Dosimeters Based on Scintillation Detectors].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 2, pp. 128–137 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-2-128-137

Low Dose Rate X-Ray Radiation Fields Implementation for Study of Energy Response of the Dosimeters Based on Scintillation Detectors

A.V. Novichenko, R.V. Lukashevich, K.G. Senkovsky

Scientific production unitary enterprise «ATOMTEX»,
Gikalo str., 5, Minsk 220005, Belarus

Received 20.03.2019

Accepted for publication 24.05.2019

Abstract

Near background low dose rate measurements are important part of the environmental radiation monitoring. It is possible to fulfill energy response verification for the high sensitive dosimeters based on inorganic scintillation detectors in low energy region when creating reference X-ray fields with dose rates up to 5 $\mu\text{Sv/h}$. The aim of this work was to create and study reference X-ray fields with low dose rate and narrow spectrum in the energy range from 15 to 250 keV using high-purity metal filters as a part of X-ray irradiator of AT300 X-ray calibration facility.

To determine the main characteristics of created X-ray fields highly sensitive comparators of photon radiation based on NaI(Tl) scintillation detectors was used. The comparators were developed in «ATOMTEX». To verify comparators energy response the reference AT5350/1 dosimeter and ionization chamber TM32003 with sensitive volume 10000 cm^3 were used.

Characteristics of X-ray fields that were created on the AT300 X-ray calibration facility to verify the energy response of high sensitive dosimeters based on scintillation detectors were investigated. The possibility to calibrate high sensitive dosimetric measuring instruments based on scintillation detectors in the energy range up to 250 keV in X-ray beams was shown.

Keywords: dose rate, comparator, scintillation detector, energy response, X-ray tube.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-2-128-137

Адрес для переписки:

А.В. Новиченко
УП «АТОМТЕХ»,
ул. Гикало, 5, г. Минск 220005, Беларусь
e-mail: Novichenko_AV@atomtex.com

Для цитирования:

А.В. Новиченко, Р.В. Лукашевич, К.Г. Сеньковский.
Создание полей рентгеновского излучения с низкой мощностью дозы для исследования энергетической зависимости чувствительности дозиметрических средств измерений на основе сцинтилляционных блоков детектирования.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 2. – С. 128–137.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-2-128-137

Address for correspondence:

A.V. Novichenko
SPE «ATOMTEX»,
Gikalo str., 5, Minsk 220005, Belarus
e-mail: Novichenko_AV@atomtex.com

For citation:

A.V. Novichenko, R.V. Lukashevich, K.G. Senkovsky.
[Low Dose Rate X-Ray Radiation Fields Implementation for Study of Energy Response of the Dosimeters Based on Scintillation Detectors].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 2, pp. 128–137 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-2-128-137

Введение

Измерение мощности дозы на уровне естественного радиационного фона является важным элементом радиационного мониторинга окружающей среды. При этом необходимо получать информацию о малейшем превышении техногенного радиационного фона по отношению к естественному радиационному фону. Применение сцинтилляционных блоков детектирования в качестве дозиметрических средств измерений для задач радиационного мониторинга является наиболее приемлемым по причине их высокой чувствительности и высокой временной стабильности.

Для решения задач радиационного мониторинга необходимо использовать дозиметрические средства измерений с известной дозовой характеристикой и энергетической зависимостью чувствительности¹. Исследование энергетической зависимости чувствительности дозиметрических средств измерений при их производстве и настройке подразумевает использование источников рентгеновского и гамма-излучения в широком диапазоне энергий (например, от 40 кэВ до 3 МэВ). Как правило, дозиметрические средства измерений калибруются или поверяются на эталонных дозиметрических установках с использованием источников гамма-излучения [1]. Набор гамма-источников, входящий в состав эталонных установок, ограничен стоимостью или периодом распада радионуклидов. На практике в большинстве случаев в состав эталонных дозиметрических установок входят такие источники гамма-излучения, как: ^{241}Am (59,6 кэВ), ^{57}Co (122 кэВ), ^{137}Cs (662 кэВ) и ^{60}Co (1173 и 1333 кэВ). Учитывая сложную энергетическую зависимость чувствительности сцинтилляционных блоков детектирования, необходимо проведение дополнительных исследований энергетической зависимости блоков детектирования. Нередки случаи, когда калибровка дозиметрических средств измерений на основе сцинтилляционных блоков детектирования проводится только с использованием источников гамма-излучения ^{241}Am и ^{137}Cs , что приводит к ошибочным результатам измерений в диапазонах 40–60 кэВ и 80–300 кэВ. Становится очевидным, что необходимо использовать эталонные рентгеновские установки, имеющие широкий набор качеств

излучений в диапазоне от единиц килоэлектрон-вольт до 300 кэВ [2, 3]. Однако определение энергетической зависимости чувствительности сцинтилляционных блоков детектирования с использованием эталонных рентгеновских установок является нетривиальной задачей, так как при их высокой чувствительности к рентгеновскому излучению ограничивается динамический диапазон измерения мощности дозы.

Проверка энергетической зависимости показаний дозиметрических средств измерений на основе сцинтилляционных блоков детектирования в диапазоне низких энергий возможна на рентгеновских поверочных установках при создании качеств излучений с низкой мощностью дозы (например, 0,1–5 мкЗв/ч). Для этого необходимо выполнить специальные исследования создаваемых полей излучений и иметь высокочувствительное средство измерений, откалиброванное в подобных полях. Применение эталонного средства измерений на эталонных рентгеновских установках методом замещения позволит проводить исследования энергетической зависимости высокочувствительных дозиметрических средств измерений на основе сцинтилляционных блоков детектирования.

Целью работы являлась разработка и создание полей рентгеновского излучения с малой мощностью дозы для исследования энергетической зависимости дозиметрических средств измерений на основе сцинтилляционных блоков детектирования с применением блоков-компараторов.

Проблематика

Стандартные эталонные серии качеств фильтрованного рентгеновского излучения, описанные в государственном стандарте СТБ ИСО², позволяют создавать минимальную мощность дозы порядка 190 мкЗв/ч на расстоянии 1000 мм от фокуса рентгеновской трубки. Данная мощность дозы является слишком высокой для проверки энергетической зависимости блоков детектирования на основе неорганических сцинтилляционных детекторов. Проведение измерений на больших расстояниях от фокуса рентгеновской трубки приведет к искажению энергетического спектра из-за поглощения излучения в воздухе, и как следствие, приведет к ошибкам при расчете мощности дозы излучения.

¹Средства измерений ионизирующих излучений. Общие технические условия: ГОСТ 27451-87

²Государственный стандарт Республики Беларусь СТБ ИСО 4037-1:2014

Сцинтилляционные детекторы, такие как NaI(Tl), имеют весьма значительную зависимость чувствительности от энергии излучения. На рисунке 1 представлена полученная нами зависимость чувствительности сцинтилляционного NaI(Tl) детектора размерами $\varnothing 40$ мм, $h = 40$ мм. Поэтому для проверки энергетической зависимости блоков детектирования на основе неорганических сцинтилляционных детекторов следует использовать качества излучения близкие к моноэнергетическому. Из-за высокой чувствительности неорганических сцинтилляционных детекторов к фотонному излучению качества излучения должны обладать как можно меньшей мощностью дозы.

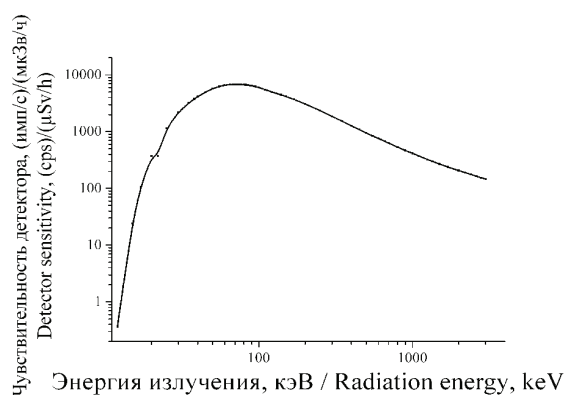


Рисунок 1 – Зависимость чувствительности NaI(Tl) детектора ($\varnothing 40$ мм, $h = 40$ мм) от энергии фотонов

Figure 1 – The NaI(Tl) detector ($\varnothing 40$ мм, $h = 40$ мм) sensitivity as a function of photon energy

Основной задачей при формировании серии качеств излучения с низкой мощностью дозы являлось получение набора качеств излучения со значениями мощности дозы порядка 1 мкЗв/ч на расстоянии 1000 мм от фокуса рентгеновской трубки и энергетическим разрешением в пределах 20 % в диапазоне эффективных энергий от 15 до 250 кэВ.

Блоки-компараторы рентгеновского и гамма-излучения

Для проведения калибровки эталонных полей рентгеновского и гамма-излучения эталонных дозиметрических установок были разработаны высокочувствительные блоки-компараторы фотонного излучения [4] на базе серийно выпускаемых сцинтилляционных блоков детектирования рентгеновского и гамма-излучения со сцинтилляционными NaI(Tl) детекторами

в рамках научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Накопленная при регистрации фотонного излучения информация обрабатывается соответствующим программным обеспечением и выводится на экран персонального компьютера (ПК) в виде мощности дозы и аппаратурных спектров фотонного излучения.

При измерении мощности дозы использован спектрометрический метод преобразования аппаратурных спектров непосредственно в мощность дозы с помощью функции радиационного отклика, значения которой зависят от амплитуды регистрируемых импульсов [5, 6].

Алгоритм работы блока-компаратора обеспечивает непрерывность процесса измерения, вычисление значений мощности дозы и оперативное отображение получаемой информации на экране ПК, статистическую обработку результатов измерений, сохранение результатов измерений мощности дозы фотонного излучения. Блоки-компараторы позволяют измерять воздушную керму, амбиентный эквивалент дозы и экспозиционную дозу.

Калибровка блоков-компараторов выполнена во Всесоюзном научно-исследовательском институте имени Д.И. Менделеева на государственных эталонах Российской Федерации, в том числе на государственном первичном эталоне единиц кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы и потока энергии рентгеновского и гамма-излучений ГЭТ 8-2011 в диапазоне энергий от 8 до 222 кэВ [4].

Исследование характеристик полей рентгеновского излучения

Поля рентгеновского излучения с низкой мощностью дозы создавались на установке поворотной рентгеновского излучения УПР-АТ300. На расстоянии 1000 мм от фокуса рентгеновской трубки на рабочем столе подвижной платформы системы позиционирования на центральной оси пучка излучения располагался блок-компаратор БКМР-АТ1104 или блок-компаратор БКМГ-АТ1102. С помощью формирователя поля рентгеновского излучения устанавливалась фильтрация для каждого качества излучения. Для получения низких уровней мощности дозы применялись дополнительные фильтры, которые устанавливались в специальный отсек формирователя

поля и ослабляли интенсивность исходного пучка до нужного уровня. Напряжение на рентгеновской трубке и ток катода задавались с помощью пульта управления высоковольтного генератора.

Для получения требуемых мощности дозы и энергетического разрешения для качеств с энергиями от 15 до 100 кэВ [7] применялись металлические фильтры размерами 100 × 100 мм из особо чистых олова, меди и алюминия различной толщины. Для проверки основных характеристик качеств излучения в данном энергетическом диапазоне применялся блок-компаратор БКМР-АТ1104 на основе сцинтилляционного NaI(Tl) детектора с бериллиевым окном (Ø 9 мм, $h = 2$ мм). Для формирования качеств излучения с энергиями от 150 до 250 кэВ применялись металлические фильтры из особо чистых свинца, олова, меди и алюминия. Для проверки основных характеристик качеств

излучения в данном энергетическом диапазоне применялся блок-компаратор БКМГ-АТ1102 на основе сцинтилляционного NaI(Tl) детектора (Ø 40 мм, $h = 40$ мм).

Эффективная энергия излучения определялась по слою половинного ослабления (СПО). Сужение спектра излучения осуществлялось уменьшением напряжения на рентгеновской трубке и увеличением фильтрации для получения необходимой эффективной энергии.

Энергетическое разрешение определялось по числовым данным спектров по формуле:

$$R_E = \frac{\Delta E}{E} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где ΔE – ширина спектра на половине максимальной ординаты спектра; E – энергия пика спектра излучения.

Основные характеристики качеств АТ-ХЛ серии представлены в таблице 1.

Таблица 1/ Table 1

Характеристики серии качеств АТ-ХЛ

Characteristics of AT-XL series

| Качество излучения Radiation quality | Энергия, кэВ Energy, keV | Фильтрация, мм Filtration, mm | | | | СПО, мм HVL, mm | Разрешение, % Resolution, % |
|---|-----------------------------|----------------------------------|--------|--------|-------|--------------------|--------------------------------|
| | | Al | Cu | Sn | Pb | | |
| AT-XL15 | 15 | 2,184 | 0,048 | – | – | 0,33 Al | 23 |
| AT-XL20 | 21 | 2,184 | 0,256 | – | – | 0,86 Al | 23,8 |
| AT-XL30 | 29 | 2,184 | 0,759 | – | – | 2,1 Al | 20 |
| AT-XL40 | 39 | 5,972 | 1,512 | – | – | 4,25 Al | 17,1 |
| AT-XL55 | 54,5 | 2,184 | 4,47 | – | – | 0,38 Cu | 15 |
| AT-XL70 | 69,7 | 3,67 | 8,988 | – | – | 0,72 Cu | 16 |
| AT-XL100 | 99,8 | 4,991 | 18,006 | 1,031 | – | 1,71 Cu | 19 |
| AT-XL150 | 150 | 4,991 | 20,037 | 13,126 | – | 3,98 Cu | 18,1 |
| AT-XL200 | 200 | 21 | 12,04 | 13,99 | 3,065 | 5,4 Cu | 19 |
| AT-XL250 | 250 | 21 | 12,04 | 15,164 | 4,99 | 6,24 Cu | 23,9 |

Для проверки значений мощности дозы исследуемых качеств излучения, полученных с помощью блоков-компараторов, проводились сравнения их показаний методом непосредственного сличения с показаниями эталонного дозиметра ДКС-АТ5350/1 с ионизационной камерой ТМ32003 с высокой степенью линейности (до 3 %) в диапазоне энергий от 0,025 до 1,3 МэВ. Рабочий объем сферической

ионизационной камеры ТМ32003 составляет 10 л, внешний диаметр равен 276 мм [8].

Предварительно ионизационная камера ТМ32003 была откалибрована в полях рентгеновского излучения в диапазоне энергий от 30 до 263 кэВ. Качества излучения для калибровки ионизационной камеры подбирались таким образом, чтобы эффективная энергия находилась максимально близко к значениям

эффективных энергий исследуемых качеств. Выбранные качества излучения соответствовали эталонным качествам фильтрованного рентгеновского излучения с низкой мощностью кермы в воздухе и с узким энергетическим разрешением. При определении калибровочных коэффициентов для ионизационной камеры ТМ32003 исследуемых качеств излучения применялся метод интерполяции по известным значениям калибровочных коэффициентов для данной камеры, полученных при известных энергиях эталонных качеств излучения. Значения калибровочных коэффициентов представлены в таблице 2.

Измерения мощности дозы проводились на расстоянии 2500 мм от фокуса рентгеновской трубки с использованием вольфрамовой диафрагмы диаметром 51 мм. Таким образом, формировалось эталонное равномерное рентгеновское поле излучения диаметром 300 мм, что было необходимо для полного и равномерного облучения всего чувствительного объема ионизационной камеры [9].

На рабочем столе системы позиционирования располагались ионизационная камера ТМ32003 и блок-компаратор на равных расстояниях от фокуса рентгеновской трубки.

На расстоянии 1000 мм от фокуса рентгеновской трубки проводилась лазерная привязка позиции центров детекторов. Далее рабочий стол с помощью пульта управления передвигался на расстояние 2500 мм от фокуса рентгеновской трубки для обеспечения равномерного поля излучения для ионизационной

камеры. Проводились измерения мощности дозы на разных качествах излучения и определялись отклонения показаний блока-компаратора от ионизационной камеры. Значения мощности дозы считывались с блока-компаратора с помощью специализированной программы на компьютере. Показания ионизационной камеры считывались с измерительного блока ДКС-АТ5350/1. В таблице 3 представлены результаты сличения ионизационной камеры ТМ32003 и блока-компаратора БКМГ-АТ1102.

Таблица 2/Table 2

Значения калибровочных коэффициентов для ионизационной камеры ТМ32003 для исследуемых качеств излучения

The calibration factor values of ionization chamber ТМ32003 for studied qualities

| Качество излучения Radiation quality | Энергия излучения, кэВ Radiation energy, keV | Калибровочный коэффициент, Гр/Кл Calibration factor, Gy/C |
|---|---|--|
| АТ-ХЛ40 | 39 | $3,084 \cdot 10^3$ |
| АТ-ХЛ55 | 54,5 | $3,074 \cdot 10^3$ |
| АТ-ХЛ70 | 69,7 | $3,095 \cdot 10^3$ |
| АТ-ХЛ100 | 99,8 | $3,113 \cdot 10^3$ |
| АТ-ХЛ150 | 150 | $3,122 \cdot 10^3$ |
| АТ-ХЛ200 | 200 | $3,141 \cdot 10^3$ |
| АТ-ХЛ250 | 250 | $3,162 \cdot 10^3$ |

Таблица 3/Table 3

Результаты измерений мощности дозы

Dose rate measurement results

| Качество излучения Radiation quality | Эффективная энергия, кэВ Effective energy, keV | Н*(10), мкЗв/ч Н*(10), $\mu\text{Sv/h}$ | | Относительное отклонение, % Relative deviation, % |
|---|---|--|---------|--|
| | | БКМГ-АТ1102 | ТМ32003 | |
| АТ-ХЛ55 | 54,5 | 3,247 | 3,297 | 1,54 |
| АТ-ХЛ70 | 69,7 | 2,52 | 2,519 | -0,04 |
| АТ-ХЛ100 | 99,8 | 7,052 | 7,213 | 2,28 |
| АТ-ХЛ150 | 150 | 6,828 | 6,7 | -1,87 |
| АТ-ХЛ200 | 200 | 9,821 | 10,17 | 3,55 |
| АТ-ХЛ250 | 250 | 20,323 | 21,638 | 6,47 |

Анализ полученных результатов указывает на хорошую сходимость значений для ионизационной камеры ТМ32003 и блока-компаратора БКМГ-АТ1102 в исследуемом диапазоне энергий, что характеризует адекватность использования блока-компаратора для калибровки данных полей излучения по мощности дозы.

Оценка неопределенности измерений околофоновых полей фотонного излучения по мощности дозы с использованием эталонного средства измерений

За неопределенность результата калибровки околофоновых полей, формируемых с использованием рентгеновского излучения, принимается относительная расширенная неопределенность U , %, – относительная суммарная стандартная неопределенность u_c с коэффициентом охвата $k = 2$, который при нормальном распределении соответствует доверительной вероятности 95 %.

Расчет расширенной неопределенности производится в соответствии с выражением:

$$U = k \cdot u_c, \quad (2)$$

где u_c – относительная стандартная неопределенность измерения мощности дозы для эталонного средства измерений, %.

Относительная стандартная неопределенность измерения мощности дозы рассчитывается в соответствии с выражением:

$$u_c = \sqrt{u_{(\dot{H}_m - \dot{H}_0)}^2 + u_{ct}^2 + u_r^2 + u_{ng}^2 + u_{nd}^2}, \quad (3)$$

где $u_{(\dot{H}_m - \dot{H}_0)}$ – относительная неопределенность измерения мощности дозы (относительно показаний эталонного средства измерений); u_{ct} – неопределенность блока-компаратора, связанная с основной погрешностью эталонного средства измерений; u_r – неопределенность, связанная с определением расстояния «источник-детектор»; u_{ng} – неопределенность, связанная с нестабильностью градуировочной характеристики преобразования эталонного средства измерений за время непрерывной работы; u_{nd} – неопределенность, связанная с нестабильностью показаний

эталонного средства измерений при измерении мощности дозы за время непрерывной работы.

Результаты сличения блока-компаратора с ионизационной камерой показывают, что в исследуемом диапазоне энергий изменение спектральной характеристики излучения при одинаковых нагрузках не влияет существенно на показания блока-компаратора. Таким образом, относительная стандартная неопределенность измерения мощности дозы с использованием блока-компаратора рассчитывается на основании расширенной неопределенности измерения мощности дозы и коэффициента охвата $k = 2$ согласно свидетельству о калибровке блока-компаратора.

Неопределенность, связанная с определением расстояния «источник-детектор», рассчитывается в соответствии с руководством по эксплуатации установки УПР-АТ300. Согласно данному руководству погрешность определения расстояния от анода рентгеновской трубки до центра детектора составляет $\pm 0,2$ %. При измерении минимальных значений мощности дозы блок-компаратор устанавливался на расстоянии 1000 мм от анода рентгеновской трубки. Таким образом, погрешность определения расстояния составила ± 2 мм.

Согласно паспортным данным на блок-компаратор, погрешность нестабильности градуировочной характеристики преобразования блок-компаратора за время непрерывной работы составляет $\pm 0,5$ %. Поскольку характер распределения погрешности является равновероятным (прямоугольным), то относительная стандартная неопределенность будет равна $0,5/\sqrt{3} = 0,29$ %.

Согласно паспортным данным блока-компаратора, погрешность нестабильности показаний компаратора при измерении мощности дозы гамма-излучения за время непрерывной работы блока-компаратора составляет $\pm 1,0$ %. Поскольку характер распределения погрешности также принимаем за прямоугольный, то относительная стандартная неопределенность будет равна $1,0/\sqrt{3} = 0,58$ %.

Расширенная неопределенность с учетом калибровочного коэффициента для блока-компаратора представлена в таблице 4.

Таблица 4/Table 4

Значения относительной стандартной и расширенной неопределенностей
Relative standard and extended uncertainty values

| Качество излучения Radiation quality | $\dot{H}^*(10)$, мкЗв/ч $\dot{H}^*(10)$, $\mu\text{Sv/h}$ | $U_{H^*}(\dot{H}^*(10))$, % | Калибровочный коэффициент Calibration factor | $U_{H^*}(\dot{H}^*(10))$, мкЗв/ч $U_{H^*}(\dot{H}^*(10))$, $\mu\text{Sv/h}$ |
|---|--|------------------------------|---|--|
| AT-XL55 | 1,051 | 6,23 | 0,995 | 0,065 |
| AT-XL70 | 0,985 | 6,74 | 0,98 | 0,065 |
| AT-XL100 | 1,104 | 6,62 | 0,98 | 0,071 |
| AT-XL150 | 0,584 | 6,66 | 0,993 | 0,038 |
| AT-XL200 | 1,641 | 6,17 | 1,005 | 0,102 |
| AT-XL250 | 18,08 | 6,208 | 1,015 | 1,139 |

Анализ полученных результатов показывает, что значения расширенной неопределенности не превышают 7 % для исследуемых качеств излучения. Основной вклад в расширенную неопределенность вносит неопределенность, связанная с основной погрешностью блок-компаратора.

Результаты и их обсуждение

Результаты измерения низких уровней мощности дозы на расстоянии 1000 мм от анода рентгеновской трубки с учетом расширенной неопределенности измерений представлены в таблице 5.

Таблица 5/Table 5

Значения мощности дозы с учетом расширенной неопределенности
Dose rate given with expanded uncertainty

| Качество излучения Radiation quality | Мощность дозы, мкЗв/ч Dose rate, $\mu\text{Sv/h}$ |
|---|--|
| AT-XL55 | $1,051 \pm 0,065$ |
| AT-XL70 | $0,985 \pm 0,065$ |
| AT-XL100 | $1,104 \pm 0,071$ |
| AT-XL150 | $0,584 \pm 0,038$ |
| AT-XL200 | $1,641 \pm 0,102$ |
| AT-XL250 | $18,08 \pm 1,015$ |

Аппаратурные спектры излучения получены с помощью блоков-компараторов рентгеновского и гамма-излучений (рисунок 2а). Спектры излучения, представленные в логарифмическом масштабе, позволяют визуально оценить схожесть энергетического разрешения серии качеств (рисунок 2б).

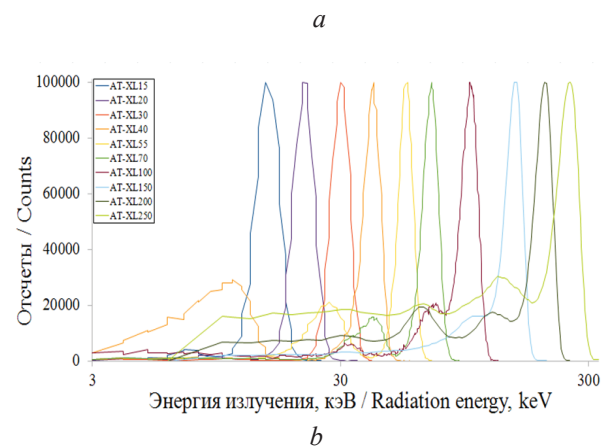
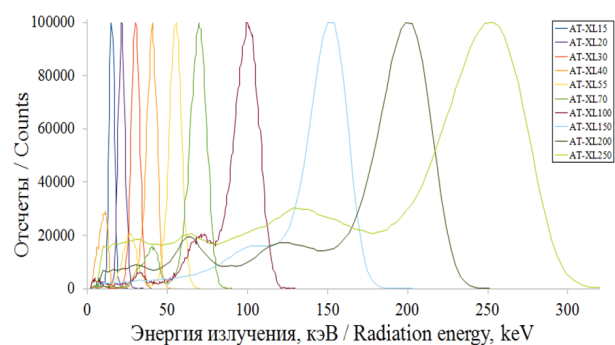


Рисунок 2 – Аппаратурные спектры для серии качеств AT-XL, измеренные блоками-компараторами БКМР-AT1104 и БКМГ-AT1102 в линейном (а) и в логарифмическом масштабе (б)

Figure 2 – Instrumental spectra of the AT-XL radiation qualities, measured with BKMR-AT1104 and BKMG-AT1102 comparators in linear scale (a) and logarithmic scale (b)

Из анализа полученных данных следует, что энергетическое разрешение полученных качеств находится в пределах от 15 до 24 %.

Заключение

Поверочная установка рентгеновского излучения УПР-АТ300 с применением набора фильтров из особо чистых свинца, олова, меди и алюминия позволяет сформировать дозиметрические поля с низкими уровнями мощности дозы и узким спектром и обеспечить исследования и проверки энергетической зависимости чувствительности дозиметрических средств измерений на основе сцинтилляционных и других высокочувствительных детекторов.

Значение мощности дозы для качества излучения с энергией 250 кэВ на расстоянии 1000 мм от анода рентгеновской трубки получилось значительно выше 1 мкЗв/ч. Однако достичь меньшего значения мощности дозы можно переместив детектор на расстояние 2500 мм. Поскольку энергия излучения достаточно высокая, перемещение на большее расстояние не приведет к ошибкам определения эффективной энергии и мощности дозы из-за незначительного ослабления излучения в воздухе.

Созданные поля рентгеновского излучения позволяют проводить исследования высокочувствительных сцинтилляционных дозиметрических средств измерений на расстояниях 1000 мм и 2500 мм от фокуса рентгеновской трубки при мощности дозы в пределах единиц мкЗв/ч в диапазоне энергий от 55 до 250 кэВ, что охватывает рабочий диапазон энергий большинства дозиметрических приборов на основе сцинтилляционных блоков детектирования.

Качества рентгеновского излучения с низкой мощностью дозы в диапазоне энергий от 15 до 40 кэВ требуют проведения дополнительных исследований с применением блока-компаратора рентгеновского излучения БКМР-АТ1104. Для подтверждения достоверности показаний блока-компаратора требуется провести сличения с показаниями ионизационной камеры с известным откликом в данном диапазоне энергий. Однако нижняя граница рабочего диапазона энергий для большинства ионизационных камер соответствует 50 кэВ. Таким образом, для сличения блока-компаратора с ионизационной камерой в диапазоне низких энергий, предварительно требуется откалибровать ионизационную камеру ТМ32003 в диапазоне от 15 до 40 кэВ и провести аналогичные исследования.

Список использованных источников

1. Дозиметрическая установка гамма-излучения УДГ-АТ110 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://atomtex.com/sites/default/files/catalogue_ru.pdf – Дата доступа: 25.01.2019.
2. Национальный эталон единиц кермы и мощности кермы в воздухе [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.belgim.by/1431> – Дата доступа: 25.01.2019.
3. Установка поверочная рентгеновского излучения УПР-АТ300 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://atomtex.com/sites/default/files/catalogue_ru.pdf – Дата доступа: 25.01.2019.
4. Лукашевич, Р.В. Сцинтилляционные блоки-компараторы для измерений мощности кермы в воздухе в диапазоне от 0,03 нГр/с до 50 нГр/с. / Р.В. Лукашевич [и др.] // Метрология и приборостроение. – 2017. – Т. 75, № 1. – С. 33–37.
5. Лукашевич, Р.В. Применение спектрометрического метода расчета мощности дозы для создания высокочувствительных образцовых средств измерения на базе сцинтилляционных блоков детектирования / Р.В. Лукашевич, Г.А. Фоков // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8, № 3. – С. 246–253.
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-246-253
6. Moriuchi, S. Development of a dosimetric system using spectrometric technique suitable for operational radiation dose measurements and evaluation / S. Moriuchi, M. Tsutsumi, K. Saito // 10-th Intern. congress of the International Radiation Protection Association IRPA-10 : proc. congress, Hiroshima, 14–19 May 2000 / Japan Health Physics Society. – Tokyo, 2000. – P–3b–197.
7. Behrens, R. The influence of the air density on the spectral properties of X-ray radiation qualities with mean energies from 6 keV to 90 keV. / R. Behrens // Rad. Prot. Dos. – 1999. – Vol. 86, no. 2. –P. 123–128.
DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a032931
8. Ionizing radiation. Detectors. Including code of practice / PTW – Freiburg. – 2018. – 49 p.
9. Implementation of the International Code of Practice on dosimetry in diagnostic radiology. – Vienna : International Atomic Energy Agency, 2011.

References

1. *Dozimetriceskaya ustanovka gamma-izlucheniya UDG-AT110* [AT110 Gamma radiation dosimetry unit]. Available at: http://atomtex.com/sites/default/files/catalogue_ru.pdf (accessed 25.01.2019).
2. *National standard of kerma units and air kerma rate*. Available at: <http://www.belgim.by/1431> (accessed 25.01.2019).
3. *Ustanovka poverochnaya rentgenovskogo izlucheniya UPR-AT300* [AT300 X-Ray calibration

facility]. Available at: http://atomtex.com/sites/default/files/catalogue_ru.pdf (accessed 25.01.2019).

4. Lukashevich R., Guзов V.D., Kozhemyakin V.A., Oborin A.V. [Scintillation comparators for measuring air kerma rate in the range from 0,03 to 50 nGy/s]. *Metrologiya i priborostroenie* [Metrology and instrumentation], 2017, vol. 75, no. 1, pp. 33–37 (in Russian).

5. Lukashevich R., Fokov G. [Application of the spectrometric method for calculating the dose rate for creating calibration highly sensitive instruments based on scintillation detection units]. *Devices and Methods of Measurements*, 2017, vol. 3, no. 8, pp. 246–253 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-3-246-253

6. Moriuchi S., Tsutsumi M., Saito K. Development of a dosimetric system using spectrometric

technique suitable for operational radiation dose measurements and evaluation. 10-th Intern. congress of the International Radiation Protection Association IRPA-10 : proc. congress, Hiroshima, 14–19 May 2000 / Japan Health Physics Society, Tokyo, 2000, pp. 3b–197.

7. Behrens R. The influence of the air density on the spectral properties of X-ray radiation qualities with mean energies from 6 keV to 90 keV. *Rad. Prot. Dos.*, 1999, vol. 86, no. 2, pp. 123–128.

DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a032931

8. Ionizing radiation. Detectors. Including code of practice / PTW – Freiburg. – 2018. – 49 p.

9. Implementation of the International Code of Practice on dosimetry in diagnostic radiology. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2011.