

Определение характеристик рентгеновского пучка по профилю поля вторичного излучения

Аннотация

Предложен новый метод определения анодного напряжения и общей фильтрации рентгеновских диагностических аппаратов по профилю полей вторичного излучения, возбуждаемых в окрестности составного рассеивающего тела, выполненного из материалов с разными абсорбционными свойствами. Показано, что в качестве измерительных критериев могут быть использованы коэффициент асимметрии и нижний квартиль экспериментально регистрируемых распределений.

Международные и отечественные стандарты регламентируют пучки излучения, используемые в диагностической практике, и требуют осуществления контроля технического состояния рентгеновского оборудования на всех этапах его жизненного цикла [1], [2]. Радиационное поле в локальной области пространства определяется условиями излучения, заданными анодным напряжением, общей фильтрацией и геометрией съемки [3]. Для однозначной характеристики радиационных полей в рентгенотехнике также вводится понятие слоя половинного ослабления (СПО), значение которого сопоставлено эффективной энергии пучка излучения и служит качественной характеристикой спектрального состава излучения. Контроль соответствия спектрального состава излучения условиям возбуждения рентгеновских пучков позволяет минимизировать дозовые нагрузки во время рентгенологических процедур. Поскольку непосредственное воздействие на пациента оказывается в радиационном поле, то и измерения с целью контроля должны осуществляться в пучке излучения без вмешательства в электрические цепи рентгеновского оборудования. Очевидно, что задачи контроля могут быть решены либо путем анализа спектрального состава излучения по результатам спектрометрических измерений, либо путем измерения анодного напряжения, оценки общей фильтрации и установления значения СПО по физически наблюдаемым эффектам, воспроизводимым в радиационном поле в момент экспозиции.

Примером спектрометрической системы, предназначенной для медицинских приложений, является рентгеновский спектрометр X-123CdTe, разработанный компанией «Amptek, Inc» (США). Это компактная система, представленная в том числе в OEM-комплектации, позволяющая осуществлять прямое измерение спектров излучения и определение граничной энергии, однозначно соотнесенной анодному напряжению [4].

Для восстановления спектральных распределений могут также использоваться данные о поглощении рентгеновского излучения линейными многоканальными детекторами. Методика восстановления спектральных распределений и оценки радиационных параметров рентгеновских систем по абсорбционным кривым, регистрируемым линейным арсенид-галлиевым детектором, рассматривалась в работе [5].

Спектрометрические системы в отечественной практике контроля пока не нашли применения. Но можно ожидать, что совершенствование детекторных технологий и развитие математических методов реконструкции и обработки спектров будет способствовать постепенному переходу на спектрометрические методики измерений.

Перечень приборов неинвазивного контроля эксплуатационных параметров рентгеновских диагностических аппаратов, включенных в Государственный реестр средств измерений РФ [6] по состоянию на 10.05.2018г., ограничен линейками универсальных дозиметров «Piranha» и «Cobia» производства компании «RTI Group AB» (Швеция) и серией универсальных дозиметров «RaySafe» и «RaySafe ThinX» производства компании «Unfors RaySafe AB» (Швеция). Многофункциональный дозиметр TNT 12000, выпускавшийся компанией «FLUKE Biomedical» (США), снят с производства. Единственный отечественный прибор для контроля электрических и радиационных характеристик УКРЭХ (изготовитель – ГБУЗ «НПЦМР

ДЗМ», г. Москва) на момент запроса не имеет действующего сертификата.

Во всех перечисленных приборах неинвазивного контроля используется однотипная схема измерений, основанная на фильтрации излучения первичного пучка и регистрации ослабленного излучения за определенной комбинацией стационарных или механически сменяемых фильтров с последующим преобразованием энергии излучения в измеряемые физические величины посредством калибровочных характеристик.

Сертифицированные в РФ универсальные дозиметры – это компактные многофункциональные приборы, отвечающие требованиям нормативных документов по номенклатуре контролируемых параметров, точности измерений и форме представления результатов, но имеющие довольно высокую стоимость и выпускаемые только зарубежными производителями.

Российскими разработчиками для определения условий излучения была предложена альтернативная схема измерений с рассеивающим фантомом [7]. Суть идеи заключается в регистрации излучения, возбуждаемого в окрестности рассеивающего тела, находящегося в радиационном поле первичного пучка одновременно в областях формирования рассеянного и ослабленного излучений. Отношение получаемых сигналов служит критерием для оценки анодного напряжения и общей фильтрации по предварительно сформированным калибровочным зависимостям. Данная схема измерений использовалась при создании встроенной системы контроля параметров платных рентгеновских аппаратов [8]. Но методикой расчета условий излучения предусматривалось выполнение при неизменных уставках двух последовательных экспозиций рассеивающего тела с учетом введения дополнительного спектросмещающего фильтра, что фактически меняет условия измерений и является существенным недостатком.

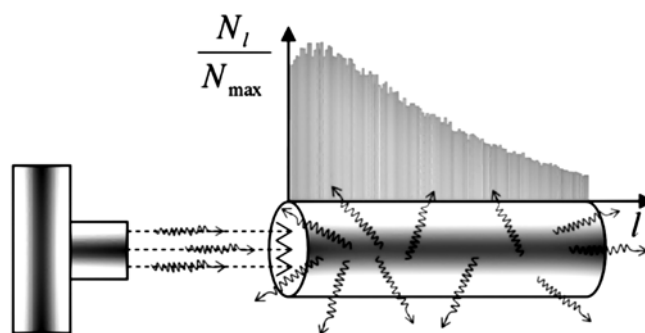


Рис. 1. Формирование поля вторичного излучения в окрестности рассеивающего тела цилиндрической формы

В рентгенотехнике обычно априорно полагают, что поля вторичного излучения изотропны, поскольку формируются при облучении относительно больших объемов вещества в результате вылета квантов рассеянного и характеристического излучений, имеющих произвольное направление распространения по отношению к поверхности рассеивающего тела. Однако если регистрировать кванты вторичного излучения непосредственно в точке вылета и фиксировать координаты вы-

лета (I) и число квантов (N_I), то профиль полученного распределения ($N_I / N_{\max}$) будет иметь характерный вид, определяемый спектральным составом первичного пучка и материалом облучаемого тела. На *рис. 1* представлен профиль поля вторичного излучения, формирующегося вдоль боковой поверхности цилиндрического рассеивающего тела при нормальном падении квантов первичного пучка на одно из его оснований.

Профиль поля вторичного излучения характеризует вероятность вылета квантов вторичного излучения в каждой пространственной точке вдоль образующей цилиндрического рассеивающего тела. При регистрации квантов излучения в счетном режиме итоговое распределение будет отвечать распределению флюенса частиц. В режиме измерения дозы будет зарегистрирован профиль дозного поля. Однако во втором случае форма профиля будет зависеть не только от суммарного количества квантов, но и от их энергии.

Анализ формы профиля поля вторичного излучения позволяет ввести дополнительные критерии для определения условий возбуждения рентгеновских пучков.

Схема измерений, основанная на определении отношения интенсивностей ослабленного и рассеянного излучений и одновременной регистрации профиля поля вторичного излучения, возбуждаемого вдоль образующей рассеивающего тела цилиндрической формы, была предложена в [9]. В качестве дополнительного измерительного критерия в работе [10] использовался коэффициент асимметрии регистрируемых распределений. В итоге удалось сформировать калибровочные зависимости для нахождения сразу двух параметров, характеризующих условия излучения, по результатам измерений, полученным за одну экспозицию без использования спектросмещающих фильтров. Тем не менее очевидным недостатком в данном случае является необходимость измерений за рассеивающим телом, поскольку проникающая способность излучения может быть неприемлемой для формирования адекватных уровней сигнала при априорно неизвестных плотностях потока квантов первичного излучения.

Можно избежать необходимости измерений в поле ослабленного излучения, если использовать не монолитное рассеивающее тело, а составное – в виде совокупности рассеивающих пластин, выполненных из материалов с разными абсорбционными свойствами, отделенных друг от друга поглощающими пластинами. При размещении составного рассеивающего тела в поле первичного излучения в окрестности каждой рассеивающей пластины будут формироваться поля вторичного излучения. Регистрируя одновременно несколько профилей, можно получить дополнительные измерительные критерии для совместного определения анодного напряжения и общей фильтрации.

Рассмотрим схему измерений с составным рассеивающим телом, представленную на *рис. 2*.

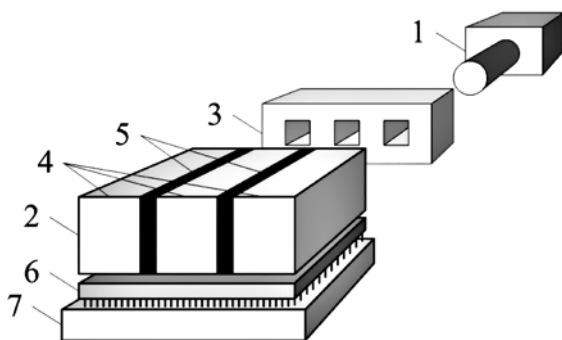


Рис. 2. Схема измерений с составным рассеивающим телом

Первичный пучок рентгеновского излучения генерируется излучателем 1. Составное рассеивающее тело 2 размещается в поле излучения за коллиматором 3, геометрически задающим области преобразования энергии первичного излучения в рассеивающих пластинах 4. В результате процессов фотопоглощения и комптоновского рассеяния в окрестности составного рассеивающего тела формируются поля ослабленного и рас-

сеянного излучений. Поглощающие пластины 5 исключают взаимное влияние полей вторичного излучения. Со стороны боковой поверхности составного рассеивающего тела размещается матрица детекторов рентгеновского излучения 6, фиксирующих характер пространственного изменения интенсивности поля вторичного излучения. Совокупность сигналов детекторов преобразуется в кадр изображения и транслируется интерфейсным устройством 7 в персональный компьютер. В персональном компьютере реализуется вычислительная процедура анализа профилей сигналов, зарегистрированных вдоль каждой из рассеивающих пластин, и определения условий возбуждения излучения по калибровочным зависимостям.

Практическая реализация схемы измерений с составным рассеивающим телом предполагает выбор измерительных критериев, обеспечивающих высокую чувствительность предложенного метода измерений и наиболее простой вид калибровочных зависимостей. Если рассматривать регистрируемые профили как статистические распределения, то для их описания можно использовать коэффициенты формы и положения. Установить влияние анодного напряжения и общей фильтрации на статистические параметры регистрируемых распределений можно с помощью математической модели системы, имитирующей процессы возбуждения рентгеновского излучения и формирования полей вторичного излучения [11].

С целью поиска измерительных критериев были рассчитаны профили полей вторичного излучения цилиндрических фантомов из ряда материалов с эффективными атомными номерами от 6 до 22 в диапазоне анодных напряжений 70...150 кВ при фильтрации 0,1...0,5 см алюминия. Все расчеты осуществлялись для фантомов радиусом 0,52 см высотой 2,6 см. Выбор геометрических размеров обуславливался линейными размерами детектора, который планировалось использовать при создании прототипа системы измерений с составным рассеивающим телом.

В качестве примера на *рис. 3* представлены профили распределений, рассчитанные для цилиндрических фантомов, выполненных из титана (Ti), рутила (TiO_2) и селенита (CaSO_4), находящихся в поле излучения, соответствующем анодному напряжению 150 кВ и общей фильтрации 3 мм алюминия.

Видно, что форма профилей существенным образом зависит от материала рассеивающего тела, но при этом огибающая распределения сохраняет вид кривой, несимметричной относительно максимума, смещенного в сторону источника излучения. Изменение условий возбуждения первичного рентгеновского пучка приводит к трансформации регистрируемых распределений. Максимум распределений смещается вглубь фантома с ростом проникающей способности первичного пучка излучения и становится более выраженным по мере увеличения его однородности.

В результате моделирования было установлено, что в наибольшей степени по диапазону меняются асимметрия (ξ) и нижний квартиль (η) регистрируемых распределений. Подбирая материалы рассеивающих тел, можно обеспечить относительные изменения ξ и η как минимум выше уровня 50 % по анодному напряжению (U_a) и 35 % по фильтрации (t_{Al}). На *рис. 4* показаны зависимости $\xi(U_a)$ и $\eta(t_{Al})$, рассчитанные соответственно при фиксированных значениях фильтрации (3 мм алюминия) и анодного напряжения (150 кВ) для фантомов, выполненных из указанных выше материалов. Характер представленных кривых сохраняется и при других возможных сочетаниях условий расчета.

Поскольку асимметрия и нижний квартиль непрерывно зависят от анодного напряжения и фильтрации, то калибровочные характеристики будут представлять собой совокупность поверхностей, заданных гладкими функциями $\xi(U_a, t_{Al})$ и (или) $\eta(U_a, t_{Al})$. Задача нахождения условий возбуждения рентгеновских пучков по экспериментально установленным значениям ξ и (или) η сводится к решению системы уравнений, определяемой числом рассеивающих пластин, формирующих составное рассеивающее тело, и конкретной методикой калибровки. Комбинируя материалы рассеивающих пластин и подбирая их количество, можно оптимизировать диапазон из-

мерений, обеспечив по диапазону неизменную чувствительность. При этом снимается неопределенность, связанная с необходимостью измерений в поле ослабленного излучения, что повышает эффективность схемы измерений с рассеивающим фантомом.

Предложенный в статье метод определения условий возбуждения рентгеновских пучков по профилю полей вторичного излучения, возбуждаемых в окрестности составного рассеивающего тела, может найти применение при создании отечественной системы неинвазивного контроля параметров рентгеновских диагностических аппаратов.

Список литературы:

1. International Electrotechnical Commission, Medical Diagnostic X-Ray Equipment – Radiation Conditions for Use in the Determination of Characteristics, Rep. IEC-61267, IEC, Geneva, 2005.
2. СанПиН 2.6.1.1192–03 Гигиенические требования к устройству и эксплуатации рентгеновских кабинетов, аппаратов и проведению рентгенологических исследований.
3. ГОСТ Р МЭК 61267–2001 Аппараты рентгеновские медицинские диагностические. Условия излучения при определении характеристик.
4. Santos J.C., Tomal A., Furquim T.A., Fausto A.M.F., Nogueira M.S., Costa P.R. Direct measurement of clinical mammographic x-ray spectra using a CdTe spectrometer // Medical Physics. 2017. Vol. 44. Iss. 7. PP. 3504-3511.
5. Лелюхин А.С. Определение качественных параметров рентгеновских пучков по абсорбционным кривым // Медицинская техника. 2017. № 3. С. 35-39.
6. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. Сведения об утвержденных типах средств измерений / <http://www.fundmetrology.ru>.
7. Блинов Н.Н., Владимиров Л.В., Даниленко Т.В., Лейченко А.И., Ларчиков Ю.В. Устройство для определения высокого напряжения на рентгеновской трубке / А. с. № 1536525. Бюл. № 2. 1990.
8. Карягин М.А., Лелюхин А.С. Радиационный киловольтметр для системы контроля рентгеновских диагностических аппаратов // Приборы. 2014. № 5. С. 4-7.
9. Муслимов Д.А., Лелюхин А.С., Зацепин А.А., Татаров А.В. Устройство для определения высокого напряжения на рентгеновской трубке / Патент на изобретение № 2633801. Бюл. № 29. 2017.
10. Зацепин А.А., Татаров А.В., Калугин Е.Я., Лелюхин А.С. Использование информации о форме полей вторичного излучения при определении режимов работы рентгеновских аппаратов // Приборы. 2017. № 8. С. 29-33.
11. Муслимов Д.А., Лелюхин А.С. Комплекс программных модулей для расчета полей вторичного рентгеновского излучения / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017614310 от 14.04.2017. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, Россия.

Александр Сергеевич Лелюхин,
канд. техн. наук, доцент,
кафедра общей физики,
Оренбургский государственный университет,
г. Оренбург,
e-mail: alex-ray@inbox.ru

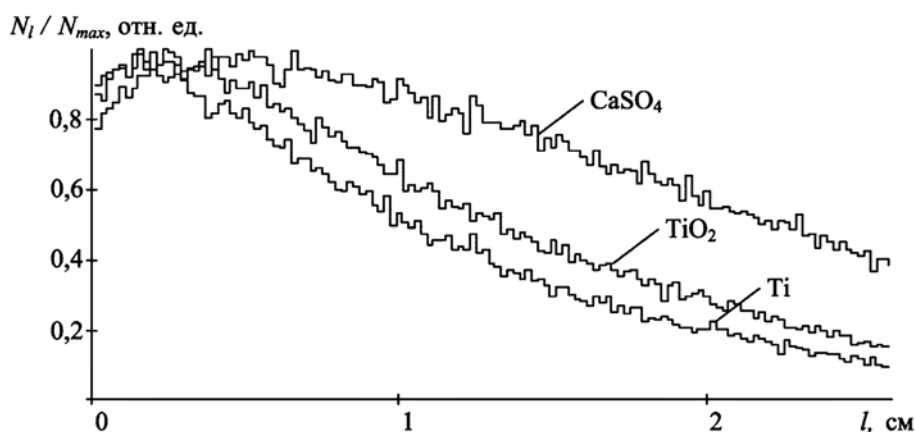


Рис. 3. Профили полей вторичного излучения, возбуждаемых вдоль образующей l цилиндрического рассеивающего тела при нормальном падении квантов первичного излучения на поверхность основания, обращенного к излучателю

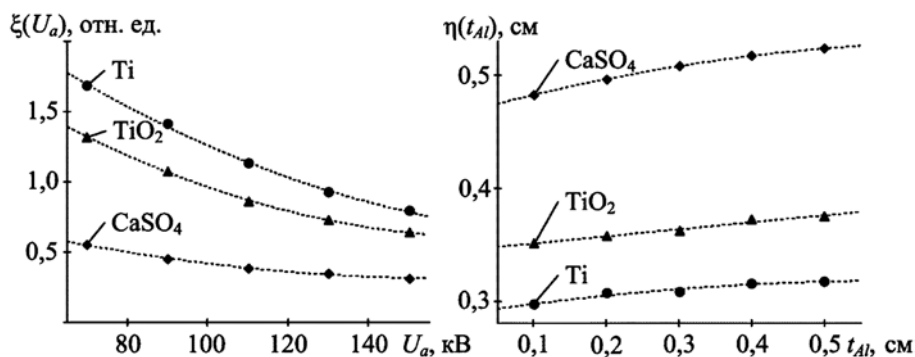


Рис. 4. Изменение статистических параметров профилей полей вторичного излучения в зависимости от анодного напряжения и фильтрации