

УДК 54.084,620.79.15

РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ДВУХЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА ПРИ ДЕТЕКТИРОВАНИИ МАТЕРИАЛОВ В РАДИОГРАФИИ

© 2020 г. С. М. Осадчий^а, А. А. Петухов^{а, *}, В. Б. Дунин^б

^аВсероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская область, 141570 Россия

^бОбъединенный институт ядерных исследований, Дубна, Московская область, 141980 Россия

*e-mail petukhov@vniiftri.ru

Поступила в редакцию 14.01.2020 г.

После доработки 22.02.2020 г.

Принята к публикации 25.02.2020 г.

Рассмотрена возможность применения кремниевых pin-детекторов для регистрации рентгеновских квантов в радиографии в диапазоне значений энергии 25–150 кэВ при реализации двухэнергетического метода. Предложен способ оценки разрешающей способности метода при определении состава материалов. Проведена количественная оценка разрешающей способности при определении атомных номеров шести химических элементов для двух пар значений энергии. Установлены ограничения и факторы, влияющие на разрешающую способность метода.

Ключевые слова: радиография, атомный номер, детектор рентгеновского излучения, двухэнергетический метод.

DOI: 10.31857/S1028096020120225

ВВЕДЕНИЕ

В современных рентгеновских сканерах используется метод регистрации рентгеновского излучения в двух областях энергетического спектра [1–5]. Осуществляется это с помощью детектора, в конструкцию которого входят два сцинтиллятора с различной чувствительностью в низко- и высокоэнергетических областях спектра, например, $Gd_2O_2S: Tb$ и CsI , или системы мелкокристаллических сцинтилляторов $ZnSe(Al)$ и $LGSO(Ce)$ [6], либо путем двукратного сканирования при разном напряжении на аноде рентгеновской трубки. В сканерах, применяемых при досмотре багажа, эта опция позволяет выделить в изображении контролируемого объекта органические и неорганические материалы по среднему атомному номеру, а также разделить материалы по группам. Предмет с атомным номером, превышающим 18, считается неорганическим и выделяется на экране монитора синим цветом. Предметы с атомным номером меньше 10 считаются органическими, и их изображение окрашивается в желтые тона, а смешанные предметы и предметы с атомным номером от 10 до 18 изображаются зеленым цветом. Предметы, атомный номер которых установить невозможно (например, в случае системы с недостаточно проникающей способностью для просвечивания предмета), отображаются более темными. Регистрация рентгеновского излучения в

двух энергетических диапазонах с помощью компьютерной обработки изображения позволяет также выделить в контролируемом объекте опасные предметы. В медицине этот метод регистрации более известен как двухэнергетическая рентгеновская абсорбциометрия и широко применяется в рентгеновских денситометрах для определения плотности костной ткани.

К недостаткам двухэнергетического метода можно отнести ошибки при идентификации материалов, особенно сложных веществ с близким коэффициентом поглощения, тонких предметов, когда поглощение в материале невелико, и другие ограничения [7]. Таким образом, технологии досмотра нуждаются в дальнейшем развитии.

РЕНТГЕНОВСКАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И ХАРАКТЕРИСТИКИ КРЕМНИЕВОГО ДЕТЕКТОРА

Исследования проводились на установке, схема которой показана на рис. 1. Она включала источник рентгеновского излучения “РАПАН”, рентгеновскую трубку с вольфрамовым анодом, напряжение на аноде трубки $U = 150$ кэВ, ток $I = 0.16$ –1 мА. Для регистрации рентгеновских квантов использовали кремниевый pin-детектор [8] в геометрии, когда излучение направлено

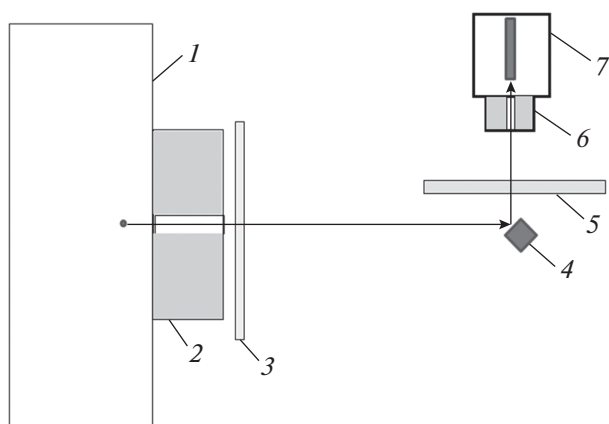


Рис. 1. Схема рентгеновской установки: 1 – “РАПАН”; 2 – коллиматор; 3 – фильтр; 4 – мишень; 5 – образец; 6 – коллиматор детектора; 7 – детектор.

вдоль слоя. Характеристики детектора: энергетическое разрешение 1.67 кэВ на линии источника ^{241}Am 59.5 кэВ в режиме работы без принудительного охлаждения при комнатной температуре 22°C, что в пересчете в относительное разрешение составляет 2.8% [8]. Размер входного окна детектора составляет 0.5 × 3 мм. Конструкция линейки из кремниевых детекторов, предназначенная для использования в сканерах, показана на рис. 2. На *p-i-n*-переход необходимо подавать напряжение смещения порядка 80 В. При указанном на рис. 2 способе подачи напряжения смещения толщина изолятора может быть менее 0.1 мм, а шаг линейки может быть уменьшен до 0.6 мм.

Пространственное разрешение при такой геометрии, когда излучение направлено вдоль слоя, вполне достаточно для эффективной работы сканеров и может быть сравнимо с разрешением традиционных линейных детекторов с сцинтилляторами, в которых при малом шаге 0.2 мм наблюдается засветка в сцинтилляторах соседних элементов детектора. В предлагаемой линейке детекторов можно задавать индивидуальную ориентацию каждого элемента, что улучшит пространственное разрешение детектора и позволит изготавливать детекторы любой конфигурации. Энергетическое разрешение такой линейки заметно выше разрешения типовой линейки с сцинтилляторами даже в отсутствие принудительного охлаждения и достаточно для выделения энергетических диапазонов, соответствующих K_{α} - и K_{β} -линиям в спектре излучения мишени или рентгеновской трубки. Для оптимального подбора соотношений значений энергии можно сделать анод рентгеновской трубки биметаллическим и настроить детектор для регистрации наиболее подходящих характеристических линий *K*-серии материалов анода. Предложенный детектор технологичен, достаточно эффективен, обладает хорошей разрешающей способностью и поэтому перспективен

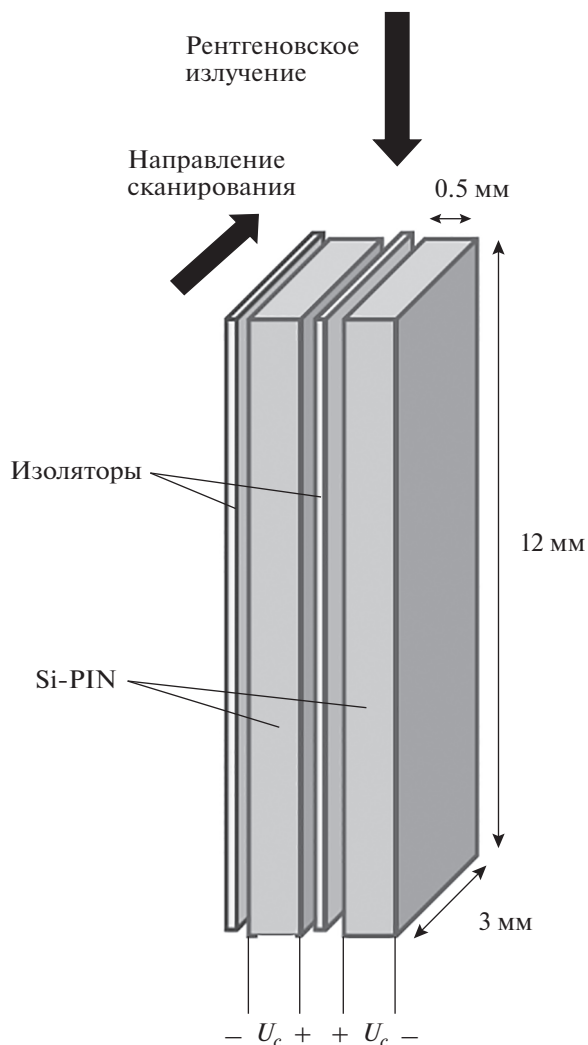


Рис. 2. Линейка из кремниевых детекторов.

для применения в досмотровой и медицинской технике.

Спектры, полученные в результате просвечивания излучением рентгеновской трубки образцов из алюминия, показаны на рис. 3. Для того чтобы избежать перегрузки детектора, фильтр низких энергий из стали толщиной 3 мм помещали возле коллиматора рентгеновской трубки.

Интегральная интенсивность рентгеновских квантов уменьшается экспоненциально с координатой *x* вдоль распространения рентгеновского излучения:

$$I = I_0 \exp(-\mu x), \tag{1}$$

где I_0 и I – интенсивности падающих и прошедших образец рентгеновских квантов соответственно, μ – коэффициент линейного поглощения, x – координата вдоль распространения луча. Относительная погрешность измерения μ , оцененная по спектрам алюминия (рис. 3), порядка

1%. Эта погрешность обусловлена нестабильностью напряжения на аноде рентгеновской трубки, напряжения смещения и зависимостью μ от E . Такого значения погрешности достаточно для реализации двухэнергетического метода и оценки его разрешающей способности.

ДВУХЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД И СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЕГО РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

Как и в [9], разрешающую способность метода оценивали при определении Z образцов известного состава. Для исследований были выбраны восемь образцов, состоящих из элементов Al, Si, Ti, Fe, Cu, Ge. Эксперименты проводились на рентгеновской установке, показанной на рис. 1. Эталонные образцы просвечивали квантами с энергией, соответствующей энергии характеристических линий $K_{\alpha 1}$ и $K_{\alpha 2}$ K -серии элементов Sn, Er, Pb [10] (табл. 1), из которых было сделано три мишени.

Значения энергии характеристических линий $K_{\alpha 1}$ и $K_{\alpha 2}$ мишеней близки, разрешение детектора не позволяет их разделить [11], поэтому аппаратуру настраивали для их совместной регистрации, а при расчете брали средние значения энергии (табл. 1). Для подсчета импульсов использовали аналого-цифровой преобразователь АЦП-8К-В1. Определив согласно (1) $\mu(E_{l,h}) = \ln(I/I_0)_{l,h}/x_0$ для образца толщиной x_0 с атомным номером Z , по измеренному отношению $(I/I_0)_{l,h}$ получаем функциональную зависимость:

$$R(Z, E_l, E_h) = \mu(E_l) / \mu(E_h), \quad (2)$$

индексы h и l относятся к более высокой и низкой энергии соответственно. Двухэнергетический метод основан на индивидуальной зависимости, определяемой формулой (2), для различных веществ, эта зависимость, по существу, является градуировочной зависимостью для рентгеновской установки: по измеренному R можно определить Z материала. С учетом того, что погрешность Δ_Z определения Z и погрешность Δ_R определения R связаны соотношением:

$$\Delta_Z = \Delta_R / (dR/dZ), \quad (3)$$

для анализа погрешности Δ_Z и разрешения δ был предложен следующий способ.

Определение градуировочной зависимости для рентгеновской установки – функции $R_{\text{выч}}(Z)$

Это может быть сделано для рентгеновских установок путем расчета или экспериментально путем анализа стандартных образцов веществ с известным Z без примесей. Поскольку разрешение детектора высокое, в качестве исходной гра-

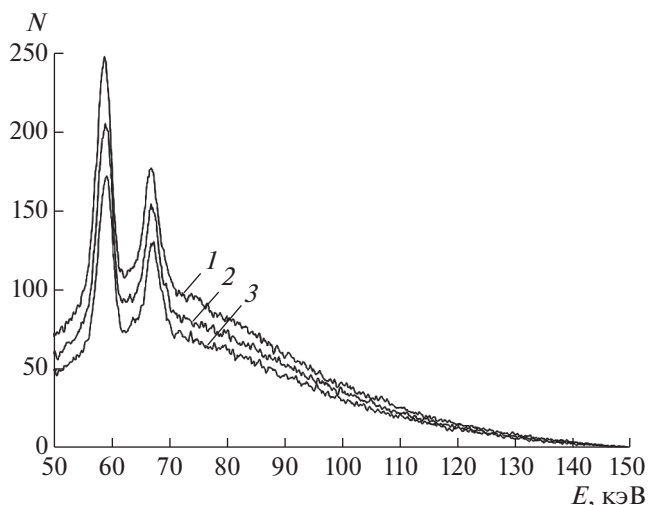


Рис. 3. Спектры просвечивания алюминиевого листа, полученные с использованием рентгеновской трубки с вольфрамовым анодом: 1 – без образца; 2 – толщина листа 2 мм; 3 – толщина листа 4 мм. N – количество отсчетов в канале спектрометра.

дуировочной зависимости $R_{\text{выч}}(Z)$ может быть принята зависимость, рассчитанная по табличным значениям $\mu_z(E)$ – справочным данным NIST [10]. Для $Z = 1-35$ по справочным данным NIST для $\mu_z(E)$ определяли коэффициенты поглощения $\mu_z(E)$ при трех значениях энергии $E = 25.16, 48.67, 73.89$ кэВ и строили зависимости $R_{\text{выч}}(Z)$ для двух пар значений энергии: 25.16/73.89 и 48.67/73.89 кэВ (рис. 4).

Вычисление производной $dR_{\text{выч}}/dZ$

С помощью полиномов пятой степени подбирали аппроксимационную функцию для $R_{\text{выч}}(Z)$ и вычисляли ее производную. Зависимости производной dR/dZ от Z для $Z = 1-35$ по справочным данным NIST приведены на рис. 4.

Вычисление среднеквадратичного отклонения по результатам измерений

Для каждого из выбранных образцов выполнена серия измерений R (рис. 4). При многократных измерениях среднеквадратичное отклонение измеряемой величины вычисляется по формуле [12]:

Таблица 1. Энергия характеристических линий мишеней

	Sn	Er	Pb
$K_{\alpha 1}$	25.27	49.12	74.97
$K_{\alpha 2}$	25.04	48.22	72.80
Средняя	25.16	48.67	73.89

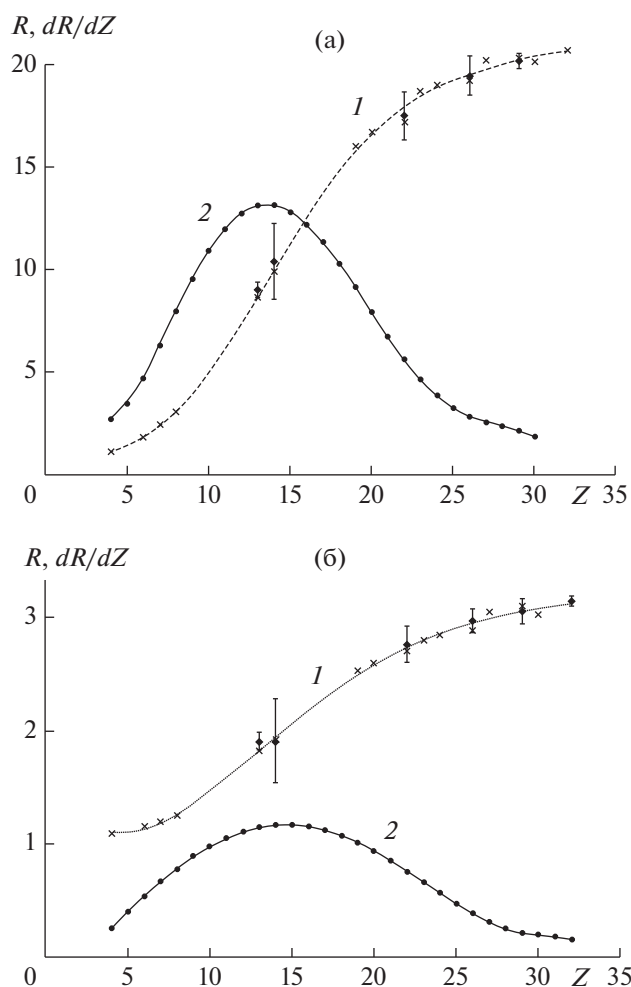


Рис. 4. Зависимости R (1) и производной dR/dZ (2) от Z для пары значений энергии: а – 25.16/73.89; б – 48.67/73.89 кэВ. Ромбы – экспериментальная зависимость $R(Z)$, вертикальными линиями показаны среднеквадратичные отклонения; крестики – расчет $R_{\text{выч}}(Z)$ по справочным данным NIST; штриховая линия – аппроксимация $R_{\text{выч}}(Z)$ полиномом пятой степени; точки – зависимости производной $dR/dZ(Z) \times 10$, полученные с использованием данных NIST.

$$s_{\bar{R}}^2 = \frac{1}{(n-1)n} \sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2, \quad (4)$$

где \bar{R} – среднее значение, i – номер измерения, n – количество измерений в серии. Многократные измерения в сканерах могут быть реализованы либо путем обработки результатов соседних элементов линейки, либо результатов последовательных измерений с помощью одного элемента, либо многократного сканирования. Последовательные измерения с помощью одного элемента и многократное сканирование требуют затрат времени и снижают скорость работы сканера. Первый путь более предпочтителен, так как размеры анализируемых предметов, как правило, больше,

чем размеры входного окна детектора. Можно предположить, что анализ состава важен для образцов предметов площадью $\sim 1 \text{ см}^2$, тогда n в (4) может достигать порядка 50. В дальнейших расчетах использовали значения $S_{\bar{R}}$ для эталонных образцов, рассчитанные по формуле (5) при $n = 50$. Для наглядного примера было рассчитано также среднеквадратичное отклонение в случае n измерений [12], $S_{\bar{R}}^2 = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2$, которое на рис. 4 показано вертикальными линиями.

Определение неисключенной систематической погрешности

Способ определения неисключенной систематической погрешности Θ индивидуален для каждой установки. На эту погрешность влияют примеси в образцах, изменение со временем характеристик детектора и рентгеновской трубки и другие факторы. Так как зависимость $R_{\text{выч}}(Z)$ рассчитана по табличным значениям $\mu_z(E)$, заметный вклад в неисключенную систематическую погрешность дает погрешность аппроксимации $\mu_z(E)$ при выполнении расчетов. Для оценки погрешности применяли следующую процедуру. Для эталонных образцов с известным Z измеряли $R_i(Z)$, находили среднее \bar{R} по серии измерений каждого образца, вычисляли отклонение среднего от значения $R_{\text{выч}}$, полученного по градуировочной характеристике $\bar{R} - R_{\text{выч}}$, затем находили неисключенную систематическую погрешность $\Theta = (\bar{R} - R_{\text{выч}})/2$.

Вычисление погрешности Δ_R

Погрешность Δ_R вычисляли по формуле [12]:

$$\Delta_R = KS, \quad S = \sqrt{s_{\bar{R}}^2 + \Theta^2/3}. \quad (5)$$

В приближении $\Theta > S_R$ можно считать, что коэффициент $K \approx \sqrt{3}$ [12].

Разрешение

Разрешение определяют, как $\delta = 2\Delta_Z$, где Δ_Z находят по формулам (3), (4). В табл. 2 приведена погрешность Δ_Z многократных измерений Z для эталонных образцов, рассчитанная по формулам (2)–(5). Разрешение, определенное по наименьшему Δ_Z для пары значений энергии 25.16/73.89 кэВ, составило $\delta = 0.3$, а для пары 48.67/73.89 кэВ $\delta = 0.9$. Поскольку погрешности измерения коэффициента поглощения мала (погрешности измерения μ 1% для алюминия, 2% для меди меньше, чем средняя относительная погрешность измерения Z 3.4% для пары 25.16/73.89 кэВ, 5.0% для пары

Таблица 2. Погрешность ΔZ определения Z для пар значений энергии 25.16/73.89 кэВ (первая строка) и 48.67/73.89 кэВ (вторая строка)

Z	13	14	22	26	29	32	Среднее
ΔZ	0.15	0.6	0.8	1.4	0.7	–	0.7
	0.4	1.2	1.0	1.6	1.9	0.4	1.2

48.67/73.89 кэВ), а энергетическое разрешение детектора существенно меньше разности значений энергии в выбранных парах (1.67 кэВ меньше, чем 48.73, 25.22 кэВ), полученное разрешение является по существу разрешающей способностью метода для выбранных пар значений энергии.

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПОГРЕШНОСТЬ ДВУХЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА

Из рис. 4 следует, что для каждой пары имеется область в середине диапазона, в которой зависимость $R(Z)$ максимальна, и области по краям, в которых зависимость слабая и определение Z затруднено. Как следует из рис. 4 и табл. 2, можно однозначно определить, например, $Z = 13$ для пары значений энергии 25.16/73.89 кэВ. В этом случае погрешность минимальна $\Delta Z \approx 0.15$ и достигается разрешение метода $\delta = 0.3$. Для других образцов с $Z = 14, 22, 26, 29$ погрешность оказалась больше: $\Delta Z \approx 0.9$. Для образцов с $Z = 14, 26$ относительная погрешность больше, чем для остальных. Это связано с тем, что образец с $Z = 14$ тонкий, и велик вклад случайной составляющей в расчет погрешности, и с тем, что в случае $Z = 26$ еще сказывается малость dR/dZ . Для другой пары 48.67/73.89 кэВ разрешение оказалось хуже $\delta = 0.8$.

Выбор пары значений энергии существенно влияет на разрешающую способность. С одной стороны, чем больше разность в значениях энергии, тем лучше разрешение (табл. 2). С другой стороны, большая разность ограничивает выбор материалов, у которых коэффициент поглощения и толщина материала должны соответствовать рабочему диапазону для двух значений энергии одновременно. Рабочий диапазон определяется из условий: $(I - I_0), I_0 \gg I_{ш}$, где $I_{ш}$ – составляющая сигнала, обусловленная шумом детектора.

Приведенные в табл. 2 погрешности измерений Z обусловлены следующими факторами: погрешностью аппроксимации при определении μ_z при рабочих значениях энергии для расчета $R_{\text{табл}}$, примесями в материалах исследуемых образцов и погрешностью измерений аналого-цифрового преобразователя. Эти погрешности могут быть существенно уменьшены, если исходная градуировочная зависимость $R(Z)$ будет получена экспериментально, с использованием эталонных образ-

цов без примесей, и если эта градуировка будет проводиться непосредственно перед сканированием. В этом случае может быть достигнута предельная разрешающая способность метода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продемонстрированы результаты применения кремниевых pin-детекторов для регистрации квантов излучения рентгеновской трубки с напряжением на аноде 150 кВ. Предложен способ оценки погрешности определения атомного номера двухэнергетическим методом в радиографии. По экспериментальным данным проведена оценка разрешающей способности для двух пар значений энергии. Найдены условия, при которых возможно определение атомного номера с разрешением 0.3. Способ может быть применен для рентгеновских установок, используемых как в технологиях безопасности, так и в медицине, что дает возможность проводить корректную оценку их технических характеристик. Результаты могут быть полезны при решении задач разделения материалов простых и сложных веществ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Удод В.А., Ван Я., Осипов С.П., Чахлов С.В., Усачев Е.Ю., Лебедев М.Б., Темник А.К. // Дефектоскопия. 2016. № 9. С. 11.
2. Найденов С.В., Рыжиков В.Д. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 9. С. 6.
3. Осадчий С.М. Двухэнергетический метод определения веществ в рентгеновской интроскопии // Тез. VII Нац. конф. "Рентгеновское, синхротронное излучения, нейтроны и электроны для исследования наносистем и материалов. Нано-Био-Инфо-Когнитивные технологии". Москва: РСНЭ-НБИК, 2009. С. 506.
4. Бокун Р.Ч., Осадчий С.М. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2010. № 7. С. 50.
5. Osipov S.P., Udod V.A., Van Ya. // Russ. J. Nondestructive Testing. 2017. V. 53. № 8. P. 568.
6. Литичевский В.А., Ополонин А.Д., Галкин С.Н., Лалаянц А.И., Воронкин Е.Ф. // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 4. С. 74.
7. Osipov S.P., Chakhlov S.V., Osipov O.S., Li S., Sun X., Zheng J., Hu X., Zhang G. // Int. J. Appl. Engin. Res. 2017. V. 12. № 23. P. 13127. <http://www.ripublication.com>
8. Осадчий С.М., Петухов А.А., Дунин В.Б. // Измерительная техника. 2019. № 5. С. 62.
9. Ryzhikov V.D., Naydenov S.V., Onyshchenko G.M., Lecoq P., Smith C.F. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2009. V. 603. P. 349.
10. National Institute of Standards and Technology (NIST, USA). <https://www.nist.gov>
11. Осадчий С.М., Петухов А.А., Дунин В.Б. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. исслед. 2019. № 8. С. 17.

12. ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые

многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения.

The Resolution of the Dual-Energy Method for Detecting Materials in Radiography

S. M. Osadchii¹, A. A. Petukhov^{1,*}, V. B. Dunin²

¹*All-Russian Research Institute of Physical-Technical and Radiotechnical Measurements, Mendeleevo, Moscow region, 141570 Russia*

²*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow region, 141980 Russia*

**e-mail petukhov@vniiftri.ru*

The possibility of using silicon PIN detectors for registration of X-ray quanta in radiography in the energy range of 25–150 keV, when implementing the dual-energy method, is considered. An approach for estimating the method resolution in determining the composition of materials is proposed. In the case of determining the atomic numbers of six chemical elements for two energy pairs, the resolution is quantitatively estimated. Limitations and factors affecting the method resolution are established.

Keywords: radiography, atomic number, X-ray detector, dual-energy method.