

В.Д. РЫЖИКОВ, д-р физ.-мат. наук, проф. ИСМА НАНУ, Харьков;
А.Д. ОПОЛОНИН, зам. зав.отд. ИСМА НАНУ, Харьков;
В.Г. ВОЛКОВ, науч. сотр. ИСМА НАНУ, Харьков;
Е.К. ЛИСЕЦКАЯ, канд. хим. наук, старш. науч. сотр. ИСМА НАНУ,
Харьков;
С.Н. ГАЛКИН, канд. хим. наук, зав. лаб. ИСМА НАНУ, Харьков;
Е.Ф. ВОРОНКИН, канд. техн. наук, старш. науч. сотр. ИСМА НАНУ,
Харьков

ТРЕХЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЦИФРОВАЯ РАДИОГРАФИЯ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ВЕЩЕСТВ С МАЛЫМ ЭФФЕКТИВНЫМ АТОМНЫМ НОМЕРОМ

Показана возможность разделения веществ по эффективному атомному номеру Z_{eff} методом трехэнергетической радиографии. Используя энергетическую зависимость эффективности поглощения рентгеновского излучения сцинтиллятором различной толщины (или состава), варьируя анодное напряжение на рентгеновской трубке и фильтры для каждого устройства, специальное программное обеспечение позволяет реконструировать изображение инспектируемого объекта в различных энергетических областях. Используя источник рентгеновского излучения и специально подобранные типы сцинтилляторов, мы можем достичь точности определения Z_{eff} до 95%, что значительно лучше по сравнению с традиционными системами инспекции для обнаружения взрывчатых веществ.

Ключевые слова: трехэнергетическая цифровая радиография, детектор, эффективный атомный номер, изображение.

Введение. На сегодняшний день, наибольшее распространение для выявления опасных вложений в ручной клади и багаже получил метод двухэнергетической цифровой радиографии (ДЭЦР) [1,2,3]. При помощи этого метода в содержимом багажа предметы удастся разделять по эффективному атомному номеру (Z_{eff}) и используя трехцветную палитру идентификации получить цветное изображение, где:

"легким" веществам с $Z_{\text{eff}} < 10$ присваивают оттенки оранжевого цвета;

"средним" веществам с $10 < Z_{\text{eff}} < 20$ присваивают оттенки зеленого цвета;

"тяжелым" веществам с $Z_{\text{eff}} > 20$ присваивают оттенки синего цвета.

Основная часть опасных и запрещенных вложений в багаже (наркотики, взрывчатка, медикаменты и др.) относятся к "легким" веществам и любое повышение точности определения Z_{eff} улучшает вероятность их обнаружения.

ДЭЦР использует принцип раздельной регистрации "мягкой" и "жесткой" составляющих спектра рентгеновского излучения, прошедшего через исследуемый объект.

Недостатком этого метода является существенное перекрытие энергетических диапазонов чувствительности низко- и высокоэнергетических детекто-

ров, что приводит к снижению точности разделения веществ по Z_{eff} . Мы сделали попытку повысить уровень идентификации материалов, используя трехэнергетический приемно-детектирующий тракт. Поставленная задача решалась с помощью коллиматора, формирующего 3 веерных пучка. В каждом веерном пучке при помощи выбора анодного напряжения рентгеновского излучателя и фильтров из различных материалов (медь, алюминий и др.) можно получить теневые рентгеновские изображения объектов контроля (ОК) в различных спектральных диапазонах.

Цель нашей работы – исследование возможности повышения точности разделения веществ с близкими эффективными атомными номерами Z_{eff} методом трехэнергетической радиографии.

Решение поставленной задачи осуществлялось двумя способами:

1) Используя энергоселективные свойства трех линеек детекторов, за одно сканирование может быть получено три изображения ОК в различных энергетических диапазонах при одном выбранном анодном напряжении источника рентгеновского излучения [4,5]. Достоинством этого способа можно считать высокую скорость получения изображений, недостатком – существенное перекрытие энергетических диапазонов при получении изображения.

2) Используя высокую точность позиционирования механизма перемещения ОК можно последовательно получить три изображения ОК при трех различных анодных напряжениях и при различных условиях фильтрации с последующим совмещением трех изображений, полученных в трех энергетических диапазонах [4,5].

В последнем случае достигается наилучшее энергетическое разделение.

Методика эксперимента

Основным чувствительным элементом трехэнергетической цифровой рентгенографической системы является детектор рентгеновского излучения типа сцинтиллятор-фотодиод (СЦ-ФД).

Схема трехэнергетического сканера показана на рис. 1

Описание установки и режимов измерения.

Рентгеновский излучатель

- анодное напряжение 40-160кВ

- ток трубки выбирается ниже уровня перегрузки АЦП в пределах 0,1-19мА

Механизм перемещения

- шаг перемещения 0,1-4мм

- максимальный ход столика 450мм

Приемно-детектирующий тракт

Детекторы

Тип детекторов – сцинтиллятор-фотодиод (СЦ-ФД)

- количество каналов в одном модуле

-16

- шаг детекторов в линейке - 1,6мм
- сцинтиллятор - ZnSe(Те)
- толщина сцинтиллятора:
- низкоэнергетический детектор (НED) - 0,6мм
- среднеэнергетический детектор (СЕД) - 1,5мм
- высокоэнергетический детектор (ВЕД) - 3,5мм
- количество линеек детекторов - 3
- количество каналов детектирования - 3x128 (384)

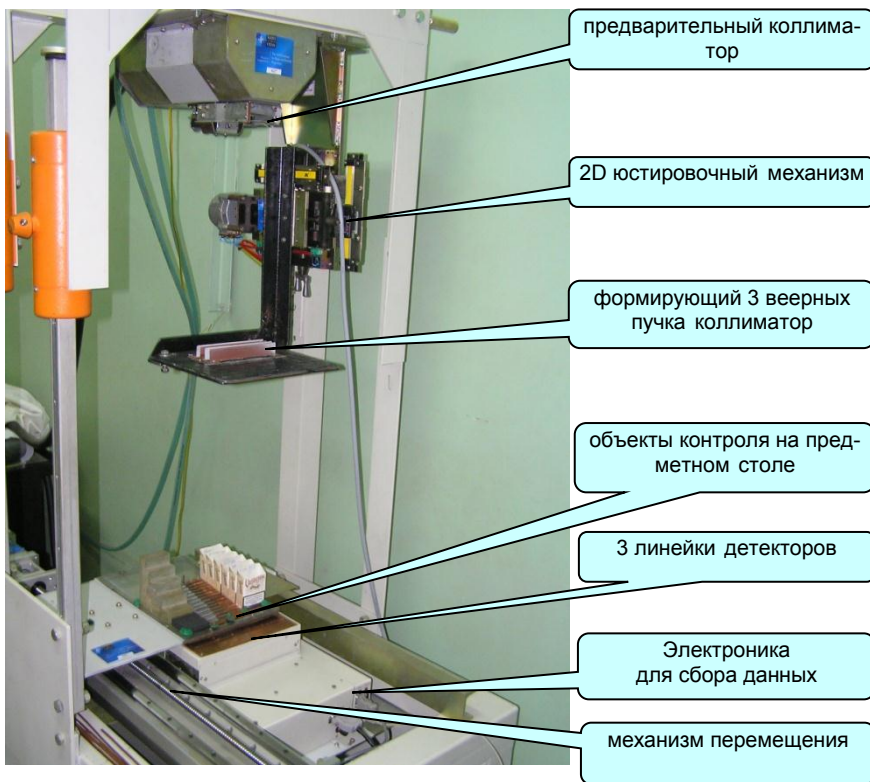


Рис. 1 – Общий вид макета мультиэнергетического сканера

Ключевым моментом разделения веществ в мультиэнергетической радиографии является отличие коэффициентов полного поглощения (массовых или линейных) для различных веществ в разных энергетических диапазонах.

Как было показано в [4,5,6] на примере "легкого" вещества как мышечная ткань и более "тяжелой" кости, наиболее существенное различие массовых коэффициентов ослабления можно наблюдать, начиная с энергий 60-70кeB.

НED – $U_a=40kV$, $I_a=10.5 mA$, фильтр – Al толщиной 2мм

СЕД – $U_a=60\text{kV}$, $I_a=13.4\text{ mA}$, фильтр – Al толщиной 12мм

ВЕД – $U_a=90\text{kV}$, $I_a=14.9\text{ mA}$, фильтр – Cu толщиной 2мм

Уровни калибровки:

Без ОК ("световая" калибровка) – $I_{\text{Light}}=60000$ (в кодах АЦП)

Без рентгеновского излучения ("темновая" калибровка) – $I_{\text{Dark}}=250$ (в кодах АЦП)

Методика разделения веществ по Z_{eff} для трехэнергетической радиографии.

Исходя из выбранных условий эксперимента можно для трех энергетических диапазонов выбрать три эффективные энергии облучения ОК исходя из предположения:

$$E_{\text{эфф}} \approx (2/3) \cdot E_{\text{макс}} \quad (1)$$

Тогда $E_1=27,7\text{keV}$; $E_2=40\text{keV}$; $E_3=60\text{keV}$.

Полученные в эксперименте сигналы от трех ЛД обозначим Н, М, L для детекторов высоких, средних и низких энергий соответственно. Тогда, на примере значений массовых коэффициентов ослабления, приведенных в [5, 6], можно пояснить принцип мультиэнергетического разделения веществ.

Предположим, что нами получено три значения сигнала (Н, М, L) для каждого пикселя изображения, при использовании трех монохроматических источников излучения с энергиями $E_1=27,7\text{keV}$; $E_2=40\text{keV}$; $E_3=60\text{keV}$. Тогда, эти сигналы можно описать следующим образом:

$$L = I_0 \cdot e^{-\mu(E_1) \cdot \rho \cdot x} \quad (2)$$

$$M = I_0 \cdot e^{-\mu(E_2) \cdot \rho \cdot x} \quad (3)$$

$$H = I_0 \cdot e^{-\mu(E_3) \cdot \rho \cdot x} \quad (4)$$

где x – линейный размер ОК в направлении распространения излучения, $\mu(E)$ – массовый коэффициент ослабления, ρ – плотность вещества, $I_0 = I_{\text{Light}} - I_{\text{Dark}}$ – максимальный уровень сигнала при отсутствии ОК.

Одной из основных характеристик вещества в радиографии является энергетическая зависимость массового коэффициента ослабления $\mu(E)$. Поэтому, восстановление зависимости $\mu(E)$ можно считать приоритетным для поиска различий между веществами, входящими в ОК (например, взрывчатка, наркотики, медикаменты и др. вещества с $Z_{\text{eff}} < 10$).

Из выражений (2-4), для каждого пикселя трехэнергетического изображения можно вычислить три значения параметра $\mu(E) \cdot \rho \cdot x$:

$$\mu(E_1) \cdot \rho \cdot x = \text{Ln}(I_0 / L) \quad (5)$$

$$\mu(E_2) \cdot \rho \cdot x = \text{Ln}(I_0 / M) \quad (6)$$

$$\mu(E_3) \cdot \rho \cdot x = \text{Ln}(I_0 / H) \quad (7)$$

В левой части выражений (5-7) стоит произведение неизвестных априори характеристик вещества – толщины, плотности и массового коэффициента ослабления. Используя три энергетических диапазона можно получить два независимых соотношения для массового коэффициента ослабления:

$$\mu_{H/M} = \frac{\mu(E_3)}{\mu(E_2)} = \frac{Ln(I_0 / H)}{Ln(I_0 / M)} \quad (8)$$

$$\mu_{M/L} = \frac{\mu(E_2)}{\mu(E_1)} = \frac{Ln(I_0 / M)}{Ln(I_0 / L)} \quad (9)$$

Выражения (8) и (9) не содержат плотности и толщины ОК и позволяют провести кусочно–линейную аппроксимацию $\mu(E)$ для двух диапазонов энергий I) $E_1 \div E_2$ и II) $E_2 \div E_3$ (см. рис. 2.).

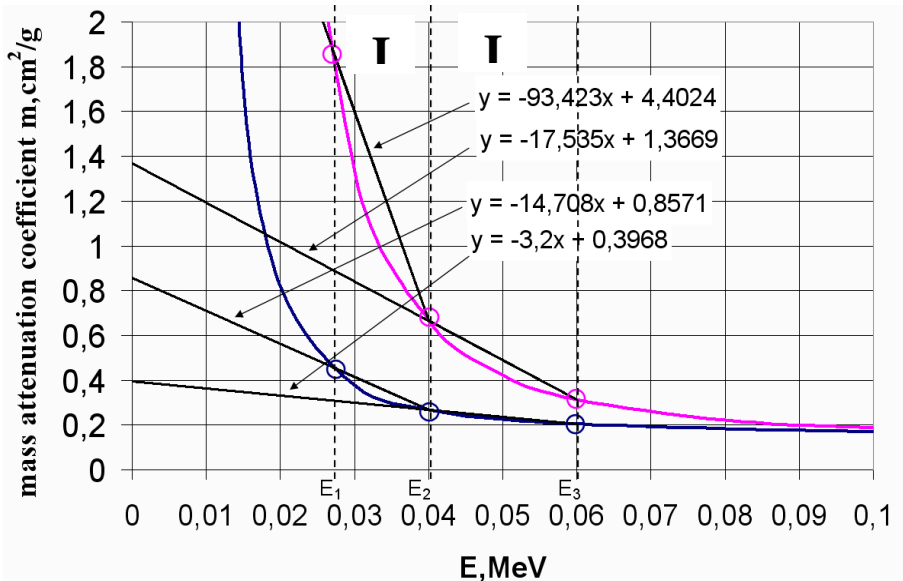


Рис. 2 – Кусочно-линейная аппроксимация массового коэффициента ослабления $\mu(E)$ для двух различных веществ в двух энергетических диапазонах

Для аппроксимирующей линейной зависимости:

$$\mu(E) = a \cdot E + b \quad (10)$$

константа a определяет угол наклона прямой и существенно зависит от материала вещества. Константа b зависит от целого ряда условий и не может быть просто вычислена при помощи сигналов, полученных в ходе эксперимента. Поэтому, константе b можно присвоить не нулевое фиксированное значение.

Тогда, для I) энергетического диапазона можно записать следующее выражение:

$$\mu_{M/L} = \frac{\mu(E_2)}{\mu(E_1)} = \frac{a_I \cdot E_2 + b}{a_I \cdot E_1 + b} \quad (11)$$

откуда находим:

$$a_I = \frac{\mu_{M/L} - 1}{E_2 - E_1 \cdot \mu_{M/L}} \cdot b \quad (12)$$

Аналогично для II) энергетического диапазона:

$$a_{II} = \frac{\mu_{H/M} - 1}{E_3 - E_2 \cdot \mu_{H/M}} \cdot b \quad (13)$$

Таким образом, подставляя значения для $\mu_{M/L}$ и $\mu_{H/M}$ из выражения (8) и (9), можно для каждой точки изображения вычислить a_I и a_{II} . Применяя двухкоординатную палитру идентификации $x = H$, $y = a_{II}/a_I$ удастся разделить имитаторы взрывчатых веществ (см. рис.3) даже с малым различием Z_{eff} (от 7.08 до 8,07).

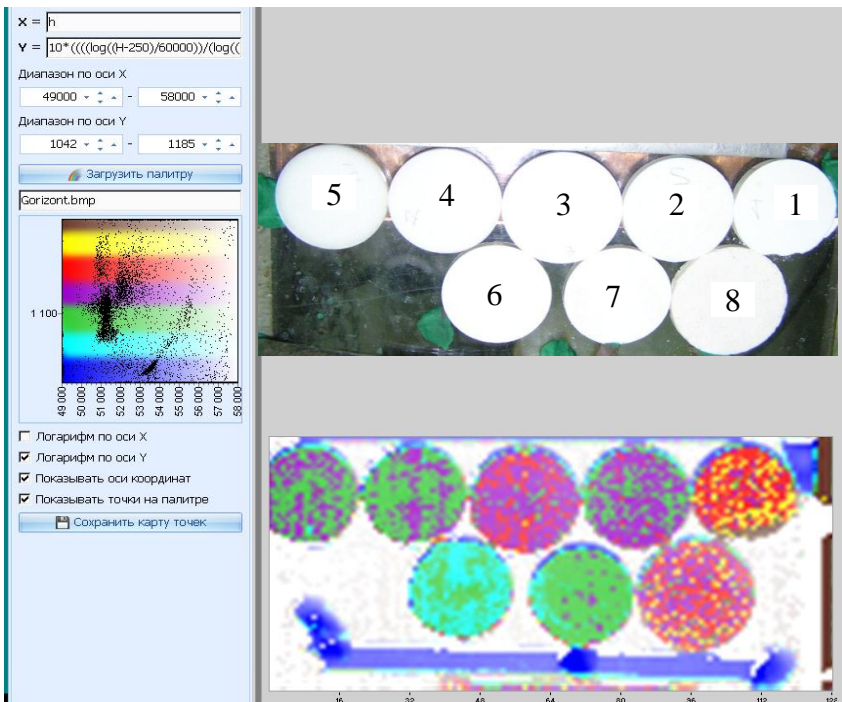


Рис. 3 – Имитаторы взрывчатых веществ. Фотография и трехэнергетическое рентгеновское изображение с применением двумерной палитры.

Результаты

Тестовые образцы.

№1 TNT $Z_{\text{eff}} = 7,08$

№2 Пироксилин $Z_{\text{eff}} = 7,34$

№3 Гексоген $Z_{\text{eff}} = 7,22$

№4 ТЭН $Z_{\text{eff}} = 7,38$

№5 Амматол $Z_{\text{eff}} = 7,41$

№6 Пироксилин $Z_{\text{eff}} = 8,07$

№7 Пироксилин $Z_{\text{eff}} = 7,51$

№8 Гексоген $Z_{\text{eff}} = 7,12$

Применяя трехкоординатную палитру идентификации RGB, где $R=H$, $G=$
 a_I , $B=a_{II}$ также удастся увидеть различия в Z_{eff} тестовых объектов (см. рис.
4.). Кроме того, применение трехмерной палитры позволяет более детально
видеть неоднородности (уплотнения) в средней части тестовых образцов (см.
рис. 5.).

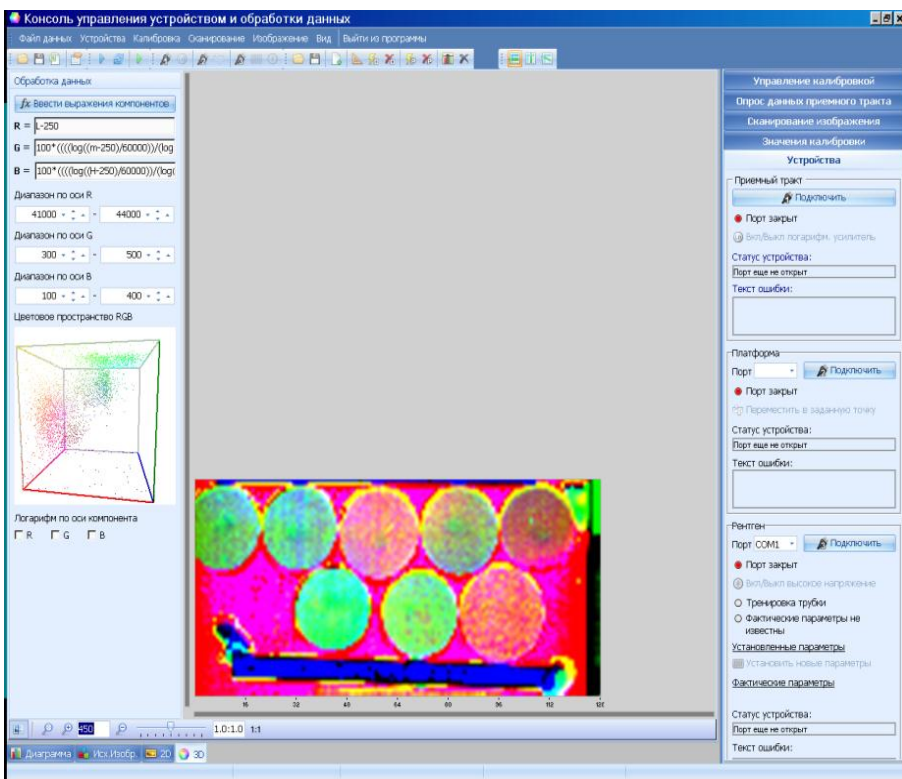


Рис. 4 – Имитаторы взрывчатых веществ. Трехэнергетическое рентгеновское изображение с применением трехмерной RGB палитры

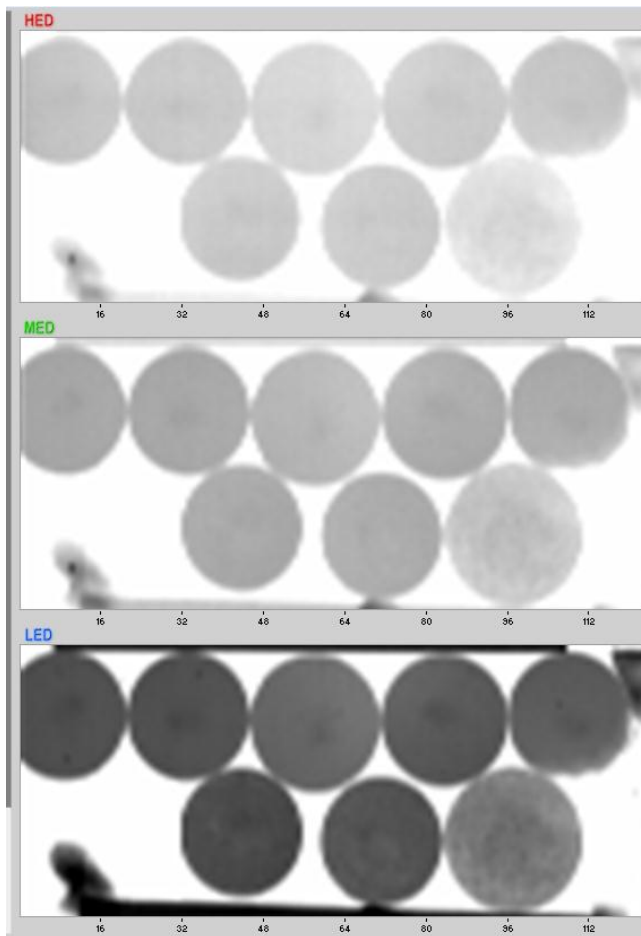


Рис. 5 – Теневые рентгеновские изображения, полученные на детекторах высоких, средних и низких энергий (HED, MED и LED соответственно)

Выводы. Применение метода мультиэнергетической радиографии для систем с монохроматическими рентгеновскими фильтрами может существенно повысить точность разделения веществ по эффективному атомному номеру [7]. Показано, что используя источник рентгеновского излучения и специально подобранные сцинтилляторы различной толщины или состава, варьируя анодное напряжение и фильтры, мы можем достичь точности определения Z_{eff} до 95%, что значительно лучше по сравнению со стандартными инспекционными системами для обнаружения взрывчатых веществ.

Предложенный метод реконструкции массового коэффициента ослабления с применением более чем трех энергий, может не только существенно повысить точность разделения веществ по Z_{eff} , но и учесть особенности химического состава ОК.

Оптимальный выбор энергий $E_1, E_2, E_3 \dots$ может повысить чувствительность метода к определенным типам взрывчатых веществ.

Благодарность: эта работа была частично проведена при поддержке проекта NATO SfP-982823.

Список літератури: 1. Ryzhikov V.D., "Nuclear Radiation Detection Scintillators based on ZnSe(Te) crystals," in Proc. of 2011 MRS Spring Meeting, 134, 2011, mrs11-1341-u04-07. 2. Harrison R.M., "Digital radiography – a review of detector design," Nuclear Instrum. and Meth., vol.A310, p.p.24-34, 1991. 3. Ryzhikov V.D., Naydenov S.V., Onyshenko G.M et al. "A spectrometric approach in radiography for detection of materials by their effective atomic number", Nuclear Instrum. and Meth., vol. A 603, p.p.349-354, 2009. 4. Ryzhikov V.D., Opolonin O.D., Lysetska O.K. et al. "X-ray radiation detectors of "scintillator-photodiode" type for security and non destructive testing," in Proc. of NSS-MIC-RSTD, 2011, p.p. 2204 – 2207. 5. Ryzhikov V.D., Grinyov B.V., Opolonin O.D et al. "Capabilities of Dual-Energy X-Ray Imaging in Medicine and Security," in Proc. of SPIE, 2012, Vol.8509, p.p.85090J-1 - 85090J-7. 6. Grinyov B.V., Ryzhikov V.D., Lecoq P, et al., "Dual-energy radiography of bone tissues using ZnSe-based scintielectronic detectors," Nuclear Instrum. and Meth., vol.A 571, p.p.399–403, 2007. 7. Naydenov S.V., Grinyov B.V., Ryzhikov V.D. "X-ray radiographic method of recognition of materials and device for its realization", U.S. Patent 7912177, March 22, 2011.

Надійшла до редколегії 15.04.2013

УДК [620.179.152:004.67]: 539.1.074.3

Трехэнергетическая цифровая радиография для разделения веществ с малым эффективным атомным номером / В.Д. Рыжиков, А.Д. Ополонин, В.Г. Волков, Е.К. Лисецкая, С.Н. Галкин, Е.Ф. Воронкин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 34 (1007). – С. 43 – 51. – Бібліогр.: 7 навз.

Показана можливість розподілу речовин по ефективному атомному номеру Z_{eff} методом трьохенергетичної радіографії. Використовуючи енергетичну залежність ефективності поглинання рентгенівського випромінювання скінтілятором різної товщини (чи складу), варіюючи анодну напругу на рентгенівській трубці і фільтри для кожного пристрою, спеціальне програмне забезпечення дозволяє реконструювати зображення інспектованого об'єкту в різних енергетичних областях. Використовуючи жорсткий рентген і спеціально підібрані типи скінтіляторів, ми можемо досягти точності визначення Z_{eff} до 95%, що значно краще в порівнянні з традиційними системами інспекції для виявлення вибухових речовин.

Ключові слова: трьохенергетична цифрова радіографія, детектор, ефективний атомний номер, зображення.

A possibility has been shown of separation between substances with small effective atomic numbers Z_{eff} by the approach of the three-energy digital radiography for increasing the detection probability of explosives. Using differential energy sensitivity of detectors of different thickness (or composition), varying X-ray source anode voltages and filter for each array, special software it is possible to reconstruct images of the control object at the different energy scales. It was shown that using standard (rough) X-ray beams and specially-chosen scintillator types, we can achieve accuracy in determination of Z_{eff} up to 95%, that significantly better as compared with systems based on conventional X-ray inspection.

Keywords: the three-energy digital radiography, detector, effective atomic number, image.