

Образец позволяет имитировать подповерхностные дефекты различных размеров и обеспечивать тем самым возможность количественной оценки параметров выявляемых дефектов.

Таким образом, контрольные образцы предназначены для выявления как поверхностных, так и подповерхностных дефектов. В будущем является актуальным усовершенствование контрольных образцов с целью повышения точности обнаружения и измерения дефектов. А также перспективным является создание контрольных образцов с типами дефектов, наиболее распространенными в контролируемых изделиях.

Список информационных источников

1.РД-13-05-2006. Методические рекомендации о порядке проведения магнитопорошкового контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах. – М., 2006. – 82 с.

2.ГОСТ 8.315-97. Стандартные образцы состава и свойств веществ и материалов. Основные положения. – М., 1997. – 26 с.

3.Бабаджанов Л.С., Бабаджанова М.Л. Меры и образцы в области неразрушающего контроля.– М.: Стандартинформ, 2007. – 208 с.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ИНСПЕКЦИОННЫХ ДОСМОТРОВЫХ КОМПЛЕКСОВ С ФУНКЦИЕЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ВЕЩЕСТВ ОБЪЕКТОВ КОНТРОЛЯ

Струговцов Д.В.

Томский политехнический университет, г. Томск

*Научный руководитель: Осипов С.П., к.т.н., доцент кафедры
физических методов и приборов контроля качества*

В настоящее время в России заметно увеличился грузопоток через границы нашего государства. Каждый день через границу нашего государства проходит огромное количество грузовых транспортных средств и крупногабаритных грузов. Для обеспечения безопасности населения, возникает необходимость в проведении таможенного контроля таких машин и грузов. Основная трудность заключается в осуществлении досмотрового контроля транспортных средств и крупногабаритных грузов – морских, железнодорожных, авиационных контейнеров, грузовых машин и т. д. Контроль объектов, указанных выше, подразумевает под собой целый комплекс длительных, трудоемких и тяжелых разгрузочно-

погрузочных работ. Практика показывает, что на проведение досмотра одного транспортного средства или контейнера необходимо 2-3 часа. Как следствие, большинство транспортных средств и крупногабаритных грузов, проходящих через таможенные границы России, оформляются на основании приложенных документов, фактически без реальной идентификации перевозимого груза.

Решить проблему производительности контроля и повысить эффективность обнаружения запрещенных веществ позволяют современные технические средства таможенного контроля (ТСКТ). В частности для контроля крупногабаритных грузов и транспортных средств применяются инспекционные досмотровые комплексы.

Практика мирового таможенного контроля показывает, что наиболее эффективной и качественной техникой в настоящее время является инспекционные досмотровые комплексы с функцией идентификации веществ объектов контроля. Данные комплексы позволяют за 5-20 минут без разгрузки и вскрытия транспортного средства или крупногабаритного груза получить их изображение и изображение, транспортируемых в нем товаров, а также помогают отнести просвечиваемые объекты к определенным материалам.

В данной статье будет рассмотрено математическое описание алгоритма оценки производительности инспекционных досмотровых комплексов с функцией идентификации веществ объектов контроля.

Инспекционный досмотровый комплекс должен обладать следующими тактико-техническими характеристиками:

- способность к визуализация содержимого груза;
- возможность распознавания различных предметов, веществ и устройств;
- координатная привязка обнаруженных предметов к местам их расположения;
- возможность распознавать изделия из различных материалов (органические вещества, металлы);
- возможность просматривать конструктивные полости и пространства между потолочными перекрытиями, полом и стенками контейнеров, а также узлов железнодорожных вагонов и автомашин.

В данной статье будет рассмотрено математическое описание алгоритма оценки производительности инспекционного досмотрового комплекса с функцией идентификации веществ объектов контроля.

Метод дуальных энергий (МДЭ) является одним из важнейших способов реализации цифровой радиографии, позволяющий идентифицировать вещества объектов досмотрового контроля (ОДК). Идентифи-

кация применительно к досмотровому контролю понимается, как отнесение вещества ОДК или его фрагмента к одному из широких классов веществ. Отнесение вещества к тому или иному классу веществ традиционно осуществляется по эффективному атомному номеру. В качестве идентификационного параметра используется значение эффективного атомного номера, либо некоторая функция от него.

Производительность комплекса цифровой радиографии на базе МДЭ существенным образом зависит от многих факторов, например, от диапазона изменения эффективного атомного номера, размера фрагментов объекта контроля, от заданной точности оценки параметра идентификации, от максимальных энергий высокоэнергетического рентгеновского излучения.

Для решения задачи идентификации веществ ОДК и их фрагментов методом дуальных энергий используются различные варианты двух основных подходов [1]. В первом подходе оценивается эффективный атомный номер вещества объекта контроля. Во втором подходе [1] формируется изображение некоторого параметра, значение которого в каждой точке изображения сравнивается с некоторыми линиями уровней, и по результатам сравнения принимается решение о сопоставлении вещества ОДК с тем или иным классом веществ. Далее будут приведены математические выражения необходимые для составления алгоритма оценки производительности инспекционного –досмотрового комплекса.

Число фотонов $n_i(n_{0i}, Z)$ рентгеновского излучения с максимальной энергией E_i , поглощённых единичным детектором в единицу времени за ОК толщиной ρH и эффективным атомным номером Z , определяется с помощью приближённого выражения

$$n(\rho H, Z) \approx \frac{P_{0\max} W(E_i, E_{\max}) a_d^2 \int_0^{E_i} f(E, E_i) e^{-m(Z)\rho H} [1 - e^{-\mu_d(E)h_d}] dE}{4\pi F^2 \int_0^{E_i} \overline{E_{ab}(E)} f(E, E_i) [1 - e^{-\mu_d(E)h_d}] dE}, \quad (1)$$

где $\overline{E_{ab}(E)}$ – среднее значение энергии зарегистрированного фотона с энергией E ; $f(E, E_i)$ – энергетический спектр рентгеновского излучения с максимальной энергией E_i ; $m(E, Z)$ – массовый коэффициент ослабления фотонного излучения с энергией E веществом ОК; $\mu_d(E)$ – линейный коэффициент ослабления фотонного излучения с энергией E материалом детектора; h_d – толщина детектора; $a_d \times a_d$ – размеры детектора; F – расстояние от источника излучения до лобовой поверхности детектора; $P_{0\max}$ – мощность рентгеновского излучения с максимально возможной энергией в спектре $E_{\max}$ на расстоянии 1 м.

Формула для оценки сигнала I_i , $i=1,2$ имеет вид

$$I_i = n_i(\rho H, Z) t_i \overline{E_{iab}}, \quad (2)$$

где I_i – исходные изображения $\mathbf{I}_i = \{I_i(x, y) : (x, y) \in S\}$, $i=1,2$, – среднее $\overline{E_{iab}}$ значение поглощённой энергии зарегистрированного фотона для рентгеновского излучения с максимальной энергией E_i за ОК. Значения $\overline{E_{iab}}$ находятся следующим образом

$$\overline{E_{iab}} = \frac{\int_0^{E_i} \overline{E_{ab}}(E) f(E, E_i) e^{-m(E)\rho H} [1 - e^{-\mu(E)h_n}] dE}{\int_0^{E_i} f(E, E_i) e^{-m(E)\rho H} [1 - e^{-\mu(E)h_n}] dE}, \quad (3)$$

Дисперсия сигнала $I_i - DI_i$ вычисляется по формуле [2]

$$DI_i = n_i(\rho H, Z) t_i \overline{E_{iab}^2} = n_i(\rho H, Z) t_i \overline{E_{iab}}^2 \eta_i^2(\rho H, Z), \quad (4)$$

где $\overline{E_{iab}^2}$ и η_i^2 – средние значения квадрата поглощённой энергии зарегистрированных фотонов и коэффициента накопления флуктуаций для рентгеновского излучения с максимальной энергией E_i за ОК. Формула для вычисления $\overline{E_{iab}^2}$ имеет вид, аналогичный (4),

$$\overline{E_{iab}^2} = \frac{\int_0^{E_i} \overline{E_{ab}^2}(E) f(E, E_i) e^{-m(E)\rho H} [1 - e^{-\mu(E)h_n}] dE}{\int_0^{E_i} f(E, E_i) e^{-m(E)\rho H} [1 - e^{-\mu(E)h_n}] dE}, \quad (5)$$

где $\overline{E_{ab}^2}(E)$ – среднее значение квадрата энергии зарегистрированного фотона с энергией E .

После подстановки (1) и (5) в формулу (4) получим выражение, связывающие дисперсию DI_i со временем измерения t_i .

$$DI_i = n_i(\rho H, Z) t_i \frac{\int_0^{E_i} \overline{E_{ab}^2}(E) f(E, E_i) e^{-m(E)\rho H} [1 - e^{-\mu(E)h_n}] dE}{\int_0^{E_i} f(E, E_i) e^{-m(E)\rho H} [1 - e^{-\mu(E)h_n}] dE}, \quad (6)$$

Рассмотрим далее более подробно математическое описание метода идентификации по эффективному атомному номеру.

В результате совместной обработки результирующих радиографических изображений $\mathbf{R}_1$ и $\mathbf{R}_2$ формируются изображения параметров МДЭ – $\mathbf{A}$ и $\mathbf{B}$.

Для каждой точке (x, y) изображающей поверхности S для оценки параметров МДЭ $A(x, y)$ и $B(x, y)$ решается система нелинейных уравнений

$$\begin{aligned}
& -\ln \int_0^{E_1} f_{ab}(E) e^{-A(x,y)f_1(E)-B(x,y)f_2(E)} dE = R_1(x,y) \\
& -\ln \int_0^{E_2} f_{ab}(E) e^{-A(x,y)f_1(E)-B(x,y)f_2(E)} dE = R_2(x,y)
\end{aligned} \tag{7}$$

здесь $E_{ab}(E, E_i)$, $i=1,2$ – энергетический спектр поглощенной энергии в радиометрическом детекторе для рентгеновского излучения с максимальной энергией E_i ; $f_1(E)$, $f_2(E)$ – энергетические зависимости двух основных процессов взаимодействия фотонного излучения с веществом ОДК.

В качестве первого процесса в системе (7) выступает эффект Комптона, а в качестве второго – эффект рождения пар.

Для решения системы (7) относительно параметров $A(x,y)$ и $B(x,y)$ необходимо знать значения максимальных энергий – E_1 и E_2 и функциональные зависимости $f_{ab}(E, E_i)$, $i=1,2$: $f_{ab}(E, E_1)$, $f_{ab}(E, E_2)$,

На этапе решения системы дисперсии случайных величин A , B – DA и DB , а также ковариация $\text{cov}(A,B)$ находятся применением метода наименьших приращений к системе (12). Конечные выражения имеют вид

$$\begin{aligned}
DA &= \frac{g_{22}^2 DR_1 + g_{12}^2 DR_2}{G^2}, \quad DB = \frac{g_{11}^2 DR_2 + g_{21}^2 DR_1}{G^2}, \\
\text{cov}(A,B) &= \frac{-g_{22}g_{21} DR_1 - g_{12}g_{11} DR_2}{G^2}.
\end{aligned} \tag{8}$$

здесь

$$g_{ij} = \frac{\int_0^{E_i} f_j(E) F_{ab}(E) e^{-A(x,y)f_1(E)-B(x,y)f_2(E)} dE}{\int_0^{E_i} F_{ab}(E) e^{-A(x,y)f_1(E)-B(x,y)f_2(E)} dE}, \quad G = g_{11}g_{22} - g_{12}g_{21}, \tag{9}$$

После подстановки получим

$$\begin{aligned}
DA &= \frac{g_{22}^2 \tau_1/t_1 + g_{12}^2 \tau_2/t_2}{(g_{11}g_{22} - g_{12}g_{21})^2}, \quad DB = \frac{g_{11}^2 \tau_2/t_2 + g_{21}^2 \tau_1/t_1}{(g_{11}g_{22} - g_{12}g_{21})^2} \\
\text{cov}(A,B) &= \frac{-g_{22}g_{21} \tau_1/t_1 - g_{12}g_{11} \tau_2/t_2}{(g_{11}g_{22} - g_{12}g_{21})^2}.
\end{aligned} \tag{10}$$

Конечный этап связан с оценкой дисперсии эффективного атомного номера. В области высоких энергий эффективный атомный номер Z связан с параметрами МДЭ следующим соотношением A и B

$$Z \approx \frac{B}{A} \tag{11}$$

Применяя метод малых приращений к (11) получим формулу для вычисления дисперсии эффективного атомного номера $Z - DZ$

$$DZ \approx \frac{A^2 DB + B^2 DA - 2AB \operatorname{cov}(A, B)}{A^4}. \quad (12)$$

Подставим выражения (10) в формулу (12). После несложных преобразований выражение для оценки дисперсии эффективного атомного номера будет иметь вид

$$DZ \approx \frac{(Ag_{21} + Bg_{22})^2 \tau_1/t_1 + (Ag_{11} + Bg_{12})^2 \tau_2/t_2}{G^2 A^4}. \quad (13)$$

Нас интересует связь дисперсии оцениваемого параметра объекта контроля DZ с параметрами t_1 , t_2 и физическими характеристиками ОК – средним значением эффективного атомного номера вещества Z и толщиной ρH . В настоящее время для вычисления параметров высокоэнергетической реализации метода дуальных энергий A и B применяют следующие формулы

$$A = \rho H, \quad B = Z\rho H. \quad (14)$$

В результате подстановки (14) в (13) получим

$$DZ \approx \frac{(g_{21} + Zg_{22})^2 \tau_1/t_1 + (g_{11} + Zg_{12})^2 \tau_2/t_2}{G^2 (\rho H)^2}. \quad (15)$$

Выражение (15) позволяет оценить точность измерения эффективного атомного номера, исходя из времени формирования строк исходных радиографических изображений, параметров ОК, максимальных энергий рентгеновского излучения.

Проведём краткий анализ выражения (15). Пусть время формирования совместно обрабатываемых строк в исходных изображениях равно t , время t складывается из t_1 и t_2 . С учётом этого факта выражение (15) переписывается следующим образом

$$DZ \approx \frac{(g_{21} + Zg_{22})^2 \tau_1/t_1 + (g_{11} + Zg_{12})^2 \tau_2/(t - t_1)}{G^2 (\rho H)^2}. \quad (16)$$

Очевидно, что существует оптимальное значение времени t_1 , при котором значение дисперсии DZ является минимальным. Формула для вычисления $t_{1\text{opt}}$ имеет вид

$$t_{1\text{opt}} = \frac{t \tau_1 (g_{21} + Zg_{22})^2}{\tau_1 (g_{21} + Zg_{22})^2 + \tau_2 (g_{11} + Zg_{12})^2}. \quad (17)$$

Замечание 1. Выражение (17) в случае использования импульсного источника рентгеновского излучения должно быть уточнено. Количество импульсов с меньшей максимальной энергией $E_1 - m_1$ должно удовлетворять следующему ограничению

$$m_1 \geq \operatorname{int} \frac{t \tau_1 (g_{21} + Zg_{22})^2 \nu_0}{\tau_1 (g_{21} + Zg_{22})^2 + \tau_2 (g_{11} + Zg_{12})^2}, \quad (18)$$

здесь $\operatorname{int}(x)$ – целая часть числа x .

Значение дисперсии DZ , соответствующее t_{opt} , находится подстановкой (17) в (16)

$$DZ \approx \frac{2[\tau_1(g_{21} + Zg_{22})^2 + \tau_2(g_{11} + Zg_{12})^2]}{tG^2(\rho H)^2}. \quad (19)$$

Формула (19) позволяет вычислить время t , необходимое для формирования пары строк изображений $\mathbf{I}_1$ и $\mathbf{I}_2$, исходя из заданного потребителем предельного уровня погрешности оценки эффективного атомного номера ΔZ_{lim} . Указанный предельный уровень погрешности оценки эффективного атомного номера ΔZ_{lim} называют разрешением по Z . Искомое выражение имеет вид

$$t = \frac{2[\tau_1(g_{21} + Zg_{22})^2 + \tau_2(g_{11} + Zg_{12})^2]}{G^2(\rho H)^2 \Delta Z_{\text{lim}}^2}. \quad (20)$$

Выражение (20) в совокупности с формулами (12-19) представляет собой алгоритм оценки производительности комплекса досмотрового контроля с функцией идентификации веществ объектов контроля и его фрагментов.

Ниже рассмотрим математическое описание второго способа идентификации веществ методом линий уровней.

Второй подход к идентификации веществ объектов контроля и их фрагментов можно назвать методом линий уровней [3]. В этом подходе на основе результирующих изображений $\mathbf{R}_1$ и $\mathbf{R}_2$ формируется идентификационное изображение

$$\mathbf{Q} = \left\{ Q(x, y) = \frac{R_2(x, y)}{R_1(x, y)} : (x, y) \in S \right\}. \quad (21)$$

Вещество ОК в точке с координатами (x, y) идентифицируется с некоторым веществом, если выполняется следующее ограничение

$$U_-(R_1(x, y)) < Q(R_1(x, y)) \leq U_+(R_1(x, y)), \quad (22)$$

где $U_-(x, y)$, $U_+(x, y)$ – уровневые линии для сопоставляемого вещества.

Дисперсия идентификационного параметра Q – DQ находится с помощью разложения по малым приращениям

$$DQ = \frac{R_1^2 DR_2 + R_2^2 DR_1}{R_1^4}. \quad (23)$$

После подстановки получим

$$DQ = \frac{R_1^2 \tau_2 / t_2 + R_2^2 \tau_1 / t_1}{R_1^4}. \quad (24)$$

Время t_{opt} для которого значение DQ минимально при фиксированном значении t находится следующим образом

$$t_{\text{opt}} = \frac{t \tau_1 R_2^2}{\tau_1 R_2^2 + \tau_2 R_1^2}. \quad (25)$$

Минимальное значение дисперсии DQ достигается при $t_1=t_{\text{lopt}}$

$$DQ = \frac{2(\tau_1 R_2^2 + \tau_2 R_1^2)}{t R_1^4}. \quad (26)$$

Время t , определяющее производительность досмотрового комплекса с идентификацией вещества ОК методом линий уровней, находится из (26), исходя из предельного уровня погрешности оценки параметра идентификации ΔQ_{lim} ,

$$t = \frac{2(\tau_1 R_2^2 + \tau_2 R_1^2)}{\Delta Q_{\text{lim}} R_1^4}. \quad (27)$$

Выражения с (13) по (27) позволяют оценить производительность досмотрового комплекса с функцией идентификации веществ ОК методом линий уровней.

В результате были составлены совокупности математических соотношений, предназначенных для оценки производительности высокоэнергетических цифровых комплексов с функцией идентификации веществ объектов контроля и их фрагментов с помощью двух основных реализаций метода дуальных энергий – по эффективному атомному номеру и методом линий уровней. В дальнейшем математический алгоритм будет переведен в алгоритм, написанный в среде MathCAD. В данном алгоритме будет достаточно вбить входные (начальные) характеристики и программа сама рассчитает примерное время контроля, и на основании результатов выводимых алгоритмом можно будет сделать вывод о том, какова должна быть скорость сканирования объекта контроля для получения качественного цифрового изображения.

Список используемой литературы

1. Osipov S.P., Temnik A.K., Chakhlov S.V. The Effects of Physical Factors on the Quality of the Dual High Energy Identification of the Material of an Inspected Object // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2014, Vol. 50, No. 8, pp. 491–498.
- 2 Fuchs, T., Keßling, P., Firsching, M., Nachtrab, F., Scholz, G. Industrial Applications of Dual X-ray Energy Computed Tomography (2X-CT). Nondestructive Testing of Materials and Structures. Springer Netherlands. 2013, Vol. 6, pp. 97–103.
- 3 Chadwick, M.B., Obložinský, P., Herman, M., Greene, N.M., McKnight, R.D., Smith, D.L., ... & Van der Marck, S.C. ENDF/B-VII. 0: Next generation evaluated nuclear data library for nuclear science and technology // Nuclear data sheets. – 2006, Vol. 107, No. 12, pp. 2931–3060.