

РАСПОЗНАВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ФРАГМЕНТОВ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОБЪЕКТОВ В КОНТЕЙНЕРАХ МЕТОДОМ ДУАЛЬНЫХ ЭНЕРГИЙ

© 2019 г. С.П. Осипов^{1,*}, Е.Ю. Усачёв², С.В. Чахлов^{1,**}, С.А. Щетинкин², С. Сун³,
Г. Жанг³, А.В. Батрагин¹, О.С. Осипов⁴

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия 634028 Томск, пр-т Ленина, 30

²МИРЭА — Российский технологический университет, Россия 119454 Москва, пр-т Вернадского, 78
³PowerScan LTD, P. R. China 100029 Beijing, Chaoyang District, Northern four Mid Road, Huatingjiayuan Building,
No: D-17B

⁴Сольвейг Мультимедиа, Россия 634055 Томск, пр-т Развития, 3
E-mail: *osip1809@rambler.ru; **chakhlov@tpu.ru

Поступила в редакцию 19.03.2019; после доработки 22.03.2019
Принята к публикации 24.05.2019

Разработаны математическая и имитационная модели формирования изображений в системе для распознавания материалов внутренних фрагментов контейнеров методом дуальных энергий. Проведена серия вычислительных экспериментов применительно к распознаванию материалов внутри транспортных контейнеров без компенсации и с компенсацией влияния исследуемого фактора на качество распознавания. Варьировались толщина предварительного фильтра, разрядность АЦП, соотношения количества импульсов низкой и высокой энергий тормозного излучения, размеры окна усредняющего фильтра. Разработан алгоритм, предназначенный для компенсации влияния толщины стенки контейнера на качество распознавания, основанный на статистической обработке радиографических изображений объекта, и экспериментально доказана его эффективность.

Ключевые слова: тормозное излучение, метод дуальных энергий, распознавание материалов, массовая толщина, эффективный атомный номер.

DOI: 10.1134/S0130308219090057

ВВЕДЕНИЕ

Для распознавания материалов объектов контроля (ОК) и их фрагментов в инспекционных досмотровых комплексах (ИДК) широко используются различные реализации метода дуальных энергий (МДЭ) [1—5]. Во всех реализациях МДЭ на вход алгоритма распознавания поступают два исходных радиографических изображения (РИ). В качестве параметра распознавания (ПР) в МДЭ применяется эффективный атомный номер материала [3, 6—8] либо параметр метода линий уровней [1, 3, 9—12]. На качество распознавания материалов влияют различные факторы [5, 13—16], связанные с особенностями излучения, взаимодействия и регистрации фотонов, трансформации шумов и смещений информативных параметров. Качество распознавания определяется также внутренней структурой ОК. Большая часть объектов досмотрового контроля относятся к классу оболочечных объектов [17—19]. Такие ОК можно считать объединением оболочки и внутреннего ее содержания. Изображения оболочки затеяют изображения внутренних фрагментов ОК, что приводит к смещению оценок ПР и к некорректному распознаванию материалов. Многие оболочки являются унифицированными, например, морские контейнеры. Все их многообразие, включая форму, материал, распределения толщины оболочки по поверхности, конечно. Отсюда следует возможность использования предварительной информации об оболочке для повышения качества распознавания материалов внутренних фрагментов ОК. Совершенствование алгоритма распознавания должно основываться на соответствующей математической модели.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПОЗНАВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ВНУТРЕННИХ ФРАГМЕНТОВ ОБОЛОЧЕЧНЫХ ОБЪЕКТОВ

1.1. Формирование и калибровка радиографических изображений

В качестве базовой модели формирования РИ в МДЭ будем использовать модели, описанные в [3, 16]. Совершенствование упомянутых моделей сводится к введению дополнительного ослабления излучения барьером, эквивалентным оболочке.

Введем систему координат $OXYZ$, точка O в центре излучающей поверхности источника тормозного излучения (ИТИ). Ось OZ совпадает с осью пучка ИТИ. Объект контроля занимает часть пространства \mathbf{V} и характеризуется распределениями эффективного атомного номера $Z — Z(x, y, z)$ и плотности $\rho — \rho(x, y, z)$, здесь точки $(x, y, z) \in \mathbf{V}$. Эффективный атомный номер Z определяет массовый коэффициент ослабления (МКО) излучения m для любой энергии фотонов E . В соответствии с общим описанием анализируемого объекта множество точек \mathbf{V} для конечного числа внутренних фрагментов представимо в виде

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_0 \cup \mathbf{V}_1 \cup \dots \cup \mathbf{V}_n, \quad (1)$$

здесь n — количество внутренних фрагментов; \mathbf{V}_0 — множество точек оболочки.

Пусть радиационно-чувствительные элементы (РЧЭ) детектора ориентированы на ИТИ и имеют толщину h . Единичные строки исходных РИ формируются за время t_L для низкоэнергетического излучения и за время t_H для высокоэнергетического излучения. На фронтальную поверхность РЧЭ в единицу времени падает N_L, N_H низко- и высокоэнергетических фотонов. Система для оценки аналоговых сигналов J_L и J_H с радиометрического детектора с центром в точке (x, y) для максимальных энергий излучения E_L и E_H с точностью до коэффициента преобразования энергии C будет выглядеть как

$$\begin{aligned} J_L(x, y) &\approx t_L \left(CN_L(x, y) \int_0^{E_L} E_{ab}(E, h) f(E, E_L) \exp \left(- \int_{L(x, y)} m(E, Z(l)) \rho(l) dl \right) \varepsilon(E, h) dE + B(x) \right) \\ J_H(x, y) &\approx t_H \left(CN_H(x, y) \int_0^{E_H} E_{ab}(E, h) f(E, E_H) \exp \left(- \int_{L(x, y)} m(E, Z(l)) \rho(l) dl \right) \varepsilon(E, h) dE + B(x) \right) \end{aligned} \quad (2)$$

где $f(E, E_L), f(E, E_H)$ — энергетические спектры излучения; $B(x)$ — энергетический эквивалент мощности темного сигнала с детектора; $E_{ab}(E, h)$ — среднее значение поглощенной энергии зарегистрированного фотона с энергией E ; $\varepsilon(E, h)$ — эффективность регистрации; $L(x, y)$ — луч, соединяющий источник излучения и точку детектирования.

Для удобства последующего анализа представим уравнения системы (2) в виде

$$J_{L,H}(x, y) = t_{L,H} (I_{L,H}(x, y) + B(x)) = t_{L,H} (CN_{L,H}(x, y) \exp(-P_{L,H}(x, y)) + B(x)). \quad (3)$$

Исходные виртуальные РИ \mathbf{J}_L и \mathbf{J}_H оцифровываются. Цифровые изображения калибруются по «черному» (вычитание темновых токов детекторов) и по «белому» (выравнивание коэффициентов передачи энергии и интенсивности потока на фронтальные поверхности РЧЭ), подвергаются логарифмированию. Полученные изображения \mathbf{D}_L и \mathbf{D}_H являются оценкой идеальных изображений \mathbf{P}_L и \mathbf{P}_H и используются в алгоритме МДЭ:

$$D_{L,H}(x, y) = \frac{\left[\overline{J_{L,H}(x, y) / \Delta} \right] - \left[\overline{t_{L,H} B(x) / \Delta} \right]}{\left[\overline{J_{L,H \text{ air}}(x) / \Delta} \right] - \left[\overline{t_{L,H} B(x) / \Delta} \right]}, \quad \Delta = \frac{\max_x \left(\overline{J_{L \text{ air}}(x)}, \overline{J_{H \text{ air}}(x)} \right)}{2^k - 1},$$

здесь $[\arg]$ — целая часть \arg ; k — разрядность АЦП; $\left[\overline{J_{L,H \text{ air}}(x) / \Delta} \right], \left[\overline{t_{L,H} B(x) / \Delta} \right]$ — средние значения ЦС для измерений по воздуху и с выключенным ИТИ.

Пусть оболочка однородна и изготовлена из материала с эффективным атомным номером Z_e и плотностью ρ_e . Для оценки влияния внешней оболочки ОК на качество распознавания материалов необходимо описание связи параметров оболочки с $I_H(x, y)$ и $I_L(x, y)$ (3). Искомая система состоит из уравнений следующего вида:

$$I_{L,H}(x, y) = \int_0^{E_{L,H}} E_{ab}(E, h) f(E_{L,H}, E) \exp \left(-m(E, Z_e) \rho_e H_e(x, y) - \int_{L_n(x, y)} m(E, Z(l)) \rho(l) dl \right) \varepsilon(E, h) dE, \quad (4)$$

здесь $H_e(x, y)$ — общая толщина оболочки по лучу, соединяющему источник излучения и точку детектирования; $L_{in}(x, y)$ — отрезок, относящийся к внутренней структуре ОК.

Выражения (4) в совокупности с (3), преобразованием АС в ЦС и необходимыми калибровками являются основой математической модели формирования изображений ОК в МДЭ. Отмеченная модель предназначена для анализа влияния параметров внешней оболочки на качество распознавания МДЭ материалов внутренних фрагментов ОК.

1.2. Распознавание материалов методом линий уровней

Формула для вычисления параметра распознавания материалов Q в методе линий уровней в точке с координатами (x, y) имеет вид [1, 3, 9—12]

$$Q(x, y) = Q(D_L(x, y)) = D_H(x, y) / D_L(x, y). \quad (5)$$

В формуле (5) подчеркивается, что параметр распознавания Q рассматривается в качестве функции от оценки толщины ОК в единицах д.с.п. — D_L .

Метод линий уровней основан на предварительном измерении зависимостей $Q(D_L)$ (характеристических кривых) для типичных представителей классов распознаваемых материалов. В результате формируется набор функций $Q_j(D_L)$, $j = 1 \dots N_C$, где N_C — количество упомянутых классов. Существуют два подхода, ассоциируемых с решающим правилом, использования функций $Q_j(D_L)$, $j = 1 \dots N_C$ для отнесения материала по экспериментальным данным Q и D к тому или иному классу.

В первом подходе (классическая реализация метода линий уровней) набор функций $Q_j(D_L)$, $j = 1 \dots N_C$ трансформируется в линии уровней $U_{j-}(D_L)$ и $U_{j+}(D_L)$, $j = 1 \dots N_C$. Классы материалов упорядочиваются по возрастанию линий уровней. Для первого подхода обязательным требованием к экспериментальным линиям уровней является ограничение

$$U_{j-}(D_L) < U_{j+}(D_L) \leq U_{j+1-}(D_L) < U_{j+1+}(D_L). \quad (6)$$

Требование совпадения верхней линии уровня для предыдущего класса материалов с нижней линией уровня для последующего класса не является обязательным. Центральное строгое неравенство порождает существование интервалов неопределенности (неоднозначности). Это означает, что материал ОК или его фрагмент не будет отнесен ни к одному из заданных классов материалов.

Первое решающее правило. Материал фрагмента ОК относится к материалу класса j_0 , если экспериментальное значение ПР Q , удовлетворяет неравенству

$$U_{j_0-}(D) < Q \leq U_{j_0+}(D), \quad (7)$$

здесь D — толщина ОК в единицах д.с.п. для энергии E_L .

Во втором подходе метода линий уровней непосредственно используется совокупность функций $Q_j(D_L)$, $j = 1 \dots N_C$. Отнесение материала ОК в этом случае осуществляется в результате совместного анализа набора функций и пары экспериментальных параметров Q и D в соответствии с решающим правилом.

Второе решающее правило. Материал фрагмента ОК относится к материалу класса j_0 , если для экспериментальных значений Q и D_L отклонение Q от $Q_{j_0}(D_L)$ по абсолютной величине минимально по сравнению со всеми остальными характеристическими кривыми. В формализованном виде описываемое решающее правило выглядит следующим образом:

$$\min_j |Q - Q_j(D)| = |Q - Q_{j_0}(D)|. \quad (8)$$

Решающее правило (7) не дает однозначного распознавания материала ОК, если значение D принадлежит интервалу неопределенности распознавания.

Выражения (1)—(8) являются основой математической модели системы досмотрового контроля оболочечных объектов с функцией распознавания материалов. Модель позволяет разработать алгоритм имитации изображений ПР.

2. АЛГОРИТМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМЕ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ВНУТРЕННИХ ФРАГМЕНТОВ ОБОЛОЧЕЧНЫХ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ ДУАЛЬНЫХ ЭНЕРГИЙ

Опишем последовательность действий в основных блоках алгоритма.

2.1. Ввод общих исходных данных и формирование вспомогательных функций

Вводятся 3 таблицы: МКО или сечений взаимодействия гамма-излучения σ [барн/атом] с веществом [20—22], атомных номеров Z и молярных масс M . Для каждой энергии E_i , $i=1 \dots n$, из таблицы сечения σ пересчитываются в МКО m :

$$m(E_i) = \sigma(E_i)10^{-24} [\text{см}^2/\text{атом}]N_A[\text{атом/моль}]/M[\text{г/моль}], N_A \text{ — число Авогадро.} \quad (9)$$

Для вычисления МКО для заданного значения энергии E вводятся интерполирующие функции $m(E, Z_{iz})$, $iz=1 \dots iz_0$.

Для выбранного материала сцинтиллятора вводится зависимость МКО от энергии $m_{sc}(E)$, функция $E_{ab}(E, h)$ [23] и двумерная функция $\varepsilon(E, h)$

$$\varepsilon(E, h) = 1 - \exp(m_{sc}(E)h). \quad (10)$$

Задается энергетический спектр $f(E_{\max}, E)$ (распределение числа фотонов по энергии), где E_{\max} — максимальная энергия тормозного излучения

$$f(E_{\max}, E) = \begin{cases} \frac{E_{\max} - E}{E \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} \frac{E_{\max} - E}{E} dE}, & E \in (E_{\min}, E_{\max}) \\ 0, & E \notin (E_{\min}, E_{\max}) \end{cases}. \quad (11)$$

Значение $E_{\min} \ll E_{\max}$ на практике выбирают из интервала от 5 до 10 кэВ.

Для описания $f(E_{\max}, E)$ используются и более сложные формулы [24, 25].

2.2. Задание исходных параметров ИДК

Распознавание материалов для высокоэнергетических реализаций МДЭ сводится к отнесению материалов по ПР Q к одному из 4 классов материалов. С каждым из классов ассоциируется свой типичный представитель со своими значениями плотности ρ и атомного номера Z . Это означает, что задаются два вектора ρ и Z :

$$\rho = \begin{pmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \rho_3 \\ \rho_4 \end{pmatrix}, \quad Z = \begin{pmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \\ Z_4 \end{pmatrix}, \quad \text{например } \rho = \begin{pmatrix} 2,26 \\ 2,7 \\ 7,86 \\ 11,3 \end{pmatrix}, \quad Z = \begin{pmatrix} 6 \\ 13 \\ 26 \\ 82 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Разрабатываемая математическая модель предназначена для исследования различных параметров ИДК на качество распознавания.

Основными параметрами ИДК с функцией распознавания материалов являются максимальные энергии тормозного излучения $E_L, E_H, E_L < E_H$. К параметрам ОК, помимо ρ и Z , относится диапазон изменения массовой толщины ρH — $[(\rho H)_{\min}, (\rho H)_{\max}]$.

В [16] отмечено, что одним из путей снижения $(\rho H)_{\min}$ при надежном распознавании материалов является фильтрация излучения. Задаются плотность ρ_f , атомный номер Z_f материала фильтра и его толщина h_f .

Одним из наиболее важных параметров ИДК, позволяющих моделировать влияние шумов на качество распознавания, является ожидаемое количество фотонов N_0 , падающих на фронтальную поверхность одного детектора линейки.

Параметр $k_p, k_p \leq 1$ предназначен для вариации мощности ИТИ.

Изменяемым параметром модели является разрядность АЦП — k_{ADC} .

За согласование диапазонов изменения аналоговых сигналов (АС) и цифровых сигналов (ЦС) отвечает параметр $C_0, C_0 > 1$.

В ИДК используются ИТИ с чередованием импульсов низкоэнергетического (E_L) и высокоэнергетического излучения (E_H). Для дополнительного согласования диапазонов изменения АС и ЦС при формировании исходных РИ ОК применяют суммирование различного количества импульсов для низкоэнергетического n_L и высокоэнергетического n_H излучений [16]. Естественно, что максимальная производительность ИДК, достигается при соотношении числа импульсов $n_L:n_H = 1:1$. Но при таком соотношении уровень шумов в РИ с энергией E_L существенно больше уровня шумов в РИ с энергией E_H .

2.3. Задание основных функций

Основные функции описывают зависимости количества зарегистрированных фотонов N и их энергии I от энергии E_{\max} , параметров ОК ($Z, \rho H$), массовой толщины предварительного фильтра $\rho_f h_f$ и толщины сцинтиллятора h_{sc} . Эти функции имеют вид:

$$N(E_{\max}, Z, \rho H, h_f, h) \approx k_p N_0 \int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E, h) f(E_{\max}, E) \exp(-m(E, Z)\rho H - m_f(E)\rho_f h_f) \varepsilon(E, h) dE, \quad (13)$$

$$I(E_{\max}, Z, \rho H, h_f, h) \approx N(E_{\max}, Z, \rho H, h_f, h) \times \frac{\int_0^{E_{\max}} E_{ab}(E, h) f(E_{\max}, E) \exp(-m(E, Z)\rho H - m_f(E)\rho_f h_f) \varepsilon(E, h) dE}{\int_0^{E_{\max}} f(E_{\max}, E) \exp(-m(E, Z)\rho H - m_f(E)\rho_f h_f) \varepsilon(E, h) dE}. \quad (14)$$

2.4. Формирование калибровочных функций

На момент перехода к разделу 2.4 энергии E_L и E_H фиксированы.

Задается количество точек разбиения диапазона $[(\rho H)_{\min}, (\rho H)_{\max}]$ — n_p . В соответствии со сказанным выше количество точек разбиения по Z равно $n_z = 4$.

Разбиение по ρH осуществляется с равным шагом, а по Z в соответствии с примером (11). Функции $N(E_L, Z, \rho H, h_f, h)$, $N(E_H, Z, \rho H, h_f, h)$, $I(E_L, Z, \rho H, h_f, h)$, $I(E_H, Z, \rho H, h_f, h)$ вычисляются по формулам (12), (13) и табулируются по переменным Z и ρH . На основе полученных матриц $\mathbf{N}_L, \mathbf{N}_H, \mathbf{I}_L, \mathbf{I}_H$ для выбранного заранее способа интерполяции или аппроксимации и уровня Z определяются непрерывные функции $N_L^*(\rho H, Z)$, $N_H^*(\rho H, Z)$ и $I_L^*(\rho H, Z)$, $I_H^*(\rho H, Z)$. Эти функции позволяют повысить производительность имитационного моделирования во много раз по сравнению с вычислениями по формулам (13), (14). Элементы матриц $\mathbf{I}_L, \mathbf{I}_H$ являются АС.

Матрицы $\mathbf{I}_L, \mathbf{I}_H$ трансформируются в матрицы ЦС — $\mathbf{D}_{L2}, \mathbf{D}_{H2}$. Из матриц $\mathbf{I}_L, \mathbf{I}_H$ и $\mathbf{D}_{L2}, \mathbf{D}_{H2}$ формируются матрицы толщин в единицах д.с.п. — $\mathbf{P}_L, \mathbf{P}_H$ и $\mathbf{PD}_L, \mathbf{PD}_H$ и матрицы ПР \mathbf{Q} и \mathbf{QD} . Анализ \mathbf{Q} и \mathbf{QD} позволяет проиллюстрировать влияние разрядности АЦП, толщины h_f и т.п. на качество распознавания и определить границы интервала ρH , в котором правильно распознаются углерод, алюминий, железо и свинец.

Выбирается способ интерполяции (аппроксимации) зависимости параметра распознавания Q от P_L и формируется набор функций для всех уровней Z — $Q(P_L, Z)$. Задаются пять уровневых функций $U(P_L, Z)$ для отнесения материалов по параметру распознавания Q к тому или иному классу распознавания в соответствии с решающим правилом (7). Показ функций $Q(P_L, Z)$ и $U(P_L, Z)$ для $Z = 6; 13; 26; 82$ на одном графике позволяет наглядно проиллюстрировать особенности распознавания материалов для малых и больших значений толщин ОК в единицах д.с.п.

2.5. Описание объекта контроля

Пусть ОК представляет собой контейнер с толщиной стенок по стали h_{Fc} . На полу контейнера доски толщиной h_w . Внутри контейнера расположен стеллаж из алюминия, на полках которого

расположены клиновидные фрагменты из углерода, алюминия, стали и свинца толщиной $(\rho H)_{\min}$ до $(\rho H)_{\max}$. Стойки и полки стеллажа имеют толщину h_{Al} .

Распределение $(\rho H)(x, y)$ по площади изображения удобно представить в виде суммы трех распределений: пустого контейнера — $(\rho H)_s(x, y)$; стеллажа — $(\rho H)_1(x, y)$; клиновидных фрагментов — $(\rho H)_0(x, y)$. Функция $(\rho H)_0(x, y)$ при условии принадлежности точки (x, y) изображению клина является убывающей функцией по координате y .

2.6. Формирование первичных зашумленных радиографических изображений МДЭ

Определяется интервал дискретизации Δ .

Вычисляются поправочные коэффициенты на ослабление излучения стенками контейнера для интенсивности — $k_{L, \text{Fe}}, k_{H, \text{Fe}}$ и числа фотонов $n_{L, \text{Fe}}, n_{H, \text{Fe}}$.

Формируются первичные цифровые зашумленные радиографические изображения $\mathbf{D}_L, \mathbf{D}_H$. Для удобства вычислений выделим несколько случаев, связанных с местоположением точки изображения относительно объекта контроля и его фрагментов. Цифровые сигналы $D_{L,H}$ в точке с координатами (x, y) моделируются по формуле

$$D_{L,H}(x, y) = \text{int} \left(\frac{I_{L,H}(\rho(x, y), Z(x, y)) \max(\alpha, 1 + \xi_N(0, \delta_{L,H}))}{\Delta} \right), \quad (15)$$

где функция $\text{int}(\arg)$ — целая часть аргумента; $\xi_N(0, \delta_{L,H})$ — случайная величина, распределенная по нормальному закону, с нулевым средним значением и относительным среднеквадратическим отклонением $\delta_{L,H}$, которое с точностью до мультипликативного коэффициента накопления флуктуаций η [23], будет выглядеть как

$$\delta_{L,H} = \frac{1}{\sqrt{N_{L,H}(\rho(x, y), Z(x, y))}}. \quad (16)$$

Параметр α в выражении (15) предназначен для исключения физически невозможных сценариев расчета и удовлетворяет ограничению $0 < \alpha \ll 1$, например, $\alpha = 0,0001$.

2.7. Фильтрация, первичная калибровка, корректировка и вычисление распределения параметра распознавания

Используемые в ИДК бетатроны имеют малую мощность тормозного излучения [26—28], что приводит к невозможности распознавания материала по одному пикселю изображения ПР. К исходным цифровым РИ $\mathbf{D}_L, \mathbf{D}_H$ применяется фильтрация методом скользящего среднего [29, 30], в результате чего они трансформируются в изображения $\mathbf{D}_L^*, \mathbf{D}_H^*$. В досмотровом контроле одинаково важны направления по x и по y , поэтому используются усредняющие фильтры размером $k_0 \times k_0$ пикселей. Для анализа величины k_0 на качество распознавания необходимо варьировать k_0 от единицы в сторону увеличения.

Изображения $\mathbf{D}_L^*, \mathbf{D}_H^*$ нормируются на средние значения ЦС по воздуху $\overline{D}_L, \overline{D}_H$ и трансформируются в распределения оценок толщин ОК в единицах д.с.п. — $P_{L,H}^*(x, y)$ и $P_{H,L}^*(x, y)$

$$P_{L,H}^*(x, y) = \max \left(\gamma, -\ln \frac{\max(\gamma, D_{L,H}^*(x, y))}{\overline{D}_{L,H}} - k_1 dp_{L,H} \right), \quad (17)$$

здесь k_1 принимает значения 0 (без коррекции исследуемого фактора) или 1 (с коррекцией); dp_L, dp_H — общие толщины стенок контейнера в единицах д.с.п. для E_L и E_H .

Параметры dp_L, dp_H для всего диапазона изменения толщин стенок контейнеров оцениваются экспериментально на стадии калибровочных измерений по плоским стальным листам. Описанная корректировка эффективна в случае своевременного поступления информации о параметрах контейнера. В противном случае алгоритм распознавания должен быть дополнен блоком автоматической оценки dp_L, dp_H .

Распределение $Q(x, y)$ оценивается по формуле (5).

2.8. Формирование итогового полутонового изображения и его раскраска

Итоговое полутоновое изображение \mathbf{G} формируется на основе изображений \mathbf{P}_L^* или \mathbf{P}_H^* . Формула для трансформации, например, \mathbf{P}_L^* в \mathbf{G} имеет вид

$$G(x, y) = M_1 - \text{int} \left(M_2 \frac{P_{L,H}^*(x, y) - \min_{x,y} P_{L,H}^*(x, y)}{\max_{x,y} P_{L,H}^*(x, y) - \min_{x,y} P_{L,H}^*(x, y)} \right), \quad (18)$$

где M_1, M_2 — целые числа, определяющие яркость. В системе цветовых координат RGB можно рекомендовать следующие значения параметров M_1, M_2 : $M_1 = 255$; $M_2 = 200$. Увеличение M_2 приведет к невозможности различать темные оттенки различных цветов.

Выбор цвета для точки изображения \mathbf{G} производится в соответствии со значением параметра распознавания Q по выбранной палитре. В качестве решающего правила может быть использованы соотношения (7) или (8). Правило (7) для малых толщин ОК непригодно, а правило (8) — работоспособно, но вне интервала неопределенности распознавания [16]. Наиболее иллюстративна палитра с фиксированными цветами. Можно использовать следующее соотношение материалов и цветов: углерод и органика — синий; алюминий — зеленый; железо и стали — красный; свинец и сплавы — желтый.

В соответствии с решающим правилом формируется вектор матриц в системе цветовых координат RGB — $(\mathbf{r} \ \mathbf{g} \ \mathbf{b})$. Этот вектор используется при раскрашивании изображения \mathbf{G} , в результате чего формируется изображение \mathbf{G}_{RGB} , которое записывается в память компьютера в формате *.bmp.

Предложенный алгоритм легко реализуется на языке MathCad, широко используемом для численного моделирования [31, 32]. Выбор в пользу MathCad обусловлен наглядностью программы и возможностью вариации всех параметров ИДК.

3. ПРИМЕРЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ МДЭ ОБОЛОЧЕЧНЫХ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ ДУАЛЬНЫХ ЭНЕРГИЙ

3.1. Первичные численные эксперименты

Для образца был выбран ИДК Томского политехнического университета (ТПУ) на основе бета-трона МИБ-9 [33]. Объектом контроля является стилизованный стальной контейнер размером $2400 \times 2400 \times 2400$ мм³ с толщиной стенки $h_{\text{Fe}} = 3$ мм. Пол контейнера выстлан деревянными досками толщиной 50 мм. Внутри контейнера находится стеллаж из алюминия, на полках которого расположены клиновидные фрагменты из углерода, алюминия, стали и свинца толщиной 0 до 160 г/см². Стояки и полки стеллажа из алюминиевого сплава имеют толщину 30 мм.

На рис. 1 приведены имитационные изображения ОК для решающих правил (7) и (8) при следующих значениях основных параметров: $E_L = 4$ МэВ, $E_H = 7,5$ МэВ; $n_L : n_H = 1:1$; сцинтиллятор CdWO_4 , $h_{sc} = 35$ мм; $N_0 = 10^6$; $k = 16$; $k_0 = 1$; $k_1 = 0$ и $k_1 = 1$; $h_f = 0$ мм.

Из анализа изображений, приведенных на рис. 1, можно сделать ряд выводов:

решающее правило (8) имеет явное преимущество перед правилом (7), так как позволяет распознавать материалы фрагментов с массовой толщиной, меньшей нижней границы интервала неопределенности распознавания;

несмотря на большое значение параметра N_0 , $N_0 = 10^6$, весьма велик уровень шумов в итоговых изображениях МДЭ;

в области небольших значений ρH наблюдаются интервалы неопределенности;

в области больших значений ρH материалы распознаются некорректно;

предварительная информация о параметрах стенки контейнера позволяет осуществить компенсацию влияния стенки.

Ниже рассматривается правило распознавания материалов, основанное на (8).

Качество распознавания материалов в ряде случаев может быть улучшено за счет рационального выбора параметров ИДК.

3.2. Фильтрация изображений скользящим средним

Проекция пикселя на объект контроля в ИДК составляет 3—4 мм. Фрагменты исследуемых объектов в досмотровом контроле, как правило, имеют размеры, в десятки раз превосходящие раз-

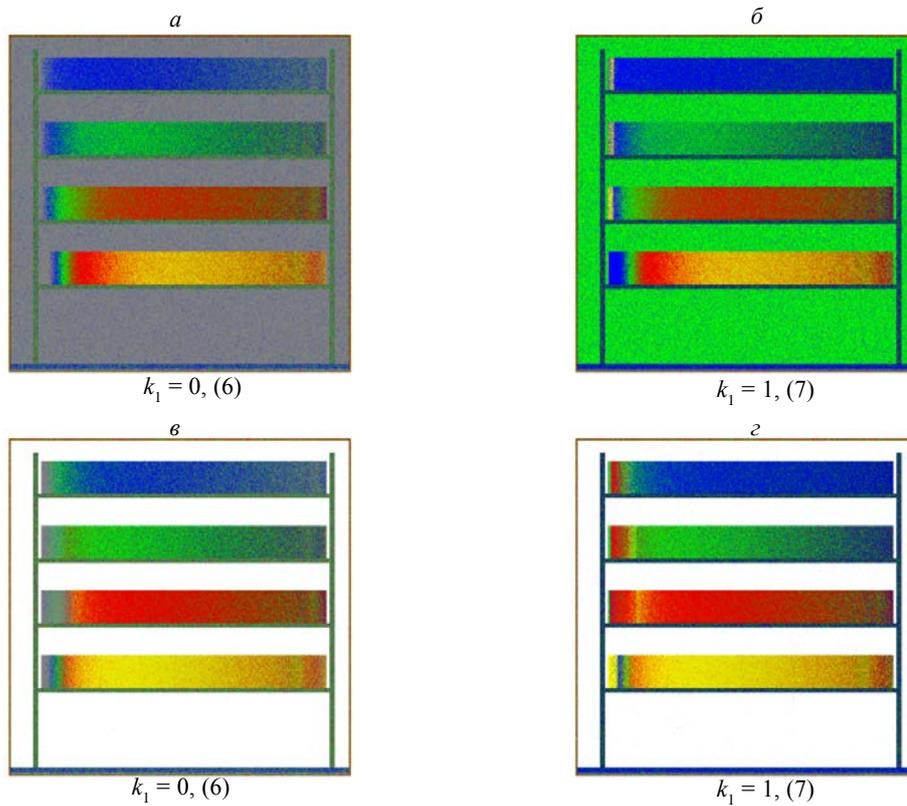


Рис. 1. Имитационные изображения ОК: без компенсации влияния стенок контейнера — *а, б*; с компенсацией — *в, г*. Параметры ИДК: $E_L = 4$ МэВ, $E_H = 7,5$ МэВ; $n_L : n_H = 1:1$; сцинтиллятор CdWO_4 , $h_{sc} = 35$ мм; $N_0 = 10^6$; $k = 16$; $k_0 = 1$; $h_f = 0$ мм.

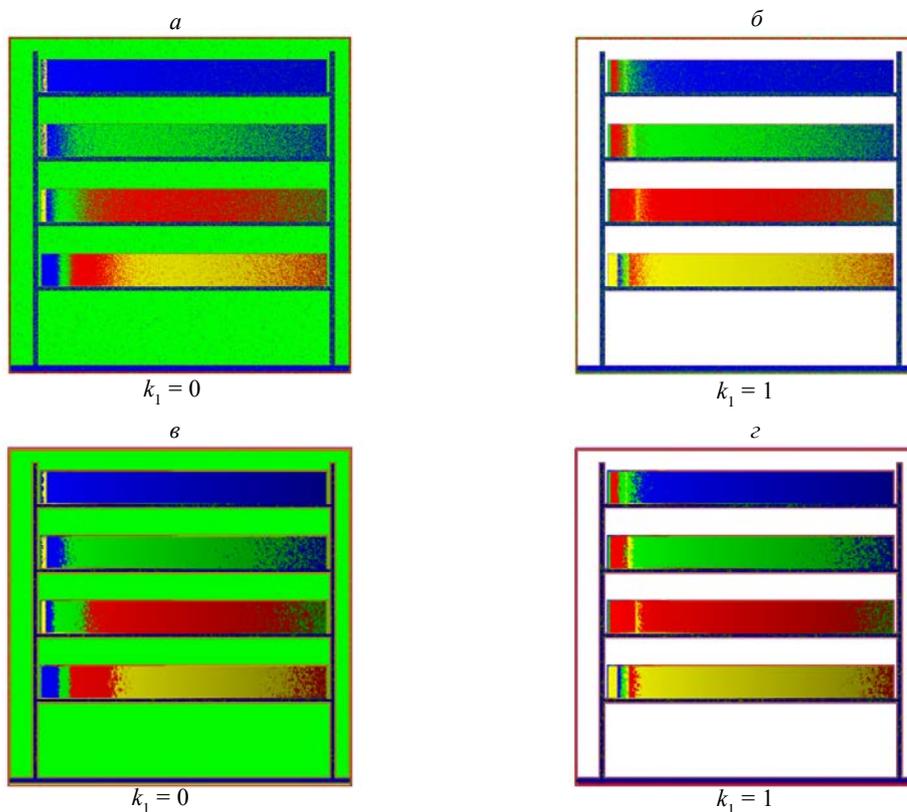


Рис. 2. Имитационные изображения ОК: без компенсации стенок контейнера — *а, в*; с компенсацией — *б, г*. Параметры ИДК: $E_L = 4$ МэВ, $E_H = 7,5$ МэВ; $n_L : n_H = 1:1$; сцинтиллятор CdWO_4 , $h_{sc} = 35$ мм; $N_0 = 10^6$; $k = 16$; *а, б* — $k_0 = 2$; *в, г* — $k_0 = 5$; $h_f = 0$ мм.

мер пикселя. Указанный факт обуславливает допустимость применения фильтрации промежуточных изображений методом скользящего среднего.

На рис. 2 приведены итоговые изображения ОК с компенсацией толщины стенок контейнера и без для фильтров с размерами окна $k_0 = 2$ и $k_0 = 5$.

Естественные ожидания уменьшения уровней шумов в изображениях подтвердились. Малые толщины конструктивных элементов стеллажа обуславливают некорректность распознавания его материала. Следует также отметить увеличивающуюся с ростом размера фильтра выраженность интервалов неопределенности.

3.3. Фильтрация тормозного излучения

В [9, 16] подчеркнуто, что предварительная фильтрация тормозного излучения приводит к его ужесточению, что позволяет распознавать материалы ОК и их фрагментов при меньшей их массовой толщине.

Было проведено имитационное моделирование для условий предыдущих расчетов с вариацией h_f . На рис. 3 приведены итоговые изображения ОК с компенсацией толщины стенок контейнера и без для свинцовых фильтров толщиной $h_f = 5$ мм; $h_f = 10$ мм.

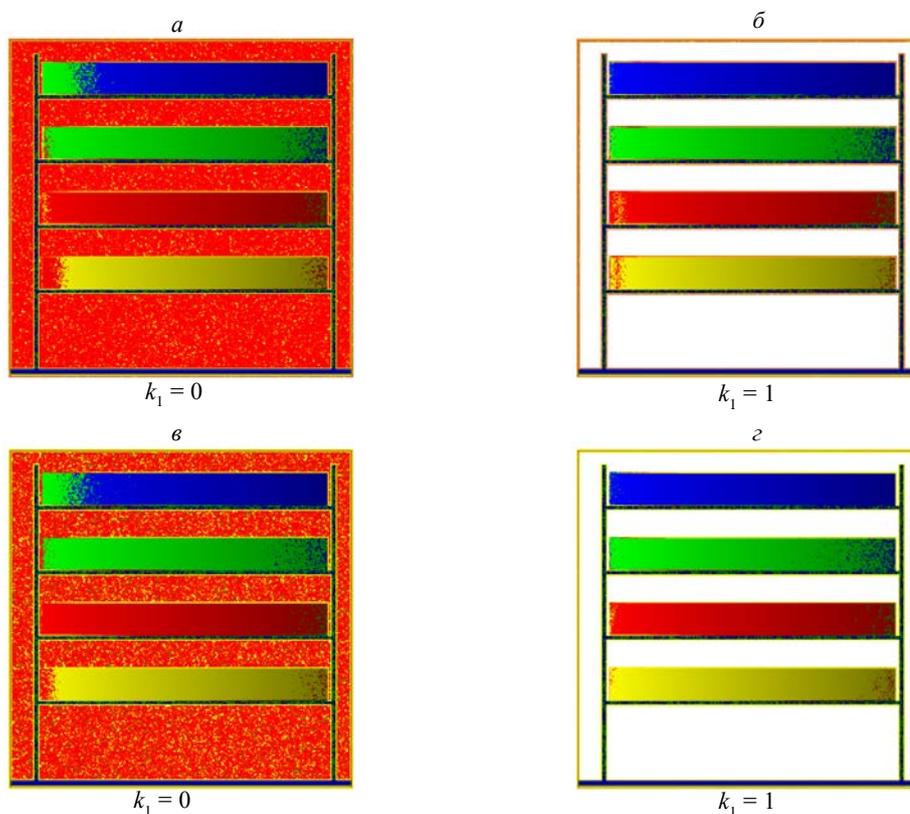


Рис. 3. Имитационные изображения ОК: без компенсации стенок контейнера — *а, в*; с компенсацией — *б, г*. Параметры ИДК: $E_L = 4$ МэВ, $E_H = 7,5$ МэВ; $n_L: n_H = 1:1$; сцинтиллятор CdWO_4 , $h_{sc} = 35$ мм; $N_0 = 10^6$; $k = 16$; $k_0 = 5$; *а, б* — $h_f = 5$ мм; *в, г* — $h_f = 10$ мм.

Анализ данных, приведенных на рис. 3, показывает эффективность применения предварительной фильтрации тормозного излучения в МДЭ. Материал стенок контейнера соотносится с классом сталей. Ожидаемое увеличение шумов на итоговых изображениях визуально незаметно. Применение фильтрации излучения приводит к уменьшению интервалов неопределенности и их сдвигу в сторону меньших толщин.

3.4. Повышение разрядности АЦП

В [16] отмечается необходимость достижения соответствия диапазонов изменения АС и ЦС. Использование АЦП с разрядностью $k = 16$ в ИДК на базе бетатрона МИБ-7,5 обеспечивает каче-

ственное распознавание материалов ОК с массовой толщиной до $\rho H = 80\text{—}90 \text{ г/см}^2$. Современные требования к массовой толщине ОК существенно выше.

С целью проверки эффективности повышения разрядности АЦП проведены численные эксперименты для АЦП с разрядностью $k = 20$ и $k = 24$.

На рис. 4 приведены итоговые изображения ОК с компенсацией толщины стенок контейнера и без для АЦП с разрядностью $k = 20$ и $k = 24$.

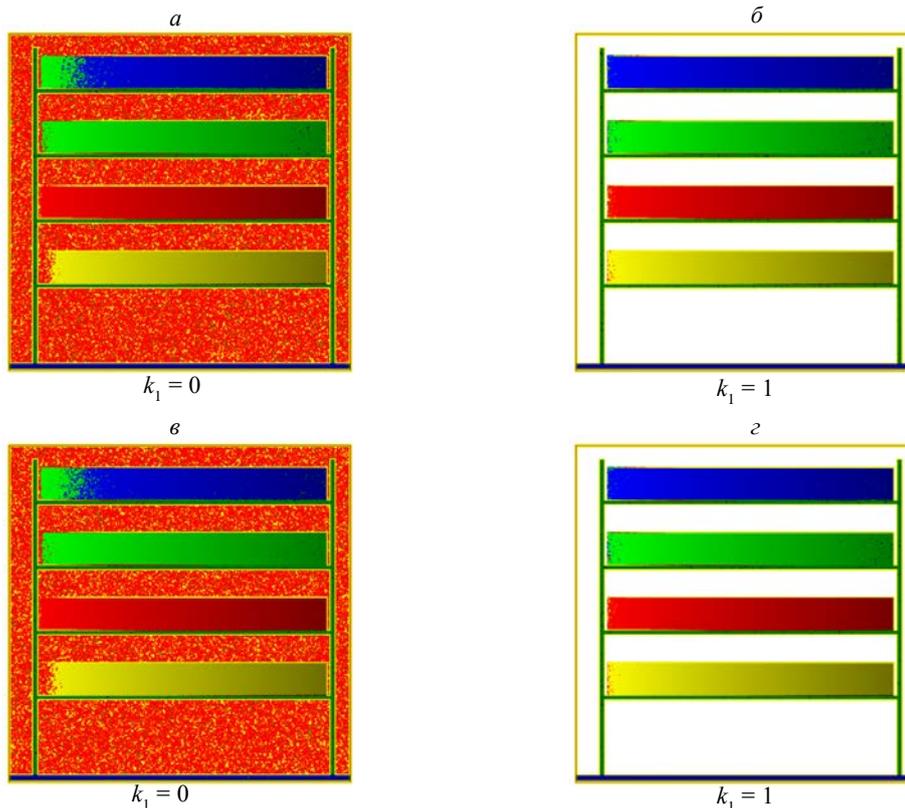


Рис. 4. Имитационные изображения ОК: без компенсации стенок контейнера — *a, в*; с компенсацией — *б, з*. Параметры ИДК: $E_L = 4 \text{ МэВ}$, $E_H = 7,5 \text{ МэВ}$; $n_L : n_H = 1:1$; сцинтиллятор CdWO_4 , $h_{sc} = 35 \text{ мм}$; $N_0 = 10^6$; $h_f = 10 \text{ мм}$; $k_0 = 5$; *a, б* — $k = 20$; *в, з* — $k = 24$.

Анализ данных, приведенных на рис. 4, демонстрирует эффективность увеличения разрядности АЦП до $k = 20$ применительно к задаче распознаванию материалов крупногабаритных фрагментов ОК (до 160 г/см^2). Дальнейшее увеличение разрядности АЦП целесообразно лишь в случае увеличения диапазона толщин ОК свыше 160 г/см^2 .

3.5. Согласование уровней аналоговых сигналов для энергий E_L и E_H

Проверим эффективность согласования уровней АС [16] для энергий E_L и E_H , достигаемого вариацией k_L и k_H , причем $k_L > k_H$. С точки зрения производительности контроля рационально фиксировать значение $k_H = 1$, а варьировать k_L .

На рис. 5 приведены результаты имитационного моделирования для условий предыдущего раздела и $k = 20$, $k_L : k_H = 2:1$, $k_L : k_H = 3:1$.

В результате сравнения данных, приведенных на рис. 4 и 5, можно сделать вывод о заметном снижении уровня шумов в итоговых изображениях МДЭ, обусловленным согласованием уровней АС для энергий E_L и E_H .

Вывод к разделу 3. Доказана эффективность метода компенсации влияния стенок контейнеров, основанного на предварительной информации о контейнере, на качество распознавания материалов внутренних фрагментов методом дуальных энергий.

Ниже рассмотрим возможность компенсации исследуемого фактора без наличия дополнительной информации о контейнере.

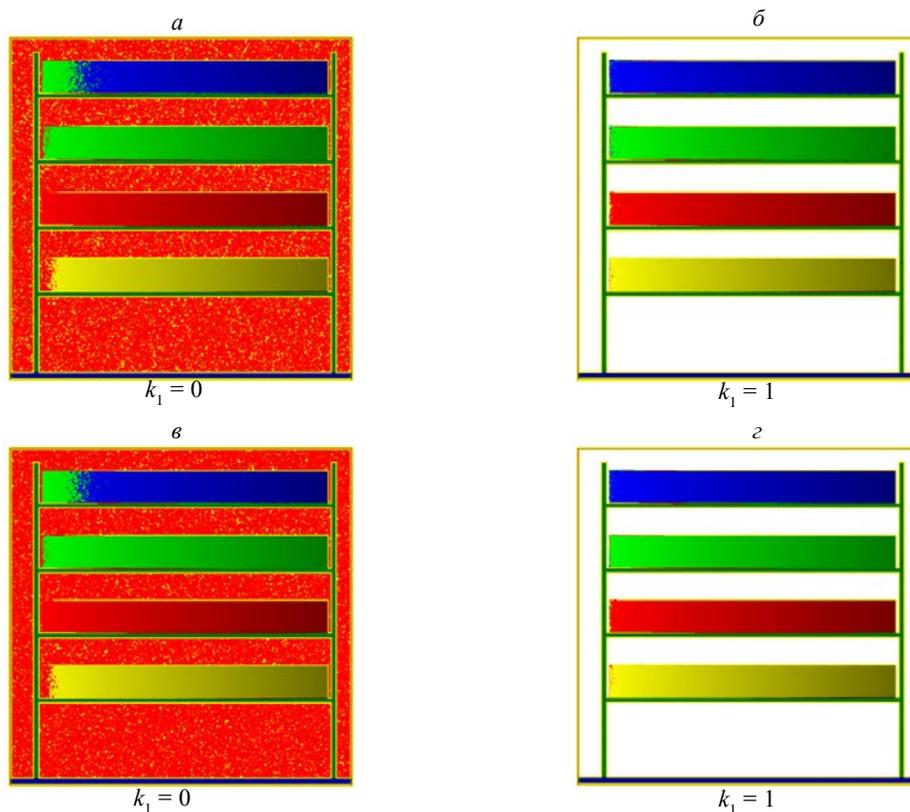


Рис. 5. Имитационные изображения ОК: без компенсации стенок контейнера — *a, в*; с компенсацией — *б, г*. Параметры ИДК: $E_L = 4$ МэВ, $E_H = 7,5$ МэВ; сцинтиллятор CdWO_4 , $h_{sc} = 35$ мм; $N_0 = 10^6$; $h_f = 10$ мм; $k_0 = 5$; $k = 20$; *a, б* — n_L ; $n_H = 2:1$; *в, г* — n_L ; $n_H = 3:1$.

4. КОМПЕНСАЦИЯ ВЛИЯНИЯ ТОЛЩИНЫ СТЕНКИ КОНТЕЙНЕРА НА КАЧЕСТВО РАСПОЗНАВАНИЯ БЕЗ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ КАЛИБРОВКИ

Алгоритм, предназначенный для компенсации влияния толщины стенки контейнера без предварительной калибровки, базируется на том, что контейнеры не имеют стопроцентного заполнения объема по высоте и по длине. Указанный факт связан с необходимостью обеспечения доступа к внутреннему содержанию контейнера и устойчивости соответствующего транспортного средства.

На первом этапе алгоритма по матрицам \mathbf{D}_L и \mathbf{D}_H строятся гистограммы $HI_L(K_L)$ и $HI_H(K_H)$, здесь $\min(\mathbf{D}_L) \leq K_L \leq \max(\mathbf{D}_L)$ и $\min(\mathbf{D}_H) \leq K_H \leq \max(\mathbf{D}_H)$. Дискретные функции $HI_L(K_L)$ и $HI_H(K_H)$ имеют несколько локальных максимумов. Применительно к анализируемой задаче для изображения \mathbf{D}_L представляет интерес два максимума функции $HI_L(K_L)$ — M_{L1} и M_{L2} , положения которых K_{L1} и K_{L2} близки к $\max(\mathbf{D}_L)$, а для изображения \mathbf{D}_H — два максимума функции $HI_H(K_H)$ — M_{H1} и M_{H2} , положения которых K_{H1} и K_{H2} близки к $\max(\mathbf{D}_H)$. Для определенности будем считать, что $K_{L1} < K_{L2}$ и $K_{H1} < K_{H2}$. Значения K_{L2} и K_{H2} соответствуют ослаблению воздухом, а K_{L1} и K_{H1} — ослаблению стенками контейнера. Коэффициенты K_{L2} , K_{H2} , K_{L1} , K_{H1} являются случайными величинами, характеристики которых зависят от массовой толщины стенок контейнера ρh_c , эффективного атомного номера его материала Z_c и от числа фотонов N_0 . Блок оценки функций $HI_L(K_L)$ и $HI_H(K_H)$ легко встраивается в общий алгоритм имитационного моделирования изображений МДЭ.

На основе рассмотренного выше алгоритма оценивались функции $HI_L(K_L)$ и $HI_H(K_H)$ для контейнера из стали с толщиной стенки $h_c = 1$ —3 мм. Число фотонов N_0 варьировалось в диапазоне от 2×10^4 до 2×10^5 . На рис. 6 приведены графики указанных зависимостей.

Из анализа рис. 6 можно сделать вывод, что визуальное разделение пиков тем заметнее, чем больше значения N_0 и h_c . Аналитическое разделение пиков основано на предположении о нормальности случайных величин в смеси. Каждая из исследуемых случайных величин полностью определяется двумя параметрами — средним значением и среднеквадратическим отклонением. Для энергий E_L и E_H исследуемыми случайными величинами являются $D_{L \text{ air}}$, $D_{L C}$ и $D_{H \text{ air}}$, $D_{H C}$ — значения ЦС для ослабления излучения воздухом (индекс — air) и стенками контейнера (индекс — C)

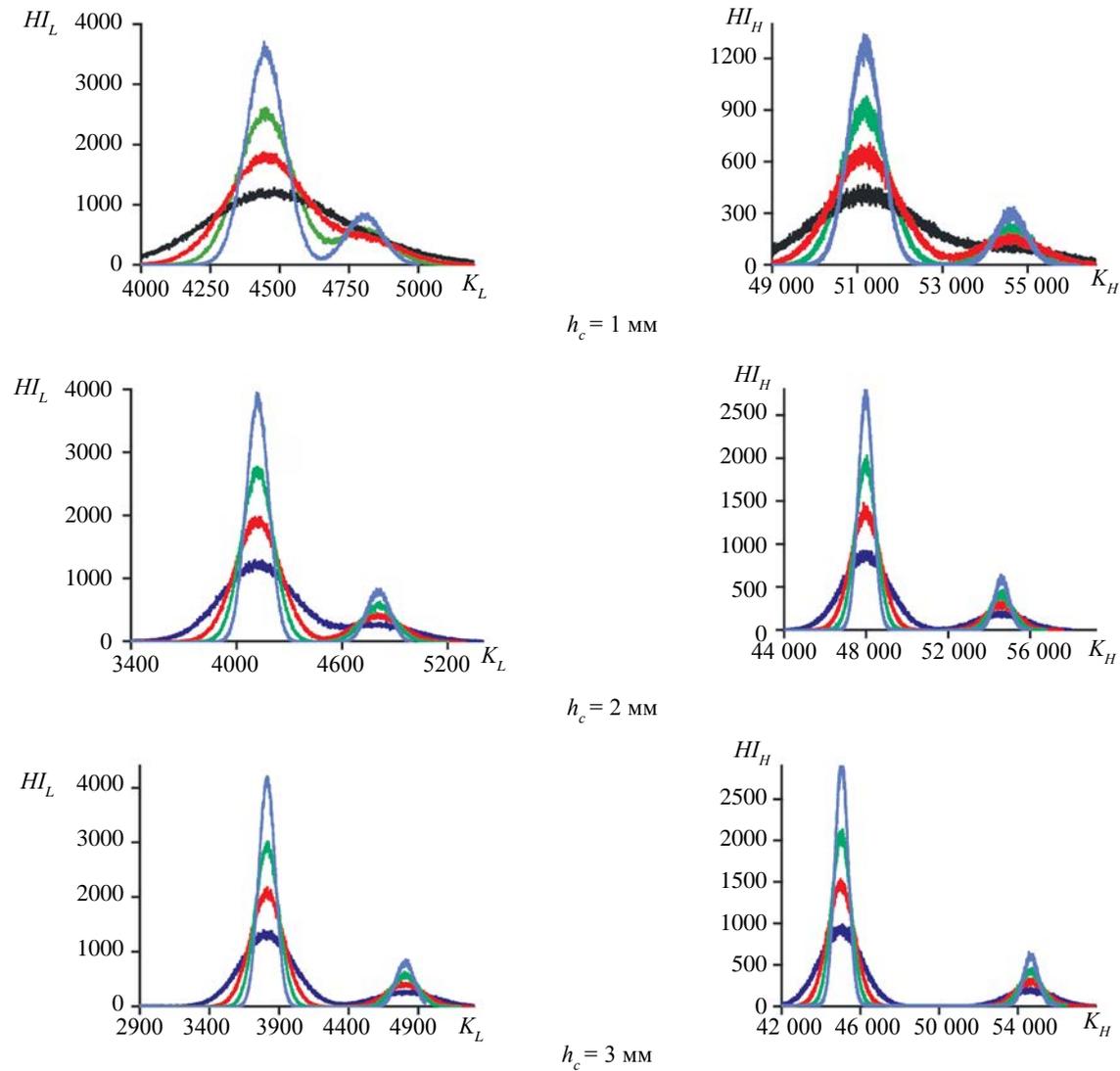


Рис. 6. Функции $H_L(K_L)$ и $H_H(K_H)$: — $N_0 = 2 \times 10^4$; — $N_0 = 5 \times 10^4$; — $N_0 = 10^5$; — $N_0 = 2 \times 10^5$.
 Параметры ИДК: $E_L = 4$ МэВ, $E_H = 7,5$ МэВ; сцинтиллятор CdWO_4 , $h_{sc} = 35$ мм; $h_f = 10$ мм; $k_0 = 5$; $k = 16$; $n_L; n_H = 1:1$.

соответственно. Средние значения и среднеквадратические отклонения для указанных случайных величин находятся методом наименьших квадратов. Применительно к рассматриваемой задаче представляют интерес $\overline{D_{L\text{air}}}$, $\overline{D_{LC}}$ и $\overline{D_{H\text{air}}}$, $\overline{D_{HC}}$. Выражения для оценки параметров dp_L , dp_H для корректировки толщины стенки контейнера по формуле (17) имеют вид

$$\overline{dp_L} = \ln \overline{D_{L\text{air}}} - \ln \overline{D_{LC}}, \quad \overline{dp_H} = \ln \overline{D_{H\text{air}}} - \ln \overline{D_{HC}}. \quad (19)$$

Значения параметров dp_L , dp_H и их оценки $\overline{dp_L}$, $\overline{dp_H}$, полученных методом имитационного моделирования, близки друг к другу. Расхождение для контейнеров с $h_{fc} \geq 2$ мм, не превосходит 1%. Это доказывает эффективность предлагаемого алгоритма.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА АЛГОРИТМА КОМПЕНСАЦИИ

Для проверки алгоритма компенсации на ИДК ТПУ [34] был проведен эксперимент, в котором ОК содержал фрагменты из алюминия, стали и плексигласа, расположенные за стальным листом толщиной 5 мм. Параметры ИДК: $E_L = 4$ МэВ, $E_H = 7,5$ МэВ; $h_f = 0$ мм; $k_0 = 1$; $k = 16$; $n_L; n_H = 3:1$.

На рис. 7 приведены изображения сканера с ОК для $E_L = 4$ МэВ и $E_H = 7,5$ МэВ, а также соответствующие гистограммы H_L и H_H для выделенных частей изображений.

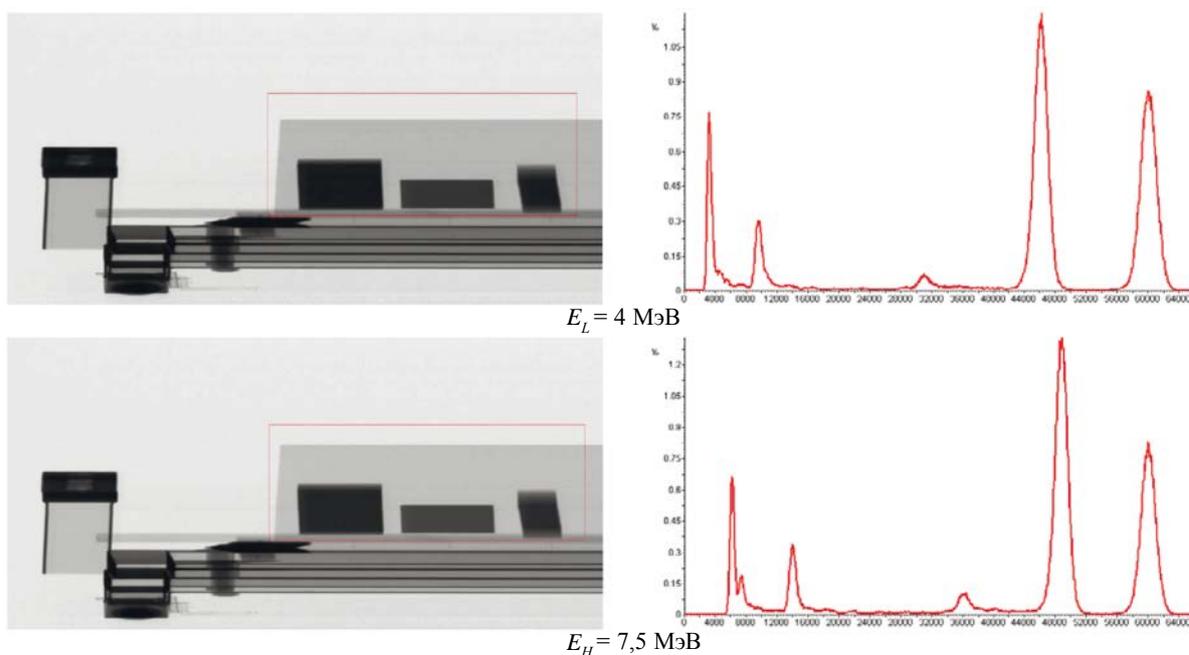


Рис. 7. Изображения сканера с ОК и гистограммы HI_L и HI_H для выделенных частей изображений.

Из анализа гистограмм, приведенных на рис. 7 можно сделать вывод о надежном различии пиков, соответствующих ослаблению воздухом и материалом имитатором стенки контейнера. Положение пиков определяется с высокой точностью, поэтому корректировочные коэффициенты dp_L , dp_H также оцениваются с высокой точностью.

На рис. 8 приведены полутоновые изображения ОК для энергий $E_L = 4$ МэВ, $E_H = 7,5$ МэВ и изображения ПР без компенсации и с компенсацией толщины преграды.

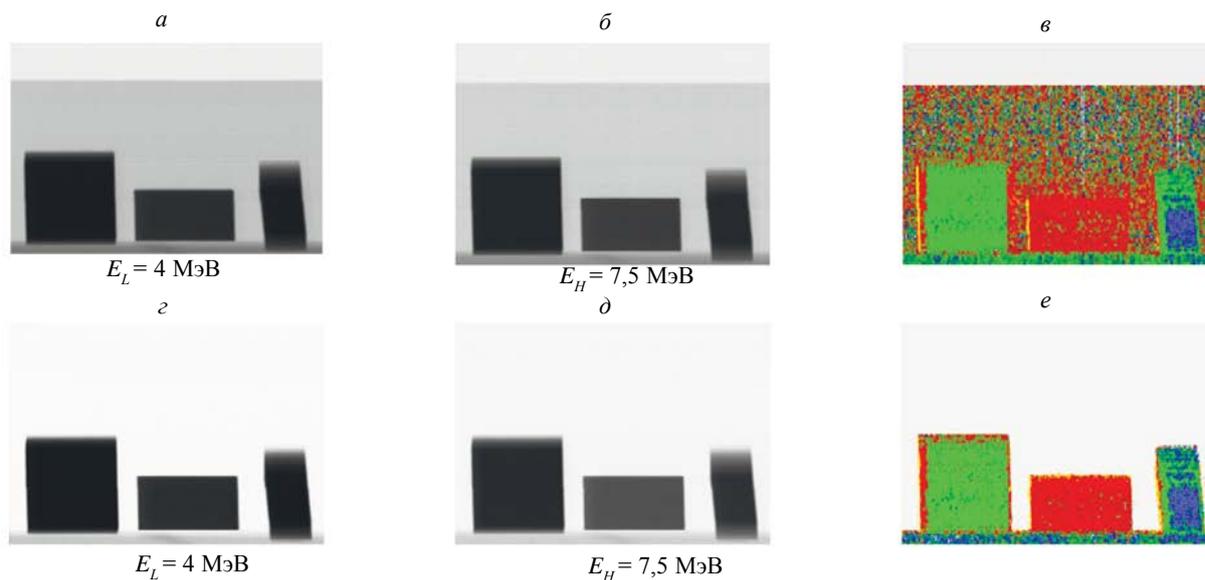


Рис. 8. Экспериментальные изображения ОК: без компенсации стенок контейнера — *а, б, в*; с компенсацией — *г, д, е*. Параметры ИДК: $h_f = 0$ мм; $k_0 = 1$; $k = 16$; $n_L:n_H = 3:1$.

Анализ результатов натурального эксперимента подтверждает эффективность алгоритма, предназначенного для компенсации влияния толщин стенок контейнеров на качество распознавания материалов внутренних фрагментов контейнера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана математическая и имитационные модели формирования изображений в системе, предназначенной для распознавания материалов внутренних фрагментов крупногабаритных оболочечных объектов методом дуальных энергий. Предложенные модели учитывают основные параметры источников и регистраторов тормозного излучения, применяемых в инспекционных досмотровых комплексах, параметры внешней оболочки и внутреннего состава объекта контроля, а также включают в себя алгоритмы компенсации влияния толщины оболочки на качество распознавания материалов внутренних фрагментов объекта. Проведена серия вычислительных экспериментов применительно к распознаванию материалов внутреннего состава транспортных контейнеров без компенсации и с компенсацией влияния толщины стенок контейнеров на качество распознавания. Варьировались следующие параметры: толщина предварительного фильтра; разрядность АЦП; соотношения количества импульсов низкой и высокой максимальных энергий тормозного излучения; размеры окна усредняющего фильтра. Разработан алгоритм для компенсации влияния толщины стенки контейнера на качество распознавания без предварительной калибровки, основанный на статистической обработке радиографических изображений объекта. Методами вычислительного и натурального моделирования доказана эффективность подходов к корректному распознаванию материалов внутренних фрагментов контейнеров.

Исследование проводилось в Томском политехническом университете в рамках гранта Программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета и при финансовой поддержке PowerScan Ltd Company (КНР).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ogorodnikov S., Petrunin V.* Processing of interlaced images in 4–10 MeV dual energy customs system for material recognition // *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*. 2002. V. 5. No. 10. No. article 104701.
2. *Wang X.W., Li J.M., Kang K.J., Tang C.X., Zhang L., Chen Z., Li Y.J., Z.H.* Material discrimination by high-energy X-ray dual-energy imaging // *High Energy Phys. Nucl. Phys.* 2007. V. 31. No. 11. P. 1076—1081.
3. *Osipov S.P., Chakhlov S.V., Osipov O.S., Shtein A.M., Strugovtsev D.V.* About accuracy of the discrimination parameter estimation for the dual high-energy method // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing. 2015. V. 81. No. 1. No. article 012082.
4. *Oh K., Kim J., Kim S., Chae M., Lee D., Cha H., Lee B.* Evaluation and optimization of an image acquisition system for dual-energy cargo inspections // *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2018. V. 65. No. 9. P. 2657—2661.
5. *Shikhaliyev P.M.* Megavoltage cargo radiography with dual energy material decomposition // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2018. V. 882. P. 158—168.
6. *Chen G., Bennett G., Perticone D.* Dual-energy X-ray radiography for automatic high-Z material detection // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2007. V. 261. No. 1—2. P. 356—359.
7. *Fu K., Ranta D., Guest C., Das. P.* The application of wavelet denoising in material discrimination system // *Image Processing: Machine Vision Applications III*. — International Society for Optics and Photonics, 2010. V. 7538. No. article 75380Z.
8. *Li L., Zhao T., Chen Z.* First dual MeV energy X-ray CT for container inspection: Design, Algorithm, and Preliminary Experimental Results // *IEEE Access*. 2018. V. 6. P. 45534—45542.
9. *Liu Y., Sowerby B.D., Tickner J.R.* Comparison of neutron and high-energy X-ray dual-beam radiography for air cargo inspection // *Applied Radiation and Isotopes*. 2008. V. 66. No. 4. P. 463—473.
10. *Novikov V.L., Ogorodnikov S.A., Petrunin V.I.* Dual energy method of material recognition in high energy introspection systems // *Questions of Atomic Science and Technology* [translated from Russian]. 1999. V. 4. No. 2. P. 93—95.
11. *Zhang G., Zhang L., Chen Z.* An HL curve method for material discrimination of dual energy X-ray inspection systems // *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*. 2005. — IEEE. 2005. V. 1. P. 326—328.
12. *Chen Z.Q., Zhao T., Li L.* A curve-based material recognition method in MeV dual-energy X-ray imaging system // *Nuclear Science and Techniques*. 2016. V. 27. No. 1. P. 1—8.
13. *Осипов С.П., Темник А.К., Чахлов С.В.* Влияние физических факторов на качество идентификации веществ объектов контроля высокоэнергетическим методом дуальных энергий // *Дефектоскопия*. 2014. № 8. С. 69—77.
14. *Rogers T.W., Jaccard N., Morton E.J., Griffin L.D.* Automated x-ray image analysis for cargo security: Critical review and future promise // *Journal of X-Ray Science and Technology*. 2017. V. 25. No. 1. P. 33—56.

15. *Kovalenko N.O., Naydenov S.V., Pritula I.M., Galkin S.N.* II sulfides and II selenides: growth, properties, and modern applications / *Single Crystals of Electronic Materials*. Woodhead Publishing, 2019. P. 303—330.

16. *Osipov S.P., Chakhlov S.V., Osipov O.S., Li S., Sun X., Zheng J., Hu X., Zhang G.* Physical and technical restrictions of materials recognition by the dual high energy X-ray imaging // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017. V. 12. No. 23. P. 13127—13136.

17. *Andrews J.T.A., Jaccard N., Rogers T.W., Griffin L.D.* Representation-learning for anomaly detection in complex x-ray cargo imagery // *Anomaly Detection and Imaging with X-Rays (ADIX) II*. — International Society for Optics and Photonics. 2017. V. 10187. No. article 101870E.

18. *Pashby J., Glenn S., Divin C., Martz H.* Radiation detection and dual-energy X-ray imaging for port security / Lawrence Livermore National Lab. (LLNL), Livermore, CA (United States), 2017. №. LLNL-TR-736549.

19. *Kolokytha S., Flisch A., Lüthi T., Plamondon M., Visser W., Schwaninger A., Hardmeier D., Costin M., Vienne C., Sukowski F., Hassler U., Dorion I., Gadi N., Maitrejean S., Marciano A., Canonica A., Rochat E., Koomen G., Slegt M.* Creating a reference database of cargo inspection X-ray images using high energy radiographs of cargo mock-ups // *Multimedia Tools and Applications*. 2018. V. 77. No. 8. P. 9379—9391.

20. *Storm L., Israel H.I.* Photon cross sections from 1 keV to 100 MeV for elements Z= 1 to Z= 100 // *Atomic Data and Nuclear Data Tables*. 1970. V. 7. No. 6. P. 565—681.

21. *Berger M.J., Hubbell J.H.* XCOM: Photon cross sections on a personal computer / National Bureau of Standards, Washington, DC (USA). Center for Radiation Research, 1987. №. NBSIR-87-3597.

22. X-ray mass attenuation coefficients. NIST Standard Reference Database 126. URL: <https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients>

23. *Udod V.A., Osipov S.P., Wang Y.* The mathematical model of image, generated by scanning digital radiography system // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing. 2017. V. 168. No. 1. No. article 012042.

24. *Aliiev F.K., Alimov G.R., Muminov A.T., Osmanov B.S., Skvortsov V.V.* Simulation of experiment on total external reflection of electron bremsstrahlung // *Technical Physics*. 2005. V. 50. No. 8. P. 1053—1057.

25. *Ali E.S.M., Rogers D.W.O.* Functional forms for photon spectra of clinical linacs // *Physics in Medicine and Biology*. 2011. V. 57. P. 31—50.

26. *Scharf W., Wieszczycka W.* Electron accelerators for industrial processing—a review // *AIP Conference Proceedings*. — AIP. 1999. V. 475. No. 1. P. 949—952.

27. *Stein M., Kasyanov V.A., Chakhlov V.L., Macleod J., Marjoribanks P., Hubbard S.* Small-size betatrons for radiographic inspection / 16th World Conference on NDT. 2004. URL: https://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/radiography/104_stein.pdf

28. *Kutsaev S., Agustsson R., Arodzero A., Boucher S., Hartzell J., Murokh A., O'Shea F., Smirnov A.Y.* Electron accelerators for novel cargo inspection methods // *Physics Procedia*. 2017. V. 90. P. 115—125.

29. *Mizusako F., Ogasawara K., Kondo K., Saito F., Tamura H.* Flash x-ray radiography using imaging plates for the observation of hypervelocity objects // *Review of Scientific Instruments*. 2005. V. 76. No. 2. No. article 025102.

30. *Bae U., Shamdasani V., Managuli R., Kim Y.* Fast adaptive unsharp masking with programmable mediaprocessors // *Journal of digital imaging*. 2003. V. 16. No. 2. P. 230—239.

31. *Sarangapani R., Jose M.T., Srinivasan T.K., Venkatraman B.* Determination of efficiency of an aged HPGe detector for gaseous sources by self absorption correction and point source methods // *Journal of Instrumentation*. 2017. V. 12. No. 7. No. article T07006.

32. *Gavrila C., Petrehus V., Gruia I.* Using Radon transform in image reconstruction // *Mathematical Modelling in Civil Engineering*. 2010. No. 3. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/10d8/2c9303cb06b800ae fdf6589bc568ff14e7ea.pdf>

33. *Chakhlov S.V., Kasyanov S.V., Kasyanov V.A., Osipov S.P., Stein M.M., Stein A.M., Xiaoming S.* Betatron application in mobile and relocatable inspection systems for freight transport control // *Journal of Physics: Conference Series*. — IOP Publishing. 2016. V. 671. No. 1. No. article 012024.

34. Scientific educational cargo vehicle inspection system. URL: <http://portal.tpu.ru/departments/laboratory/rknl/eng/products/iDK>