УДК 620.179.15

АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СЭНДВИЧ-ДЕТЕКТОРОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2023 г. В.А. Удод[1,*], С.П. Осипов[2,], С.Ю. Назаренко[2,***]**

[1]*Томский государственный университет, Россия 634050 Томск, пр. Ленина, 36*
[2]*Томский политехнический университет, Россия 634050 Томск, пр. Ленина, 30*
E-mail: [*]pr.udod@mail.ru; [**]osip1809@rambler.ru; [***]svetanaz@mail.ru

Поступила в редакцию 14.02.2023; после доработки 17.02.2023
Принята к публикации 17.02.2023

Приводится описание алгоритма оптимизации параметров сэндвич-детекторов рентгеновского излучения применительно к распознаванию материалов методом дуальных энергий. Применение алгоритма проиллюстрировано на конкретном примере, где были получены значения толщин первого детектора и промежуточного фильтра (входящих в состав сэндвич-детектора), которые для заданных материалов первого детектора (CsI) и промежуточного фильтра (Cu) являются оптимальными при распознавании взрывчатых веществ.

Ключевые слова: рентгеновское излучение, алгоритм, оптимизация, сэндвич-детектор, методы дуальных энергий, распознавание материалов, эффективный атомный номер.

DOI: 10.31857/S0130308223030041, **EDN:** OPADUK

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время досмотр багажа и ручной клади пассажиров, грузовых контейнеров и т.п., выполняемый на основе рентгеновского контроля, является неотъемлемым компонентом для большинства аэропортов, крупных железнодорожных станций и таможенных пунктов [1—8]. Среди различных типов систем, используемых для этой цели, наибольшее распространение в последние десятилетия получили сканирующие системы цифровой рентгенографии (ССЦР) [1, 2, 9—11].

Процесс функционирования ССЦР состоит в просвечивании объекта контроля (ОК) коллимированным потоком рентгеновского излучения веерообразной формы с последующей регистрацией излучения, прошедшего через ОК, коллимированным одномерным (линейным) матричным массивом детекторов [2, 9].

Для повышения эффективности досмотра современные рентгеновские инспекционные комплексы наделяются функцией распознавания материалов, позволяющей с определенной надежностью обнаруживать опасные либо запрещенные вложения в ОК (в частности взрывчатые и наркотические вещества и т.д.) [1, 2, 10, 11].

Следует заметить, что помимо досмотрового контроля распознавание материалов широко применяется и при проведении различных диагностических исследований с использованием рентгеновских компьютерных томографов [12—15].

Физико-математической основой распознавания материалов с применением рентгеновского излучения является метод дуальных энергий (МДЭ) [8, 16—18]. Согласно этому методу, распознавание материала осуществляется по его эффективному атомному номеру (ЭАН) [16—18]. Для определения (оценки) ЭАН формируется, а затем с помощью некоторого математического программного обеспечения решается система из двух уравнений, соответствующих двум различным максимальным (эффективным) энергиям просвечивающего излучения [3, 5, 16, 17]. При этом левые части уравнений применительно к досмотровым ССЦР представляют собой теоретические радиационные прозрачности ОК (толщины в длинах свободного пробега), аналитически выражаемые как функции от ЭАН и массовой толщины материала ОК, а правые части — экспериментальные радиационные прозрачности ОК (толщины в длинах свободного пробега), полученные (в реальном физическом эксперименте) при тех же максимальных (эффективных) энергиях [9, 17, 19].

Различные схемы реализации МДЭ описаны в [9, 10, 14, 17, 19] и согласно одной из них, чаще всего применяемой при досмотре багажа и ручной клади пассажиров, ОК сканируется однократно, а прошедшее через него излучение регистрируется одномерным матричным массивом (линейкой) из сэндвич-детекторов, каждый из которых имеет следующую структуру по ходу пучка рентгеновского излучения: первый (передний) детектор — промежуточный фильтр — второй (задний) детектор [10, 20, 21]. Промежуточный фильтр обычно представляет собой пластинку из меди [10].

В [22] был разработан алгоритм оценки погрешностей ЭАН при распознавании материалов в системе рентгеновского контроля, содержащей сэндвич-детекторы излучения. В настоящей статье, на основе отмеченного алгоритма, предлагается новый алгоритм, предназначенный для оптимизации параметров сэндвич-детектора излучения, а именно — оптимизации ЭАН и толщины первого детектора и толщины промежуточного фильтра. Критерием оптимальности является минимум погрешности оценки ЭАН методом дуальных энергий, порождаемой квантовой природой рентгеновского излучения.

АЛГОРИТМ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СЭНДВИЧ-ДЕТЕКТОРОВ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА ПОГРЕШНОСТИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОГО АТОМНОГО НОМЕРА МЕТОДОМ ДУАЛЬНЫХ ЭНЕРГИЙ

Сэндвич-детектор состоит из радиационно-чувствительных элементов (РЧЭ) первого и второго детекторов и промежуточного фильтра. Пусть индекс 1 ассоциируется с РЧЭ первого детектора, 2 — с РЧЭ второго детектора, а f — промежуточного фильтра. При описании ОК индекс отсутствует. Каждый из структурных элементов сэндвич-детектора и объект контроля характеризуется ЭАН материала Z и массовой толщиной ρH. Под массовой толщиной ρH объекта или РЧЭ понимается произведение плотности ρ соответствующего материала на его толщину H.

Для формализации записи и облегчения перевода в программный код все варьируемые параметры алгоритма могут быть сведены в матрицу параметров **P**:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} Z_1 & Z_f & Z_2 \\ \rho_1 H_1 & \rho_f H_f & \rho_2 H_2 \end{pmatrix}.$$

Алгоритм оптимизации можно представить в виде совокупности нескольких этапов.

Этап 1. Назначается максимальная энергия E_0 рентгеновского излучения.

Этап 2. Определяется числовой энергетический спектр $g(E, E_0)$ источника рентгеновского излучения.

Этап 3. Задается матрица параметров сэндвич-детектора **P**.

Этап 4. Указывается диапазон изменения ЭАН Z материалов ОК, $Z_{\min} \le Z \le Z_{\max}$, подлежащих распознаванию методом дуальных энергий.

Этап 5. Устанавливаются нижняя $d_{\min}$ и верхняя $d_{\max}$ границы радиационной прозрачности ОК.

Этап 6. Строится множество допустимых значений параметров ОК $\mathbf{D}(\mathbf{P}) \subset \Re^2$ с учетом ограничений 4 и 5 этапов:

$$\mathbf{D}(\mathbf{P}) = \left\{ (Z, \rho H) \middle| Z_{\min} \le Z \le Z_{\max}, d_{\min} \le d_{t1}(Z, \rho H, \mathbf{P}^{\langle 1 \rangle}) < d_{t2}(Z, \rho H, \mathbf{P}) \le d_{\max} \right\},$$

здесь $\mathbf{P}^{\langle 1 \rangle}$ — первый столбец матрицы **P**; $d_{t1}(Z, \rho H, \mathbf{P}^{\langle 1 \rangle})$, $d_{t2}(Z, \rho H, \mathbf{P})$ — теоретические значения радиационных прозрачностей ОК, соответствующие первому и второму детекторам сэндвича и вычисляемые по формулам, аналогичным приведенным в [23]:

$$d_{t1}(Z, \rho H, \mathbf{P}^{\langle 1 \rangle}) = \frac{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-m(E, Z)\rho H) \overline{E}_{ab1}(E) \varepsilon_1 \left(E, \mathbf{P}^{\langle 1 \rangle} \right) dE}{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \overline{E}_{ab1}(E) \varepsilon_1 \left(E, \mathbf{P}^{\langle 1 \rangle} \right) dE};$$

$$d_{t2}(Z, \rho H, \mathbf{P}) = \frac{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp\left(-m(E, Z)\rho H - \sum_{i=1}^{2} m(E, P_{1i}) P_{2i} \right) \overline{E}_{ab2}(E) \varepsilon_2 \left(E, \mathbf{P}^{\langle 3 \rangle} \right) dE}{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp\left(-\sum_{i=1}^{2} m(E, P_{1i}) P_{2i} \right) \overline{E}_{ab2}(E) \varepsilon_2 \left(E, \mathbf{P}^{\langle 3 \rangle} \right) dE},$$

где $m(E, Z)$, $m(E, P_{11})$, $m(E, P_{12})$ — массовые коэффициенты ослабления (МКО) фотонов с энергией E для материалов ОК, РЧЭ первого детектора и промежуточного фильтра соответственно, см^2/г; $\overline{E}_{ab1}(E)$, $\overline{E}_{ab2}(E)$ — средние значения поглощенной энергии зарегистрированного фотона с энергией E для РЧЭ первого и второго детекторов соответственно, МэВ;

$\varepsilon_1\left(E,\mathbf{P}^{\langle 1\rangle}\right)=1-\exp(-m(E,P_{11})P_{21})$, $\varepsilon_2\left(E,\mathbf{P}^{\langle 3\rangle}\right)=1-\exp(-m(E,P_{13})P_{23})$ — эффективности регистрации квантов излучения с энергией E для РЧЭ первого и второго детекторов; $\mathbf{P}^{\langle 3\rangle}$ — третий столбец матрицы $\mathbf{P}$.

Из описания множества $\mathbf{D}(\mathbf{P})$ следует, что уравнения:

$$d_{t1}(Z,(\rho H)_{\max}(Z),\mathbf{P}^{\langle 1\rangle})=d_{\min},\ d_{t2}(Z,(\rho H)_{\min}(Z),\mathbf{P})=d_{\max}$$

для фиксированного значения Z определяют для заданной матрицы параметров $\mathbf{P}$ минимальное $(\rho H)_{\min}(Z)$ и максимальное $(\rho H)_{\max}(Z)$ допустимые значения массовых толщины ОК.

Этап 7. Проводится повторение этапов 3—6 для фиксированных материалов РЧЭ первого и второго детекторов (т.е. значение ЭАН Z_1 и Z_2 считаются фиксированными) и разных, но заранее определенных, комбинаций значений параметров $\rho_1 H_1$, $\rho_2 H_2$ и $\rho_f H_f$ (массовых толщин РЧЭ первого и второго детекторов, а также промежуточного фильтра).

В результате выполнения данного этапа будет сформирована совокупность множеств допустимых решений $\mathbf{D}(\mathbf{P})$, соответствующих фиксированным значениям ЭАН Z_1, Z_2 и различным комбинациям значений параметров $\rho_1 H_1$, $\rho_2 H_2$, $\rho_f H_f$.

Этап 8. «Минимальное множество допустимых решений» $\mathbf{D}_0(Z_1, Z_2)$ находится для фиксированных значений параметров Z_1, Z_2 и представляет собой пересечение совокупности множеств $\mathbf{D}(\mathbf{P})$, полученных на этапе 7, т.е.

$$\mathbf{D}_0(Z_1,Z_2)=\bigcap_{\mathbf{P}} D(\mathbf{P}).$$

Этап 9. Задается множество тестовых ОК $\mathbf{D}_t(Z_1, Z_2)$ для фиксированных значений параметров Z_1, Z_2 как некоторое подмножество минимального множества допустимых решений $\mathbf{D}_0(Z_1, Z_2)$, т.е. определяется множество пар $(Z_t, (\rho H)_t)$ из $\mathbf{D}_0(Z_1, Z_2)$, где Z_t и $(\rho H)_t$ — соответственно ЭАН материала тестового ОК и его массовая толщина.

Заметим, что задание множества тестовых ОК описанным способом гарантирует принадлежность всех тестовых ОК каждому из множеств допустимых решений $\mathbf{D}(\mathbf{P})$, соответствующих различным, но заранее определенным комбинациям значений параметров $\rho_1 H_1$, $\rho_2 H_2$, $\rho_f H_f$.

Этап 10. Для фиксированной тройки значений параметров $\rho_1 H_1$, $\rho_2 H_2$, $\rho_f H_f$ для каждого тестового ОК вычисляются радиационные прозрачности $d_{t1}(Z_t,(\rho H)_t,\mathbf{P}^{\langle 1\rangle})$ и $d_{t2}(Z_t,(\rho H)_t,\mathbf{P})$.

Этап 11. Задается значение параметра

$$\sigma_0=\sqrt{\int_0^{E_0} g(E,E_0)E^2dE}\Bigg/\sqrt{C_{id}}\int_0^{E_0} g(E,E_0)EdE,$$

здесь C_{id} — обобщенный параметр, характеризующий источник и сэндвич-детектор излучения [16].

Параметр σ_0, согласно [23, 24], представляет собой относительное среднеквадратическое отклонение (СКО) заряда (энергии), регистрируемого идеальным детектором за фиксированный промежуток времени T при отсутствии ОК. Идеальный детектор является гипотетическим детектором полного поглощения, причем его поперечные размеры и местоположение идентичны первому детектору.

Выражение для оценки параметра σ_0 может быть представлено в соответствии с [24] в следующей эквивалентной форме:

$$\sigma_0=\frac{\eta}{\sqrt{N_q}},$$

где

$$\eta=\frac{\sqrt{\overline{E^2}}}{\overline{E}}=\sqrt{\frac{\int_0^{E_0} g(E,E_0)E^2dE}{\int_0^{E_0} g(E,E_0)dE}}\Bigg/\frac{\int_0^{E_0} g(E,E_0)EdE}{\int_0^{E_0} g(E,E_0)dE}$$

— коэффициент амплитудного разброса поглощенной энергии регистрируемых фотонов для идеального детектора рентгеновского излучения;

$$N_q = C_{id} \int_0^{E_0} g(E, E_0) dE$$

— среднее число фотонов, регистрируемых идеальным детектором за время T при отсутствии ОК.

Этап 12. Вычисляется значение СКО $\sigma(\Phi_1, \mathbf{P}^{\langle 1 \rangle})$ шума Φ_1, соответствующего теоретической прозрачности $d_{t1}(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P}^{\langle 1 \rangle})$ тестового ОК для РЧЭ первого детектора, основываясь на формулах из [23]:

$$\sigma\left(\Phi_1, \mathbf{P}^{\langle 1 \rangle}\right) = \frac{\sigma\left(\Phi_1, \mathbf{P}^{\langle 1 \rangle}\right)}{\sigma_0} \sigma_0 =$$

$$= \frac{\sqrt{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp(-m(E, Z_t)(\rho H)_t) \overline{E^2_{ab1}}(E) \varepsilon_1\left(E, \mathbf{P}^{\langle 1 \rangle}\right) \mathrm{d}E \cdot \int_0^{E_0} g(E, E_0) E dE}}{\sqrt{\int_0^{E_0} g(E, E_0) E^2 dE} \cdot \int_0^{E_0} g(E, E_0) \overline{E}_{ab1}(E) \varepsilon_1\left(E, \mathbf{P}^{\langle 1 \rangle}\right) dE} \sigma_0.$$

Этап 13. Определяется значение СКО $\sigma(\Phi_2, \mathbf{P})$ шума Φ_2, соответствующего теоретической прозрачности $d_{t2}\left(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P}\right)$ тестового ОК для второго детектора, также основываясь на формулах из [23]:

$$\sigma\left(\Phi_2, \mathbf{P}\right) = \frac{\sigma\left(\Phi_2, \mathbf{P}\right)}{\sigma_0} \sigma_0 =$$

$$= \frac{\sqrt{\int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp\left(-m(E, Z_t)(\rho H)_t - \sum_{i=1}^{2} m(E, P_{1i}) P_{2i}\right) \overline{E^2_{ab2}}(E) \varepsilon_2\left(E, P^{\langle 3 \rangle}\right) \mathrm{d}E \cdot \int_0^{E_0} g(E, E_0) E dE}}{\sqrt{\int_0^{E_0} g(E, E_0) E^2 dE} \cdot \int_0^{E_0} g(E, E_0) \exp\left(-\sum_{i=1}^{2} m(E, P_{1i}) P_{2i}\right) \overline{E}_{ab2}(E) \varepsilon_2\left(E, P^{\langle 3 \rangle}\right) dE} \cdot \sigma_0.$$

Этап 14. Осуществляется розыгрыш случайных величин — шумов Φ_1 и Φ_2 в предположении их независимости, нормальности распределения, равенства нулю их математических ожиданий и равенства их СКО значениям $\sigma(\Phi_1, \mathbf{P}^{\langle 1 \rangle})$ и $\sigma(\Phi, \mathbf{P})$ соответственно.

Этап 15. Находятся экспериментальные (фактические) уровни радиационных прозрачностей тестового ОК для детекторов сэндвича:

$$d_1\left(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P}^{\langle 1 \rangle}\right) = d_{t1}\left(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P}^{\langle 1 \rangle}\right) + \Phi_1;$$

$$d_2(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P}) = d_{t2}(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P}) + \Phi_2.$$

Этап 16. Оцениваются параметры Z_t и $(\rho H)_t$ путем решения относительно $(Z, \rho H) \in \mathbf{D}_0(Z_1, Z_2)$ системы уравнений вида:

$$\begin{cases} d_{t1}(Z, \rho H, \mathbf{P}^{\langle 1 \rangle}) = d_1\left(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P}^{\langle 1 \rangle}\right), \\ d_{t2}\left(Z, \rho H, \mathbf{P}\right) = d_2\left(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P}\right). \end{cases}$$

Этап 17. Проводится n-кратное повторение этапов 14 — 16 для неизменных значений СКО $\sigma\left(\Phi_1, \mathbf{P}^{\langle 1 \rangle}\right)$ и $\sigma(\Phi_2, \mathbf{P})$. В итоге для каждого тестового ОК получается множество $\mathbf{Res} = \{(Z_i, (\rho H)_i) \mid i = 1, 2, \ldots, n\}$, состоящее из n оценок параметров Z_t и $(\rho H)_t$.

Этап 18. Для каждого отдельного тестового ОК на основе множества оценок **Res**, полученного для него на этапе 17, находят среднее значения Z_m, СКО m_z и относительные среднеквадратические погрешности δ_Z оценки параметра Z_t:

$$Z_m = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Z_i,\ m_Z = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Z_i - Z_t)^2},\ \delta_Z = \frac{m_Z}{Z_t}\cdot 100\,\%.$$

Этап 19. Этапы 10—18 повторяются для всевозможных (заранее определенных) комбинаций значений параметров $\rho_1 H_1$, $\rho_2 H_2$ и $\rho_f H_f$.

В результате выполнения данного этапа формируются «таблицы погрешностей» оценок ЭАН тестовых ОК. Число таких таблиц равно числу рассмотренных комбинаций анализируемых параметров.

Этап 20. Находится оптимальная комбинация $((\rho_1 H_1)_{\text{opt}}(Z_1,\ Z_2),\ (\rho_f H_f)_{\text{opt}}(Z_1,\ Z_2),$ $(\rho_2 H_2)_{\text{opt}}(Z_1,\ Z_2))$ значений параметров $\rho_1 H_1$, $\rho_2 H_2$ и $\rho_f H_f$ на основе анализа всей совокупности «таблиц погрешностей», полученных на этапе 19. При этом в качестве оптимальной может считаться та комбинация, для которой максимальная погрешность оценки атомного номера является минимальной (либо максимальная относительная погрешность оценки атомного номера является минимальной), т.е. оптимальность подразумевается по критерию минимакса (наилучшим образом для наихудшего случая).

Этап 21. Этапы 3—20 повторяются для разных (заранее определенных) значений параметров Z_1, Z_2.

В результате выполнения данного этапа формируется множество **D**, состоящее из элементов вида $(Z_1, Z_2, (\rho_1 H_1)_{\text{opt}}(Z_1, Z_2), (\rho_f H_f)_{\text{opt}}(Z_1, Z_2), (\rho_2 H_2)_{\text{opt}}(Z_1, Z_2))$.

Этап 22. Находится оптимальная комбинация $(Z_{1\text{opt}}, Z_{2\text{opt}}, (\rho_1 H_1)_{\text{opt}}(Z_{1\text{opt}}, Z_{2\text{opt}}),$ $(\rho_f H_f)_{\text{opt}}(Z_{1\text{opt}}, Z_{2\text{opt}}), (\rho_2 H_2)_{\text{opt}}(Z_{1\text{opt}}, Z_{2\text{opt}}))$ матрицы параметров **P**, т.е. находится оптимальный элемент множества **D** на основе анализа «таблиц погрешностей», соответствующих различным элементам данного множества.

Очевидно, что в случае оптимизации параметров $\rho_1 H_1$, $\rho_2 H_2$ и $\rho_f H_f$ (или H_1, H_2 и H_f) для заданных значений параметров Z_1, Z_2 следует ограничиться этапами 1—20 вышеописанного алгоритма.

Заметим также, что и другие варианты оптимизационных задач (задано Z_1 и $\rho_1 H_1$, а оптимизировать $\rho_f H_f$, либо задано Z_1 и $\rho_f H_f$, а оптимизировать $\rho_1 H_1$ и т.д.) могут быть также решены на основе предлагаемого алгоритма.

Приведем теперь конкретный пример использования данного алгоритма.

ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛГОРИТМА

Этап 1. Пусть $E_0 = 160$ кэВ.

Этап 2. По аналогии с [22] примем, что

$$g(E, E_0) = C\frac{E_0 - E}{E}\exp\left(-m(E, Z_g)(\rho H)_g\right),$$

здесь C — некоторый постоянный множитель; $m(E,\ Z_g)$ — МКО излучения материалом выходного окна рентгеновской трубки (силикатным стеклом SiO_2 толщиной 1,5 мм) с массовой толщиной $(\rho H)_g$.

Этап 3. Предположим, учитывая результаты работ [22, 25], что первый (передний) детектор изготовлен из CsI (при этом основной процесс взаимодействия с излучением — фотоэффект), промежуточный фильтр представляет собой медную пластину, а второй (задний) детектор является детектором полного поглощения. Исходя из этого, при проведении моделирования будем полагать:

$$\overline{E}_{ab1}(E)\big/E = \overline{E^2_{ab1}}(E)\big/E^2 = 1;\ \varepsilon_2(E) = \overline{E}_{ab2}(E)\big/E = \overline{E^2_{ab2}}(E)\big/E^2 = 1.$$

Предположим также, что толщина H_1 РЧЭ первого детектора и толщина H_f промежуточного фильтра могут изменяться следующим образом:

$$H_1 = 0{,}1;\ 0{,}2;\ 0{,}3;\ 0{,}4;\ 0{,}5\ \text{мм};\ H_f = 0{,}3;\ 0{,}5;\ 0{,}7;\ 0{,}9;\ 1{,}1\ \text{мм}.$$

Соответственно при этом:

$$\rho_1 H_1 = 0{,}0451;\ 0{,}09;\ 0{,}135;\ 1{,}8;\ 0{,}226\ \text{г/см}^2;\ \rho_f H_f = 0{,}27;\ 0{,}45;\ 0{,}63;\ 0{,}81;\ 0{,}99\ \text{г/см}^2.$$

Таким образом, всего имеем 25 различных комбинаций (пар) значений параметров H_1 и H_f (или, что равносильно, 25 пар значений параметров $\rho_1 H_1$ и $\rho_f H_f$).

Этап 4. Положим: $Z_{\min} = 3$ (Li), $Z_{\max} = 30$ (Zn).

Этап 5. Положим, по аналогии с [15]:

$$d_{\min} = 1/2^{16} \approx 1{,}526 \cdot 10^{-5}; \quad d_{\max} = d_{t2}(Z_{\mathrm{Fe}}, (\rho H_{\min})_{\mathrm{Fe}}) = d_{t2}(26; 0{,}063),$$

где 2^{16} — число уровней квантования аналого-цифровых преобразователей, имеющих разрядность $m = 16$; $Z_{\mathrm{Fe}} = 26$ — атомный номер железа; $(\rho H_{\min})_{\mathrm{Fe}} = 0{,}063$ г/см^2 — минимальная массовая толщина стальной проволочки, которую обнаруживает комплекс досмотрового рентгеновского контроля, описанный в [26].

В табл. 1 представлены результаты вычислений прозрачностей $d_{\max}$ для всех 25 различных комбинаций значений параметров H_1 и H_f, описанных на этапе 3.

Таблица 1

Максимальные теоретические прозрачности для второго (заднего) детектора для различных комбинаций значений параметров H_1 и H_f

H_f, мм	H_1, мм				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,3	0,95155	0,95874	0,96354	0,96689	0,96929
0,5	0,95909	0,9638	0,96697	0,9693	0,97104
0,7	0,96323	0,96655	0,96894	0,97075	0,97218
0,9	0,96597	0,96848	0,97038	0,97187	0,97307
1,1	0,96798	0,96997	0,97153	0,97278	0,97383

Этапы 6, 7. Строим множества допустимых решений для всех выбранных (на этапе 3) 25 комбинаций значений параметров H_1 и H_f.

На рис. 1 (для наглядности) изображены границы данных множеств при $H_1 = 0{,}1$ мм. Заметим при этом, что $(\rho H)_{\max}(Z)$ зависит только от $\rho_1 H_1$, т.к. теоретическая прозрачность для первого детектора не зависит от промежуточного фильтра.

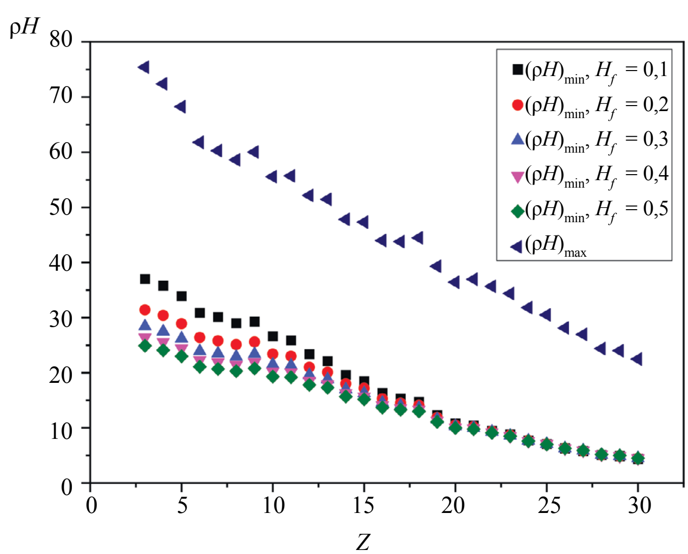

Рис. 1. Зависимости минимального $(\rho H)_{\min}$ и максимального $(\rho H)_{\max}$ значений массовой толщины ОК от эффективного атомного номера Z при $H_1 = 0{,}1$ мм для разных значений параметра H_f.

Таблица 2

Нижняя $(\rho H)_{-}(Z)$ и верхняя $(\rho H)_{+}(Z)$ границы «минимального множества допустимых решений» $\mathbf{D}_0(Z_1)$ для целочисленных значений Z

Z	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$(\rho H)_{-}(Z)$, г/см^2	0,37	0,358	0,339	0,309	0,301	0,29	0,293	0,266	0,259
$(\rho H)_{+}(Z)$, г/см^2	75,401	72,387	68,243	61,774	60,25	58,589	60,013	55,561	55,696
Z	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$(\rho H)_{-}(Z)$, г/см^2	0,234	0,221	0,196	0,185	0,163	0,153	0,147	0,123	0,108
$(\rho H)_{+}(Z)$, г/см^2	52,146	51,464	47,808	47,296	43,979	43,765	44,463	39,302	36,419
Z	21	22	23	24	25	26	27	28	29
$(\rho H)_{-}(Z)$, г/см^2	0,104	0,095	0,088	0,077	0,071	0,063	0,059	0,052	0,05
$(\rho H)_{+}(Z)$, г/см^2	36,957	35,673	34,364	31,807	30,483	28,116	26,945	24,388	24,009

Этап 8. Находим верхнюю $(\rho H)_{+}(Z)$ и нижнюю $(\rho H)_{-}(Z)$ границы «минимального множества допустимых решений» $\mathbf{D}_0(Z_1)$ для целочисленных значений Z (табл. 2), учитывая, что $3 \le Z \le 30$:

$$(\rho H)_{+}(Z) = \min_{H_1}\left\{(\rho H)_{\max}(Z) \middle| H_1 = 0{,}1;\ 0{,}2;\ 0{,}3;\ 0{,}4;\ 0{,}5\,\text{мм}\right\};$$

$$(\rho H)_{-}(Z) = \max_{H_1,H_f}\left\{(\rho H)_{\min}(Z) \middle| H_1 = 0{,}1;\ 0{,}2;\ 0{,}3;\ 0{,}4;\ 0{,}5\ \text{мм};\ H_f = 0{,}3;\ 0{,}5;\ 0{,}7;\ 0{,}9;\ 1{,}1\,\text{мм}\right\}.$$

Находим путем линейной интерполяции верхнюю и нижнюю границы «минимального множества допустимых решений» для нецелочисленных значений Z.

Строим и запоминаем в дискретизированной форме полноформатное «минимальное множество допустимых решений» $\mathbf{D}_0(Z_1)$. При этом дискретизация по Z и ρH происходит соответственно с шагом 0,1 и 0,1 г/см^2.

Таблица 3

Атомные номера, массовые толщины тестовых ОК и их теоретические радиационные прозрачности, соответствующие первому и второму детекторам при H_1 = 0,1 мм; H_f = 0,3 мм

$Z_t = 6$	Радиационные прозрачности	$(\rho H)_t$, г/см^2				
		1	2	5	10	20
	$d_{t1}(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P}^{\langle 1\rangle})$	0,7881	0,6289	0,3333	0,124	0,0191
	$d_{t2}(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P})$	0,8513	0,7249	0,4484	0,2024	0,042
$Z_t = 13$	Радиационные прозрачности	$(\rho H)_t$, г/см^2				
		0,7	1,5	3	6	15
	$d_{t1}(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P}^{\langle 1\rangle})$	0,6156	0,4275	0,2443	0,0975	0,0115
	$d_{t2}(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P})$	0,856	0,721	0,5287	0,2927	0,0561
$Z_t = 26$	Радиационные прозрачности	$(\rho H)_t$, г/см^2				
		0,3	0,6	1,5	4	10
	$d_{t1}(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P}^{\langle 1\rangle})$	0,4051	0,2498	0,0998	0,0227	0,0022
	$d_{t2}(Z_t, (\rho H)_t, \mathbf{P})$	0,8048	0,6696	0,4208	0,1518	0,0223

Этапы 9, 10. В качестве тестовых материалов возьмем C, Al и Fe. Соответствующие им массовые толщины приведены в табл. 3. Там же, в качестве примера, приведены теоретические радиационные прозрачности $d_{t1}(Z_t,(\rho H)_t,\mathbf{P}^{\langle 1\rangle})$ и $d_{t2}(Z_t,(\rho H)_t,\mathbf{P})$, соответствующие первому и второму детекторам для пары значений: H_1 = 0,1 мм; H_f = 0,3 мм (или, что равносильно, для пары значений: $\rho_1 H_1$ = 0,0451 г/см^2; $\rho_f H_f$ = 0,27 г/см^2).

Этап 11. Зададим следующие значения параметра σ_0: 0,001; 0,003; 0,01; 0,03.

Этапы 12, 13. В табл. 4 (в качестве примера) представлены результаты вычислений СКО $\sigma\left(\Phi_1, \mathbf{P}^{\langle 1\rangle}\right)$ шума Φ_1 и СКО $\sigma(\Phi_1, \mathbf{P})$ шума Φ_2 для всех выбранных (на этапе 11) значений параметра σ_0 при H_1 = 0,1 мм и H_f = 0,3 мм.

Таблица 4

СКО шумов Φ_1 и Φ_2 при H_1 = 0,1 мм и H_f = 0,3 мм

Z_t	σ_0	СКО	$(\rho H)_t$, г/см²				
			1	2	5	10	20
6	0,001	$\sigma(\Phi_1)$	0,0013	0,0012	0,0009	0,0006	0,0002
	0,003		0,004	0,0037	0,0027	0,0017	0,0007
	0,01		0,0134	0,0122	0,0091	0,0058	0,0024
	0,03		0,0403	0,0365	0,0274	0,0173	0,0071
	0,001	$\sigma(\Phi_2)$	0,0016	0,0015	0,0012	0,0008	0,0004
	0,003		0,0048	0,0045	0,0035	0,0024	0,0011
	0,01		0,0161	0,0149	0,0118	0,008	0,0037
	0,03		0,0483	0,0447	0,0354	0,024	0,0111
Z_t	σ_0	СКО	$(\rho H)_t$, г/см²				
			0,7	1,5	3	6	15
13	0,001	$\sigma(\Phi_1)$	0,0013	0,0011	0,0009	0,0006	0,0002
	0,003		0,0038	0,0033	0,0026	0,0017	0,0006
	0,01		0,0126	0,0108	0,0086	0,0057	0,0022
	0,03		0,0377	0,0325	0,0257	0,0172	0,0065
	0,001	$\sigma(\Phi_2)$	0,0016	0,0015	0,0013	0,001	0,0004
	0,003		0,0049	0,0045	0,0039	0,003	0,0013
	0,01		0,0162	0,015	0,013	0,0099	0,0045
	0,03		0,0487	0,045	0,039	0,0296	0,0134
Z_t	σ_0	СКО	$(\rho H)_t$, г/см²				
			0,3	0,6	1,5	4	10
26	0,001	$\sigma(\Phi_1)$	0,0011	0,0009	0,0006	0,0003	0,0001
	0,003		0,0033	0,0027	0,0019	0,001	0,0003
	0,01		0,0109	0,009	0,0062	0,0032	0,0011
	0,03		0,0326	0,027	0,0185	0,0096	0,0033
	0,001	$\sigma(\Phi_2)$	0,0016	0,0015	0,0012	0,0008	0,0003
	0,003		0,0048	0,0044	0,0036	0,0023	0,0009
	0,01		0,016	0,0148	0,0121	0,0076	0,003
	0,03		0,0479	0,0444	0,0362	0,0227	0,0091

Этапы 14—20. Выполнение этапов 14—20 осуществлялось в пакете «MathCad», где производилось n = 10000 моделирований значений шумов Φ_1 и Φ_2 для каждого значения параметра σ_0

для каждого тестового ОК и каждой комбинации значений параметров H_1, H_f. Соответствующие результаты отображены в табл. 5—7. В любой внутренней ячейке данных таблиц приведены три числа, разделенные наклонными линиями. Первое число означает максимальное значение СКО, второе — максимальное значение относительной среднеквадратической погрешности, а третье — соответствующую им массовую толщину тестового ОК. Так, например, в табл. 5 для $H_1 = 0{,}1$ мм, $H_f = 0{,}3$ мм и $\sigma_0 = 0{,}001$ приведена тройка чисел 0,12/1,95/1. Это означает: $(m_Z)_{\max} = 0{,}12$; $(\delta_Z)_{\max} =$ $= 1{,}95$ %; $(\rho H)_t = 1$ г/см^2.

Таблица 5

Максимальные погрешности оценки эффективного атомного номера для тестового материала $Z_t = 6$ (углерод) для разных значений параметров H_1 и H_f

H_f, мм	σ_0	H_1, мм				
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,3	0,001	0,12/1,95/1	0,14/2,27/1	0,16/2,6/1	0,18/2,92/1	0,19/3,25/1
	0,003	0,35/5,8/1	0,41/74,91/1	0,47/7,76/1	0,53/8,88/1	0,59/9,78/1
	0,01	1,31/21,8/1	1,52/25,4/1	1,73/28,86/1	1,92/31,94/1	2,08/34,67/1
	0,03	5,23/87,22/20	4,49/74,91/1	5,13/85,41/1	5,76/95,9/1	6,28/104,63/1
0,5	0,001	0,12/2,07/1	0,15/2,41/1	0,16/2,71/1	0,19/3,1/1	0,2/3,4/1
	0,003	0,37/6,14/1	1,14/18,94/2	0,49/8,22/1	0,56/9,27/1	0,62/10,4/1
	0,01	1,39/23,1/1	1,61/26,87/1	1,81/30,22/1	2,22/36,92/1	2,17/36,18/1
	0,03	5,05/84,18/20	4,88/81,3/1	5,44/90,64/1	6,13/102,2/1	6,67/111,2/1
0,7	0,001	0,13/2,2/1	0,15/2,54/1	0,18/2,93/1	0,19/3,24/1	0,22/3,6/1
	0,003	0,39/6,52/1	0,46/7,67/1	0,64/10,73/1	0,59/9,88/1	0,66/10,9/1
	0,01	1,47/24,47/1	1,69/28,19/1	2,98/49,69/1	2,09/34,86/1	2,26/37,66/1
	0,03	4,94/82,37/20	5,28/87,95/1	6,06/100,95/1	6,47/107,9/1	7,04/117,4/1
0,9	0,001	0,14/6,9/1	0,16/2,7/1	0,18/3,08/1	0,21/3,42/1	0,23/3,76/1
	0,003	0,41/6,9/1	0,48/8,06//1	0,55/9,22/1	0,63/10,5/1	0,7/11,62/1
	0,01	1,56/25,3/1	2,09/34,83/1	1,99/33,33/1	2,18/36,33/1	2,36/39,28/1
	0,03	5,04/84,05/1	5,72/95,39/1	6,27/104,6/1	6,85/114,2/1	7,31/121,8/1
1,1	0,001	0,15/2,46/1	0,17/2,84/1	0,19/3,22/1	0,23/3,81/2	0,27/4,56/2
	0,003	0,44/7,3/1	0,52/8,59/1	0,59/9,81/1	0,75/12,4/2	0,74/12,35/1
	0,01	1,89/31,42/1	3,17/52,86/1	2,09/34,84/1	2,29/38,2/1	2,44/40,7/1
	0,03	5,53/92,24/1	6,25/104,16/1	6,67/111,1/1	7,28/121,27/1	7,66/127,7/1

Как следует из табл. 5—7, максимальные относительные погрешности оценки ЭАН достигаются на углероде, т.е. на легких материалах. Исходя из этого и учитывая тот факт, что тяжелые материалы помимо рентгеновских систем могут быть дополнительно обнаружены досмотровыми металлодетекторами, дальнейший процесс оптимизации параметров сэндвич-детекторов целесообразно провести на тестовых материалах в виде взрывчатых веществ (ВВ). При этом для сокращения объемов вычислений ограничимся только максимальными значениями СКО шумов Φ_1 и Φ_2 (когда значение параметра σ_0=0,03), что будет соответствовать в статистическом отношении наименее благоприятному из рассматриваемых вариантов для распознавания материалов.

Наиболее распространенные ВВ, согласно [4], имеют ЭАН, близкий к 7.

В табл. 8 приведены результаты расчетов СКО шумов Φ_1 и Φ_2 для тестовых ОК из материала с ЭАН $Z = 7$ для разных значений параметров H_1 и H_f при $\sigma_0 = 0{,}03$.

Таблица 6

Максимальные погрешности оценки эффективного атомного номера для тестового материала Z_t = 13 (алюминий) для разных значений параметров H_1 и H_f

H_f, мм	σ_0	H_1, мм				
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,3	0,001	0,32/2,44/15	0,27/2,08/15	0,26/1,96/15	0,25/1,9/15	0,25/1,923/15
	0,003	0,78/5,99/15	0,66/5,1/15	0,63/4,86/15	0,63/4,87/15	0,63/4,83/15
	0,01	3,44/26,47/15	2,49/19,12/15	2,23/17,2/15	2,25/17,34/0,7	2,61/20,1/0,7
	0,03	9,27/71,29/15	8,39/64,52/15	8,2/61,6/15	7,74/59,6/15	7,82/60,18/0,7
0,5	0,001	0,3/2,34/15	0,26/2,02/15	0,25/1,9/15	0,25/1,9/15	0,25/1,92/15
	0,003	0,75/5,74/15	0,65/4,97/15	0,62/4,8/15	0,62/4,76/15	0,65/4,98/0,7
	0,01	3,24/24,91/15	2,38/18,34/15	2,2/16,9/15	2,5/19,25/0,7	2,77/21,3/0,7
	0,03	9,12/70,18/15	8,27/63,61/15	8,03/61,8/15	7,79/59,93/15	8,2/63,04/0,7
0,7	0,001	0,29/2,27/15	0,26/1,98/15	0,24/1,88/15	0,25/1,9/15	0,25/1,91/15
	0,003	0,72/5,56/15	0,65/4,97/15	0,63/4,82/15	0,63/4,83/0,7	0,68/5,23/0,7
	0,01	3,08/23,67/15	2,24/17,9/15	2,34/18,04/0,7	2,66/20,5/0,7	3,2/23,1/0,7
	0,03	9,01/69,31/15	8,18/62,9/15	7,88/60,6/15	7,9/61,48/0,7	8,4/65,52/0,7
0,9	0,001	0,29/2,21/15	0,25/1,94/15	0,25/1,9/15	0,24/1,9/15	0,25/1,92/15
	0,003	0,71/5,43/15	0,63/4,81/15	0,61/4,7/15	0,66/5,1/0,7	0,72/5,51/0,7
	0,01	2,95/22,68/15	2,29/17,57/0,7	2,6/19,9/0,7	2,81/21,63/0,7	3,19/24,55/0,7
	0,03	8,93/68,66/15	8,1/62,4/15	7,82/60,15/15	8,18/62,93/0,7	8,7/67,01/0,7
1,1	0,001	0,28/2,17/15	0,25/1,91/15	0,25/1,89/15	0,24/1,87/15	0,25/1,91/15
	0,003	0,69/5,32/15	0,62/4,79/15	0,64/4,93/0,7	0,69/5,32/0,7	0,76/5,8/0,7
	0,01	2,84/21,89/15	2,48/19,11/0,7	2,76/21,23/0,7	3,13/24,09/0,7	3,34/25,7/0,7
	0,03	8,86/68,17/15	8,03/61,8/15	8,02/61,7/0,7	8,5/65,2/0,7	8,9/68,5/0,7

Таблица 7

Максимальные погрешности оценки эффективного атомного номера для тестового материала Z_t = 26 (железо) для разных значений параметров H_1 и H_f

H_f, мм	σ_0	H_1, мм				
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
0,3	0,001	2,57/9,9/10	1,99/7,64/10	1,74/6,68/10	1,56/5,99/10	1,45/5,57/10
	0,003	4,87/18,72/10	4,25/16,36/10	3,96/15,22/10	3,77/14,5/10	3,63/13,94/10
	0,01	7,81/30,4/10	7,16/27,53/10	6,82/26,45/10	6,62/25,47/10	6,55/25,18/10
	0,03	11,04/42,45/10	10,62/40,83/10	10,42/40,29/10	10,32/39,7/10	10,33/39,73/10
0,5	0,001	2,49/9,58/10	1,92/7,4/10	1,66/6,39/10	1,51/5,8/10	1,42/5,47/10
	0,003	4,78/18,37/10	4,18/16,07/10	3,92/15,6/10	3,7/14,24/10	3,63/13,96/10
	0,01	7,68/29,55/10	7,06/27,16/10	6,74/25,91/10	6,61/25,39/10	6,41/24,64/10
	0,03	10,89/41,89/10	10,51/40,42/10	10,31/39,67/10	10,31/39,65/10	10,16/39,06/10

Окончание табл. 7

0,7	0,001	2,42/9,3/10	1,88/7,22/10	1,63/6,28/10	1,48/5,69/10	1,39/5,34/10
	0,003	4,69/18,05/10	4,17/16,02/10	3,85/14,73/10	3,71/14,26/10	3,54/13,62/10
	0,01	7,57/29,13/10	6,91/26,59/10	6,65/25,57/10	6,46/24,86/10	6,46/24,85/10
	0,03	10,78/41,44/10	10,31/39,67/10	10,16/39,07/10	10,13/38,95/10	10,22/39,32/10
0,9	0,001	2,35/9,04/10	1,82/6,98/10	1,57/6,05/10	1,46/5,6/10	1,37/5,27/10
	0,003	4,62/17,76/10	4,05/15,59/10	3,78/14,54/10	3,63/13,94/10	3,56/13,67/10
	0,01	7,48/28,76/10	6,9/26,56/10	6,65/25,57/10	6,47/24,9/10	6,34/24,37/10
	0,03	10,67/41,03/10	10,33/39,73/10	10,23/39,35/10	10,13/38,95/10	10,07/38,74/10
1,1	0,001	2,29/8,8/10	1,82/7,2/10	1,55/5,94/10	1,44/5,55/10	1,36/5,22/10
	0,003	4,55/17,49/10	3,99/15,38/10	3,79/14,56/10	3,58/13,78/10	3,48/13,39/10
	0,01	7,39/28,43/10	6,83/26,27/10	6,52/25,07/10	6,46/24,86/10	6,38/24,53/10
	0,03	10,59/40,72/10	10,24/39,38/10	10,06/38,69/10	10,1/38,82/10	10,06/38,68/10

Таблица 8

СКО шумов Φ_1 и Φ_2 для тестовых ОК с ЭАН Z = 7 для разных значений H_1 и H_f при σ_0 = 0,03

H_1, мм	H_f, мм	СКО	$(\rho H)_r$, г/см^2				
			1	2	5	10	20
0,1	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,03988	0,03585	0,02649	0,01643	0,00664
		$\sigma(\Phi_2)$	0,04822	0,04454	0,03512	0,0237	0,01089
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,03988	0,03585	0,02649	0,01643	0,00664
		$\sigma(\Phi_2)$	0,05355	0,04951	0,03915	0,02652	0,01226
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,03988	0,03585	0,02649	0,01643	0,00664
		$\sigma(\Phi_2)$	0,05842	0,05404	0,04281	0,02908	0,0135
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,03988	0,03585	0,02649	0,01643	0,00664
		$\sigma(\Phi_2)$	0,0631	0,0584	0,04633	0,03154	0,0147
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,03988	0,03585	0,02649	0,01643	0,00664
		$\sigma(\Phi_2)$	0,06769	0,06268	0,04979	0,03396	0,01587
0,2	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,03329	0,03002	0,02234	0,01399	0,00574
		$\sigma(\Phi_2)$	0,05438	0,05028	0,03977	0,02696	0,01248
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,03329	0,03002	0,02234	0,01399	0,00574
		$\sigma(\Phi_2)$	0,05935	0,05491	0,04352	0,02959	0,01375
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,03329	0,03002	0,02234	0,01399	0,00574
		$\sigma(\Phi_2)$	0,06402	0,05926	0,04703	0,03204	0,01495
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,03329	0,03002	0,02234	0,01399	0,00574
		$\sigma(\Phi_2)$	0,06859	0,06352	0,05047	0,03444	0,01612
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,03329	0,03002	0,02234	0,01399	0,00574
		$\sigma(\Phi_2)$	0,07314	0,06776	0,05389	0,03684	0,01728

Окончание табл. 8

0,3	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,03096	0,02798	0,02094	0,01321	0,00548
		$\sigma(\Phi_2)$	0,06014	0,05565	0,04412	0,03001	0,01396
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,03096	0,02798	0,02094	0,01321	0,00548
		$\sigma(\Phi_2)$	0,0649	0,06008	0,0477	0,03252	0,01518
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,03096	0,02798	0,02094	0,01321	0,00548
		$\sigma(\Phi_2)$	0,06946	0,06434	0,05114	0,03492	0,01635
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,03096	0,02798	0,02094	0,01321	0,00548
		$\sigma(\Phi_2)$	0,074	0,06856	0,05454	0,0373	0,01752
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,03096	0,02798	0,02094	0,01321	0,00548
		$\sigma(\Phi_2)$	0,07855	0,07279	0,05796	0,03969	0,01868
0,4	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,02981	0,02699	0,02028	0,01287	0,00539
		$\sigma(\Phi_2)$	0,06567	0,0608	0,04829	0,03293	0,01539
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,02981	0,02699	0,02028	0,01287	0,00539
		$\sigma(\Phi_2)$	0,07031	0,06512	0,05178	0,03537	0,01658
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,02981	0,02699	0,02028	0,01287	0,00539
		$\sigma(\Phi_2)$	0,07483	0,06934	0,05518	0,03775	0,01774
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,02981	0,02699	0,02028	0,01287	0,00539
		$\sigma(\Phi_2)$	0,07937	0,07356	0,05859	0,04014	0,01891
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,02981	0,02699	0,02028	0,01287	0,00539
		$\sigma(\Phi_2)$	0,08395	0,07783	0,06203	0,04254	0,02008
0,5	0,3	$\sigma(\Phi_1)$	0,02915	0,02643	0,01993	0,0127	0,00536
		$\sigma(\Phi_2)$	0,07106	0,06583	0,05235	0,03578	0,01679
	0,5	$\sigma(\Phi_1)$	0,02915	0,02643	0,01993	0,0127	0,00536
		$\sigma(\Phi_2)$	0,07564	0,0701	0,0558	0,03819	0,01796
	0,7	$\sigma(\Phi_1)$	0,02915	0,02643	0,01993	0,0127	0,00536
		$\sigma(\Phi_2)$	0,08018	0,07432	0,0592	0,04058	0,01913
	0,9	$\sigma(\Phi_1)$	0,02915	0,02643	0,01993	0,0127	0,00536
		$\sigma(\Phi_2)$	0,08474	0,07857	0,06264	0,04297	0,0203
	1,1	$\sigma(\Phi_1)$	0,02915	0,02643	0,01993	0,0127	0,00536
		$\sigma(\Phi_2)$	0,08937	0,08288	0,06611	0,04541	0,02149

В табл. 9 приведены полученные в результате моделирования значения максимальных относительных погрешностей $(\delta_Z)_{max}$ (в %) для тестовых ОК с эффективным атомным номером $Z = 7$ для диапазона массовых толщин $(\rho H)_t$ от 1 до 20 г/см^2 для разных значений параметров H_1 и H_f при $\sigma_0 = 0{,}03$.

В качестве критерия оптимальности сэндвич-детекторов излучения, на наш взгляд, вполне естественно использовать минимум максимальной относительной погрешности оценки атомного номера исследуемых тестовых ОК (для рассматриваемого диапазона массовых толщин).

Таблица 9

Максимальные относительные погрешности $(\delta_Z)_{max}$, (в %) для тестовых ОК с эффективным атомным номером $Z = 7$ для разных значений параметров H_1 и H_f при $\sigma_0 = 0,03$

H_1, мм	H_f, мм				
	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1
0,1	96,9	91,2	90,7	88,6	86,2
0,2	73,8	74,4	77,2	84,3	89,6
0,3	73,9	79,1	88	91,1	94,2
0,4	83,9	90,3	94	99,2	103,9
0,5	91,5	96,4	100,7	103,7	109,6

Тогда, согласно табл. 9, указанный минимум составит приблизительно 74 %, а соответствующие ему оптимальные значения $H_{1\,opt}$ и $H_{f\,opt}$ будут равны:

$$H_{1\,opt} = 0{,}2 \text{ мм}, H_{f\,opt} = 0{,}3 \text{ мм или } H_{1\,opt} = 0{,}2 \text{ мм}, H_{f\,opt} = 0{,}5 \text{ мм или } H_{1\,opt} = 0{,}3 \text{ мм}, H_{f\,opt} = 0{,}3 \text{ мм}.$$

Если принять во внимание экономический фактор (минимизация затрат материалов на изготовление сэндвич-детекторов), то предпочтение следует отдать паре:

$$H_{1\,opt} = 0{,}2 \text{ мм}, H_{f\,opt} = 0{,}3 \text{ мм}.$$

Таким образом, предложенный нами алгоритм позволил получить значения параметров сэндвич-детекторов излучения (с заданным материалом первого детектора), которые являются оптимальными при распознавании ВВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлен алгоритм оптимизации параметров сэндвич-детекторов излучения по критерию минимума максимальной относительной погрешности оценки эффективного атомного номера материалов объектов контроля методом дуальных энергий, порождаемой квантовой природой излучения. Было проиллюстрировано его использование на конкретном примере для сэндвич-детектора со следующими параметрами: первый (передний) детектор изготовлен из CsI (с преобладающим процессом взаимодействия с излучением в виде фотоэффекта), промежуточный фильтр изготовлен из меди, второй (задний) детектор является детектором полного поглощения. Были получены значения параметров описанного сэндвич-детектора излучения, которые являются оптимальными при оценке эффективного атомного номера взрывчатых веществ. Алгоритм может представлять интерес для разработчиков рентгеновских комплексов с сэндвич-детекторами излучения, что достаточно характерно для систем досмотра багажа, ручной клади пассажиров, почтовых отправлений и легкового автотранспорта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Khan S.U., Khan I.U., Ullah I., Saif N., Ullah I.* A review of airport dual energy X-ray baggage inspection techniques: image enhancement and noise reduction // Journal of X-ray Science and Technology. 2020. V. 28. No. 3. P. 481—505. https://doi.org/10.3233/XST-200663

2. *Yalçın O., Reyhancan I.A.* Detection of explosive materials in dual-energy X-Ray security systems // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2022. V. 1040. Article ID 167265. https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167265

3. *Chang C.H., Ni Y.C., Tseng S.P.* Calculation of effective atomic numbers using a rational polynomial approximation method with a dual-energy X-ray // Journal of X-Ray Science and Technology. 2021. V. 29. No. 2. P. 317—330. https://doi.org/10.3233/xst-200790

4. *Yim C.W., Hong S.G.* A MCNP simulation for a new dual-energy dual-beam X-ray inspection method using multi-angle compton scattering to determine the effective atomic number of explosives // Radiation Physics and Chemistry. 2022. V. 195. Article ID 110084. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110084

5. *Duvillier J., Dierick M., Dhaene J., Van Loo D., Masschaele B., Geurts R., Hoorebeke L.V., Boone M.N.* Inline multi-material identification via dual energy radiographic measurements // NDT & E International. 2018. V. 94. P. 120—125. https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.01.002

6. *Cordova A.* Technologies for primary screening in aviation security //Journal of Transportation Security. 2022. V. 15. No. 3—4. P. 141—159. https://doi.org/10.1007/s12198-022-00248-8

7. *Linardatos D., Koukou V., Martini N., Konstantinidis A., Bakas A., Fountos G., Valais I., Michail C.* On the response of a micro non-destructive testing X-ray detector // Materials. 2021. 14. P. 888. https://doi.org/10.3390/ma14040888

8. *Vukadinovic D., Anderson D.* X-ray baggage screening and AI, EUR 31123 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022. http://dx.doi.org/10.2760/46363

9. *Osipov S.P., Udod V.A., Wang Y.* Identification of materials in X-Ray inspections of objects by the dual-energy method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2017. V. 53. No. 8. P. 568—587. https://doi.org/10.1134/S1061830917080058 [*Осипов С.П., Удод В.А., Ван Я.* Распознавание материалов методом дуальных энергий при радиационном контроле объектов // Дефектоскопия. 2017. № 8. С. 33—56.]

10. *Kayalvizhi R., Malarvizhi S., Topkar A., Vijayakumar P.* Raw data processing techniques for material classification of objects in dual energy X-ray baggage inspection systems // Radiation Physics and Chemistry. 2022. V. 193. Article ID 109512. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109512

11. *Mamchur D., Peksa J., Le Clainche S., Vinuesa R.* Application and advances in radiographic and novel technologies used for non-intrusive object inspection // Sensors. 2022. V. 22. No. 6. Article ID 2121. https://doi.org/10.3390/s22062121

12. *Busi M., Kehres J., Khalil M., Olsen U.L.* Effective atomic number and electron density determination using spectral x-ray CT // Anomaly Detection and Imaging with X-rays (ADIX) IV. SPIE. 2019. V. 10999. P. 7—17. https://doi.org/10.1117/12.2519851

13. *Jumanazarov D., Koo J., Busi M., Poulsen H.F., Olsen U.L., Iovea M.* System-independent material classification through X-ray attenuation decomposition from spectral X-ray CT // NDT & E International. 2020. V. 116. P. 102336. https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102336

14. *Iovea M., Neagu M., Duliu O.G., Oaie G., Szobotka S., Mateiasi G.* A Dedicated on-board dual-energy computer tomograph // J. Nondestruct Eval. 2011. V. 30. P. 164—171. https://doi.org/10.1007/s10921-011-0104-x

15. *Smith R.C., Connelly J.M.* CT technologies // Counterterrorist Detection Techniques of Explosives. Elsevier, 2022. P. 29—45. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64104-5.00009-6

16. *Alvarez R.E.* Invertibility of the dual energy x-ray data transform // Medical Physics. 2019. V. 46. No. 1. P. 93—103. https://doi.org/10.1002/mp.13255

17. *Osipov S., Chakhlov S., Udod V., Usachev E., Schetinkin S., Kamysheva E.* Estimation of the effective mass thickness and effective atomic number of the test object material by the dual energy method // Radiation Physics and Chemistry. 2020. V. 168. Article ID 108543. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108543

18. *Zhang Y., Kong W., Li D., Liu X.* On using XMC R-CNN model for contraband detection within X-ray baggage security images // Mathematical Problems in Engineering. 2020. V. 2020. Article ID 1823034. https://doi.org/10.1155/2020/1823034

19. *Alvarez R.E.* Analytic models for spectral x-ray imaging. 2019. Preprint. http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.12391.09128

20. *Fredenberg E.* Spectral and dual-energy X-ray imaging for medical applications // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2018. V. 878. P. 74—87. https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.07.044

21. *Zhao S., Pan H., Zhang W., Xia D., Zhao X.* An oblique projection modification technique (OPMT) for fast multispectral CT reconstruction // Physics in Medicine & Biology. 2021. V. 66. No. 6. Article ID 065003. https://doi.org/10.1088/1361-6560/abe028

22. *Udod V.A., Osipov S.P., Nazarenko S.Yu.* Algorithm for Evaluating Errors in Recognition of Materials in X-Ray Testing System Containing X-Ray Sandwich Detectors // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2022. V. 58. No. 1. P. 46—56. https://doi.org/10.1134/S1061830922010065 [*Удод В.А., Осипов С.П., Назаренко С.Ю.* Алгоритм оценки погрешностей при распознавании материалов в системе рентгеновского контроля, содержащей сэндвич-детекторы излучения // Дефектоскопия. 2022. № 1. С. 40—51.]

23. *Udod V.A., Vorobeichikov S.E., Nazarenko S.Y.* Mathematical models of radiation transparency of test objects when using sandwich X-ray radiation detectors // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2020. V. 56. No. 2. P. 161—170. https://doi.org/10.1134/S1061830920020096 [*Удод В.А., Воробейчиков С.Э., Назаренко С.Ю*. Математические модели радиационных прозрачностей объекта контроля при использовании сэндвич-детекторов рентгеновского излучения // Дефектоскопия. 2020. № 2. С. 31—41.]

24. *Udod V.A., Osipov S.P., Wang Y.* Estimating the influence of quantum noises on the quality of material identification by the dual-energy method // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. No. 8. P. 585—600. https://doi.org/10.1134/S1061830918080077 [*Удод В.А., Осипов С.П., Ван* Я. Оценка вли-

яния квантовых шумов на качество распознавания материалов методом дуальных энергий // Дефектоскопия. 2018. № 8. С. 50—65.]

25. *Slavashevich I., Pozdnyakov D., Kasiuk D., Linev V.* Optimization of physico-topological parameters of dual energy X-ray // Engineering of Scintillation Materials and Radiation Technologies: Selected Articles of ISMART2018. 2019. V. 227. P. 262. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21970-3_19

26. *Liang K.J., Sigman J.B., Spell G.P., Strellis D., Chang W., Liu F., Mehta T., Carin L.* Toward automatic threat recognition for airport X-ray baggage screening with deep convolutional object detection // arXiv preprint arXiv:1912.06329. 2019. https://doi.org/10.48550/arXiv.1912.06329