

АНАЛИЗ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПРИ СКАНИРОВАНИИ ТРАНСПОРТНЫХ КОНТЕЙНЕРОВ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕМ

А. В. Зелёная^{1,*}, *М. Е. Зелёный*^{1,2,**}, *А. А. Туринге*¹,
В. Г. Недорезов^{1,***}

¹ Институт ядерной физики РАН, Москва

² Московский физико-технический институт

(Национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

Для обеспечения национальной безопасности важен контроль перемещения опасных или стратегически важных грузов, таких как взрывчатые вещества, радиоактивные материалы, редкие и драгоценные металлы. Проводить такой контроль можно, сканируя содержимое транспортных контейнеров гамма-излучением. В данной работе рассмотрена существующая методика дуальных энергий и предложен альтернативный способ, основанный на измерении энергетического распределения гамма-квантов. Для оценки было проведено моделирование с помощью транспортного кода GEANT4. Также выполнен эксперимент по измерению энергетического разрешения детектора на основе сцинтиллирующего кристалла BGO и кремниевого фотомножителя.

It is important for national security to control the movement of dangerous or strategically important cargo such as explosives, radioactive materials, rare and precious metals. This control can be provided by scanning transport containers by gamma rays. In this report the existing technique for scanning (dual energy method) is considered and the alternative method based on measuring the energy distribution of gamma rays is proposed. For estimation of perspectives of the proposed method, the corresponding simulation was conducted by using the GEANT4 toolkit. The example of the reconstruction algorithm of the chemical composition of the scanned object is also considered. In addition, the experiment for estimation of energy resolution of the detector based on a scintillation crystal BGO and SiPM was carried out.

PACS: 02.70.-c; 23.20.Nx; 32.90.+a

*E-mail: zelyenaya.av@phystech.edu

**E-mail: mihail.zelenyy@phystech.edu

***E-mail: vladimir@cpc.inr.ac.ru

ВВЕДЕНИЕ

Использование высокоэнергетического гамма-излучения в прикладной томографии сегодня широко распространено. В этой статье мы рассмотрим возможности улучшения существующего метода как путем модернизации оборудования, так и путем разработки математических алгоритмов, которые более полно используют информацию, содержащуюся в измеренных значениях. В начале мы рассмотрим существующий метод дуальных энергий и определим возможные направления для создания более точной методики. Далее в работе приведено описание нескольких моделей и численных экспериментов с обсуждением результатов. Также в работе приведены результаты измерений характеристик сцинтилляционного кристалла BGO, который может послужить основой для модернизированного оборудования.

МЕТОД ДУАЛЬНЫХ ЭНЕРГИЙ

Рассмотрим, как уменьшается поток гамма-лучей. Коэффициент пропускания описывается следующим уравнением:

$$T(E_0, t, Z) = \frac{\int_0^{E_0} S(E_0, E) \exp(-\mu(E, Z) \times t) dE}{\int_0^{E_0} S(E_0, E) dE}, \quad (1)$$

где T — прозрачность материала для гамма-излучения; $S(E_0, E)$ — функция отклика детектора; $\mu(E, Z)$ — массовый коэффициент ослабления; t — оптическая толщина материала; E_0 — предельная энергия тормозного излучения; E — энергия гамма-излучения; Z — заряд ядра исследуемого материала.

Предположим, что в качестве источника гамма-лучей используется тормозное излучение со спектром, как на рис. 1, *a*, и максимальной энергией E_0 , зависящей от энергии электронного пучка. Коэффициент прозрачности $T(E_0, t, Z)$ также зависит от среднего массового коэффициента ослабления материала. Рис. 1, *б* показывает зависимость коэффициента ослабления от энергии для различных материалов. Мы можем выделить три области: начальную, в которой доминирует фотоэлектрический эффект и могут быть разделены только материалы с большим зарядом ядра; среднюю, в которой доминирует комптоновское рассеяние и материалы не различимы; и, наконец, область, где основное влияние оказывает процесс рождения электрон-позитронных пар и материалы достаточно хорошо различимы [1–3]. Последняя область может быть использована для метода дуальных энергий [3].

Уравнение (1) не позволяет определить материал, если неизвестна оптическая толщина материала. Для решения этой проблемы в методе дуальной

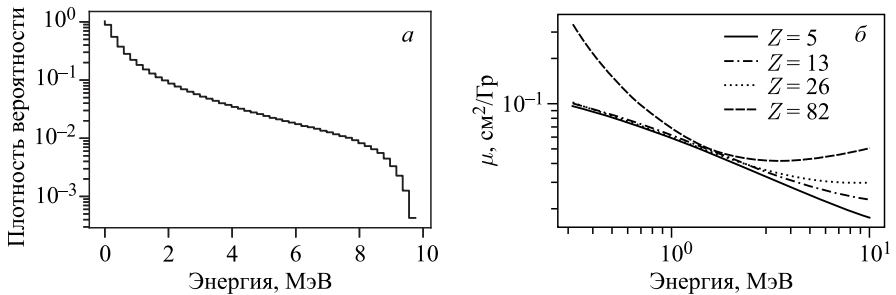


Рис. 1. а) Спектр тормозного излучения от электрона с энергией 10 МэВ. б) Массовый коэффициент ослабления для различных материалов

энергии предлагается использовать два электронных пучка с различной энергией. С использованием прозрачности для двух предельных энергий гамма-лучей $E_0^{(1)}$ и $E_0^{(2)}$, а затем минимизации функционала

$$F(z) = \frac{|t(E_0^{(1)}, z) - t(E_0^{(2)}, z)|}{t(E_0^{(1)}, z)} \rightarrow \min \quad (2)$$

становится возможным исключить неизвестную нам оптическую толщину и вычислить эффективное зарядовое число для исследуемого материала. Данный метод позволяет отнести сканируемый материал к одной из четырех групп, разделенных по эффективному зарядовому числу: $Z_{\text{eff}} \sim 5$, $Z_{\text{eff}} \sim 13$, $Z_{\text{eff}} \sim 26$, $Z_{\text{eff}} \sim 82$.

Однако метод дуальной энергии имеет некоторые недостатки, среди которых мы выделим два:

- необходимость в двух пучках различной энергии ведет к усложнению конструкции сканера;
- данный метод будет иметь малую эффективность в случае использования материала, состоящего из сильно различающихся по заряду элементов.

Поэтому мы предлагаем альтернативный подход:

- использовать только один электронный пучок с энергией 10 МэВ;
- измерять не только пространственное, но и энергетическое распределение гамма-квантов.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для оценки мы провели несколько GEANT4 [2] моделирований, используя схему (рис. 2): электронный пучок с энергией 10 МэВ сталкивается с вольфрамовым конвертером, создавая тормозное излучение, которое облучает стальной двухметровый контейнер, внутри которого находится сканиру-

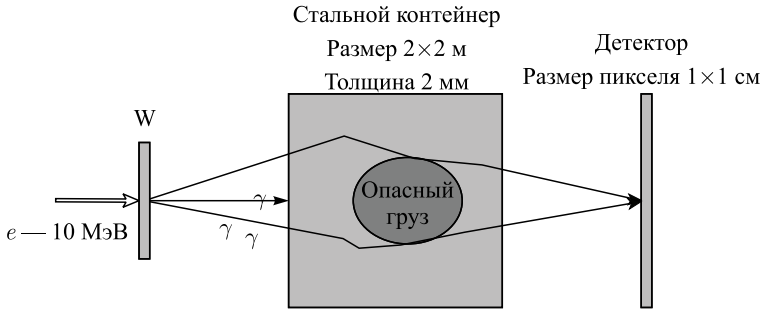


Рис. 2. Схема моделирования

емый объект, и регистрируется детектором. Расстояние между вольфрамовым конвертером и контейнером составляет 2 м, между контейнером и детектором — 10 см.

Приведем несколько примеров проведенного моделирования.

- На рис. 3, *а* показан пример опасного стального объекта неоднородной толщины, сравнимой с толщиной стенок контейнера.
- Рис. 3, *б* и 4, *а* показывают результат моделирования уранового кубика с ребром 6 см (масса около 4 кг), помещенного в свинцовую сферу толщиной 1 см. Как показало моделирование, такой куб можно обнаружить с толщиной оболочки до 5 см.
- Рис. 4, *б* демонстрирует разницу между двумя органическими материалами: безопасным — целлюлозой и опасным — гексогеном (RDX). Разница

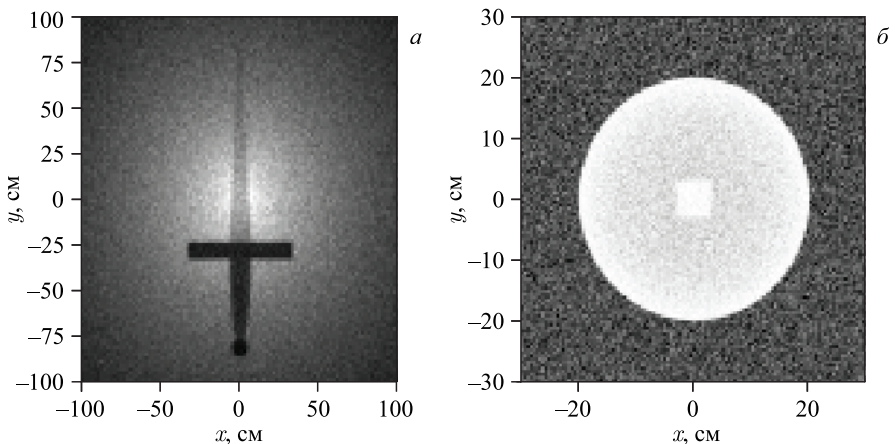


Рис. 3. *а*) Опасный стальной предмет с неравномерной толщиной. *б*) Кубик урана в свинцовой оболочке (XY-распределение)

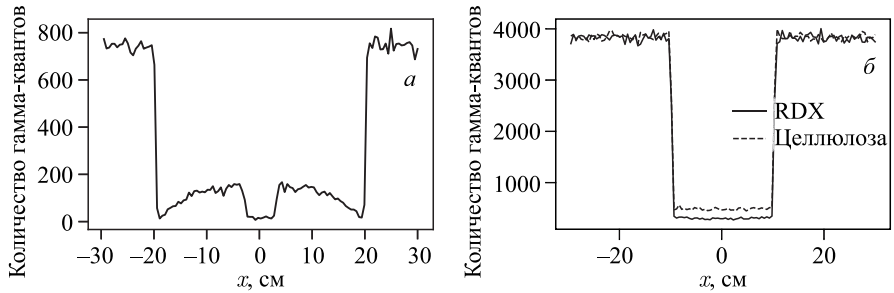


Рис. 4. *а*) Кубик урана в свинцовой оболочке (X -распределение). *б*) Сравнение целлюлозы и гексогена

значительна, это означает, что можно разработать алгоритмы поиска органических взрывчатых веществ.

• На рис. 5, *а* показан результат сравнения двух энергетических спектров (в качестве сравнительной метрики выбран логарифм отношения интенсивностей) для сфер из алюминия и урана диаметром 1 см. Как видим, даже в таких малых масштабах и малых (по сравнению с реальным пучком) интенсивностях можно регистрировать различия в энергетических спектрах.

Чтобы оценить возможность определения эффективного заряда материала по энергетическому спектру, было смоделировано сканирование шести мишеней из различных материалов (железо, свинец, алюминий, целлюлоза, олово, уран) с одинаковыми поперечными и различными продольными размерами. Продольный размер был выбран таким образом, чтобы общее ослабление потока гамма-излучения было одинаковым для всех материалов и их нельзя

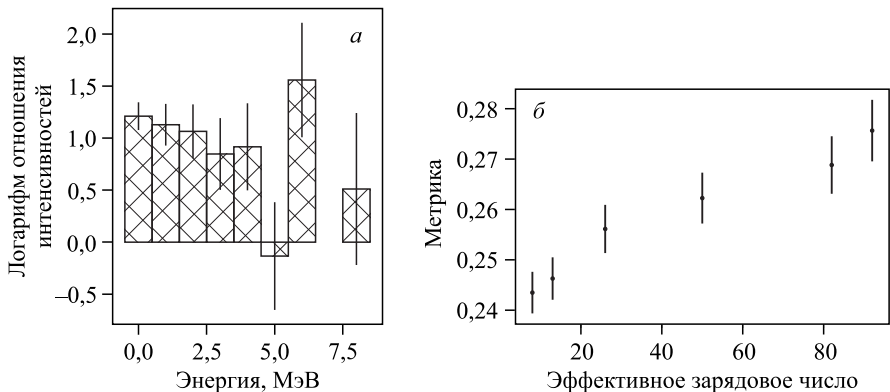


Рис. 5. *а*) Сравнение энергетических спектров из урановых и алюминиевых сфер. *б*) Зависимость метрики от эффективного зарядового числа материала

было различить только путем анализа количества гамма-квантов, пришедших в детекторы.

Энергетические спектры этих мишеней показаны на рисунках. Как видно, спектры для всех мишеней различны в области до 3 МэВ (рис. 6, *a*) и в области после 4 МэВ (см. рис. 6, *b*). Следует отметить, что это различие является значительным даже при малых интенсивностях электронного пучка (10^8 электронов), что указывает на более выраженное различие в реальном электронном пучке от ускорителя (10^{15} электронов). Таким образом, можно сформулировать простой критерий, отличающий различные материалы: доля числа частиц с энергией больше 3 МэВ. Такой критерий позволяет различать материалы по Z_{eff} (см. рис. 5, *b*). Следует отметить, что ошибки на рис. 5 являются только статистическими и при интенсивностях, соответствующих реальному электронному пучку, будут незначительны.

Сформулированный критерий достаточно хорош для практического использования, однако не является оптимальным решением, поскольку при его

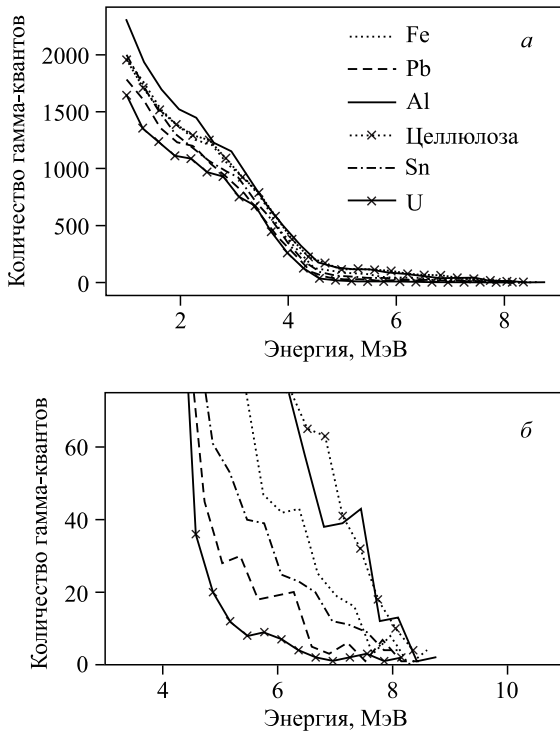


Рис. 6. *a*) Энергетические спектры различных материалов (общий вид). *б*) Энергетические спектры различных материалов (участок с энергией более 4 МэВ)

использовании большая часть информации о спектре теряется. В следующем разделе мы использовали простой пример, чтобы показать потенциал для создания трехмерной гамма-томографии с использованием полной информации о спектре.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТОЛЩИН МАТЕРИАЛОВ

Рассмотрим одномерный случай, когда гамма-лучи проходят стопку из нескольких материалов с фиксированной общей толщиной и нам нужно восстановить толщину отдельных материалов (рис. 7). Используем простую модель, в которой ослабление потока гамма-излучения задается следующим уравнением:

$$\frac{N(E)}{N_0(E)} = \exp \left(- \sum_i \Sigma_i^{\text{mean}}(E) x_i \right), \quad (3)$$

где x_i — толщина i -слоя; Σ_i^{mean} — среднее макроскопическое сечение для группы материалов с близкими зарядовыми числами; N , N_0 — количество гамма-квантов. В этом случае мы не учитываем многократное рассеяние и наличие аннигиляционной линии. Мы считаем, что общая толщина известна, и для восстановления толщины отдельных слоев мы используем метод наименьших квадратов, т. е. минимизируем такую сумму:

$$\sum_E \left(\ln \frac{N(E)}{N_0(E)} + \sum_i \Sigma_i^{\text{mean}}(E) x_i \right)^2 \rightarrow \min. \quad (4)$$

Приведем пример работы алгоритма. Будем считать, что энергетическое разрешение составляет величину 10%. Рассмотрим стопку из трех слоев: алюминиевого, железного и свинцового. Рис. 8, *a* показывает вклад каждого восстановленного материала в общее ослабление потока гамма-лучей. Табл. 1 содержит результаты восстановления для данного примера. Как видим из таблицы, результат восстановления довольно точный. Чтобы прояснить возможности алгоритма, мы провели несколько численных экспериментов. Мы так же, как и в примере, использовали алюминий, железо и свинец и взяли около

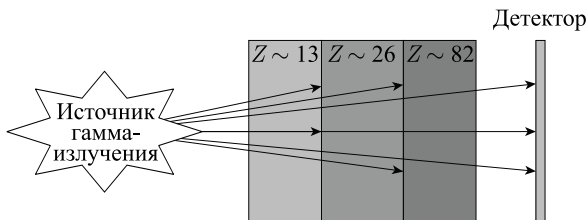


Рис. 7. Восстановление толщин материалов (схема моделирования)

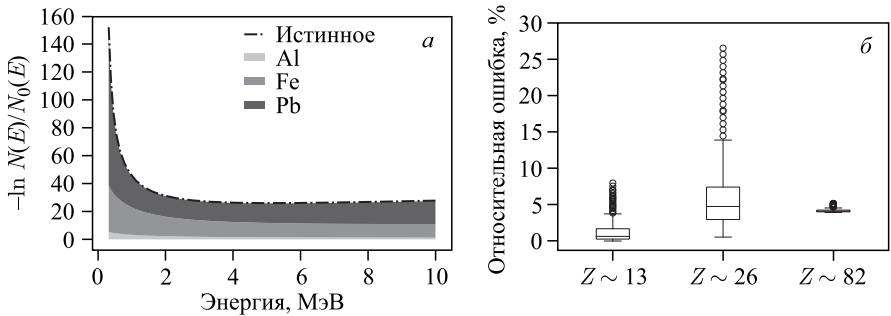


Рис. 8. а) Вклад отдельных слоев в полное ослабление потока. б) Распределение ошибок восстановления для различных численных экспериментов

Таблица 1. Пример результата работы алгоритма восстановления

Материал	Истинная толщина, см	Восстановленная толщина, см
Al	20	19,6
Fe	40	41,6
Pb	30	28,7

200 наборов с разным соотношением толщин слоев, причем суммарная толщина лежала в диапазоне от 30 до 180 см.

Рис. 8, б показывает разброс ошибки восстановления для данных наборов. Как мы можем видеть, толщина тяжелых элементов определяется лучше всего: с точностью порядка 5 %, а толщина элементов из группы железа хуже всего: величина ошибки достигает 30 %. Однако мы рассматривали весьма простую модель и возникает вопрос: какая от нее польза? В данной модели мы использовали только энергетическое разрешение и по нему смогли провести восстановление послойной структуры объекта. При добавлении пространственного распределения, мы можем провести дополнительно сегментирование вдоль еще одной оси и с учетом временной компоненты восстановить трехмерную структуру груза контейнера (3D гамма-томография). Таким образом, наша простая модель показывает, что у нас есть перспектива создания действительно мощной системы для анализа содержимого контейнеров.

ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДЕТЕКТОРА

В дополнение к моделированию было измерено энергетическое разрешение сцинтилляционного детектора гамма-излучения. В качестве сцинтиллятора использовался кристалл BGO размером $10 \times 30 \times 100$ мм (глубина кристалла подбиралась так, чтобы обеспечить полное поглощение гамма-

Таблица 2. Измерение энергетического разрешения детектора

Источник	Энергия, МэВ	σ_E/E , %
^{22}Na	0,511	19,0
^{137}Cs	0,662	14,7
^{22}Na	1,275	13,0

квантов до 10 МэВ), для регистрации излучения сцинтиллятора использовался фотодетектор AgauC-60035-4P. В качестве источников излучения использовались ^{22}Na (имеет две линии 0,511 и 1,275 МэВ) и ^{137}Cs (имеет линию 0,662 МэВ). Фотодетектор AgauC-60035-4P представляет собой матрицу из четырех фотодиодов размером 6×6 мм, оснащенную индивидуальным предусилителем с коэффициентом усиления, равным 150. В процессе работы измерялся суммарный сигнал с двух фотодиодов матрицы. Сигнал с матрицы подавался на усилитель (ORTEC 579) и затем поступал на входной канал АЦП (CAEN DT5742) и на дискриминатор (CAEN mod. 224), логический сигнал которого служил тригером в системе. В отсутствие источника шкала АЦП была прокалибрована в абсолютных единицах — числе фотоэлектронов. В табл. 2 представлен результат измерения разрешения детектора — отношения СКО фотопика к его положению (σ_E/E). Световыход составляет 140 фотоэлектрон/МэВ, а порог шумов — величину порядка 100 кэВ.

ВЫВОДЫ

1. Энергетические спектры материалов с различным эффективным зарядовым числом различаются в областях энергий до 3 и после 4 МэВ. Оценена зависимость зарядового числа от доли гамма-квантов с энергией выше 3 МэВ. Данный метод позволяет идентифицировать в контейнере отдельные группы элементов по зарядовому числу (легкие, средние, тяжелые) в одной экспозиции при одной фиксированной энергии электронов, оптимально вблизи 8 МэВ. При этом требуется разрешение не хуже 15 % и эффективность регистрации около 90 %.

2. Энергетическое разрешение порядка 10 % позволяет определить толщину отдельного слоя в многослойной структуре с точностью 25 %.

3. Измерено энергетическое разрешение детектора на основе BGO, в целом полученные результаты говорят о высоких эксплуатационных характеристиках и качестве материала. Представляется возможным достижение характеристик, заявленных производителем ($\text{FWHM} \sim 9\%$ для ^{137}Cs).

Развитие данной тематики является перспективным направлением деятельности, но требует финансовой поддержки, при наличии которой станут возможными разработка программы для проверки содержимого транс-

портного контейнера по заявленному манифесту и создание программы для гамма-томографии содержимого контейнеров.

Данная работа частично профинансирована в рамках госзадания № 3.3008.2017/ПЧ Министерства образования и науки Российской Федерации и частично выполнена при поддержке РФФ (грант № 16-12-10039).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Heitler W.* The Quantum Theory of Radiation. Courier Corporation, 1984.
2. *Allison J. et al.* Recent Developments in Geant4 // Nucl. Instr. Meth. A. 2016. V. 835. P. 186–225; <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900216306957>.
3. *Spirin D., Berdnikov Y., Gavrish Y.* Principles of Large Cargo Introspecty // Sci. and Techn. Statements of the St.Petersburg State Polytechn. Univ. Phys. Math. 2010. No.2(98).