

УДК 53.072, 53.681.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ МАТЕРИАЛА МЕТОДОМ КОМПТОНОВСКОГО РАССЕЙЯНИЯ

**В.Д. Афанасьев, С.А. Письменецкий, В.Б. Пышкин, В.Г. Рудычев,
В.И. Тесленко-Пономаренко, И.С. Тимченко**

*Харьковский национальный университет, Лаборатория радиационной физики,
ул. Курчатова, 31, Харьков, 61108*

Поступила в редакцию 26 марта 2004 г.

Описана экспериментальная проверка возможности определения плотности материала методом комптоновского рассеяния. Измерения выполнены с использованием органических сцинтиляционных детекторов (дозиметров) на тормозном пучке ускорителя электронов ЛУЭ-6; в качестве исследуемого набора образцов были взяты целлюлоза, плексиглас, бетон, алюминий и сталь. Рассчитано координатное разрешение цилиндрического детектора, оснащенного длинным коллиматором; который был выбран для выделения тестируемого элемента объема макета. Измерена зависимость мощности дозы тормозного излучения, рассеянного исследуемым макетом на угол 45° , от плотности материала рассеивателя. Полученные значения отличаются от расчетных не более чем на 30% и подтверждают возможность использования данного метода для оценки плотности и обнаружения легких материалов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тормозное излучение ЛУЭ, элемент объема макета, комптоновское рассеяние, определение плотности.

Интроскопия большеразмерных предметов как область прикладной физики в последнее время активно совершенствуется. Одной из целей, несомненно, является разработка методов выделения в составе инспектируемых объектов запрещенных к перевозке предметов - оружия, взрывчатки, делящихся и радиоактивных веществ, замаскированных среди безопасных вложений. Учеными из Германии предложено техническое решение и получен патент на детектирующее устройство для интроскопии [1]. Идея состоит в раздельной одновременной регистрации мощности дозы тормозного излучения (ТИ) в низко- и высокоэнергетической частях спектра после прохождения через объект. Полученные при облучении объекта 4 значения мощности дозы при одной фиксированной энергии ускорителя (2 значения мощности дозы без объекта и 2 - с ослаблением в объекте) позволяют определить материал макета. Похожее решение содержится в патенте США [2], в котором предлагается получить два разных профиля поглощения излучения в объекте с использованием двух специально сформированных спектров излучения, а затем, основываясь на полученных профилях, определить атомный номер вещества. В другом патенте США [3] заявлена возможность детектирования различных материалов с использованием резонансного рассеяния фотонов тормозного спектра. Падающее на объект излучение вызывает в материале резонансное поглощение и рассеяние, регистрация и измерение которых дают информацию о наличии и концентрации в объеме определенных химических элементов; детектирование комптоновского рассеяния и процесса рождения пар используется для создания трехмерного распределения плотности или атомного номера во всем объекте. Техническое решение [4], также предложенное учеными Германии, позволяет определять характеристики материала объекта. Для этих целей сконструировано детектирующее устройство на основе специально подобранных сцинтиляторов, состоящее из последовательно расположенных двух детекторов для раздельной регистрации низко- и высокоэнергетических фотонов спектра ТИ, прошедших объект.

Наряду с методами, основанными на поглощении ТИ, разрабатываются активационные и гамма-резонансные методы [5], а также их комбинации. В качестве одной возможной комбинации было предложено использовать "просвечивание + рассеяние + активация" высокоэнергетическим ($E_0 \geq 30$ МэВ) пучком ТИ. Настоящая работа была направлена на выявление возможных трудностей при реализации метода "просвечивание + рассеяние" на тормозном пучке ускорителя электронов ЛУЭ-6 ХНУ.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Схема эксперимента представлена на рис.1. Источник излучения состоит из линейного ускорителя электронов 1 с максимальной энергией 6 МэВ ЛУЭ-6, $e\text{-}\gamma$ конвертора 2 и коллиматоров. Конвертор содержит 0,27 мм вольфрамовую пластину и 20 мм алюминиевый фильтр для полного поглощения пучка электронов и одновременно является датчиком полного тока пучка. Заслуживают внимания система коллиматоров и используемые для регистрации детекторы. Коллиматор пучка 3 предназначен для ограничения области внутри исследуемого объекта, облучаемой ТИ от конвертора. Эта область имеет форму усеченного конуса с малым углом при образующей и, в первом приближении, ее можно считать цилиндром диаметром около 3,5 см.

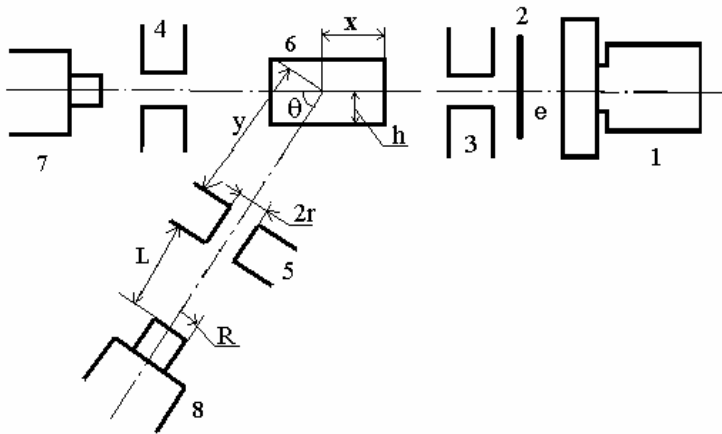


Рис.1. Схематическое изображение экспериментальной установки. 1 - линейный ускоритель электронов ЛУЭ-6, e - электронный пучок, 2 - e-γ конвертор, 3, 4 и 5 - коллиматоры пучка, прошедшего пучка и рассеянного излучения, соответственно, 6 - исследуемый макет, θ - угол регистрации рассеянного излучения, h - высота положения оси пучка над нижней гранью макета, x - глубина точки рассеяния от облучаемой поверхности макета, 7 и 8 - детекторы прямого пучка и рассеянного излучения, соответственно, 2r - диаметр коллиматора рассеянного излучения, L - расстояние между коллиматором и детектором, y - расстояние между выделенным элементом объема и коллиматором, R - радиус входного окна детектора.

выделенного элемента объема внутри макета. Предполагается, что информация о выходе рассеянного излучения из всех элементов объема макета может быть использована для создания компьютерной программы, воссоздающей 3-мерное распределение плотности вещества в обследуемом макете.

В качестве детекторов тормозного излучения были выбраны органические сцинтилляторы Д-76-00 и СДП-14 Ø40×20 мм с фотоумножителями в токовом режиме. Токовый сигнал ФЭУ далее преобразовывался в частоту импульсов, которая измерялась интенсивметром в аналоговой форме, либо частотомером в периодическом режиме. Такой тип детектора предпочтительней при работе на тормозном пучке ЛУЭ с двух точек зрения. Во-первых, геометрия сцинтилляционного кристалла и окружающего его специального кожуха устраняет зависимость показаний от энергии фотонов, а значит от формы спектра, т.е. сигналы пропорциональны энергии ТИ, выделяемой в кристалле за определенный интервал времени. Во-вторых, в режиме коротких ($\sim 2 \times 10^{-6}$ с) импульсов излучения, следующих с низкой частотой (50 Гц), энергия тормозного излучения, преобразуемая за импульс тока пучка в электрический сигнал, во много раз больше энергии одиночного фотона, который был бы зарегистрирован в спектрометрическом режиме. Например, при средних измеряемых мощностях дозы тормозного излучения 20 мкР/с, в детекторе выделяется около 500 МэВ за импульс, а максимальная энергия отдельного фотона составляет не более 5 МэВ для прямого пучка и порядка 1 МэВ для рассеянного.

СВЯЗЬ ВЫХОДА РАССЕЯННЫХ ФОТОНОВ С ПАРАМЕТРАМИ МАКЕТА

Выход ТИ, рассеянного некоторым веществом на заданный угол, может быть описан выражением:

$$S(x, h, \theta, \omega, E_e) = \int_0^{E_e} F(E_e, E) \cdot \frac{d\sigma(\theta, E)}{d\Omega} \cdot \omega \cdot N_e \cdot \exp(-\mu(E) \cdot x) \cdot \exp(-\mu(E_2(\theta, E)) \cdot \frac{h}{\sin \theta}) \cdot dE, \quad (1)$$

где E_e - энергия электронов, МэВ; $F(E_e, E)$ - нормированный спектр тормозного излучения, $\text{см}^{-2}\text{МэВ}^{-1}$; $\frac{d\sigma(\theta, E)}{d\Omega}$ - сечение комптоновского рассеяния гамма-квантов на угол θ при энергии E , барн/электрон; ω - телесный угол детектора рассеянных фотонов ($\omega \approx 3 \times 10^{-3}$ стеррад.); N_e - число электронов в выделенном элементе объема, h - высота положения оси пучка над нижней гранью макета, см; x - глубина точки рассеяния от облучаемой поверхности макета, см; $\mu(E)$ и $\mu(E_2(\theta, E))$ - линейные коэффициенты ослабления узкого пучка гамма-квантов в материале до и после комптоновского рассеяния. Значения величин ω , N_e и $E_2(\theta, E)$ [6] вычисляли по следующим формулам:

$$\omega = \pi \cdot R^2 / m^2, \quad (2)$$

Коллиматор прошедшего излучения 4 ограничивает поле зрения детектора прошедшего излучения 7 теми же размерами области макета. Коллиматор рассеянного излучения 5 образован диафрагмой из 5 см свинца диаметром 1,6 см, расположенной примерно на середине расстояния между макетом и детектором, и свинцовым стаканом для ослабления бокового рассеянного излучения, окружающим сцинтилляционный кристалл детектора 8 (на рис.1 не показан). Совместное действие коллиматоров сводится к тому, что детектор 8 регистрирует излучение, образующееся в небольшом выделенном элементе объема макета, ограниченном двумя коническими поверхностями, оси которых образуют угол 45° . Перемещая исследуемый макет в поперечном или продольном направлениях относительно оси пучка, мы можем, таким образом, получить зависимость интенсивности рассеянного на заданный угол (45°) гамма-излучения, от положения

$$N_e = \frac{N_A \cdot Z}{A} \cdot \rho \cdot v, \quad (3)$$

$$E_2(\theta, E) = \frac{E}{1 + \frac{E}{0,511} \cdot (1 - \cos \theta)}, \quad (4)$$

где m – расстояние от детектора рассеянного излучения до выделенного объема, см; v – объем, выделяемый системой коллиматоров, см³, R – радиус детектора рассеянного излучения, см; ρ и Z – плотность, г/см³, и число электронов молекулы материала образца, соответственно; N_A – число Авогадро, A – атомный (молекулярный) вес.

Функция $F(E_e, E)$ была рассчитана по программе "PENelope" [7] для используемой конструкции конвертора (0,27 мм W+ 20 мм Al) и энергии электронов $E_e = 6$ МэВ.

Заметим, что для макета, содержащего в направлении x слои разных материалов, формула (1) существенно усложняется, поскольку коэффициенты $\mu(E)$ и $\mu(E_2(\theta, E))$ из-за переменной плотности становятся функциями x . В данной работе мы ограничились рассмотрением случая однородного материала.

Для оценки величины объема v , выделяемого внутри макета системой коллиматоров, был исследован вопрос о координатном распределении эффективности регистрации цилиндрического детектора, снабженного длинным коллиматором, под которым мы понимаем систему из входной диафрагмы и апертуры детектора. При расчете не рассматривается вопрос о взаимодействии излучения со стенками коллиматора, а только геометрическая задача.

Пусть распределение эффективности регистрации детектора для точек, лежащих на оси z , перпендикулярной оси детектора и коллиматора, описывается функцией $F(z)$, пропорциональной площади детектора, которая видна из точки наблюдения z в исследуемой плоскости.

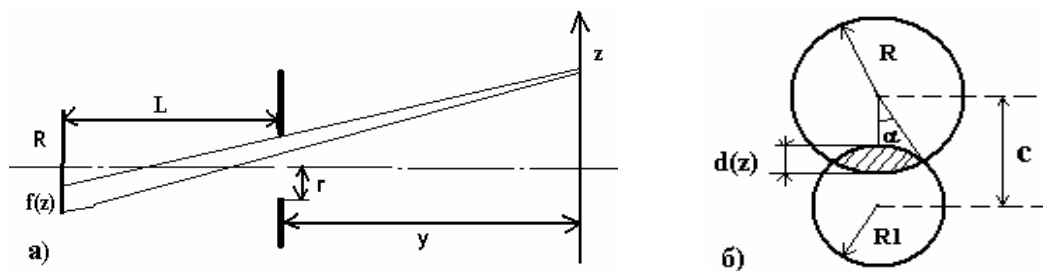


Рис.2. К расчету координатного разрешения коллиматора: а) вид сбоку; б) вид в плане плоскости детектора.

R и r – радиусы входных окна детектора и диафрагмы коллиматора, соответственно, z – ось, вдоль которой передвигается источник излучения, L – длина коллиматора, y – расстояние между осью z и коллиматором, $f(z)$ – часть площади детектора, которую видно из точки z , C – расстояние между центрами двух кругов, $d(z)$ – высота области перекрытия, $R1$ – радиус проекции входного отверстия коллиматора на плоскость передней стенки детектора, α – угол между перпендикуляром к общей хорде двух окружностей и радиусом, проведенным в точку пересечения.

На рис.2 приведены обозначения к расчету функции $F(z)$, где ось z лежит в исследуемой плоскости и является осью, вдоль которой передвигается источник излучения, а y – расстояние от этой плоскости до входа в коллиматор, см, L – длина коллиматора, см, R и r – радиусы детектора и входной диафрагмы коллиматора, соответственно, см, $f(z)$ – часть площади детектора, которую видно из точки z , C – расстояние между центрами двух кругов, $d(z)$ – высота области перекрытия.

Проекция входного отверстия коллиматора на плоскость передней стенки детектора представляет собой круг, радиус которого:

$$R1 = \frac{r \cdot (L + y)}{y}. \quad (5)$$

Очевидно, что при $R1 < R$ коллиматор будет ограничивать полную чувствительность детектора, а при $R1 > R$ поле зрения системы будет большим, в связи с чем представляет интерес получить выражение для $F(z)$ при $R1 \approx R$. Площадь перекрытия двух кругов — передней поверхности детектора и проекции входного отверстия коллиматора (см. рис. 2 (б)) может быть найдена из соотношения:

$$f(z) = R^2 \left[\frac{\pi}{90^\circ} \cdot \arccos(\alpha) - \sin(2 \cdot \arccos(\alpha)) \right], \quad (6)$$

где $\cos(\alpha)$ определяется по формуле:

$$\cos(\alpha) = 1 - \frac{d(z)}{2 \cdot R} \quad (7)$$

$$и \quad d(z) = R + r - \frac{L}{y} \cdot (z - r). \quad (8)$$

C является функцией координаты z и определяется из следующего соотношения:

$$C(z) = \frac{L}{y} \cdot z. \quad (9)$$

Функция $F(z)$ равна:

$$F(z) = \begin{cases} \pi \cdot R1^2, & \text{при } C(z) \leq R - R1 \\ 0, & \text{при } C(z) > R + R1 \\ f(z), & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (10)$$

Для оценки величины объема v , выделяемого коллимационной системой, находили эффективные значения размеров исследуемого элемента, т. е. высоту и радиус цилиндра. Значение эффективной высоты было оценено как удвоенное значение функции $F(z)$ на полувисоте, умноженное на $\sin(\theta)$. Значение радиуса цилиндра определялось радиусом коллиматора пучка 3 и составляло около $1,8$ см. Такая оценка дает только приблизительное значение эффективного объема области рассеяния.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальная проверка метода "просвечивание + рассеяние" производилась с использованием набора образцов в форме прямоугольного параллелепипеда $60 \times 100 \times 100$ мм из следующих материалов: целлюлоза, плексиглас, кирпич, алюминий и феррит. Измерения производились на ТИ линейного ускорителя электронов ЛУЭ-6. Со скоростью 3 мм/с образцы перемещались в поперечном относительно оси пучка направлении, перекрывая пучок на время порядка 30 с. В это время регистрировались мощности дозы рассеянного (детектор 8) и ослабленного прямого (детектор 7) излучений. Ось пучка пересекала образец на высоте $h = 1,5$ см от нижней его грани, через которую выходил поток рассеянного излучения. Результаты измерений эффекта рассеяния с оцененными экспериментальными погрешностями приведены в таблице (колонка 4). В колонке 5 приведено отношение интенсивностей рассеянного излучения и прямого пучка, которое, как видно из таблицы, составляет $(1 \pm 2) \times 10^{-6}$. Под значением фона понималось среднее значение показаний детектора 8 в отсутствие рассеивателя, которое в данном эксперименте составляло (17 ± 1) мкР/с при телесном угле детектора $\omega \approx 3 \times 10^{-3}$ стерад.

Таблица. Результаты измерения мощности дозы рассеянного тормозного излучения

Материал	Хим. Состав	Плотность, г/см ³	P_i , мкР/с	$\langle P_i \rangle, 10^{-6}$
Дерево	$C_6H_{10}O_5$	0,58	$3,79 \pm 1,6$	0,95
Плексиглас	$C_5H_8O_2$	1,2	$5,82 \pm 1,9$	1,46
Кирпич ¹	Бетон	1,7	$6,99 \pm 2,8$	1,75
Алюминий	Al	2,7	$7,23 \pm 1,3$	1,8
Феррит	Fe_2O_3	5,1	$9,57 \pm 1,2$	2,39

На рис.3 измеренные значения мощности дозы тормозного излучения, рассеянного образцом на угол 45° , приведены в зависимости от плотности материала образца. Здесь же сплошной линией показана расчетная зависимость выхода от плотности, соответствующая формуле (1). При оценке экспериментальной погрешности учитывалось среднеквадратичное отклонение регистрации фона, эффекта + фона и разброс положения установки образцов. Различие в абсолютном значении измеренного и расчетного выходов составляет около $1,5$ мкР/с (~ 30 % превышения расчетного значения над измеренным для случая алюминия) и может быть связано с приближенным методом оценки элемента объема образца, участвующего в измерении. Полученная при энергии электронов $E_e = 6$ МэВ зависимость выхода рассеянного излучения от плотности близка к линейной при малых значениях плотности материала рассеивателя.

Расчеты выхода по формуле (1) для разных значений параметров (энергии электронов E_e и высоты пучка над нижней гранью h) показывают (рис. 4), что при $E_e = 6$ МэВ в зависимости мощности дозы рассеянного излучения от плотности материала макета наблюдается широкий максимум около значений плотности $(2-3)$ г/см³.

¹ Состав силикатного кирпича близок к химическому составу бетона.

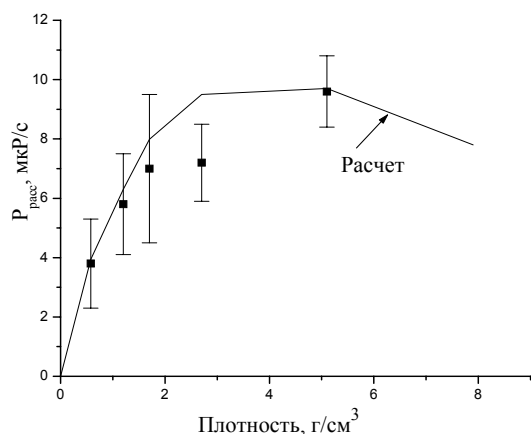


Рис.3. Мощность дозы рассеянного гамма-излучения. Точки – измеренные значения, кривая – расчет по формуле (1).

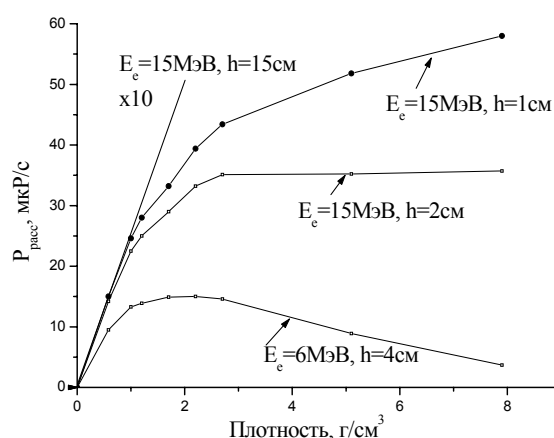


Рис.4. Мощности доз рассеянного гамма-излучения для 2^x энергий электронов и разных значений параметров h , рассчитанные по формуле (1).

Такая немонотонная (неоднозначная) зависимость выхода от плотности не позволяет однозначно определять плотность методом комптоновского рассеяния. Использование ТИ с большей граничной энергией ($E_c=15$ МэВ), во-первых, увеличивает выход рассеянного излучения за счет большей проникающей способности и, во-вторых, при небольших значениях высот h (~ 2 см) приводит к монотонной зависимости выхода от плотности материала макета.

ВЫВОДЫ

Для случая тонких слоев и повышенной ($E_c \geq 10$ МэВ) энергии излучения расчетная зависимость выхода рассеянных гамма-квантов от плотности материалов, в которых происходит рассеяние, имеет монотонную, близкую к пропорциональной, зависимость. Экспериментальные результаты в исследованном нами диапазоне значений плотностей подтверждают работоспособность методики определения плотности методом комптоновского рассеяния и хорошо согласуются с расчетными.

Для улучшения фоновых условий при измерениях на ускорителе электронов система коллиматоров должна быть тщательно сконструирована. Для достижения заданного координатного разрешения детектора, удаленного от точки рассеяния, необходимо использовать специальный длинный коллиматор, методика расчета которого приведена в работе.

Проведенные измерения в диапазоне плотностей макета (0,5-5,1) г/см³ позволили установить ограничения, присущие данному методу контроля плотности. Анализ полученных данных указывает на перспективность данной методики для контроля состава материалов с малой плотностью.

Дальнейший интерес представляет получение данных для проверки возможности восстановления трехмерного распределения плотности по всему объему макета. С этой целью предполагается измерение зависимости выхода от глубины положения элемента объема и исследования с неоднородными по плотности макетами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Geus George, et al., United State Patent, 6,195,413. Method and arrangement for detecting X-rays.
2. Bjorkholm Paul, United State Patent, 6,069,936. Material discrimination using single-energy X-ray imaging system.
3. Bertozzi William, United State Patent, 5,420,905. Detection of explosives and other materials using resonance fluorescence, resonance absorption with bremsstrahlung radiation.
4. Frank Andreas, et al., United State Patent, 6,445,765. X-ray detecting apparatus.
5. Alvarez Robert, et al., United State Patent, 4,029,963. X-ray spectral decomposition imaging system.
6. Руководство по радиационной защите для инженеров. Т. 1. Перев. с англ. под ред. Д.Л. Бродера и др. М.: Атомиздат, 1972, с. 424.
7. Baro J., Sempau J., Salvat F., Fernandez-Varea J. PENELOPE: an algorithm for Monte Carlo simulation of the penetration and energy loss of electrons and positrons in matter// Nucl. Instrum. Meth. – 1995.- В 100.- P. 31-46.

MATERIAL DENSITY MEASUREMENT WITH COMPTON SCATTERING METHOD USING**V.D. Afanasyev, S.A. Pismenetskiy, V.B. Pyshkin, V.G. Rudychev,****V.I. Teslenko-Ponomarenko, I.S. Timchenko***Radiation physical chair KNU, Kurchatov str., 31, Kharkiv, 61108*

The experimental test has been described for a possibility of determination of material density by Compton scattering method. The measurements were carried out with the scintillation detectors (dosimeters) and through the use of linac bremsstrahlung; as tested materials cellulose, plexiglass, concrete, Al and Fe were taken. Coordinate resolution was calculated of cylindrical detector equipped with long collimator, which was chosen to limit tested element of model volume. The dependence was achieved of dose rate of scattered at a scattering angle of 45° on scattering density. The difference between experimental and calculated results is less than 30%. The performed measurements have shown that such method may be used for determination of material density and revealing of light substances.

KEY WORDS: linac bremsstrahlung, element of model volume, Compton scattering, density determination.