

УДК 539.12.01

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДУАЛЬНЫХ ЭНЕРГИЙ ДЛЯ ДИСКРИМИНАЦИИ ТЯЖЕЛЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В.Д. Афанасьев, С.А. Письменецкий, В.Г. Рудычев, Д.В. Рудычев

Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина,

г. Харьков, пл.Свободы,4, Украина

E-mail:rud@pht.univer.kharkov.ua

Поступила в редакцию 12 июня 2005 г.

Повышение чувствительности метода дуальных энергий реализуется специальным формированием спектров тормозного излучения (ТИ). 1-й пучок ТИ формируется электронами с энергией $E_e < 4$ МэВ, энергия 2-го пучка не ограничена сверху. В обоих случаях используются фильтры. Разработана методика определения средней массовой толщины инспектируемых объектов. На маскирующем фоне можно выделить вложения из тяжелых материалов с массовой толщиной от 10 г/см^2 .

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дискриминация тяжелых элементов, тормозное излучение, дуальные энергии

Метод дуальных энергий основан на использовании двух спектров тормозного излучения (ТИ) для идентификации различных химических элементов в инспектируемых объектах [1]. Из-за разницы в поглощении гамма-квантов разной энергии в материалах с различным атомным номером возможна дискриминация этих материалов. Вследствие непрерывности спектров ТИ метод дуальных энергий обладает невысокой разрешающей способностью при детектировании отдельных материалов [2-3].

Целью работы является модификация метода дуальных энергий для повышения достоверности дискриминации материалов с большим атомным номером (Pb,U) на маскирующем фоне.

ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА

Известно, что в области энергий γ -квантов (1 – 2,5) МэВ доминирует комптоновское рассеяние. Массовые коэффициенты ослабления гамма-излучения различных элементов $\mu \sim Z/A$, т.е. слабо зависят от Z (см. рис. 1). Введем среднее значение массового коэффициента ослабления для набора материалов с различным элементным составом в виде

$$\mu_{av}(E) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mu_i(E), \quad (1)$$

где E - энергия γ -квантов, μ_i - массовые коэффициенты ослабления для различных материалов. На рис. 2 показаны относительные отклонения массовых коэффициентов ослабления некоторых материалов от среднего значения $[\mu_i(E) - \mu_{av}(E)] / \mu_{av}(E)$, причем $\mu_{av}(E)$ рассчитывалось усреднением μ_i для 50 различных элементов и материалов, исключая элементы с большим Z . Рис. 1 и 2 иллюстрируют тот факт, что ослабление узкого пучка γ -квантов при прохождении через объект, слабо зависит от элементного состава, если энергии γ -квантов находятся в интервале (1 – 2,5) МэВ. За границами этого интервала ослабление γ -квантов сильно зависит от наличия в поглотителе веществ с большим Z .

Следовательно, для дискриминации тяжелых элементов необходимо формирование двух пучков ТИ: 1 – низкоэнергетического, с ограничением энергии γ -квантов снизу и сверху; 2 – высокоэнергетического, с ограничением энергии снизу. Чем выше энергия γ -квантов, тем больше их ослабление материалами с большим Z , поэтому ограничения по энергии на пучок 2 сверху нет. Ограничение по энергии снизу пучка 2 желательно, т.к. при малых энергиях коэффициенты ослабления также сильно зависят от материала. Формирование спектров ТИ с заданными характеристиками может быть достигнуто при помощи фильтров.

Как и в работе [3], определим прозрачности объектов для пучков ТИ 1 и 2, как отношение мощности дозы после прохождения объекта $D_i(t \cdot \mu_{mat})$ к мощности дозы излучения до объекта $D_i(0 \cdot \mu_{mat})$.

$$R_i(t \cdot \mu_{mat}) = D_i(t \cdot \mu_{mat}) / D_i(0 \cdot \mu_{mat}), \quad (2)$$

где t - массовая толщина объекта в г/см^2 ; μ_{mat} - массовый коэффициент ослабления материала объекта в $\text{см}^2/\text{г}$; $i=1$ и 2. Соотношение для мощности дозы имеет вид:

$$D_i(t \cdot \mu_{mat}) = \int_{E_{min}^i}^{E_{max}^i} E \cdot Sp_i(E) \mu_{en}^d(E) e^{-\mu_{mat}(E)t} dE, \quad (3)$$

где $Sp_i(E)$ - распределение по энергии i -го пучка; E_{min}^i , E_{max}^i - минимальная и максимальная энергия i -го

пучка; $\mu_{en}^d(E)$ -полный массовый коэффициент поглощения энергии γ -квантов в материале детектора (полагаем детектор тонким); $\mu_{mat}(E)$ определяется соотношением

$$\mu_{mat}(E) = \sum_j w_j \mu_j(E), \quad (4)$$

где w_j - весовая доля j - й составляющей материала объекта. Дискриминационный эффект определим как

$$DE(t \cdot \mu_{mat}) = [R_2(t \cdot \mu_{mat}) - R_1(t \cdot \mu_{mat})] / R_1(t \cdot \mu_{mat}). \quad (5)$$

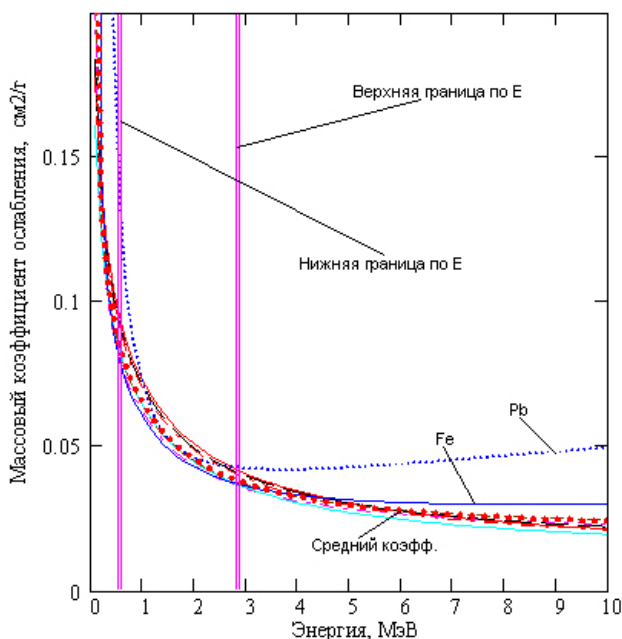


Рис.1. Зависимость массовых коэффициентов от энергии γ -квантов

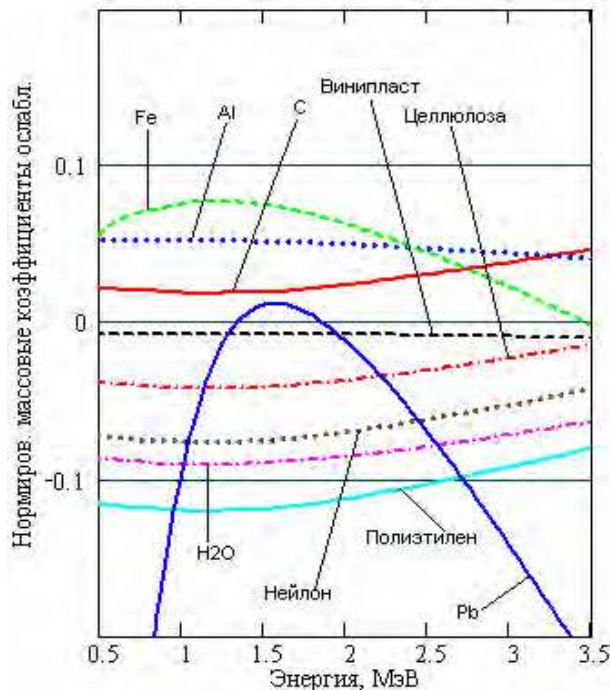


Рис.2. Отклонение массовых коэффициентов от среднего.

Изменение величины DE дает качественное представление о наличии вложений из тяжелых материалов. Количественные характеристики объекта получим, используя введенный ранее средний массовый коэффициент ослабления μ_{av} . Пусть R_1^{exp} - экспериментально измеренная прозрачность объекта при облучении пучком 1. Расчетное значение t_c массовой толщины объекта получим численными методами из соотношения

$$R_1(t_c \cdot \mu_{av}) = R_1^{exp}. \quad (6)$$

Полагаем, что определенная из соотношения (6), величина t_c включает в себя некоторую величину t_h - массовую толщину вложений и материала с большим Z . Зная экспериментальное значение прозрачности объекта R_2^{exp} для пучка 2 определим численно величину t_h из соотношения:

$$R_2[(t_c - t_h) \cdot \mu_{av} + t_h \cdot \mu_h] = R_2^{exp}, \quad (7)$$

где μ_h -полный массовый коэффициент ослабления предлагаемого вложения с большим Z (например, для Pb, U и т.д.).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Расчет спектрально-угловых характеристик ТИ проводился при помощи пакета PENELOPE [4]. Для пучка 1 взята начальная энергия электронов $E_e = 3,5$ МэВ, конвертер из W толщиной 0,3 мм и фильтр из Pb толщиной 1 см. Пучок 2: $E_e = 10$ МэВ, конвертер из W толщиной 0,5 мм, фильтр из углерода (графит) толщиной 10 см и Pb толщиной 2 мм. Свинец поглощает низкоэнергетические γ -кванты с энергией до 200 кэВ. На рис. 3 показаны спектральные распределения для пучков 1 и 2.

Для иллюстрации возможностей методики были взяты макеты 2-х разных составов: макет 1 состоял из равных весовых частей $w_i = 1/4$: Al, целлюлозы, воды, полиэтилена, и макет 2, в котором содержание железа $w_{Fe} = 1/2$, а $w_{Al} = w_{цел} = w_{H2O} = w_{Pol} = 1/8$. В качестве вложения материала с большим Z выбран Pb с толщинами 10, 20, 30 и 40 $г/см^2$.

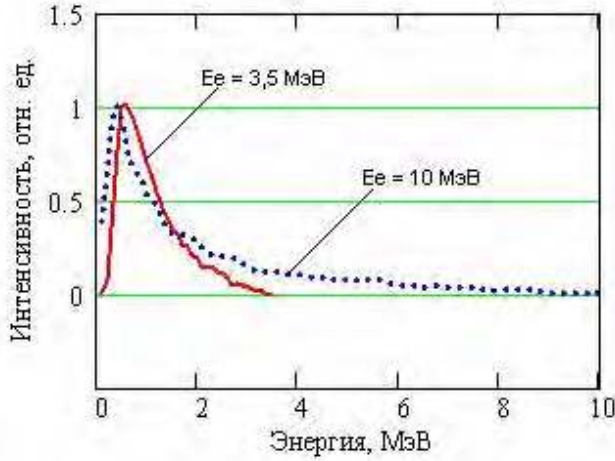


Рис.3. Спектральные характеристики ТИ пучков 1 и 2.

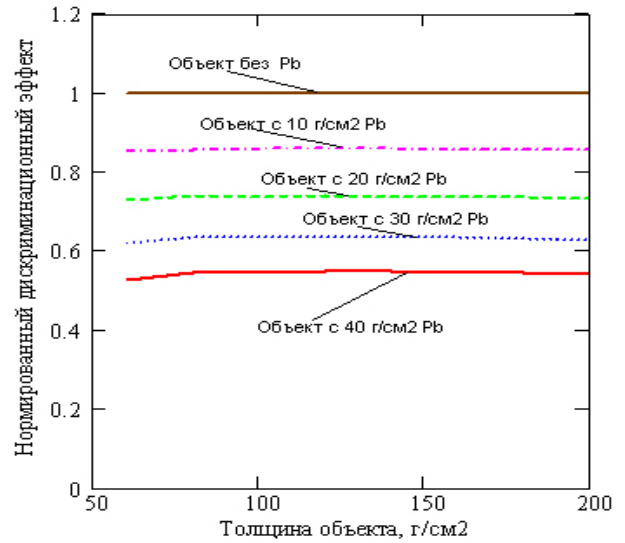
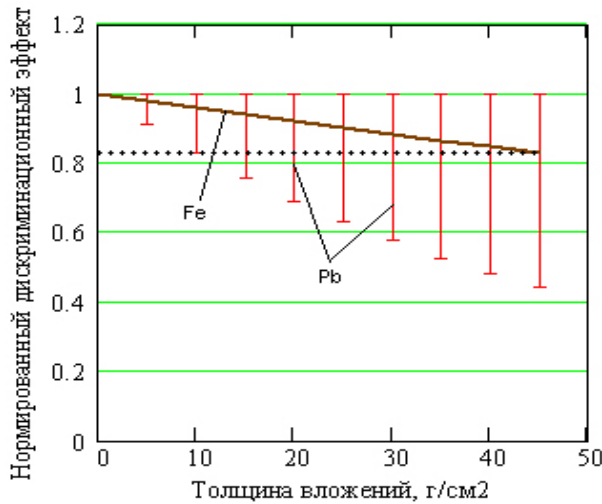
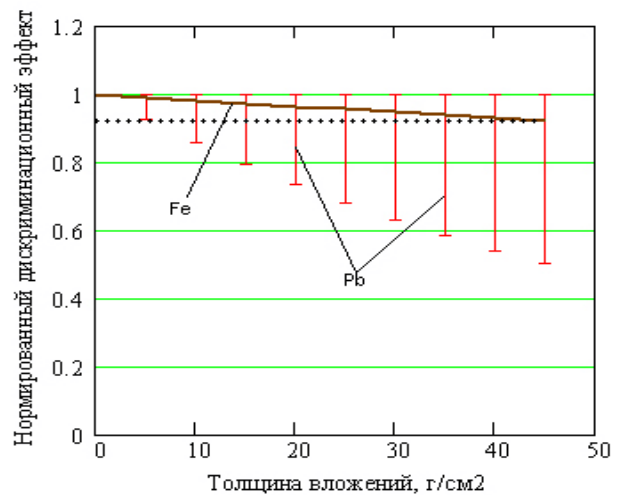


Рис.4. Зависимость дискриминационного эффекта от толщины объекта.

На рис. 4 представлена зависимость величины отношения дискриминационного эффекта для макета 2, содержащего вложения из Pb к дискриминационному эффекту без вложений. Из приведенных данных видно, что уже при толщине вложений 10 $г/см^2$ во всем диапазоне толщин объекта (60-200 $г/см^2$) дискриминационный эффект от Pb превышает 10%. Величины DE для макета 1 несколько превышают DE макета 2 при практически такой же зависимости от t .



а) в макете 1



б) в макете 2

На рис. 5 а,б представлены зависимости отношений дискриминационных эффектов от толщины вложений из Pb и Fe для макетов 1 и 2 толщиной 200 $г/см^2$. Эти рисунки иллюстрируют разницу в дискриминационных эффектах для объектов содержащих вложения из материалов с большим Z и при отсутствии таких вложений. Из рис. 5 а видно, что для макета 1 дискриминационный эффект от вложения 45 $г/см^2$ железа эквивалентен вложению 10 $г/см^2$ Pb. Для макета 2, 45 $г/см^2$ Fe эквивалентны 5 $г/см^2$ Pb. Таким образом, для объектов с большим содержанием железа, в которых, как правило, осуществляется провоз несанкционированных вложений, с высокой достоверностью можно выделить вложения материалов с большим Z .

На рис. 6 а,б представлены зависимости отклонения расчетной толщины макетов t_c от реальной, для макетов 1 и 2, содержащих вложения Pb различной толщины. Приведенные данные показывают, что измерения при помощи пучка 1 позволяют с точностью несколько процентов определить массовую толщину макета независимо от состава материалов в нем. Для макета 2 с большим содержанием железа, с точностью, лучшей

чем 50%, во всем диапазоне толщин объекта определяется толщина вложения из Pb, начиная с толщин 20 г/см². Для макета 1 результат определения толщины вложений из Pb более неопределенный. Отметим, что наличие вложений и в 1-м и во 2-м макетах хорошо будет видно по дискриминационному эффекту (см. рис.4,5).

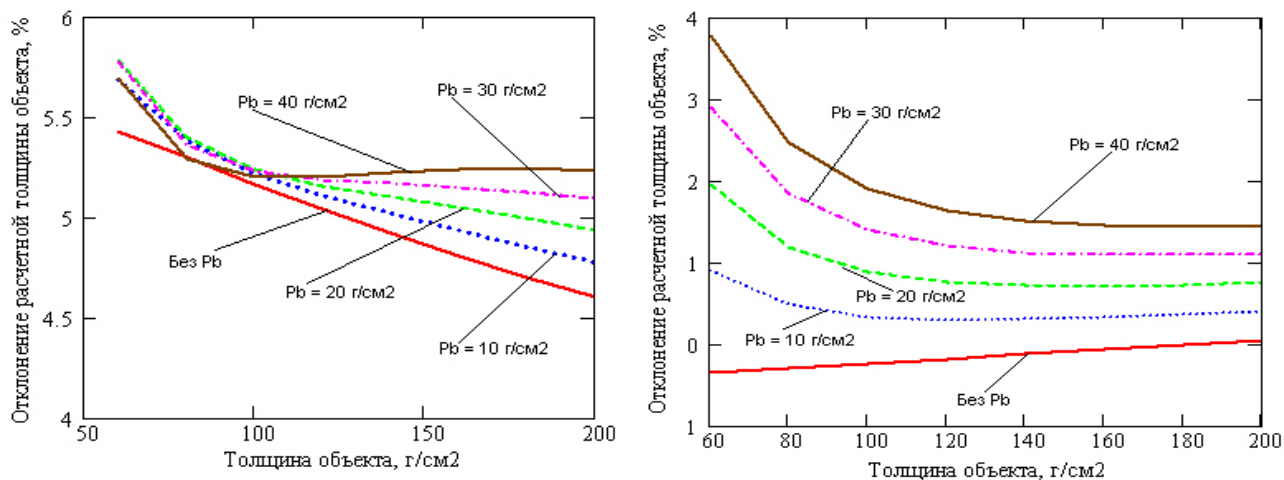


Рис.6. Отклонение расчетной толщины макетов

а) макет 1

б) макет 2

На рис.7 а,б представлены рассчитанные, с использованием соотношения (7), зависимости отклонения толщины вложений из Pb от реальных, для макетов 1 и 2, от толщины объекта в котором они находятся.

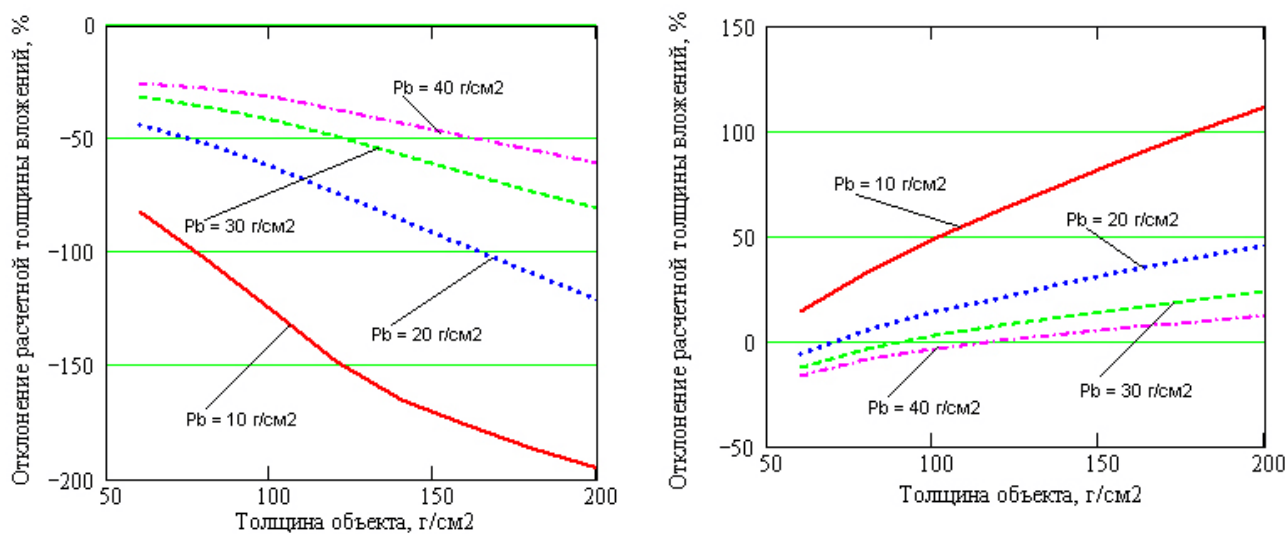


Рис.7. Отклонение расчетной толщины вложений

а) в материале 1

б) в материале 2.

ВЫВОДЫ

Формирование спектров ТИ с ограничением по энергии снизу и сверху для низкоэнергетического пучка и снизу для высокоэнергетического пучка в методе дуальных энергий позволяет:

- идентифицировать вложения материалов с большим Z на маскирующем фоне по дискриминационному эффекту;
- определить с достаточно высокой точностью (несколько процентов) массовую толщину инспектируемых объектов;
- в ряде случаев с приемлемой точностью определить толщину вложений из материалов с большим атомным номером.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. W. Neale, J. Rushbrooke, R. Ansoorge Material identification using X-rays // US Patent, 5,524,133. - 1996.
2. V.L. Novikov, S.A. Ogorodnikov, V.I. Petrunin Dual energy method of material recognition in high energy introscopy system. // Вопросы атомной науки и техники, сер.:ЯФИ. -1999. -Т.35. -№4. -С. 93-95

3. С.А. Огородников, В.И. Петрунин К вопросу чувствительности дискриминации материалов методом дуальной энергии в диапазоне 4-10 МэВ //Сб. докладов 10 Международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. -С.-Петербург. -2001. -С.154-160.
4. PENELOPE 2003, PACKAGE-ID: NEA-1525/008.

USING OF DUAL ENERGY METHOD FOR HIGH-Z ISOTOPES DISCRIMINATION

V.D. Afanasev, S.A. Pismenetskiy, V.G. Rudychev, D.V. Rudychev

V.N. Karazin Kharkov National University

61077, Kharkiv, sq. Svobody,4, Ukraine

An increase of sensitivity of dual energy method has been realized by the special forming of spectra of bremsstrahlung radiation (BR). The 1st BR beam is formed by electrons with energy of $E_e < 4$ MeV, the energy of 2nd beam is not limited from above. In both cases the filters are used. The method of determination of average mass thickness of the inspected objects is developed. On a masking background it is possible to select the enclosure of heavy materials with a mass thickness about 10 g/sm^2 .

KEY WORDS: high-Z isotopes discrimination, bremsstrahlung, dual energy.