

УДК 519.6

ФОРМИРОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 10 МЭВ

В.Т. Лазурик, С.А. Письменецкий, В.Г. Рудычев, Д.В. Рудычев

Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина

г. Харьков, пл. Свободы, 4, Украина, 61022

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

Поступила в редакцию 21 февраля 2011 г.

Предложены подходы для сравнения характеристик тормозного излучения (ТИ) для области энергий, в которой доминирует комптоновское рассеяние. Определены параметры конвертера, создающего максимальный выход ТИ в области энергий электронов 3-5 МэВ. Исследованы особенности тормозного излучения при падении электронов на конвертеры из различных материалов под разными углами при энергии 10 МэВ. Показано, что средняя энергия ТИ существенно зависит от угла падения электронов на конвертер и материала конвертера. Определены углы падения электронов и материал конвертера, при которых спектральное распределение ТИ от электронов с энергией 10 МэВ подобно распределению от электронов с энергией 4 МэВ при нормальном падении. Использование установленных особенностей генерации ТИ позволит реализовать метод дуальных энергий (как 3-х и более энергий) для радиографической инспекции на одном ускорителе электронов с энергией $E_e = 8-10$ МэВ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: тормозное излучение, спектры, материал конвертера, углы падения электронов, критерии адекватности, дуальные энергии.

FORMING OF THE DIFFERENT SPECTRAL CHARACTERISTICS OF BREMSSTRAHLUNG RADIATION FROM 10 MEV ELECTRONS

V.T. Lazurik, S.A. Pismenetskiy, V.G. Rudychev, D.V. Rudychev

V.N. Karazin Kharkov National University

4, Svoboda sq., 61022, Kharkiv, Ukraine

Approach is proposed for the comparison of characteristics of bremsstrahlung radiation (BR) in the energy range, where Compton scattering is dominant. Parameters of the converter, which provides maximum of BR in the 3-5 MeV electron energy range, are determined. Some particularities were investigated of BR under the different coincidence angle of electrons and different converter material at $E=10$ MeV. It was shown the average energy of BR depends sufficiently both a coincidence angle of electrons and the material of the converter. Both the angles and converter material have been found when the BR spectrum from 10 MeV electrons is the similar as 4 MeV spectrum under normal coincidence of electrons. The use of the particularities investigated of BR makes it possible an achievement of dual energy method of radiography on one electron accelerator to 8-10 MeV energy.

KEY WORDS: bremsstrahlung radiation, spectra, converter material, coincidence angles of electrons, criteria of adequateness, dual energy.

ФОРМУВАННЯ РІЗНИХ СПЕКТРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЛЬМІВНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ЕЛЕКТРОНАМИ З ЕНЕРГІЄЮ 10 МЕВ

В.Т. Лазурик, С.О. Письменецкий, В.Г. Рудычев, Д.В. Рудычев

Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна

м. Харків, пл. Свободи, 4, Україна, 61022

Запропоновано підходи для порівняння характеристик гальмового випромінювання (ГВ) для області енергій, в якій домінує комптонівське розсіяння. Визначено параметри конвертора, який створює найбільший вихід ГВ в діапазоні енергій 3-5 МеВ. Досліджено особливості гальмового випромінювання при падінні електронів на конвертори з різних матеріалів під різними кутами при енергії 10 МеВ. Показано, що середня енергія ГВ істотно залежить від кута падіння електронів на конвертор і матеріалу конвертора. Визначені кути падіння електронів і матеріал конвертора, при яких спектральний розподіл ГВ від електронів з енергією 10 МеВ є подібним до розподілу від електронів з енергією 4 МеВ при нормальному падінні. Використання встановлених особливостей генерації ГВ дозволить реалізувати метод дуальних енергій (як і 3-х і більше енергій) для радіографічної інспекції на одному прискорювачі електронів з енергією $E_e = 8-10$ МеВ.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: гальмове випромінювання, спектри, матеріал конвертора, кути падіння електронів, критерії адекватності, дуальні енергії.

Одной из проблем борьбы с несанкционированными перевозками, возникшей в связи с соглашением о нераспространении ядерных материалов и материалов потенциального терроризма, стало выявление методами неразрушающего контроля возможных вложений внутри крупногабаритных транспортных контейнеров.

Перспективным методом определения элементного состава содержимого закрытого контейнера является метод дуальных энергий. Для его реализации при инспекции крупногабаритных грузов предложено использовать два пучка тормозного излучения с максимальными энергиями $E_L = 3-5$ МэВ и $E_H = 8-10$ МэВ [1]. При взаимодействии первого пучка энергией E_L с веществом доминирует комптон-эффект, а второго - образование электрон-позитронных пар. Т.о. возникает возможность выделить вещества с определенным атомным номером Z .

Выполненные исследования [2], показали, что качество получаемого изображения инспектируемого объекта достаточно высокое. Однако было отмечено, что определение конкретного элемента (действительного значения Z) остается принципиально неоднозначным. В работе [3] показано, что увеличение числа пучков тормозного излучения (ТИ), например до 3-х, при граничных энергиях $E = 3, 6$ и 9 МэВ позволит уменьшить неоднозначность.

Для реализации метода дуальных или более энергий традиционно использовали 2 ускорителя (3 ускорителя) электронов. Предлагались также модификации элементов и систем ускорителя, обеспечивающие двухпучковый режим.

Целью настоящей работы является определение материалов конвертера и углов испускания электронами с энергией 10 МэВ пучка ТИ, подобного по спектральным характеристикам тормозному излучению, генерируемому электронами с энергией 4 МэВ, для последующего использования в методике инспекции крупногабаритных объектов методом дуальных энергий.

КРИТЕРИИ ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКОВ ТИ

Ослабление фотонного излучения в веществе, как известно, происходит, в основном, вследствие трех физических процессов, а именно, фотоэффекта, комптоновского рассеяния и образования электрон-позитронных пар. Из таблиц коэффициентов ослабления (например, [4]) для каждого элемента легко можно выделить область энергий, где главный вклад вносит комптоновское рассеяние. В этой области, очевидно, ослабление фотонного излучения мало зависит от атомного номера Z химического элемента, а определяется концентрацией электронов в единице объема. Выше этой области ослабление, главным образом, определяется процессом образования пар e^-e^+ , который, напротив, весьма чувствителен к величине Z ($\sigma_{\text{pair}} \approx Z^2$). Последнее обстоятельство указывает область энергии фотонов, в которой ослабление излучения при прохождении некоторой толщины вещества будет зависеть как от самой толщины, так и от атомного номера Z .

Следует принять во внимание, что диапазон энергий $\Delta E_C = E_p - E_{ph}$, в котором доминирует комптон-эффект, с ростом Z существенно сужается.

Можно ввести среднее значение массового коэффициента ослабления узкого пучка гамма-квантов, зависящее от энергии, для ряда химических элементов: C, Al, Ca, Fe, As, Mo, Sn, Ba, W, Pb, U в интервале Z от 6 до 92:

$$\mu_{av}(E) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mu_{tot}^{(i)}(E) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\mu_{ph}^{(i)}(E) + \mu_C^{(i)}(E) + \mu_P^{(i)}(E)], \quad (1)$$

и относительное среднее квадратичное отклонение массовых коэффициентов ослабления от среднего значения (1):

$$\delta_{av}(E) = \frac{1}{\mu_{av}(E) \cdot N} \sqrt{\sum_{i=1}^N [\mu_{av}(E) - \mu_{tot}^{(i)}(E)]^2}, \quad (2)$$

где N —число химических элементов, коэффициенты ослабления которых усредняются. Зависимость (2) показана на рис.1. Как видно, значения относительного среднего квадратичного отклонения коэффициента ослабления в интервале энергий от $E_{av}^{\min} = 1$ МэВ до $E_{av}^{\max} = 3,4$ МэВ не превышают 3% ($\delta_{av} < 3\%$) практически для всех элементов.

В качестве критерия эффективности применения ТИ в качестве низкоэнергетического в методе дуальных энергий (назовем его «комптоновским») можно взять отношение R_L числа гамма-квантов N_L с энергиями, принадлежащими интервалу $(E_{av}^{\min}, E_{av}^{\max})$, к полному числу гамма-квантов в интервале $(0, E_L)$, выраженное следующим соотношением:

$$R_L = \frac{\int_{E_{av}^{\min}}^{E_{av}^{\max}} N_L(E) dE}{\int_0^{E_L} N_L(E) dE}, \quad (3)$$

где $N_L(E)$ - плотность потока гамма-квантов, создаваемого электронами с энергией E_L . Значение величины R_L согласно (3) определяется формой спектра $N_L(E)$, создаваемого на конвертере определенной конструкции электронами с энергией E_L . Максимум R_L соответствует оптимальному формированию пучка низкоэнергетического ТИ, т.е. формированию такого спектра, у которого наибольшая часть фотонов попадает в интервал $(E_{av}^{\min}, E_{av}^{\max})$.

Важной характеристикой процесса образования ТИ является полное количество γ -квантов N_γ , генерируемое N_e электронами, т.е. выход ТИ или число γ -квантов на один электрон, которое можно выразить соотношением:

$$Y_{\text{tot}} = N_\gamma / N_e. \quad (4a)$$

Так же, как для соотношения (3), важной характеристикой спектра ТИ является отношение количества γ -

квантов N_{\min}^{\max} в энергетическом интервале $E_{av}^{\min} < E < E_{av}^{\max}$ к числу электронов N_e :

$$Y_{\min}^{\max} = N_{\min}^{\max} / N_e . \tag{46}$$

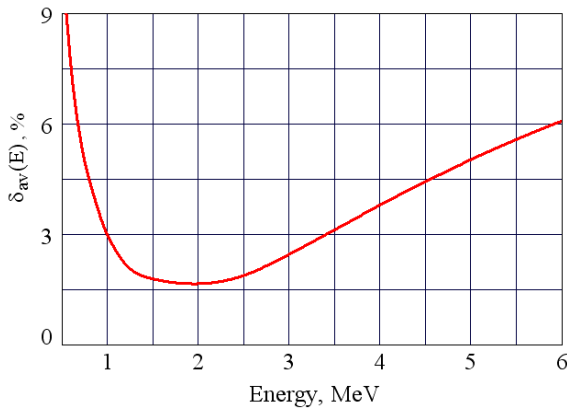


Рис.1. Относительное среднее квадратичное отклонение коэффициентов ослабления от среднего значения для выборки из 11 нуклидов (C, Al, Ca, Fe, As, Mo, Sn, Ba, W, Pb, U).

Отметим также, что важной характеристикой ТИ является средняя энергия фотонов как по всему спектру, так и на отдельных интервалах энергий.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКА НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ТИ

Исследование формирования низкоэнергетического пучка ТИ электронами с энергией 4 МэВ было выполнено для конвертера из вольфрама. Предполагалось, что пучок электронов нормально падает на поверхность конвертера, при этом поперечные размеры конвертера существенно больше диаметра пучка электронов. Для расчета характеристик ТИ использовался программный пакет PENELOPE [4].

Были рассчитаны выходы ТИ в переднюю полусферу и критериальные отношения R_L , Y_{tot} и Y_{\min}^{\max} в зависимости от толщины конвертера, приведенные на рис.2. Аналогично критерию в виде мощности дозы ТИ [5], отношения Y_{tot} и Y_{\min}^{\max} вначале растут с увеличением толщины конвертера, а после достижения максимума вблизи $t=0,6$ мм спадают. Причем в зависимости $Y_{tot}(t)$ максимум четко выражен, а поведение $Y_{\min}^{\max}(t)$ имеет более плавный характер. Форма кривой для $Y_{tot}(t)$ подобна зависимости мощности дозы от толщины конвертера, приведенной в [6].

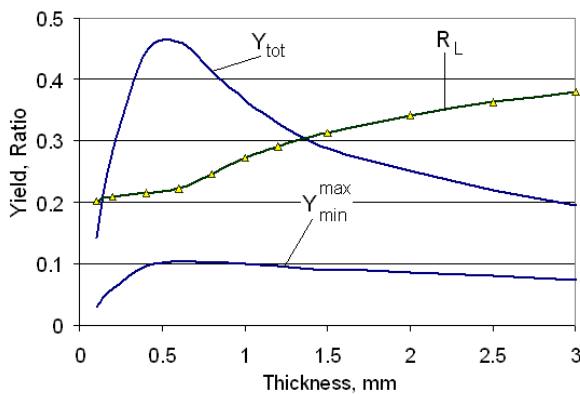


Рис.2. Критериальные отношения (3, 4а, 4б) в зависимости от толщины конвертера из вольфрама при энергии электронов 4 МэВ.

Величина \bar{E}_{tot} с ростом t увеличивается, т.к. уменьшается число низкоэнергетических гамма-квантов. \bar{E}_{Δ} вначале уменьшается, т.к. уменьшается средняя энергия электронов в толщине конвертера. При дальнейшем увеличении толщины \bar{E}_{Δ} практически не меняется. На рис.4 приведены спектры ТИ от конвертеров разной толщины, излучаемого в переднюю полусферу. Как видно, с ростом толщины спектр ТИ

Аналогично сказанному относительно критерия (3), можно утверждать, что оптимальному для применения в дуальном методе формированию пучка высокоэнергетического тормозного излучения (энергия электронов E_H), соответствует спектральное распределение $N_H(E)$, в котором доля высокоэнергетических гамма-квантов (из диапазона энергий образования пар) максимальна. Отношение доли гамма-квантов с энергиями в интервале $E_{av}^{\max} < E < E_H$ к полному числу γ -квантов:

$$R_H = \int_{E_{av}^{\max}}^{E_H} N_H(E)dE / \int_0^{E_H} N_H(E)dE , \tag{5}$$

где $N_H(E)$ - плотность потока гамма-квантов, создаваемого электронами с энергией E_H , выполняет роль критерия оптимизации высокоэнергетического пучка ТИ, подобного (3) для низкоэнергетического.

При увеличении толщины конвертера относительное количество гамма-квантов R_L на интервале энергий $E_{av}^{\min} < E < E_{av}^{\max}$ растет. Это связано с тем, что в выбранном материале конвертера ($Z=74$) сильнее поглощаются низкоэнергетические гамма-кванты, что равнозначно уменьшению E_{av}^{\min} и расширению интервала $(E_{av}^{\min}, E_{av}^{\max})$. Важной характеристикой ТИ является средняя энергия как по всему спектру \bar{E}_{tot} , так и средняя \bar{E}_{Δ} по интервалу $E_{av}^{\min} < E < E_{av}^{\max}$ для излучения, распространяющегося вперед в узком конусе ($0 \pm 6^\circ$). Зависимости \bar{E}_{tot} и \bar{E}_{Δ} от толщины конвертера приведены на рис.3.

обогащается высокоэнергетическими квантами, что соответствует росту средней энергии \bar{E}_{tot} .

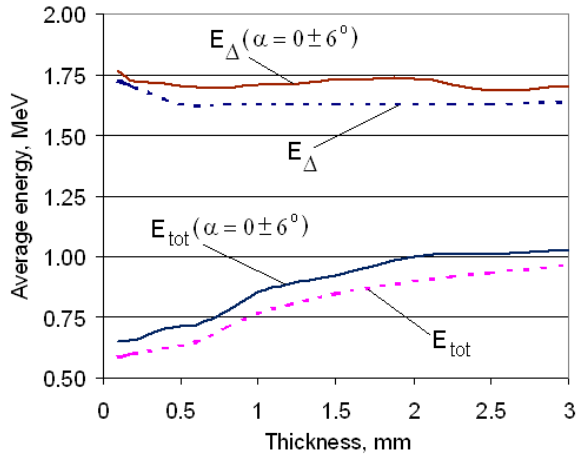


Рис.3. Средние энергии спектров ТИ для излучения, испускаемого в узком $0\pm 6^\circ$ телесном угле.

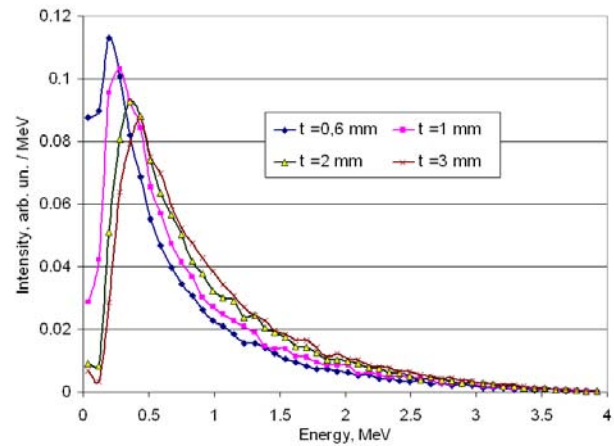


Рис.4. Спектры ТИ от конвертеров разной толщины, излучаемого в переднюю полусферу.

Сравнение расчетных характеристик спектров ТИ показывает, что оптимальным конвертером низкоэнергетичного излучения является такой, который обеспечивает наибольший выход гамма-квантов в диапазоне доминирования комптон-эффекта и, соответственно, наибольшие значения R_L и Y_{min}^{max} . В то же время, для реализации метода дуальных энергий наилучшими условиями было бы приблизительное равенство интенсивностей низкоэнергетического и высокоэнергетического пучков.

ФОРМИРОВАНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ТИ

Характеристики ТИ, образующегося при взаимодействии электронов с энергией 10 МэВ с конвертерами из разных материалов, были получены аналогично описанному выше. На рис.5 приведены угловые распределения ТИ, создаваемого электронами на конвертерах разной толщины из вольфрама.

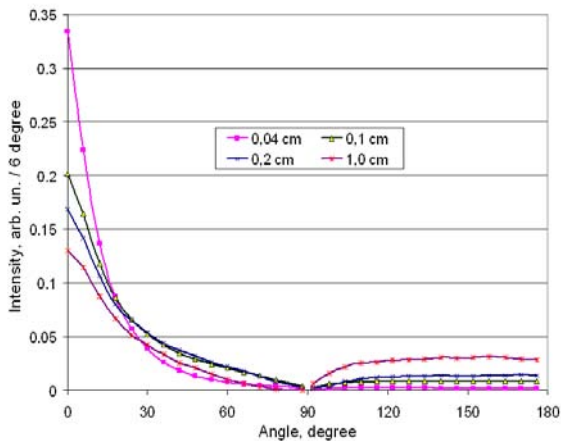


Рис.5. Угловые распределения ТИ, создаваемого электронами с энергией 10 МэВ на конвертерах разной толщины из W.

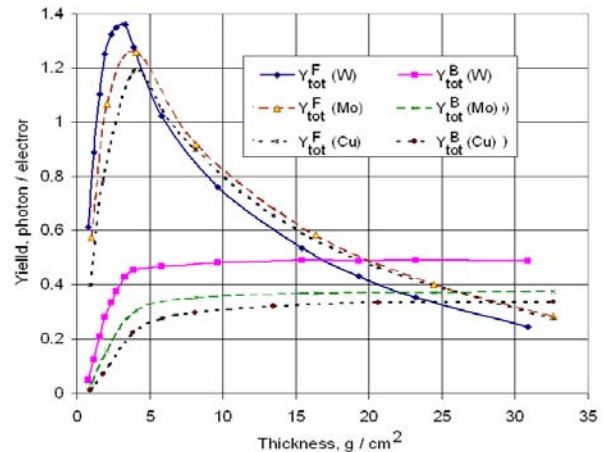


Рис.6. Выход гамма-квантов в переднюю полусферу $Y_{tot}^F(t)$ и заднюю полусферу $Y_{tot}^B(t)$ в зависимости от толщины для конвертеров из W, Mo и Cu.

Приведенные данные иллюстрируют сильную зависимость выхода ТИ от угла вылета фотонов относительно направления движения электронов. При этом выход ТИ в заднюю полусферу достаточно велик. Вид угловых распределений для конвертеров с меньшим атомным номером аналогичен рис.5.

Результаты расчетов полных выходов гамма-квантов в переднюю полусферу $Y_{tot}^F(t)$ и в заднюю полусферу $Y_{tot}^B(t)$ в зависимости от толщины для конвертеров из вольфрама, молибдена и меди представлены на рис.6. Так же, как для низкоэнергетического пучка, выходы ТИ с ростом толщины конвертера растут, достигают максимума, а затем спадают. Особенностью процесса образования ТИ при $E_e=10$ МэВ является тот факт, что начиная с некоторой толщины конвертеров выход ТИ вперед больше у конвертеров с меньшим атомным номером (Mo, Cu). Это связано с сильным поглощением вольфрамом гамма-квантов с низкими энергиями. При большой толщине конвертера (~ 20 г/см²) выходы вперед для Mo и Cu практически одинаковы,

см. рис.6. Рассчитаны средние энергии ТИ в зависимости от угла вылета с шагом 6° для конвертеров из вольфрама различной толщины, см. рис.7. Из данных рис.7б видно, что средняя энергия ТИ под углом $\sim 160^\circ$ и малой толщине конвертера (0,01-0,02)см, меньше 0,2 МэВ. Максимальная средняя энергия ТИ, излучаемого вперед под малыми углами увеличивается с ростом толщины конвертера от $\sim 1,3$ МэВ до $\sim 2,5$ МэВ при $t=1,0$ см (рис.7а). При больших толщинах вольфрама (0,5см и больше) средняя энергия ТИ под углом, близким к 90° , падает из-за увеличения поглощения фотонов в толще материала конвертера (рис.7а).

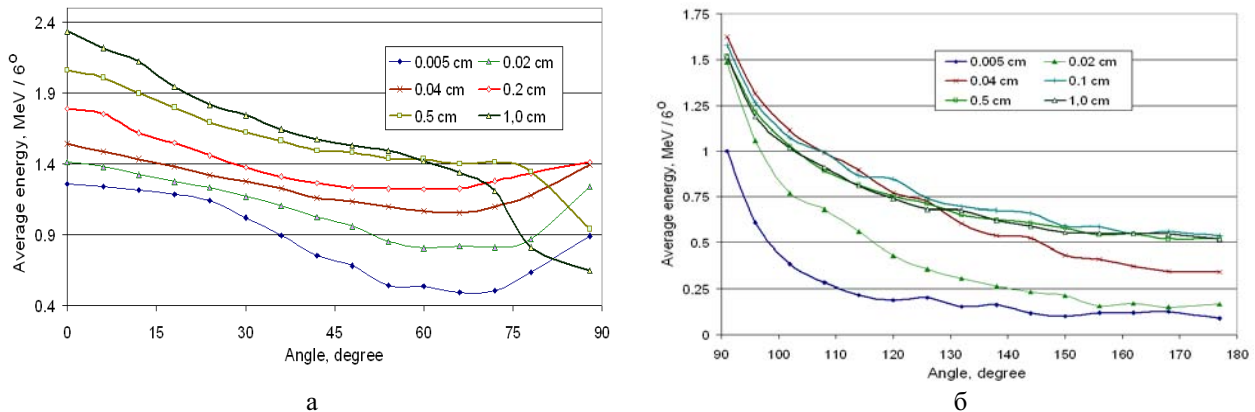


Рис.7. Средние энергии ТИ в зависимости от угла вылета для W.
а – для углов $0-90^\circ$; б - для углов $90^\circ-180^\circ$

Для ТИ, излучаемого в заднюю полусферу, с ростом угла наблюдается снижение средней энергии для всех толщин конвертеров. При этом средняя энергия минимальна при углах, близких к 180° , и минимальной толщине конвертера. Рост толщины конвертера приводит в начале к увеличению средней энергии, а при толщине $>0,1$ см практически перестает зависеть от толщины.

Для конвертеров с меньшим атомным номером вид зависимости средней энергии от угла при разной толщине (рис.8) аналогичен зависимостям для конвертера из вольфрама. Сравнение энергетических характеристик ТИ для конвертеров из разных материалов при одинаковой массовой толщине, эквивалентной 2 мм W, показывает, что средняя энергия ТИ на всем угловом интервале уменьшается при уменьшении атомного номера материала конвертера.

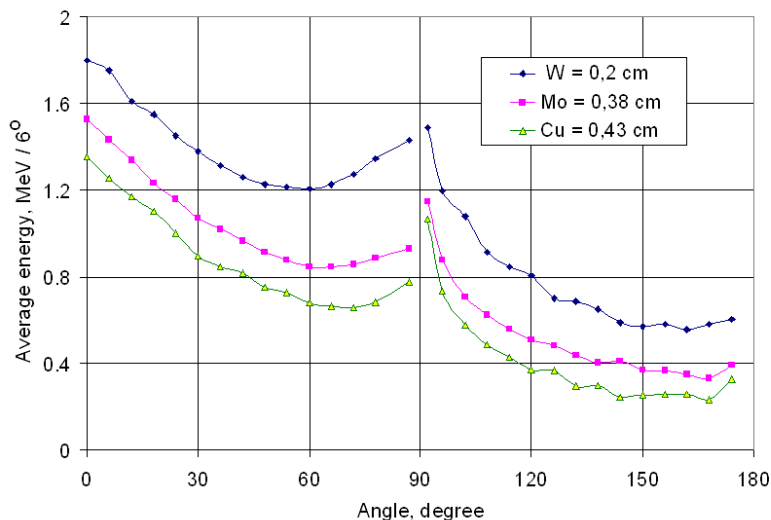


Рис.8. Средние энергии ТИ в зависимости от угла вылета для W, Mo Cu .

Отметим, что выходы $ТИ^B$ (в заднюю полусферу, рис.6) также уменьшаются с уменьшением атомного номера материала конвертера. Выход же $ТИ^F$ (в переднюю полусферу) для конвертера с меньшим атомным номером (Mo, Cu) начиная с некоторой толщины конвертера ($t=4\text{г/см}^2$) превосходит выход $ТИ^F$ для конвертера из вольфрама.

ПРИМЕНЕНИЕ К МЕТОДУ ДУАЛЬНЫХ ЭНЕРГИЙ

Анализ полученных распределений позволяет подобрать угол испускания гамма-квантов, материал и толщину конвертера, при которых характеристики ТИ электронов с энергией 10 МэВ будут достаточно близкими к характеристикам ТИ электронов с энергией ~ 4 МэВ [7]. Из рис.8 следует, что для рассматриваемых конвертеров из W, Mo и Cu массовой толщиной $3,86 \text{ г/см}^2$ существуют угловые интервалы, в которых средняя

энергия ТИ близка к 0,8 МэВ (конвертер из Мо – угол около 60°, конвертер из Cu – угол около 40°, конвертер из W – угол около 120°). Усреднение же спектров гамма-квантов для этих углов на интервале $1 < E < 3,4$ МэВ дает среднюю энергию $E_{\Delta} \approx 1,8$ МэВ. Данные, приведенные на рис.3, показывают, что средняя энергия E_{Δ} низкоэнергетического пучка ТИ (при усреднении по интервалу $1 < E < 3,4$ МэВ, $E_c^L=4$ МэВ) для различных значений толщины конвертера несколько меньше 1,8 МэВ.

В качестве характеристики подобия спектров используем среднеквадратичные отклонения двух сравниваемых спектров, определяемые следующим соотношением:

$$\delta N(t, t_X, \Delta\alpha) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{[dN^L(t, E_i)/dE - dN^H(t_X, \Delta\alpha, E_i)/dE]^2}{[dN^H(t_X, \Delta\alpha, E_i)]^2}}, \quad (6)$$

где: $dN^L(t, E_i)/dE$ - спектральное распределение ТИ, создаваемое пучком электронов с энергией 4 МэВ на конвертере из W толщиной t , N - число разбиений интервала $1 < E < 3,4$ МэВ, E_i - энергии из этого интервала, $dN^H(t_X, \Delta\alpha, E_i)$ - спектральное распределение ТИ, создаваемого электронами с энергией 10 МэВ на конвертере из материала X (W, Mo и Cu в нашем случае) толщиной t_X и испускаемого под углом α (интервал углов $= \alpha \pm 6^\circ$).

В соответствии с изложенным в разделе «ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКА НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ТИ», в качестве низкоэнергетического спектра ТИ выбираем спектр, от электронов 4 МэВ на конвертере из W толщиной 0,6 мм. При такой толщине полный выход $Y_{tot}(t)$ и выход гамма-квантов $Y_{min}^{max}(t)$ в интервале энергий ΔE_{min}^{max} близки к максимальным значениям. Подобный спектр в соответствии с условием (6) может быть сформирован электронами с энергией 10 МэВ под углом 60° ($\Delta=60^\circ \pm 6^\circ$) на конвертере из молибдена толщиной $t_{Mo} = 3,8$ мм, при которой выход ТИ^F максимален. На рис.9 приведены эти спектральные распределения.

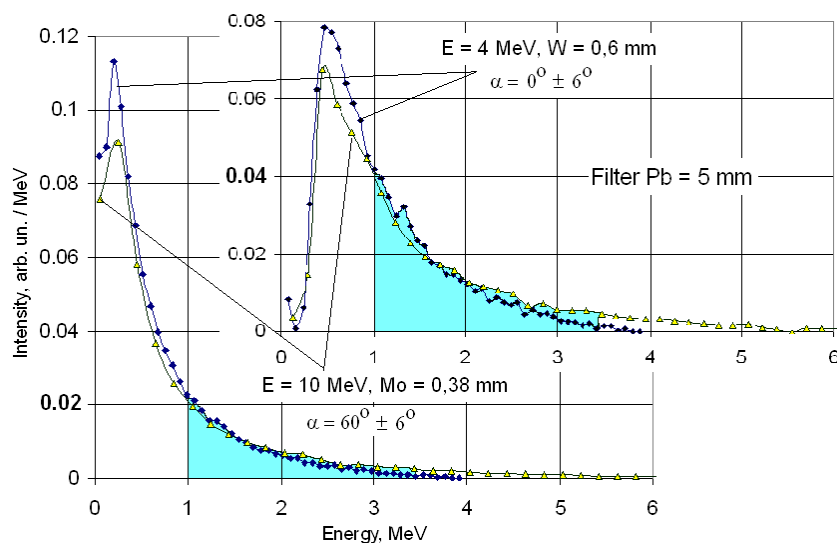


Рис.9. Спектры низкоэнергетического ТИ, сформированные на пучках при $E_c=10$ МэВ и 4 МэВ.

Подобие формы спектров ТИ при углах 60° и 0° на рис.9 подтверждается численными значениями параметров ТИ, которые приведены в таблице. Из данных, приведенных в таблице, следует, что характеристики ТИ, сформированные на молибденовом конвертере $E_c=10$ МэВ $\alpha=60^\circ \pm 6^\circ$ (строка 2) уступают характеристикам ТИ (W $E_c=4$ МэВ $\alpha=0^\circ$ – строка 1) по выходу гамма-квантов Y_{tot} практически в 2 раза и несколько меньше по Y_{min}^{max} .

Спектральные характеристики обоих спектров ТИ можно улучшить, повысив долю гамма-квантов в интервале энергий $1 < E < 3,4$ МэВ путем применения фильтра из материала с большим Z, например Pb. На рис.9 этому интервалу энергий соответствует заштрихованная область, площадь которой в случае использования фильтра увеличивается примерно вдвое. В 3 и 4 строках таблицы приведены характеристики ТИ с фильтром из Pb толщиной 5 мм. В этом случае доля частиц из интервала ΔE возрастает до 43-46% от общего количества гамма-квантов.

Таблица

Сравнительные характеристики спектров ТИ для метода дуальных энергий

№ п/п	E_e , МэВ	Материал конвертера, толщина, мм	α , град	Y_{tot}	$Y_{min}^{max}(t)$	R_L	E_{av} (МэВ)	E_{Δ} (МэВ)
1	4	W, 0,6	0	0,146	0,0326	0,22	0,72	1,70
2	10	Mo, 3,8	60	0,0752	0,0182	0,24	0,85	1,77
3	4	W 0,6 +Pb 5	0	0,048	0,013	0,43	1,07	1,74
4	10	Mo 3,8 +Pb 5	60	0,031	0,008	0,454	1,41	1,80

Из приведенных выше данных следует, что характеристики тормозного излучения, создаваемого электронами с энергией 10 МэВ на конвертерах из разных материалов, при определенных углах вылета относительно пучка электронов достаточно близки параметрам ТИ, генерируемого электронами с энергией 4 МэВ.

ВЫВОДЫ

Показано, что соответствующим выбором материала конвертера и угла между пучком электронов и направлением используемого ТИ, на пучке электронов 10 МэВ можно воспроизвести характеристики ТИ, генерируемого электронами с энергией 4 МэВ в направлении исходного пучка. Используя оба излучения (высокоэнергетическое и низкоэнергетическое), возможно реализовать инспекцию контейнеров методом дуальных энергий на одном ускорителе электронов с энергией $E_H = 8-10$ МэВ, работающем в штатном режиме.

Это позволяет предложить схему эксперимента и необходимого оборудования для использования одного ускорителя электронов с энергией 8-10 МэВ в интроскопическом комплексе крупногабаритных объектов методом дуальных энергий. Возможно также расширение числа пучков и набора энергий ТИ для улучшения качества методики идентификации материалов, скрытых внутри упаковки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Neale W., Rushbrooke J., Ansorge R. Material identification using X-rays // US Patent, 5,524,133. - 1996.
2. S. Ogorodnikov and V. Petrunin Processing of interlaced images in 4–10 MeV dual energy customs system for material recognition // Phys. Rev. Special Topics - Accelerators and Beams. - 2002. - Vol. 5. - P.104701.
3. B. S. Ishkhanov, A. S. Kurilik, D. S. Rudenko, K. A. Stopani and V. I. Shvedunov Multiple-Beam Method for Object Scanning, 2008 // Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Fizicheskaya. - 2008. - Vol. 72, № 6. - P.908–911.
4. 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. Instr. & Meth. - 1995. - Vol. B100. - P.31-46.
5. I. Meissner, M. Abs, M. R. Cleland et al. X-ray treatment at 5 MeV and above // Rad. Phys. Chem. - 2000. - Vol. 57. - P.647-651.
6. Auslander, V. I., et al. X-ray converters for powerful industrial electron accelerators // Radiat. Phys. Chem. - 2004. - Vol. 71. - P.297-299.
7. V. T. Lazurik, V. G. Rudychev, D. V. Rudychev Komp'juternoe modelirovanie processa inspekcii bol'shikh ob'ektov metodom dual'nykh jenergij // Visnik Harkivs'kogo nacional'nogo universitetu, serija: Mat. model. Inform. tehnologii. Avtomatizovani sistemi upravlinnja. - 2009. - №863. - Vip. 12. - S.143-156.