

УДК 519.6

Компьютерное моделирование процесса инспекции больших объектов методом дуальных энергий

В. Т. Лазурик, В. Г. Рудычев, Д. В. Рудычев

Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Украина

В настоящей работе развита математическая модель потока тормозного излучения (ТИ) и проведена модернизация программного обеспечения для повышения эффективности расчетов в рамках принятой модели. На основе сравнительного анализа результатов численного моделирования процесса формирования ТИ показана возможность использования одного электронного пучка в двух вариантах пространственного расположения конвектора ТИ. Обсуждаются некоторые особенности реализации предложенных методов.

Ключевые слова: математическая модель, тормозное излучение, программное обеспечение, эффективность расчетов, численное моделирование.

У дійсній роботі розвинена математична модель потоку гальмового випромінювання (ТИ) і проведена модернізація програмного забезпечення для підвищення ефективності розрахунків у рамках прийнятої моделі. На основі порівняльного аналізу результатів чисельного моделювання процесу формування ТИ показана можливість використання одного електронного пучка у двох варіантах просторового розташування конвектора ТИ. Обговорюються деякі особливості реалізації запропонованих методів.

Ключові слова: математична модель, гальмове випромінювання, програмне забезпечення, ефективності розрахунків, чисельне моделювання.

In the present work the mathematical model of a bremsstrahlung is developed and modernization of the software for increase of efficiency of calculations within the limits of the accepted model is spent. On the basis of the comparative analysis of results of numerical modeling of process of formation bremsstrahlung possibility of use of one electronic beam in two variants of a spatial arrangement convector bremsstrahlung is shown. Some features of realization of the offered methods are discussed.

Keywords: mathematical model, bremsstrahlung, software, efficiency of calculations, numerical modeling

1. Введение

В последние годы в мире возникли серьезные проблемы, связанные с терроризмом. Одна из самых значимых угроз - это возможность ядерного терроризма, а также применения «грязных» (радиоактивных) бомб. Наиболее вероятно, что перевозка как делящихся, так радиоактивных материалов будет осуществляться в защитных оболочках из свинца. Для дистанционного контроля транспортных средств и грузовых контейнеров в настоящее время используют разнообразные рентгеновские сканеры. Однако при досмотре крупногабаритных контейнеров и грузовых автомобилей применение рентгеновских сканеров малоэффективно. Особенно затруднительна идентификация замаскированных несанкционированных вложений, например, на фоне металлических изделий (станочное оборудование и др. объекты). Для просмотра крупногабаритных грузов используют более высокоэнергетические гамма-кванты, обладающие большей проникающей способностью по сравнению с рентгеновским излучением. Источниками гамма-квантов в этом случае являются ускорители электронов с энергиями в несколько МэВ.

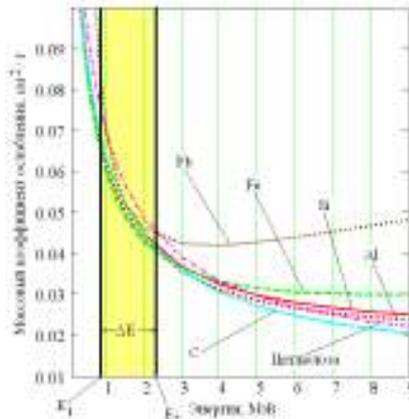


Рис.1. Зависимости массовых коэффициентов ослабления от энергии гамма-квантов для ряда элементов.

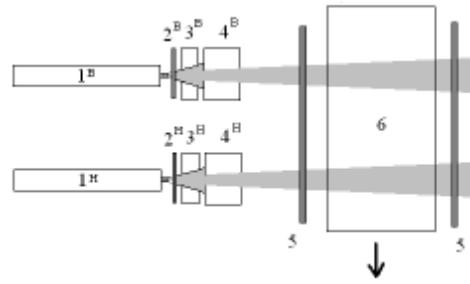


Рис.2. Схема комплекса инспекции крупногабаритных грузов методом «дуальной энергии». 1-ускоритель электронов, 2-конвертер, 3-фильтр, 4-коллиматор, 5-детектирующая линейка, 6-инспектируемый груз.

Индекс В – высокоэнергетический пучок, $E = 8 \div 10$ МэВ; индекс Н – низкоэнергетический пучок, $E = 3 \div 5$ МэВ.

Одним из наиболее перспективных и активно разрабатываемых в настоящий момент методов является так называемый метод «дуальных» энергий. Метод основан на том, что при прохождении гамма-квантов разной энергии через материалы существует различие в поглощении их отдельными химическими элементами. На рис.1 представлены зависимости массовых коэффициентов

ослабления от энергии гамма-квантов для ряда элементов [1]. Из данных, приведенных на рис.1 следует, что в области энергий E гамма-квантов $E_1 < E < E_2$, где $E_1 \approx 0.8$, а $E_2 \approx 2.4$ МэВ массовые коэффициенты ослабления для разных химических элементов сравнительно мало отличаются друг от друга. С ростом энергии гамма-квантов выше величины E_2 массовые коэффициенты ослабления для тяжелых элементов, в особенности свинца или урана существенно возрастают.

Это отличие дает возможность дискриминации материалов с различными атомными номерами, используя два пучка тормозного излучения (ТИ) [2]. Для получения двух пучков электронов применяют, как правило, два ускорителя электронов [3-4]. Схема комплекса инспекции крупногабаритных грузов методом «дуальной энергии» приведена на рис.2. Пучки электронов от ускорителей 1Н и 1В попадают на конвертеры 2Н и 2В и трансформируются в потоки тормозного излучения. Фильтры 3Н и 3В выполняют две функции: поглощают прошедшие через конвертеры электроны и формируют спектральные распределения для каждого из пучков. Инспектируемый объект - 6 перемещается последовательно через поток тормозного излучения, создаваемого высокоэнергетическим ускорителем электронов – 1В с энергией $8 \div 10$ МэВ, а затем проходит зону с низкоэнергетическим пучком ТИ создаваемым ускорителем – 1Н электронов с энергией $3 \div 5$ МэВ (или из зоны низкоэнергетического ТИ (ТИН) входит в зону высокоэнергетического ТИ (ТИВ)). Проводя измерения прохождения обоих пучков ТИ через

инспектируемый объект – 6 при помощи детектирующих линеек –5, можно определить наличие несанкционированных вложений из элементов с большим атомным весом [5].

Дискриминационный эффект (т.е. выделение химических элементов с большим атомным номером на фоне других элементов) в значительной степени будет определяться видом спектров высокоэнергетического и низкоэнергетического ТИ. Очевидно, что чем больше будет количество гамма-квантов: с энергиями в интервале $E_1 < E < E_2$ для пучка ТИН и, соответственно, с энергиями $E > E_2$ для пучка ТИВ, тем выше будет дискриминационный эффект. В качестве критерия оптимальности сформированных пучков ТИ в методе «дуальных» энергий будем использовать максимум отношения числа гамма-квантов из интервала $E_1 < E < E_2$ ко всем гамма-квантам для пучка ТИН в соответствии с соотношением:

$$R_H = \int_{E_1}^{E_2} N_{\gamma}^H(E) dE / \int_{E_{MIN}}^{E_{MAX}^H} N_{\gamma}^H(E) dE, \quad (1)$$

где $N_{\gamma}^H(E)$ - плотность потока гамма-квантов (фотонов ТИН), фотон/(МэВ×электрон), E_{MAX}^H - максимальная энергия электронов ускорителя 1Н. Для пучка ТИВ оптимум будет определяться из следующего соотношения:

$$R_B = \int_{E_2}^{E_{MAX}^B} N_{\gamma}^B(E) dE / \int_{E_{MIN}}^{E_{MAX}^B} N_{\gamma}^B(E) dE, \quad (2)$$

где $N_{\gamma}^B(E)$ - плотность потока гамма-квантов (фотонов ТИВ), фотон/(МэВ×электрон), E_{MAX}^B - максимальная энергия электронов ускорителя 1В. Важной характеристикой системы формирования (конвертер + фильтр) пучков ТИН и ТИВ является количество гамма-квантов генерируемое одним электроном и определяемое соотношением:

$$Y_T = \int_{E_{MIN}}^{E_{MAX}} N_{\gamma}(E) dE / N_e, \quad (3)$$

где N_e – число электронов; $N_{\gamma}(E)$ – плотность потока гамма-квантов, а E_{MAX} – максимальная (энергия электронов) и минимальная энергия пучков ТИН или ТИВ.

Кроме величин, характеризующих количество гамма-квантов на соответствующих энергетических интервалах, важной характеристикой является средняя энергия фотонов на этих интервалах, определяемая соотношением:

$$E_{A,B}^{AV} = \int_{E_A}^{E_B} E \cdot N_{\gamma}(E) dE / \int_{E_A}^{E_B} N_{\gamma}(E) dE, \quad (4)$$

где $E_{A,B}^{AV}$ - средняя энергия фотонов на интервале энергий $E_A < E < E_B$.

2. Математическая модель и её программная реализация

Математическая модель процесса генерации тормозного излучения (ТИ) и взаимодействия ТИ с инспектируемым объектом содержит набор соотношений описывающих следующие физические микропроцессы взаимодействия излучения с атомами вещества:

- Упругое и не упругое рассеяние электронов и позитронов
- Эмиссия тормозного излучения электронами и позитронами
- Аннигиляция позитрона.
- Когерентное (Рэлей) рассеяние гамма-квантов.
- Некогерентное (Compton) рассеяние гамма-квантов
- Фотоэлектрическое поглощение гамма-квантов.
- Генерация электрон-позитронной пары.

Программная реализация этой модели осуществлялась конфигурированием пакета PENELOPE, предназначенного для проведения расчетов транспорта электронов и гамма-квантов через различные объекты и среды методом Монте-Карло [6-7].

Так как размеры инспектируемых объектов достаточно велики, то возникла необходимость провести модернизацию регистрирующей и генерирующей части модулей Penlayer и Pendose пакета PENELOPE [6], в которых реализована возможность ввода спектральных распределений первичных частиц. Пользовательский интерфейс модернизированной программы представлен на рис.3.

Отметим, что в более поздних редакциях пакета PENELOPE [7] также был реализован ввод спектральных распределений первичных частиц. Проведенное сравнение модуля из пакета PENELOPE [7] и модернизированного модуля показывает, что для исследуемых в этой работе объектов время расчета на 20% меньше при использовании модернизированного модуля.

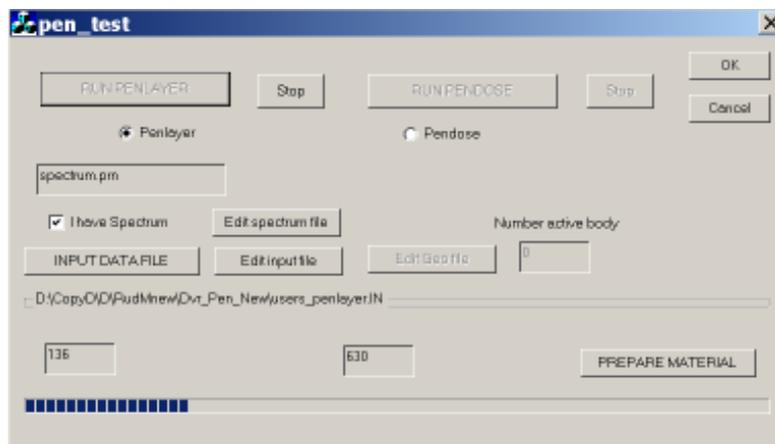


Рис.3. Созданный интерфейс для пакета PENELOPE

3. Численные исследования свойств конвертеров и фильтров

Оптимальные характеристики конвертеров при использовании ТИ в радиационных технологиях определяются из условия максимального выхода

потока гамма-квантов [Мейснер]. В нашем случае критериями оптимальности является максимальное значение величин R_B и R_H определяемых соотношениями (1) и (2). При этом R_B и R_H зависят не только от параметров конвертеров $2B$ и $2H$, но также и от параметров фильтров $3B$ и $3H$. Кроме этого, как известно, распределение фотонов по энергии зависит от их угла вылета относительно направления движения электронов, т.е. и их количество и энергия будут зависеть от углов раствора щелевых коллиматоров $4B$ и $4H$.

Моделирование характеристик тормозного излучения на выходе системы: конвертер, фильтр, коллиматор производится последовательно. Вначале определяются параметры конвертера для заданной энергии пучка электронов. Известно, что для конвертеров используются материалы с большим атомным номером: тантал, вольфрам, свинец и т.д. Для определенности энергию пучка электронов примем 4 МэВ и рассмотрим возможности использования конвертера из вольфрама. Для моделирования характеристик ТИН будем использовать модифицированный пакет PENELOPE. При этом предполагается, что пучок электронов падает нормально на поверхность конвертера и поперечные размеры конвертера существенно больше диаметра пучка (приближение точечного пучка). Выполнены расчеты генерации ТИ в зависимости от толщины конвертера. Выходными данными, в результате работы пакета PENELOPE, являются спектральные и угловые распределения тормозных гамма-квантов. По энергии проводится разбиение на 50 интервалов от E_{MIN} до E_{MAX} , угловое распределение выводится в виде числа гамма-квантов вылетающих в сферу с аксиальной симметрией и распределением по углу направления движения электрона с интервалом 6 градусов. На рис. 4 приведены рассчитанные зависимости полного выхода фотонов в зависимости от толщины конвертера, а также количество гамма-квантов на один электрон ($R_H \cdot Y_T$ из соотношений (1) и (3)) в диапазоне энергий $E_1 < E < E_2$, углы вылета фотонов лежат в интервале $0 \div 12^\circ$. Из данных, приведенных на рис. 4 видно, что суммарный выход фотонов имеет довольно резкий максимум при толщине конвертера около 0.4 мм. Максимум числа фотонов для интервала энергий $E_1 < E < E_2$ соответствует толщине конвертера $0.7 \div 0.8$ мм и достаточно медленно спадает с ростом толщины конвертера.

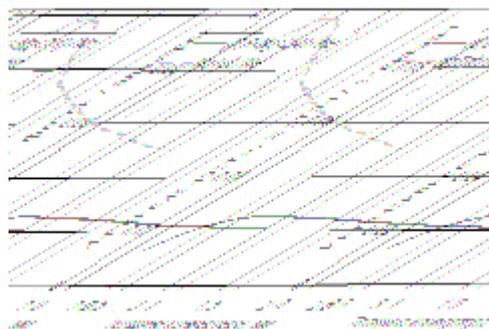


Рис.4. Зависимости числа фотонов от толщины конвертера.

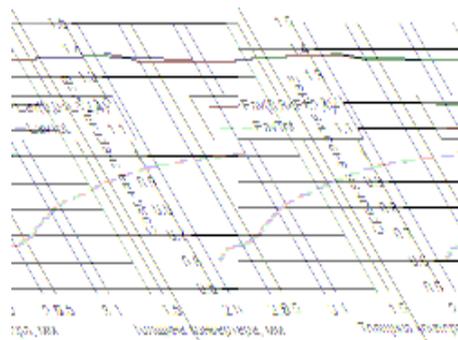


Рис.5. Зависимости средней энергии фотонов от толщины конвертера.

На рис. 5 приведены значения средних энергий как фотонов ТИН для всех энергий, так для интервала $E_1 < E < E_2$. Видно, что с ростом толщины конвертера растет средняя энергия фотонов всего спектра, а средняя энергия фотонов для интервала $E_1 < E < E_2$ практически не изменяется. На рис. 6 показаны зависимости интенсивности гамма-квантов от энергии для разных толщин конвертера. Сравнение данных, приведенных на рис. 5 и 6, показывает, что при малых толщинах конвертера велик вклад низкоэнергетических фотонов, при этом средняя энергия фотонов практически не изменяется. В соответствии с требованиями соотношения (1) оптимальным будет конвертер, генерирующий спектр с максимальной величиной R_H . На рис. 7 показано изменение отношения числа фотонов из интервала $E_1 < E < E_2$ ко всем фотонам (R_H из соотношения (1)) в зависимости от толщины конвертера. С увеличением толщины конвертера величина R_H растет. Выполненные расчеты показывают, что уже при толщине конвертера 0.8 мм число прошедших электронов меньше 5% при их средней энергии 1.48 МэВ. Т.е. эти прошедшие электроны при дальнейшем увеличении толщины конвертера практически не дают вклада в ТИН. А дополнительная масса вольфрама (превышающая 0.8 мм) выполняет для ТИН функции фильтра из тяжелого материала, хорошо поглощающего гамма-кванты как с низкой энергией, так и высокой энергией (см. рис.1).

Поэтому возможна конструкция конвертера, состоящего из нескольких слоев: 1-й слой из тугоплавкого материала с большим атомным номером (для вольфрама 0.7 ÷ 0.8 мм), 2-й слой поглотитель электронов и съем тепловой нагрузки – вода 1-2 мм, 3-й слой – сталь 0.2 - 0.5 мм. Дополнительно фильтр из материала с большим атомным номером, например, свинца толщиной 3-5 мм.

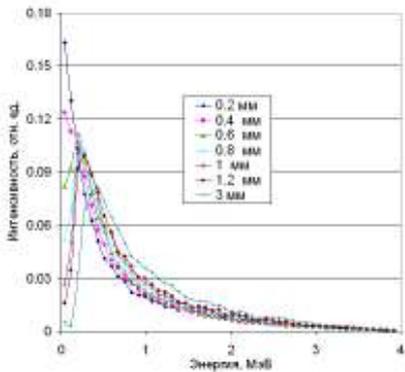


Рис.6. Распределения фотонов ТИН по энергии для различных толщин конвертера.

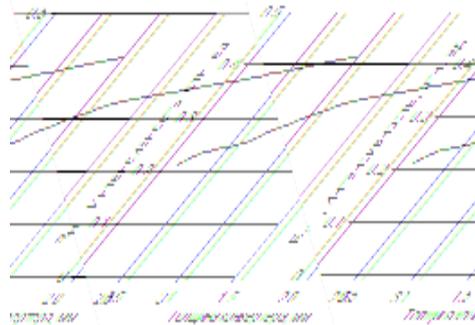


Рис.7. Изменение отношения числа фотонов из интервала $E_1 < E < E_2$ ко всем фотонам в зависимости от толщины конвертера.

Аналогично расчетам оптимальных характеристик ТИН выполним оптимизацию высокоэнергетического пучка ТИВ. В качестве материала конвертера также будем использовать вольфрам. На рис. 8 приведены рассчитанные зависимости полного выхода фотонов в зависимости от толщины конвертера, а также количество гамма-квантов на один электрон ($R_B \cdot Y_T$ из соотношений (2) и (3)) в диапазоне энергий $E_2 < E$, углы вылета фотонов лежат

в интервале $0 \div 12^\circ$. Из данных, приведенных на рис. 8 видно, что суммарный выход фотонов имеет довольно резкий максимум при толщине конвертера около 1 мм. Максимум числа фотонов для интервала энергий $E > E_2$ соответствует толщине конвертера $1.6 \div 1.8$ мм и спадает с ростом толщины конвертера быстрее, чем для ТИН. На рис. 9 приведены значения средних энергий как фотонов ТИВ для всех энергий, так для интервала $E > E_2$. Видно, что с ростом толщины конвертера, как и для ТИН, растет средняя энергия фотонов всего спектра, а средняя энергия фотонов для интервала $E > E_2$ медленно падает.

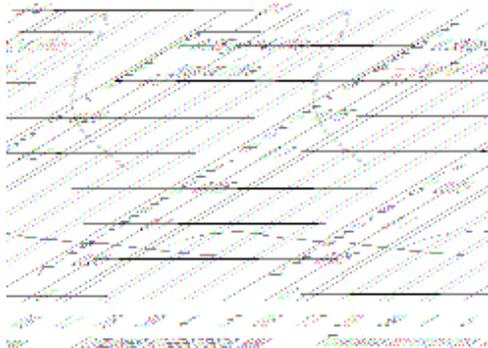


Рис.8. Зависимости числа фотонов генерируемым одним электроном от толщины конвертера.

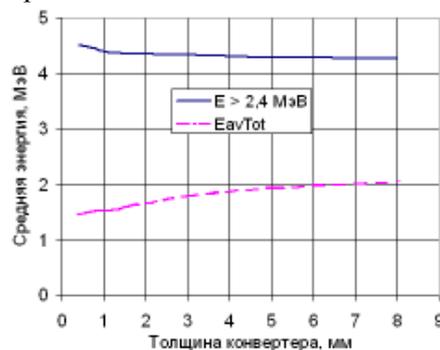


Рис.9. Зависимости средней энергии фотонов от толщины конвертера.

Такое отличие этой характеристики ТИВ от ТИН связано с тем, что элементы с большим атомным номером (свинец, вольфрам и др.) хорошо поглощают как низкоэнергетические, так и высокоэнергетические гамма-кванты (см. рис.1). В функции конвертера 2В и фильтра 3В входят как формирование ТИВ с максимальной долей высокоэнергетических гамма-квантов, так и поглощение всех электронов. Приведенные на рис.1 данные показывают, что элементы с малым атомным номером достаточно хорошо поглощают низкоэнергетические и слабо высокоэнергетические фотоны. Поэтому выбираем оптимальную толщину конвертера из вольфрама равную 1.6 мм, в соответствии с данными рис.8, а в качестве фильтра графит. Для сравнения характеристик ТИВ, образующегося при помощи фильтров из различных материалов, толщину фильтров будем измерять в $г/см^2$.

Проведенные расчеты определения оптимальных параметров фильтра показали, что при увеличении толщины фильтра средняя энергия фотонов (интервал энергий $E > E_2$): растет для фильтров из материалов с малым атомным номером и падает при материале с большим атомным номером. На рис.10 показаны зависимости средней энергии фотонов в зависимости от толщины фильтров из разных материалов. Отметим, что в спектральном распределении фотонов по энергии образуемому от фильтра из графита присутствует значительное количество низкоэнергетических гамма-квантов. Введение тонкого слоя из свинца практически полностью поглощает такие гамма-кванты не приводя к существенному изменению зависимости энергии от толщины фильтра. Проведенные исследования показали, что увеличение толщины фильтра из графита приводит к росту средней энергии, но при этом уменьшается как общее количество фотонов ТИВ генерируемых одним электроном, так и

число фотонов с энергиями $E > E_2$. На рис.11а и 11б приведены выходы фотонов в зависимости от толщины фильтров как для всего спектра, так и для фотонов с энергиями $E > E_2$. Следует отметить, что применение фильтров из легких материалов позволит более эффективно использовать пучки электронов (см. данные, приведенные на рис.11, выход фотонов для фильтра из графита по сравнению с фильтром из вольфрама больше практически на всем диапазоне толщины фильтров). При этом относительный вклад фотонов с энергиями $E > E_2 = 2.4$ МэВ увеличивается с ростом толщины фильтров как для вольфрама, так и для графита (зависимости аналогичные рис. 7 для ТИН).

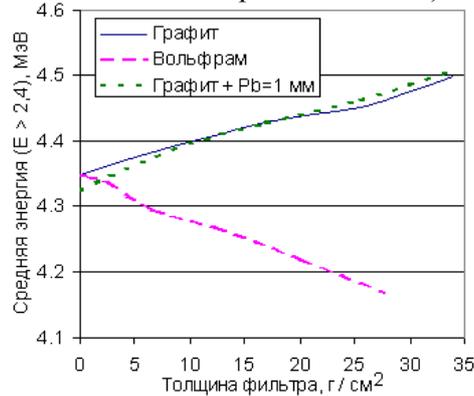


Рис.10. Зависимость средней энергии фотонов для интервала $E > E_2$ в зависимости от толщины фильтров из разных материалов.

Представленные на рис. 8-11 данные характеризуют фотоны ТИВ, вылетающие в интервале углов $0 \div 12^\circ$ и имеющие наибольшую интенсивность. На рис. 12 приведено угловое распределение вылетающих фотонов, создаваемых электронами с энергией 10 МэВ, падающих нормально на конвертер из вольфрама толщиной 1.6 мм для разной толщины фильтров из графита (плюс 1 мм свинца). Данные, приведенные на рис.12 показывают, что толщина фильтра практически не влияет на вид углового распределения. Рис.12 также иллюстрирует, что кроме интенсивного потока гамма-квантов по направлению движения электронов (ТИ вперед), значительное количество фотонов излучается назад.

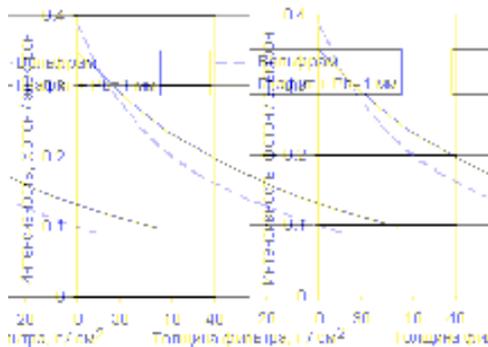


Рис.11а. Выходы фотонов в зависимости от толщины фильтров для всего спектра.

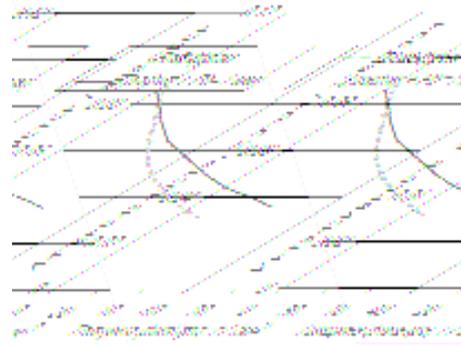


Рис.11б. Выходы фотонов в зависимости от толщины фильтров для фотонов с энергиями $E > E_2$.

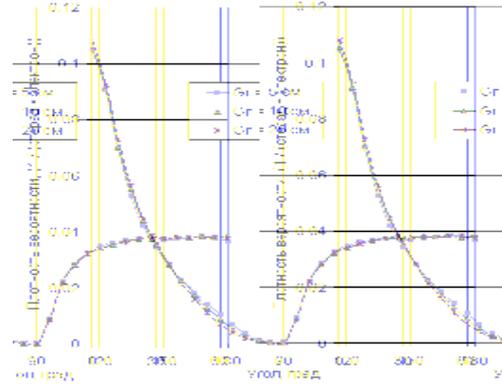


Рис.12. Угловое распределение ТИ создаваемое пучком электронов с энергией 10 МэВ.

На рис.13 показаны распределения интенсивностей ТИ по энергии вперед и назад для различных угловых интервалов. Для этих же угловых интервалов приведены средние энергии фотонов по всему спектру – E_{av} и значения средней энергии для интервала $E > E_2 = 2.4$ МэВ. Из данных, приведенных на рис.13б видно, что энергии фотонов вылетающих из конвертера под углами свыше 90° существенно ниже энергий фотонов (около 1 МэВ), вылетающих вперед.

Количество гамма-квантов, вылетающих вперед приблизительно равно числу гамма-квантов, вылетающих назад (площади под кривыми в интервалах $0 \div 90^\circ$ и $90 \div 180^\circ$ в пределах ошибок равны). При этом средняя энергия фотонов, вылетающих под малыми углами вперед, существенно больше средней энергии фотонов, вылетающих назад. Приведенные на рисунках 12 и 13 угловые и спектральные распределения показывают, что электроны с энергией 10 МэВ генерируют два пучка ТИ на конвертере из вольфрама с фильтром.

При этом фотоны, вылетающие под углами свыше 90° , обладают достаточной интенсивностью и более низкой средней энергией. Следовательно, такие фотоны могут быть использованы в качестве низкоэнергетического пучка в методе дуальных энергий.

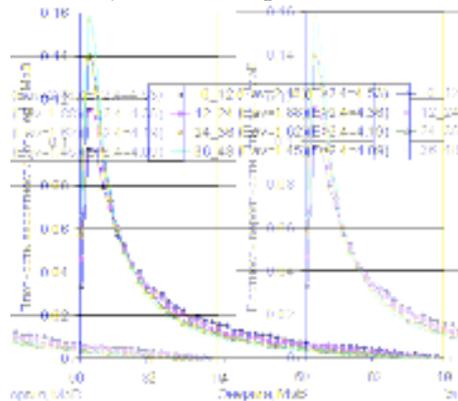


Рис.13а. Спектральное распределение тормозного излучения вылетающего вперед для различных интервалов углов.

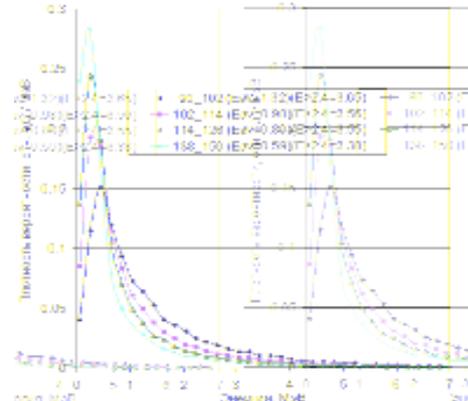


Рис.13б. Спектральное распределение тормозного излучения вылетающего назад для различных интервалов углов.

4. Анализ возможности использования одной ускорительной установки

Так как сечение образования гамма-квантов пропорционально квадрату атомного номера Z , то, как правило, в качестве конвертеров ТИ используют материалы с большим Z . Известно, что энергетический выход ТИ (полная энергия), распространяющегося в направлении движения электронов, растет с увеличением толщины конвертера, а начиная с некоторого значения уменьшается [8]. Это связано с поглощением низкоэнергетических фотонов в материале конвертера и используется при разработке эффективных конвертеров для прикладных применений.

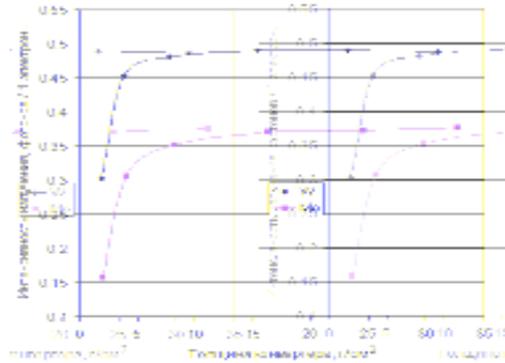


Рис.14. Интенсивность излучения фотонов ТИ, вылетающих в заднюю полусферу, в зависимости от толщины конвертера конвертеров из вольфрама и молибдена.

В качестве критерия будем использовать число гамма-квантов ТИ, образовавшихся от 1-го электрона, и вылетающих в заднюю полусферу. На рис.14. представлена зависимость интенсивности излучения фотонов ТИ, вылетающих в заднюю полусферу, от толщины конвертеров из вольфрама и молибдена. Число фотонов быстро растет с толщиной конвертера как для вольфрама, так и для молибдена. Начиная с толщин ≈ 15 г/см² выход гамма-квантов практически не изменяется от толщины конвертера, при этом число фотонов генерируемых в конвертере из вольфрама на 30% больше чем в конвертере из молибдена. Для этих же конвертеров (массовые толщины приблизительно одинаковы при толщине молибдена в 2 раза большей, чем у вольфрамового конвертера) приведены на рис.15 средние энергии фотонов в зависимости от их угла вылета. Результаты расчетов показывают, что для всех углов вылета средняя энергия фотонов, генерируемых из вольфрамовой мишени приблизительно на 200 кэВ больше, чем для мишени из молибдена. Отметим также, что с ростом толщины конвертера средняя энергия фотонов, вылетающих назад, уменьшается.

На рис.16. представлено угловое распределение интенсивности излучения фотонов ТИ, вылетающих в заднюю полусферу, для разной толщины конвертера из вольфрама. Представленные данные показывают, что, начиная с углов вылета фотонов свыше 120° , выход ТИ слабо изменяется и максимален для углов 180° . Однако, при максимальном выходе ТИ средние энергии фотонов минимальны. Данные, приведенные на рис. 4-6 показывают, что, выбирая толщину конвертера

и угол вылета фотонов, а также материал конвертера, можно в значительных пределах изменять их среднюю энергию.

Для определенности рассмотрим спектральные характеристики пучка ТИ под разными углами, создаваемого конвертером из вольфрама толщиной 0,8 см (выход ТИ назад в этом случае максимален для электронов с энергией 10 МэВ, см. рис.14).

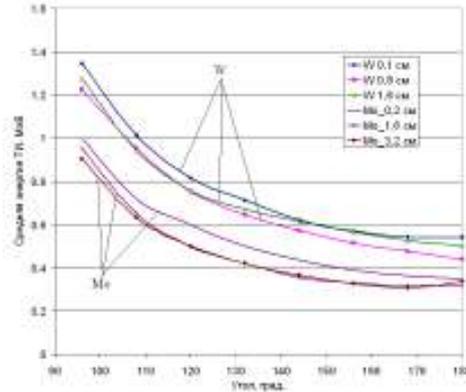


Рис.15. Средняя энергия фотонов ТИ в зависимости от угла их вылета.

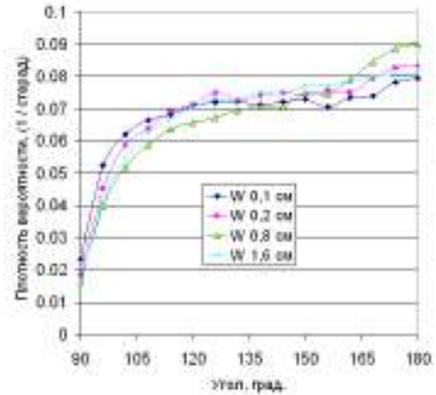


Рис.16. Угловое распределение ТИ назад для разных толщин конвертера из вольфрама.

На рис. 17 показано спектральное распределение ТИ назад для различных интервалов углов и приведен для сравнения низкоэнергетический спектр ТИ [3], рассчитанный для электронов с энергией 3,5 МэВ. Сравнение представленных спектров показывает, что в ТИ назад, присутствуют много фотонов с низкой энергией. Однако, спектр ТИ от электронов с энергией 3,5 МэВ [3] был «ужестчен» при помощи фильтра из свинца толщиной 1 см.

Используя аналогичный фильтр (толщина Pb = 1 см) получим из спектров, приведенных на рис.17, спектральные распределения для тормозных гамма-квантов, представленные на рис. 18.

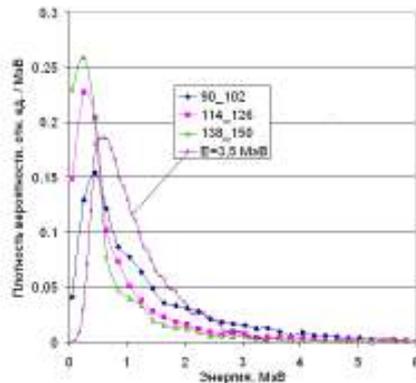


Рис.17. Спектральное распределение ТИ назад для различных интервалов углов, создаваемое конвертером из вольфрама толщиной 0,8 см.

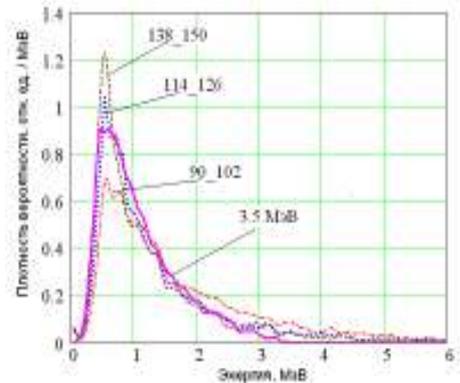


Рис.18. Спектральное распределение ТИ назад для различных интервалов углов, создаваемое конвертером из вольфрама толщиной 0,8 см и фильтром из 1 см свинца.

В этом случае, спектры ТИ назад, создаваемые электронами с энергией 10 МэВ достаточно близки к спектру ТИ от электронов 3,5 МэВ. В качестве характеристики подобия спектров примем их среднеквадратичные отклонения δSp , определяемые следующим соотношением:

$$\delta Sp = \sqrt{\sum_{j=1}^N [(Sp3_5j - SpAn_j) / SpAn_j]^2 / N} \quad (5)$$

где $Sp3_5j$ – спектр от электронов с энергией 3,5 МэВ с которым происходит сравнение, $SpAn_j$ – сравниваемый спектр из углового интервала An_j , в нашем случае из интервалов $90^\circ \div 102^\circ$, $114^\circ \div 126^\circ$ и $138^\circ \div 150^\circ$.

Отметим, что кроме подобия спектральных распределений важной характеристикой является также средняя энергия ТИ в используемом интервале углов, а также доля (выход) фотонов на один электрон. В таблице 1 приведены как средние энергии ТИ для разных интервалов углов вылета фотонов, так и выходы фотонов на 1 электрон для конвертера из вольфрама и разных угловых интервалов выхода ТИ. Для сравнения приведены характеристики ТИ для конвертера из молибдена. Сравнение приведенных в таблице 2 и на рис. 8 данных показывает, что неплохое согласие с характеристиками пучка с энергией 3,5 МэВ обеспечивают фотоны тормозного излучения из углового интервала $114^\circ \div 126^\circ$: минимальное среднеквадратичное отклонение и максимальный выход фотонов ТИ на 1 электрон. Использование конвертера из молибдена приводит к значительному уменьшению выхода фотонов.

Таблица 1. Данные о характеристиках ТИ для различных угловых интервалов.

Конвертер (материал и его толщина, см),	Энергия электронов, МэВ	Угловой интервал выхода ТИ, град	Средне-квадратичное отклонение	Средняя энергия ТИ, МэВ $0,8 < E < 2,4$	Количество всех фотонов на 1 электрон	Доля фотонов в интервале углов	Ослабление в фильтре, 1 см Pb	Выход фотонов на 1 электрон, %
W - 0,03	3,5	$0 \div 12$	-	1,37	0,072 (вперед)	0,345	-	2.50
W - 0,8	10,0	$90 \div 102$	0.84	1.39	0,491 (назад)	0.056	0.493	1.36
W - 0,8	10,0	$114 \div 126$	0.725	1.33	0,491 (назад)	0,129	0.335	2.13
W - 0,8	10,0	$138 \div 150$	0.73	1.33	0,491 (назад)	0.141	0.265	1.83
Mo - 0,8	10,0	$114 \div 126$	0.734	1,28	0.370 (назад)	0.144	0.202	1.08

Таким образом, численное моделирование характеристик ТИ, создаваемого электронами с энергией $8 \div 10$ МэВ, показало что фотоны вылетающие в заднюю полусферу обладают характеристиками, адекватными пучку фотонов, генерируемых электронами с энергией $3 \div 5$ МэВ. Это обстоятельство позволяет предложить схему комплекса для инспекции крупногабаритных объектов методом дуальных энергий на основе одного ускорителя электронов с энергией $8 \div 10$ МэВ, см. рис. 19.

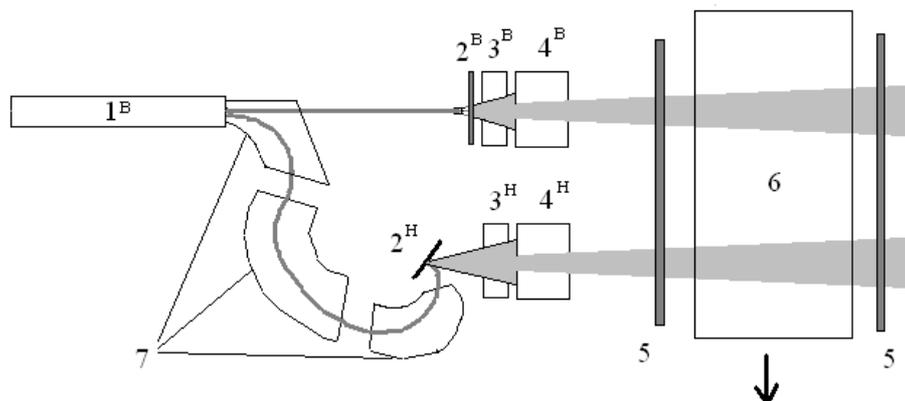


Рис.19. Схема комплекса инспекции крупногабаритных грузов методом «дуальной энергии». 1^В-ускоритель электронов с энергией $8 \div 10$ МэВ, 2-конвертер, 3-фильтр, 4-коллиматор, 5-детектирующая линейка, 6-инспектируемый груз, 7-импульсные поворотные магниты.

Индекс В – формирующие системы высокоэнергетического пучка ТИ^В, индекс Н – формирующие системы низкоэнергетического пучка.

5. Выводы

Развита математическая модель потоков тормозного излучения из конвекторов с произвольной пространственной ориентацией. Реализована модернизация программного обеспечения для численных исследований процесса инспекции больших объектов методом дуальных энергий.

Проведены численные исследования свойств конвертеров и фильтров для выбора оптимальных параметров систем формирования низкоэнергетического и высокоэнергетического пучков тормозного излучений, используемых в методе дуальных энергий.

На основе сопоставительного анализа результатов моделирования показано, что инспекция крупногабаритных объектов методом дуальных энергий может быть реализована на базе одного ускорителя электронов с энергией электронов в пучке 10 МэВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Neale W., Rushbrooke J., Ansorge R. 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, Харьков. -1999, сер.ЯФИ, т.35, № 4, стр. 93-95
3. В. Д. Афанасьев, С. А. Письменецкий, В. Г. Рудычев, Д. В. Рудычев Применение метода дуальных энергий для дискриминации тяжелых элементов. - “Вісник Харківського університету”, №664, серія фізична “Ядра, частинки, поля”, 2005, вип.2./27/ с.56-60.
4. Б. Ю. Богданович, А. А. Завадцев и др. Проект ЛУЭ на основе бипериодической ускоряющей структуры с глубокой перестройкой энергии

- в импульсном режиме. //Сб. докладов 10 международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине.- С.-Петербург.- 2001, стр.109-112.
5. А. А. Завадцев, А. Д. Завадцев, А. А. Краснов и др., источник тормозного излучения для комплекса инспекции контейнеров и грузовиков. //Сб. докладов 11 международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, С.-Петербург.- 2005, стр.34-37.
 6. 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, B100, p.31-46.
 7. Salvat Francesc, Fernández-Varea José M., Sempau Josep. PENELOPE-2008: A Code System for Monte Carlo Simulation of Electron and Photon Transport.- Barcelona, Spain, Workshop Proceedings.- 336 pages.
 8. NEA#06416, ISBN: 978-92-64-99066-1 Auslander, V.I., et al., 2004. X-ray converters for powerful industrial electron accelerators. Radiat. Phys.Chem. 71, 297-299.

Надійшла у першій редакції 17.07.2009, в останній -13.10.2009.

© Лазурик В. Т., Рудычев В. Г., Рудычев Д. В., 2009