

УДК 53.072, 53.681.3

ВЫРАВНИВАНИЕ ДОЗЫ НА ПОВЕРХНОСТИ ОБЪЕКТОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В.Т. Лазурик, С.А. Письменецкий, Г.Ф. Попов, 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 10 июня 2005 г.

Разработана модель расчета дозовых полей в объектах, создаваемых протяженными конвертерами. Показано, что за счет заданного расчетного изменения углов падения электронов на конвертер, можно существенно уменьшить неравномерность дозы тормозного излучения, поглощенной в объекте. Оптимизация угловых и пространственных распределений электронов на конвертере, обеспечивает максимальное использование энергии ТИ. Корректность предложенного подхода подтверждается прямым моделированием методами Монте-Карло (пакет GEANT 4).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: радиационные технологии, тормозное излучение, протяженный конвертер, метод оптимизации.

При использовании пучков тормозного излучения в радиационных технологиях основным требованием, обеспечивающим качество обработки объектов, является однородность поглощенной дозы по объему упаковки или объекта. Важную роль играет также эффективность использования энергии пучка, которая определяет стоимость радиационной обработки. В настоящее время характеристики установок (конструкции конвертеров, параметры тормозного излучения (ТИ)) и поглощенные дозы в облучаемых объектах, могут быть получены моделированием, как правило, основанном на методе Монте-Карло [1-3]. При всех достоинствах этого метода его достаточно сложно прямо использовать для оптимизации характеристик поля излучения и распределения поглощенных доз.

Целью данной работы является повышение эффективности использования энергии потока тормозного излучения за счет оптимизации режима работы устройств вывода пучка и конструкции e^- - гамма конвертера. Для этого разработана схема расчета дозовых полей в облучаемых объектах и пространственно-угловых распределений ТИ, создаваемых сканирующим пучком и протяженным конвертером.

ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА

Исходными данными для расчетов являются конструкция конвертера и устройства вывода пучка и энергия электронов. Максимальная энергия электронов, используемых для стерилизации продуктов питания, ограничена Food and Agricultural Organization of the United Nations на уровне 5 МэВ. Оптимальные параметры конвертеров, при которых выход жесткого ТИ граничной энергией 5 МэВ максимален, обобщены в [1-3]. Для выбранной конструкции конвертера рассчитывались спектрально-угловые характеристики ТИ при различных углах падения электронов на конвертер при помощи программных пакетов PENELOPE или GEANT 4. Полученные данные служили для получения параметризованных соотношений для спектрального $Sp(E, \varphi)$ в $(\text{МэВ}\cdot\text{см}^2\cdot\text{сек})^{-1}$ и углового распределений $An(\theta, \varphi)$ в $(1/\text{см})$ ТИ. Здесь E – энергия γ - квантов в МэВ, φ - угол падения электронов на конвертер (в плоскости (x,z)), θ - угол между направлением тормозного γ -кванта и направлением электрона до попадания на конвертер (ОВ на рис. 1).

В соответствии с работой [4 с.121], количество поглощенной энергии \mathcal{E} γ -квантов в объеме ΔV для случая электронного равновесия определяется выражением:

$$\mathcal{E} = \int_{\Delta V} (dr)^3 \rho(r) \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} dE \cdot Sp(E, r) \cdot E \cdot \mu_{en}(E), \quad (1)$$

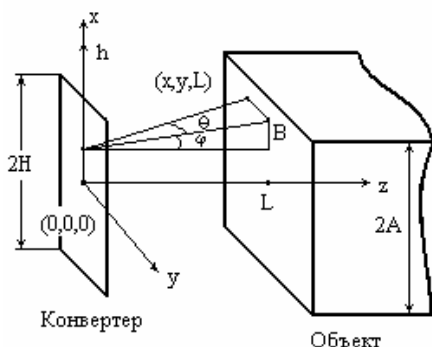
в котором \mathcal{E} имеет размерность МэВ/сек; $\rho(r)$ – плотность среды, $\text{г}/\text{см}^3$, в точке r ; E_{\min}, E_{\max} – минимальная и максимальная энергии ТИ, $Sp(E, r)$ – поток γ – излучения на единичный интервал энергии в $(\text{МэВ}\cdot\text{см}^2\cdot\text{сек})^{-1}$; $\mu_{en}(E)$ – полный массовый коэффициент ослабления для поглощения энергии γ - квантов в $\text{см}^2/\text{г}$. Поглощенная доза, создаваемая ТИ, определяется как отношение поглощенной энергии в объеме к массе вещества в этом объеме, а соответственно мощность дозы как изменение дозы во времени.

Используя соотношение (1) получим выражение для мощности дозы, создаваемой ТИ в точке с координатами (x,y,L) на поверхности плоского облучаемого объекта, расположенного параллельно конвертеру, в следующем виде:

$$D_s(x,y) = C_E \cdot \int_{-H}^H An(\theta, \varphi) \frac{L}{[L^2 + y^2 + (x-h)^2]^{3/2}} dh, \quad (2)$$

где $2H$ - длина конвертера, по которому перемещается пучок электронов; L - расстояние от конвертера до облучаемого объекта; $2A$ - высота облучаемого объекта. C_E - коэффициент, зависящий от спектрального состава ТИ и материала облучаемого объекта.

Соотношение для угла θ в зависимости от x, y, φ имеет вид:



$$\theta = \arccos \left[\frac{\frac{L^2}{\cos^2 \varphi} + L^2 + (x-h)^2 - (x-h + L \cdot \operatorname{tg} \varphi)^2}{\frac{2L}{\cos \varphi} \sqrt{L^2 + y^2 + (x-h)^2}} \right]. \quad (3)$$

Рис.1. Схема модели

$$C_E = \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} E \cdot \mu_{en}(E) \cdot Sp(E) dE. \quad (4)$$

Отметим, что вид спектрального распределения $Sp(E, \varphi)$, практически, не изменяется при изменении угла падения электронов φ на конвертер в интервале $0-45^\circ$.

Предположим, что облучаемые объекты перемещаются перпендикулярно вертикальной оси конвертера, как правило, на конвейере (вдоль оси y на рис.1). Полезно используемое излучение определим как излучение, попадающее на облучаемый объект с высотой $2A$, следующим соотношением:

$$D_{dep} = \int_{-A}^A dx \int_{-\infty}^{\infty} D_s(x,y) dy. \quad (5)$$

Потери ТИ (γ -кванты, не попавшие на объект) определяются соотношением:

$$D_{los} = 2 \int_A^{\infty} dx \int_{-\infty}^{\infty} D_s(x,y) dy. \quad (6)$$

Тогда коэффициент использования пучка ТИ принимает вид:

$$K_{TU} = \frac{D_{dep}}{D_{dep} + D_{los}}. \quad (7)$$

Так как перемещающийся перед конвертером объект находится в достаточно широкой зоне действия ТИ, то для оценок дозового распределения по глубине объекта можно считать поток γ -квантов широким пучком. В этом случае интенсивность потока γ -квантов в глубине объекта может быть рассчитана с учетом фактора накопления.

Соотношение для мощности дозы в точке с координатами x, y, z внутри объекта имеет вид:

$$D_v(x,y,z) = \int_{-H}^H An(\theta, \varphi) \frac{L+z}{R^3} \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} E \mu_{en}(E) \cdot Sp(E) \cdot e^{-\mu(E) \cdot Rb \cdot \rho} \cdot B[\mu(E) \cdot Rb \cdot \rho] dh dE, \quad (8)$$

где $R = \sqrt{(L+z)^2 + y^2 + (x-h)^2}$, $Rb = \frac{Z}{L+z} \cdot R$, $\mu(E)$ – полный массовый коэффициент ослабления γ -квантов, B - дозовый фактор накопления, ρ - плотность облучаемого материала. Выражение для θ в соотношении (8) определяется соотношением (3) с заменой $L \rightarrow L+z$.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

При использовании ТИ в радиационных технологиях пучок электронов попадает на конвертер, как правило, после сканера. При этом между сканером и конвертером часто устанавливается линза Пановского, направляющая пучок на конвертер под заданными углами. В ряде случаев для выравнивания дозового распределения на поверхности объектов используется специальный режим сканирования, увеличивающий количество частиц на краях конвертера [3].

Нами был выполнен расчет спектральных и угловых характеристик трехслойного [2] конвертера со следующими параметрами: 0,8 мм Та, 2 мм Н₂О и 2 мм Fe . На рис. 2а показаны спектры ТИ для углов падения электронов 0 и 45 градусов. Видно, что спектр ТИ для этого интервала углов практически не изменяется. Рис. 2б иллюстрирует изменение угловых распределений для различных углов падения электронов.

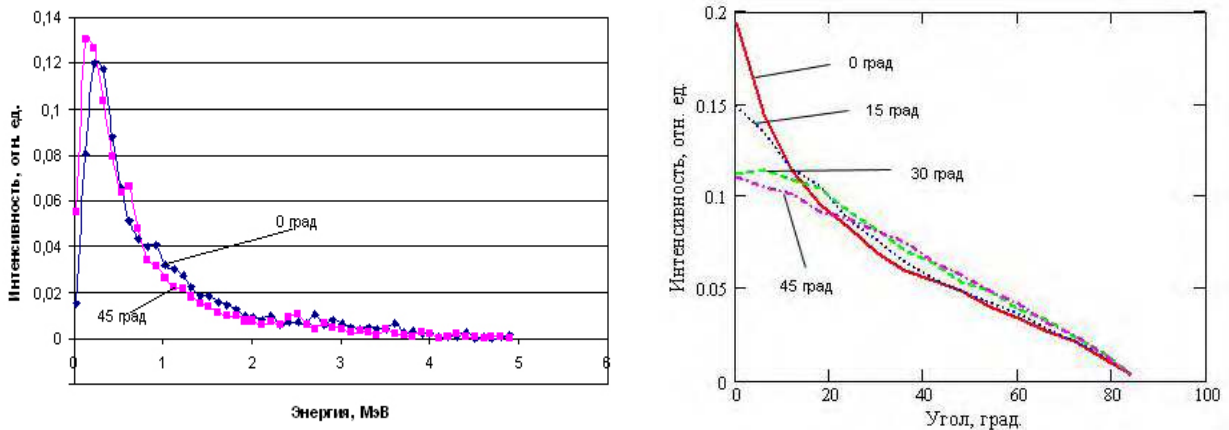


Рис.2. Распределения тормозного излучения для разных углов падения электронов
 а) спектральное распределение ТИ
 б) угловое распределение ТИ

С использованием соотношения (1) выполнен расчет дозовых распределений для следующих условий облучения: $L = 70$ см, $2H = 70$ см, $2A = 70$ см, $\rho = 0,5$ г/см³. На рис.3 представлены зависимости дозовых распределений на поверхности объекта вдоль конвертера для следующих вариантов: падение электронов на конвертер непосредственно после сканера с углом отклонения до 45°; падение по нормали к конвертеру; изменение тока пучка на краях конвертера. Из рис.3 видно, что при нормальном падении, также как и при использовании сканера, доза в центре на поверхности объекта на 30-35% больше, чем на краях.

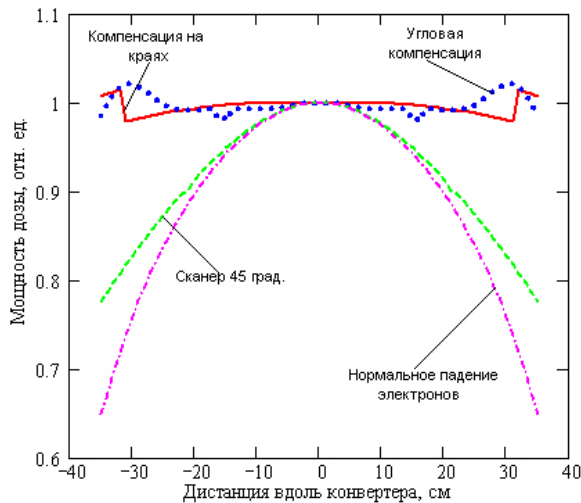


Рис.3. Зависимость мощности дозы от различных условий падения электронов на конвертер.

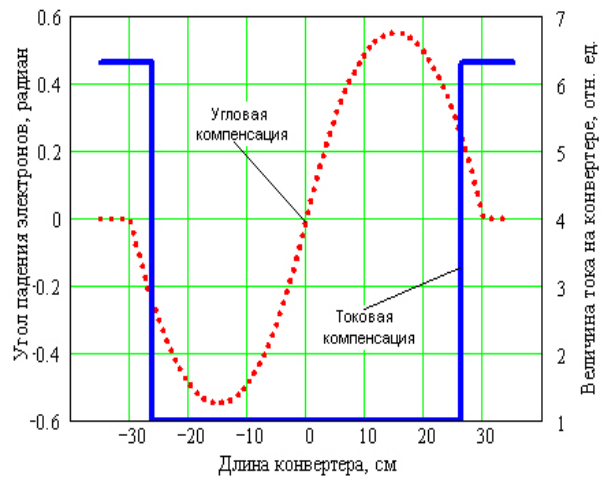


Рис.4. Варианты зависимостей угловой и токовой компенсаций.

Компенсация неравномерности дозы увеличением тока на краях (см. рис. 4) приводит к существенному улучшению однородности по дозе. Нами предлагается, при постоянном токе пучка, изменить углы падения электронов на конвертер таким образом, чтобы перераспределить ТИ по объекту за счет отклонения от центра части пучка, попадающей на конвертер (см. рис. 4). Однородность тока пучка, либо заданное токовое распределение на конвертере можно обеспечивать изменением во времени магнитного поля сканера [5 с. 303-306]. Приведенная на рис.3 зависимость дозового распределения при угловой компенсации показывает практически такую же неравномерность, как компенсация током на краях, т.е. выравнивание дозовых распределений компенсацией током на краях или изменением углового распределения электронов, падающих на конвертер, приводит практически к одинаковым результатам.

Сравним эффективность использования энергии ТИ для этих случаев. На рис. 5 а,б показаны изодозовые распределения, создаваемые конвертером на объектах для этих случаев. Видно, что потери излучения в случае компенсации током на краях выше.

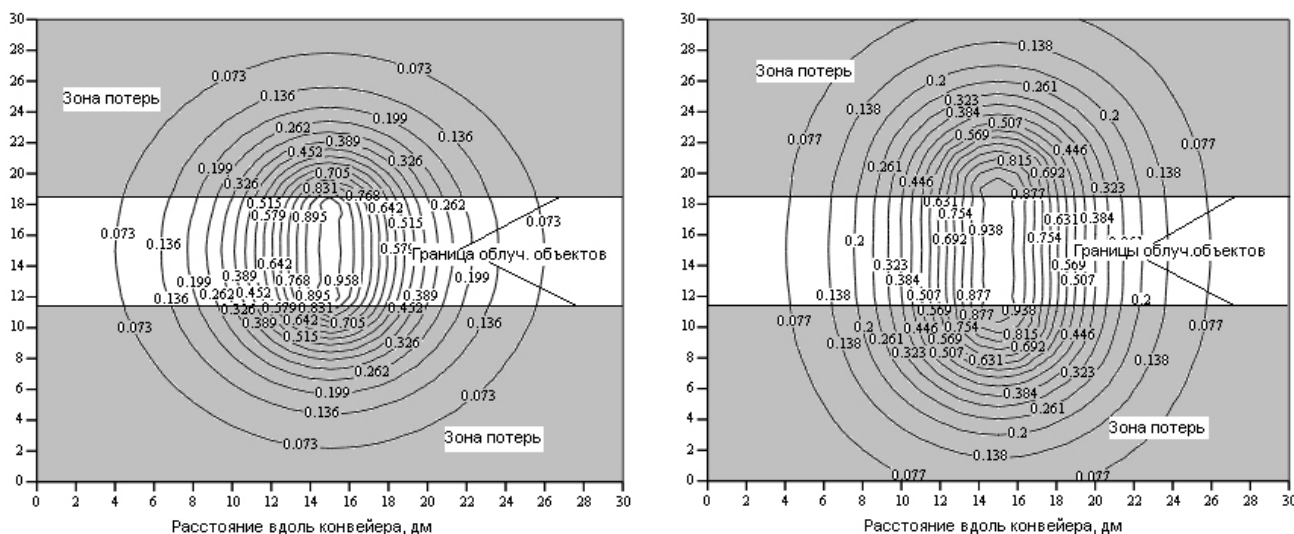


Рис.5. Распределение мощности дозы ТИ

а) при угловой компенсации

б) при токовой компенсации

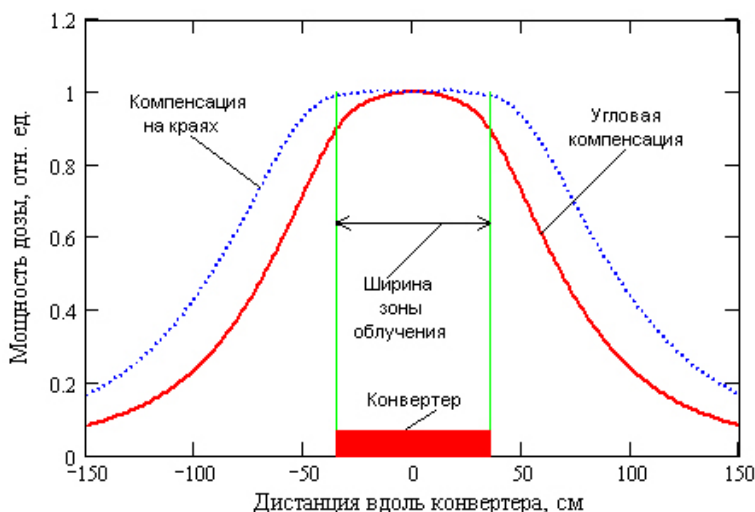


Рис.6. Усредненная мощность дозы вдоль конвертера для угловой и токовой компенсаций

На рис.6 показаны усредненные вдоль направления конвейера распределения дозы $D_c(x)$ вдоль конвертера, где

$$D_c(x) = \int_{-\infty}^{\infty} D_c(x, y) dy .$$

Усредненное значение мощности дозы для угловой компенсации несколько менее однородно (неоднородность около 10%) по сравнению с компенсацией током, однако эффективность использования пучка выше, т.е. время экспозиции меньше на 30%.

Выполнено прямое численное моделирование усредненной вдоль конвейера по длине объекта мощности дозы для вариантов: нормального падения электронов на конвертер и угловой компенсации, при помощи программного пакета GEANT 4. На рис.7 а,б приведены зависимости рассчитанные методом Монте-Карло и по формуле (7). Данные на этих рисунках иллюстрируют неплохое согласие предложенного метода для небольших толщин объектов.

зависимости рассчитанные методом Монте-Карло и по формуле (7). Данные на этих рисунках иллюстрируют неплохое согласие предложенного метода для небольших толщин объектов.

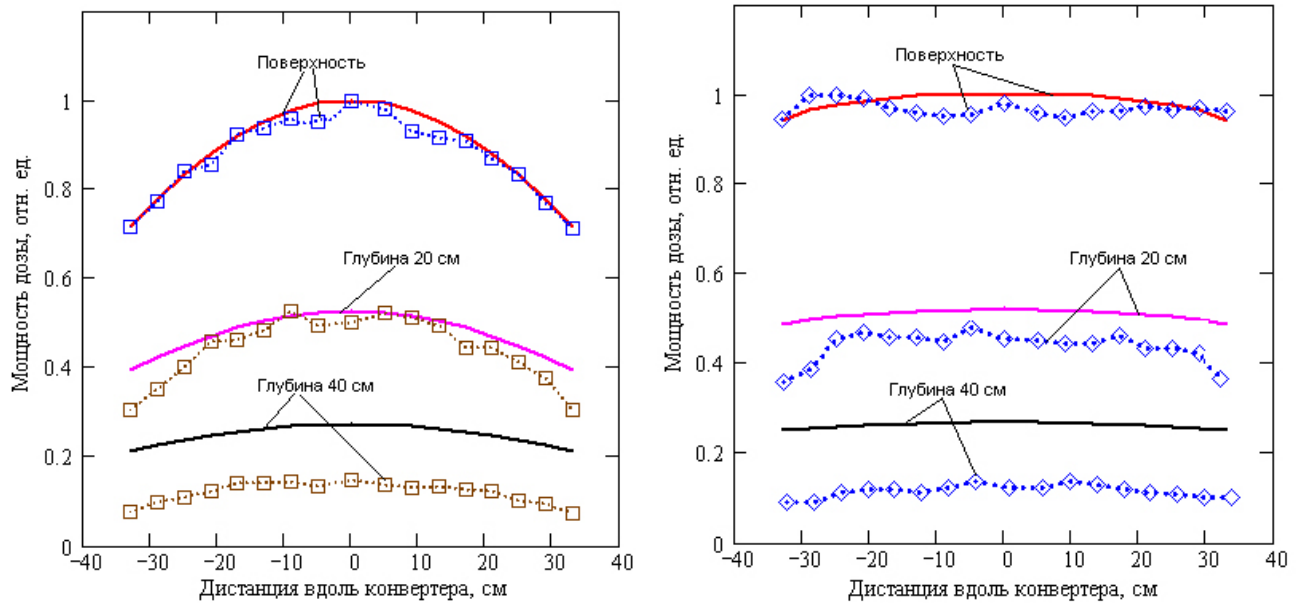


Рис.7. Зависимость мощности дозы на разной глубине

а) при нормальном падении электронов. Непрерывные линии - расчет по модели, квадратики - метод Монте-Карло.

б) при угловой компенсации падения электронов. Непрерывные линии - расчет по модели, ромбики - метод Монте-Карло.

ВЫВОДЫ

Предложенная модель расчета дозовых полей в объектах, создаваемых протяженными конвертерами позволяет оптимизировать угловые и пространственные распределений электронов на конвертере для получения заданного дозового распределения на объекте. Показано, что за счет заданного расчетного изменения углов падения электронов на конвертер, можно существенно уменьшить неравномерность дозы ТИ, поглощенной в объекте и при этом обеспечить максимальное использование энергии ТИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. I. Meissner, M. Abs, M.R. Cleland at all. X-ray treatment at 5 MeV and above // Rad. Phys. Chem. – 2000.-V.57. – P. 647-651.
2. F. Stichelbaut, I.L. Bol, M.R. Cleland at all. The Palletron: a high-dose uniformity pallet irradiator with X-ray // Rad. Phys. Chem. – 2004.-V.71. –P. 291-295.
3. V.L. Auslander, A.D. Bukin, L.A. Voronin at all. Bremsstrahlung converters for powerful industrial electron accelerators // Rad. Phys. Chem. – 2004.-V.71. –P. 297-299.
4. Руководство по радиационной защите для инженеров. Т.1. Пер. с англ. Под ред. Д.Л. Бродера и др. М.: Атомиздат, 1972 – 424 с.
5. С.А. Письменецкий, Г.Ф. Попов, В.Б. Пышкин, В.Г. Рудычев Формирование заданного распределения частиц системой сканирования //Сб. докладов 10 Международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине, С.-Петербург, 2001. - 446 с.

SMOOTHING OF SURFACE DOSE DISTRIBUTION UNDER BREMSSTRAHLUNG IRRADIATING

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

V.N. Karazin Kharkiv National University,
61077, Kharkiv, sq. Svobody,4, Ukraine

The model of computation of the dose fields in the objects formed by extensive converters is developed. Optimization of the angular and spatial distribution of electrons on a converter provides the maximal use of the bremsstrahlung energy. It is shown, that due to the set computation change of angles of incidence of electrons on a converter, it is possible substantially to decrease the inconstancy of the bremsstrahlung dose absorbed in an object. Correctness of offered approach is confirmed by the direct simulation by the methods of Monte Carlo (package GEANT 4).

KEY WORDS: radiation technology, bremsstrahlung, extensive converter, optimization method