

УДК 53.072, 53.681.3

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ ДЛЯ РАДИАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ МАКСИМАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ ТОРМОЗНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

**В.Т. Лазурик, 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](mailto:rud@pht.univer.kharkov.ua)*

Поступила в редакцию 25 ноября 2008 г.

Исследованы особенности формирования дозовых полей в радиационно-технологических линиях, использующих тормозное излучение от электронов с энергией 5 МэВ, создаваемое протяженными конвертерами, при обработке перемещающихся на конвейере объектов. Показано, что при малой плотности облучаемых объектов, неоднородность дозового распределения определяется геометрическими параметрами: расстоянием конвертер-поверхность объекта, размера зоны облучения вдоль конвертера. Определено, что максимальная толщина облучаемых объектов с малой плотностью -  $Z_{max}$ , при допустимой неоднородности дозы  $DUR < 1,5$ , пропорциональна длине конвертера. Показано, что при большой плотности объекта, увеличение длины конвертера не приводит к росту  $Z_{max}$ . Исследована возможность увеличения максимальной толщины облучаемых объектов за счет модификации конвертера, приводящего к увеличению средней энергии тормозного излучения. **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** радиационные технологии, рентгеновское излучение, тормозное излучение, протяженный конвертор, электрон.

Для облучения тормозным излучением (ТИ) объектов больших размеров (стерилизация, модификация полимеров и т.д.) используются промышленные радиационно-технологические линии (РТЛ). В состав РТЛ входят ускорители электронов различных типов (линейный ускоритель, динамитрон и т.д.), система формирования заданного распределения потока электронов на конвертере, протяженный конвертер, конвейер и другое вспомогательное оборудование. Пучок электронов с энергией 5 МэВ (для стерилизации продуктов питания энергия электронов ограничена международной организацией по сельскому хозяйству и продовольствию при ООН (ФАО) величиной 5 МэВ) от ускорителя проходит через сканер, осуществляющий развертку вдоль протяженного конвертера. Для изменения угла падения электронов между сканером и конвертером устанавливают отклоняющий магнит (линзу Пановского). На конвейере поперек конвертера перемещаются облучаемые объекты разной плотности упакованные, как правило, в прямоугольные ящики.

Основным условием работы РТЛ является обеспечение заданной техническими условиями значения дозы по всему объему облучаемого объекта с допустимой неоднородностью –  $DUR$ . Не менее важным требованием к РТЛ является возможность обработки объектов больших габаритов.

Целью настоящей работы является анализ и оптимизация параметров РТЛ, обеспечивающих возможность обработки объектов максимальных размеров с допустимой неоднородностью дозы по объему.

### ИСТОЧНИК ТИ

Оптимальные параметры конвертера: количество слоев, их материал и толщина, обеспечивающих максимальный выход ТИ, для нормально падающих электронов с энергией 5 МэВ, детально исследовались в [1-3]. Во всех работах в качестве критерия использовался максимальный выход тормозного излучения и отсутствие большого количества низкоэнергетических гамма-квантов. Рассмотрены различные конструкции, характеристики ТИ для этих конвертеров достаточно близки. В дальнейшем для расчетов в данной работе будем использовать характеристики ТИ, создаваемого трехслойным конвертером, используемым в ИВА [3] для серии ускорителей RHODOTRTON. Параметры конвертера: 1-й слой – 1,2 мм Та, 2-й слой – 2 мм охлаждающей воды, 3-й слой – 2 мм нержавеющей стали.

Для такого конвертера, в пакетах PENELOPE и GEANT4, нами были выполнены расчеты спектрально-угловых характеристик ТИ для нормального (0 град) падения электронов с энергией 5 МэВ на конвертер. Рис. 1 иллюстрирует энергетический спектр ТИ испускаемого под разными углами относительно направления движения электронов, при нормальном падении электронов на конвертер. Приведенные данные показывают, что для такого конвертера с ростом углов вылета гамма-квантов их энергия несколько падает. На рис. 2 показано угловое распределение ТИ для нормального падения электронов на конвертер. Приведенные данные являются исходными для расчета дозовых распределений в объектах, создаваемых как точечным, так и протяженным конвертерами. Ширина конвертера не учитывается, так как диаметр пучка электронов около 1 см, а длина конвертера от десятков сантиметров до 2 метров [1-3].

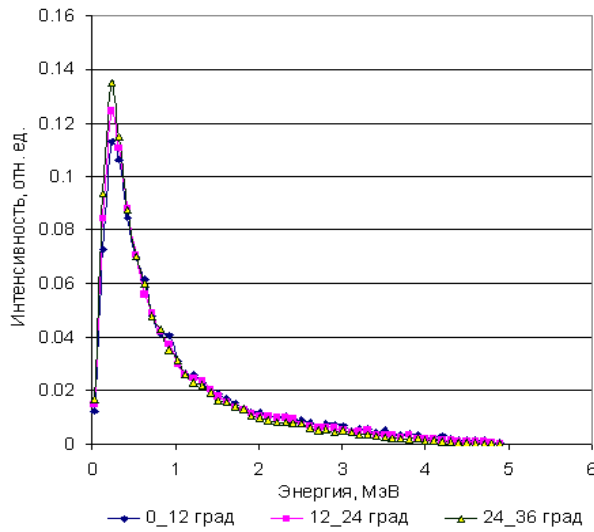


Рис.1. Спектральный состав ТИ для разных интервалов углов вылета гамма-квантов.

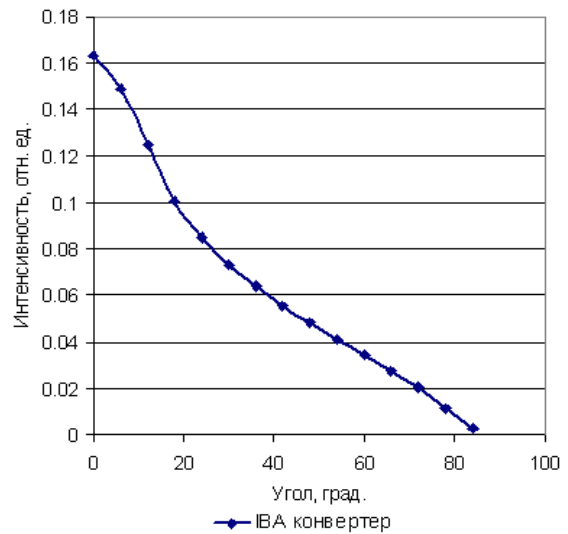


Рис.2. Угловые распределения ТИ.

**ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА**

Пусть протяженный конвертер длиной  $2Y_c$  размещен параллельно оси  $y$  с центром в начале координат. Вдоль оси  $x$  (см. рис.3) перемещается на конвейере объект в виде параллелепипеда бесконечной длины. Поверхность объекта находится на расстоянии  $L$  от конвертера, а соотношение между размером объекта вдоль оси  $y$  и его толщиной (вдоль оси  $z$ ) является предметом исследования. Таким образом, точки внутри объекта с координатами  $(y, z)$  перемещаются от  $-\infty$  до  $+\infty$  вдоль оси  $x$ . Размеры помещения, в котором происходит облучение ограничены, и длина помещения, вдоль которого конвейер перемещает объект равна  $2X_B$ . Зона действия ТИ вдоль координаты  $x$  ограничивается размерами  $-X_B$  до  $X_B$ .

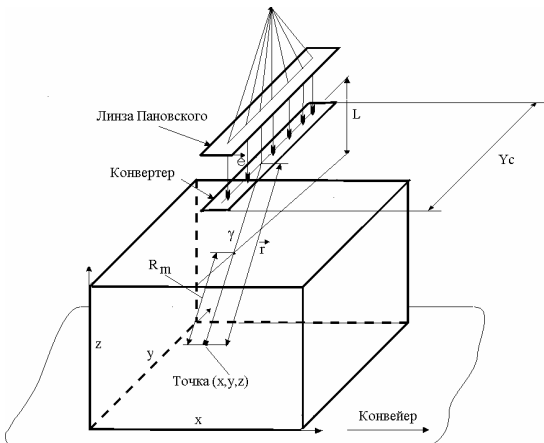


Рис.3. Геометрическая модель радиационно-технологической линии.

В бесконечной однородной среде, ослабляющей одинаково во всех направлениях, доза создаваемая точечным изотропным источником является функцией только расстояния между источником и точкой наблюдения. С учетом рассеянного излучения, доза в заданной точке пропорциональна фактору накопления  $B$  и определяется соотношением [4]:

$$D_p(r, E) = \frac{S_v B [\mu(E) \rho \cdot r] \exp[-\mu(E) \rho \cdot r]}{4\pi \cdot r^2}, \quad (1)$$

где  $\mu(E)$  - массовый коэффициент ослабления гамма-квантов в материале объекта,  $r = [x^2 + y^2 + (z + L)^2]^{1/2}$  - расстояние от изотропного источника до точки наблюдения,  $\rho$  - плотность среды,  $S_v$  - мощность источника.

В нашем случае среда неоднородна и имеет четкую границу раздела: воздух – облучаемый объект. Кроме этого, гамма-кванты испускаемые каждым точечным элементом протяженного конвертера имеют определенные угловые  $An(\theta)$  и энергетические распределения  $Sp(E)$ . Тогда доза в точке с координатами  $(x, y, z)$ , создаваемая точечным источником, находящимся на протяженном конвертере в центре координат будет определяться соотношением:

$$D_p(x, y, z, L, \rho) = \frac{S_v \int_0^{E_{MAX}} An(\theta) \cos(\theta) Sp(E) B [\mu(E) \cdot \rho \cdot R_m] \exp[-\mu(E) \cdot \rho \cdot R_m] dE}{x^2 + y^2 + (z + L)^2}, \quad (2)$$

где:  $\theta = \arccos[(z+L)/r]$  - угол между падающими на конвертер электронами и  $\gamma$ - квантами, вылетающими из центра координат в точку  $(x, y, z)$ .  $An(\theta)$  – угловое распределение ТИ;  $Sp(E)$  - спектральный состав ТИ;  $R_m = r \cdot z / (z + L)$  - длина пробега  $\gamma$ - квантов в материале от поверхности до точки наблюдения;  $B$  - фактор накопления числа  $\gamma$ - квантов от изотропного источника.

Следует отметить, что соотношение (2) дает завышенное значение дозы, т.к. среда имеет границу раздела и не бесконечна, а гамма-кванты, вылетающие из источника не изотропны. Поэтому фактор накопления может быть модифицирован следующим образом:

$$B_M[\mu(E) \cdot \rho \cdot R_m] = 1 + \frac{B[\mu(E) \cdot \rho \cdot R_m] - 1}{BM}, \quad (3)$$

где  $BM > 1$  – подгоночный параметр.

Тогда для точечного источника соотношение (2) можно записать в виде 2-х сомножителей

$$D_p(x, y, z, L, \rho) = DR(x, y, z, L) \cdot DM(x, y, z, L, \rho), \quad (4)$$

где

$$DR(x, y, z, L) = An(\theta) \cdot (z + L) / r^3, \quad (5)$$

$$DM(x, y, z, L, \rho) = \int_0^{E_{MAX}} B[\mu(E)\rho \cdot R_m] \exp[-\mu(E)\rho \cdot R_m] Sp(E) dE. \quad (6)$$

Множитель  $DR$  зависит лишь от положения точки Р относительно источника и угла  $\theta$  под которым падают гамма-кванты на площадку  $dxdy$  вокруг точки Р. Фактор  $DM$  зависит как от положения точки Р в пространстве ( $R_m(x, y, z)$ ), так и спектрального состава излучения ( $Sp(E)$ ), а также свойств облучаемого материала ( $\mu(E)$ ,  $\mu_{en}(E)$ ,  $\rho$ ). Следует отметить, что при стремлении плотности материала к нулю ( $\rho \rightarrow 0$ ), множитель  $DM = const$ , значение которой не зависит от положения точки наблюдения, а определяется спектральным составом ТИ. Пусть при  $\rho \rightarrow 0$  и  $DM(x, y, z, L, 0) = DM_0$ , тогда

$$D_p(x, y, z, L, 0) = DM_0 \cdot DR(x, y, z, L). \quad (7)$$

Такое представление позволяет разделить факторы, формирующие дозу, на геометрические и изменяющие поток излучения за счет поглощения и рассеяния тормозных  $\gamma$ -квантов в объекте.

### ОСОБЕННОСТИ ГЛУБИННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЗЫ ОТ ИСТОЧНИКА ТИ ПРИ МАЛОЙ ПЛОТНОСТИ ОБЪЕКТОВ

Пусть объект находится на расстоянии  $L$  от точечного источника ТИ, размещенного в начале координат. Так как объект перемещается относительно источника вдоль оси  $x$ , то доза на поверхности определяются интегрированием в пределах зоны облучения от  $-X_B$  до  $X_B$ , а на глубине  $z$  в пределах  $-X_B \cdot (z + L) / L$  до  $X_B \cdot (z + L) / L$ , см. рис.4. Отношение дозы на поверхности объекта к дозе на глубине  $z$  (неоднородность дозы) определяется отношением:

$$RP(X_B, y, z, ) = \int_{-X_B}^{X_B} DR(x, y, 0) dx / \int_{-X_B \cdot \frac{L+z}{L}}^{X_B \cdot \frac{L+z}{L}} DR(x, y, z) dx. \quad (8)$$

Для оценок неоднородности доз в объекте предположим, что угловое распределение ТИ - изотропное, т.е.  $An(\theta) = 1$ . В этом случае выражение (8) можно проинтегрировать для значений  $y = 0$ , в результате чего получается следующее соотношение:

$$RP_{ZZ}(X_B, 0, z, ) = \frac{z + L}{L} = 1 + \frac{z}{L}, \quad (9)$$

Соотношение (9) иллюстрирует, что неоднородность дозы, создаваемой точечным изотропным источником, не зависит от размеров зоны облучения  $2X_B$ , а определяется отношением  $z / L$ . Величине  $DUR = 1.5$  соответствует значение  $z / L = 1 / 2$ .

Выполненные расчеты неоднородности дозы с использованием соотношения (8) для  $An(\theta)$  в соответствии с данными, приведенными на рис.2, показали, что и в этом случае неоднородность дозы, создаваемой точечным источником, не зависит от размеров зоны облучения  $2X_B$ , а величине  $DUR = 1.5$  соответствует также значение  $z / L = 1 / 2$ .

Пусть протяженный конвертер длиной  $Y_C$  размещен вдоль оси  $y$  с центром в начале координат. Ширина конвертера намного меньше его длины, так как диаметр пучка электронов 1-2 см, а длина конвертера достигает 1 и более метров. Мощность дозы в точке с координатами  $(x, y, z)$  внутри объекта складывается от излучения всех точечных источников, рассчитываемого в соответствии с соотношением (4), вдоль конвертера и определяется выражением:

$$D_c(x, y, z, L) = DM_0 \int_{-Y_C/2}^{Y_C/2} \frac{An(\theta')(z+L)dy'}{[x^2 + (y-y')^2 + (z+L)^2]^{3/2}}, \tag{10}$$

где  $\theta' = \arccos\{(z+L)/[x^2 + (y-y')^2 + (z+L)^2]^{1/2}\}$ .

Производя замену переменной  $y' = Y_C l'$  и обозначая  $k = x/Y_C$ ,  $l = y/Y_C$  и  $m = z/Y_C$ ,  $m_L = L/Y_C$  получим

$$DC(k, l, m, m_L) = \frac{DM_0}{Y_0} \int_{-0,5}^{0,5} \frac{An(\theta'')(m+m_L)dl'}{[k^2 + (l-l')^2 + (m+m_L)^2]^{3/2}}, \tag{11}$$

где  $\theta'' = \arccos\{(m+m_L)/[k^2 + (l-l')^2 + (m+m_L)^2]^{1/2}\}$ .

С учетом перемещения облучаемого объекта на конвертере в пределах зоны облучения  $2X_B$ , суммарная мощность дозы в точке с координатами  $(l, m)$  определяется из соотношения:

$$DC_S(K_B, l, m, m_L) = \int_{-K_B \cdot \frac{m+m_L}{m}}^{K_B \cdot \frac{m+m_L}{m}} DC(k, l, m, m_L) dk, \tag{12}$$

где  $K_B = X_B / Y_C$ .

Соотношение (12) позволяет построить распределение экспозиционной дозы в плоскости  $(l, m)$  с безразмерными координатами  $l, m$ , не привязываясь к размерам (длине) конвертера. Масштабным множителем, как для координат, так и для абсолютного значения дозы (см. (11)), служит длина конвертера  $Y_C$ , а параметрами, определяющими характер дозового распределения, являются  $K_B$  и  $L$  ( $m_L = L / Y_C$ ).

Отметим, что размеры зоны облучения  $X_B$  для различных значений  $L$  могут быть выражены с использованием угла  $\alpha_C$ , назовем его углом коллимации  $X_B = L \operatorname{tg} \alpha_C$  или  $K_B = m_L \cdot \operatorname{tg} \alpha_C$  (см. рис.4). А, соответственно, пределы интегрирования для дозы на глубине  $m (z/Y_C)$  от  $-K_B \cdot (m+m_L) \cdot \operatorname{tg} \alpha_C / m$  до  $K_B \cdot (m+m_L) \cdot \operatorname{tg} \alpha_C / m$ .

Используя соотношение (12) были исследованы зависимости дозовых распределений от расстояния: конвертер - поверхность объекта и от величины  $\alpha_C$ , определяющей размеры зоны облучения. Отметим, что оба параметра в целом определяют эффективность использования ТИ, т.е. долю энергии ТИ, передаваемой объекту.

Одним из основных требований, применяемых при радиационной обработке материалов, является требование однородности дозы в облучаемом материале. Например, при стерилизации  $D_{\max} / D_{\min} = DUR$  не должно превышать 1,5. Максимум дозы, создаваемой протяженным конвертером (при нормальном падении на него электронов), находится в приповерхностном слое напротив центра конвертера. Используя соотношение (12), можно ввести характеристику показателя однородности дозового распределения, нормированную на максимальное значение дозы на поверхности объекта, в следующем виде:

$$R_S(l, m, m_L, \alpha_C) = DC_S(l, m, m_L, \alpha_C) / DC_S(0, m_L, m_L, \alpha_C). \tag{13}$$

В случае оценки неоднородности дозы при стерилизации, скажем продуктов питания,  $R_S$  умножается на 1,5, и тогда при  $R_S > 1$  выполняется условие  $DUR < 1,5$ .

На рис. 5(а-е) представлены зависимости показателя однородности дозы вдоль конвертера при различном удалении от него для  $m_L = 0,05; 0,5; 1,5$  и  $\alpha_C = 15^\circ$  и  $75^\circ$ . Данные, приведенные на рис.5, показывают размеры зоны облучения материала с малой плотностью, при которой  $DUR < 1,5$ . Для наглядности, область доз с  $DUR < 1,5$  затемнена и назовем эту область «полезным» объемом. Внешняя граница зоны (в глубине объекта) по форме напоминает параболу, ширина основания, в основном, определяется размерами конвертера, а максимальная глубина –  $Z_{\max}$  зависит как от расстояния от конвертера до объекта  $L$ , так и угла  $\alpha_C$ .

Координаты внешней границы зоны, для фиксированных значений  $m_L$  и  $\alpha_C$  и  $DUR < 1,5$ , можно определить из уравнения:

$$1,5 \cdot R_S(l, m, m_L, \alpha_C) - 1 = 0, \tag{14a}$$

а значение  $Z_{\max}$  из уравнения:

$$1,5 \cdot R_S(0, m, m_L, \alpha_C) - 1 = 0. \tag{146}$$

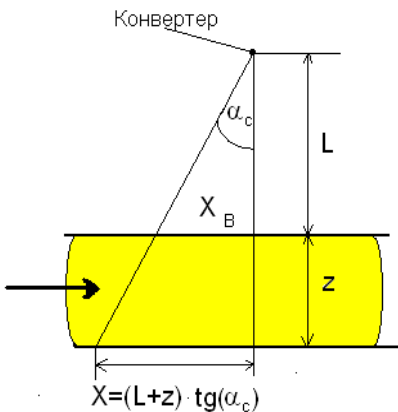


Рис.4. Схема расчета глубинного распределения.

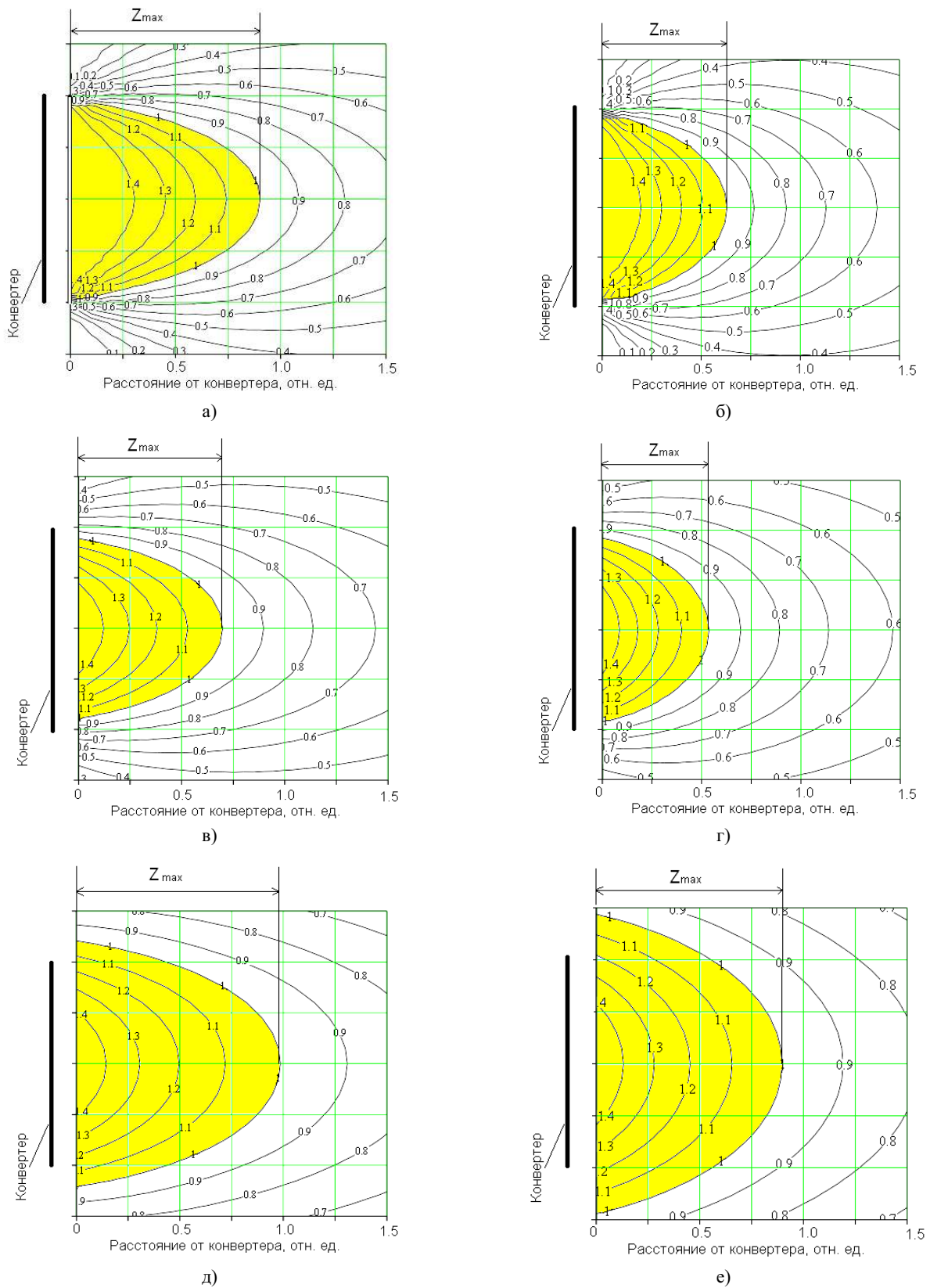


Рис.5. Распределение дозы.

а)  $L = 0,05Y_c$  и  $\alpha_c = 15^\circ$ ; б)  $L = 0,05Y_c$  и  $\alpha_c = 75^\circ$ ; в)  $L = 0,5Y_c$  и  $\alpha_c = 15^\circ$ ; г)  $L = 0,5Y_c$  и  $\alpha_c = 75^\circ$ ; д)  $L = 1,5Y_c$  и  $\alpha_c = 15^\circ$ ; е)  $L = 1,5Y_c$  и  $\alpha_c = 75^\circ$ .

На рис.6 показаны зависимости  $Z_{max}$  - максимальной глубины «полезного» объема (толщина объекта) от расстояния  $L$  - «конвертер-поверхность» для разных значений угла коллимации  $\alpha_c$ . Отметим, что для протяженного источника значение  $Z_{max}$  имеет минимум при некотором  $L$ . С уменьшением  $\alpha_c$   $Z_{max}$  растет, в отличие от точечного источника, где  $Z_{max}$  не зависит от размеров зоны облучения или угла коллимации и растет

с увеличением  $L$ . Границы зоны «полезного объема» для значения  $L/Y_C = 1$  и ряда  $\alpha_C$  приведены на рис.7. Данные, приведенные на рис.6 показывают, что с увеличением угла коллимации  $\alpha_C$  незначительно увеличивается ширина «полезной» зоны вблизи поверхности, при этом площадь полезной зоны несколько уменьшается.

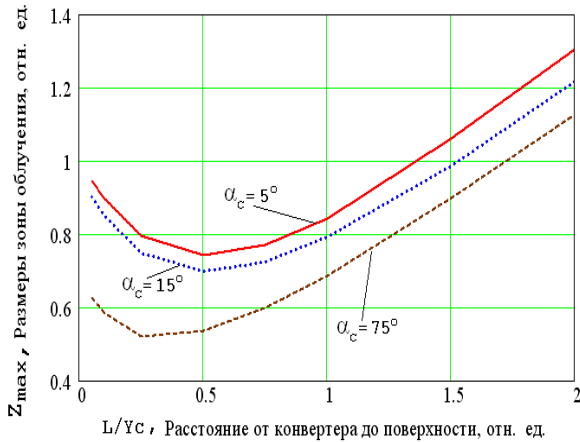


Рис.6. Зависимость максимальной глубины зоны «полезного объема» от расстояния «конвертер-поверхность»  $L$  для  $\alpha_C=5^\circ, 15^\circ$  и  $75^\circ$ .

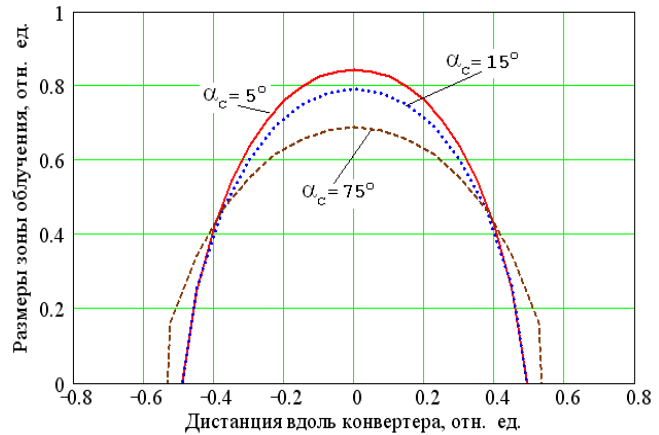


Рис.7. Форма зоны «полезного объема» для значений  $\alpha_C=5^\circ, 15^\circ$  и  $75^\circ, L/Y_C = 1$ .

### ДОЗОВЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ, СОЗДАВАЕМЫЕ ПРОТЯЖЕННЫМ КОНВЕРТЕРОМ, В ОБЛУЧАЕМЫХ ОБЪЕКТАХ ПРИ ИХ ЗНАЧИТЕЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ

С ростом плотности облучаемого материала, кроме геометрических факторов, на дозовое распределение значительное влияние оказывает затухание и перерассеяние  $\gamma$ -квантов. При этом существенным оказывается длина пробега  $\gamma$ -квантов от поверхности объекта до точки наблюдения внутри него (см. рис. 3). Тогда доза в точке с координатами  $(y, z)$ , при прохождении вдоль конвертера в пределах зоны облучения

–  $X_B \cdot \frac{L+z}{L} \div X_B \cdot \frac{L+z}{L}$ , определяется выражением:

$$DCS(y, z, \rho) = \int_0^{E_{max}} Sp(E)dE \int_{-X_B \cdot \frac{L+z}{L}}^{X_B \cdot \frac{L+z}{L}} dx \int_{-Y_C/2}^{Y_C/2} \frac{An(\theta')B[\rho\mu(E)R_m'] \exp[-\rho\mu(E)R_m'](z+L)dy'}{[x^2 + (y-y')^2 + (z+L)^2]^{3/2}}, \quad (15)$$

где  $r' = [x^2 + (y - y')^2 + (z + L)^2]^{1/2}$ ;  $R_m' = r' \cdot (z + L) / z$  - длина пробега  $\gamma$ -квантов от поверхности объекта до точки наблюдения внутри него с координатами  $x, y, z$ ;  $\theta'$  – определяется из соотношения (10).

Выполнены уточнения результатов, получаемых в данной методике, с использованием расчетов методами Монте-Карло. Для моделирования методом Монте-Карло воздействия ТИ с полиэтиленом используется пакет PENELOPE 2005 и GEANT4 [5,6]. Проведены расчеты дозового распределения от точечного источника ТИ в кубе с размерами от 0,1 м до 1 м с разной плотностью полиэтилена. Получены факторы накопления, которые использовались для расчетов дозовых распределений, создаваемых протяженным конвертером, в кубах аналогичных размеров. Проведено сравнение результатов расчетов с учетом факторов накопления и прямым моделированием облучения от протяженного конвертера методом Монте-Карло (PENELOPE 2005 и GEANT4). Показано, что при отсутствии фактора накопления ( $B = 1$ ) доза во всем объеме занижена. Хорошее совпадение с данными, полученными прямым моделированием (не считая приповерхностных эффектов) дает модификация фактора накопления в соответствии с соотношением (3) при коэффициенте подгонки  $BM = 1,6$ .

При определении влияния плотности облучаемого объекта на дозовые распределения в нем, следует принимать во внимание, что невозможно введение масштабных множителей, возможных при расчетах чисто геометрической задачи. Это связано с тем, что интенсивность процесса поглощения гамма-квантов зависит как от расстояния: поверхность объекта – точка наблюдения в нем, так и от плотности объекта. Поэтому характеристики дозовых распределений в значительной степени будут зависеть от размеров объектов. Нами был выполнен расчеты для различных размеров протяженных конвертеров.

На рис.8а показано дозовое распределение против центра конвертера в полиэтилене при различных его плотностях, создаваемое конвертером с размерами  $Y_C = 100$  см. На рисунке выделена затемнением зона, в которой  $DUR < 1,5$ . Данные, приведенные на рисунке, показывают быстрое уменьшение  $Z_{max}$  с ростом плотности полиэтилена. Отметим, также значительное влияние угла коллимации  $\alpha_C$  на величину  $Z_{max}$ .

Аналогичные расчеты, проведенные для конвертера длиной 200 см (см. рис.8б), показывают некоторое увеличение значений  $Z_{max}$  с ростом  $Y_C$ . Расстояние от конвертера до поверхности облучаемого объекта в обоих случаях выбиралось  $L = Y_C/2$ .

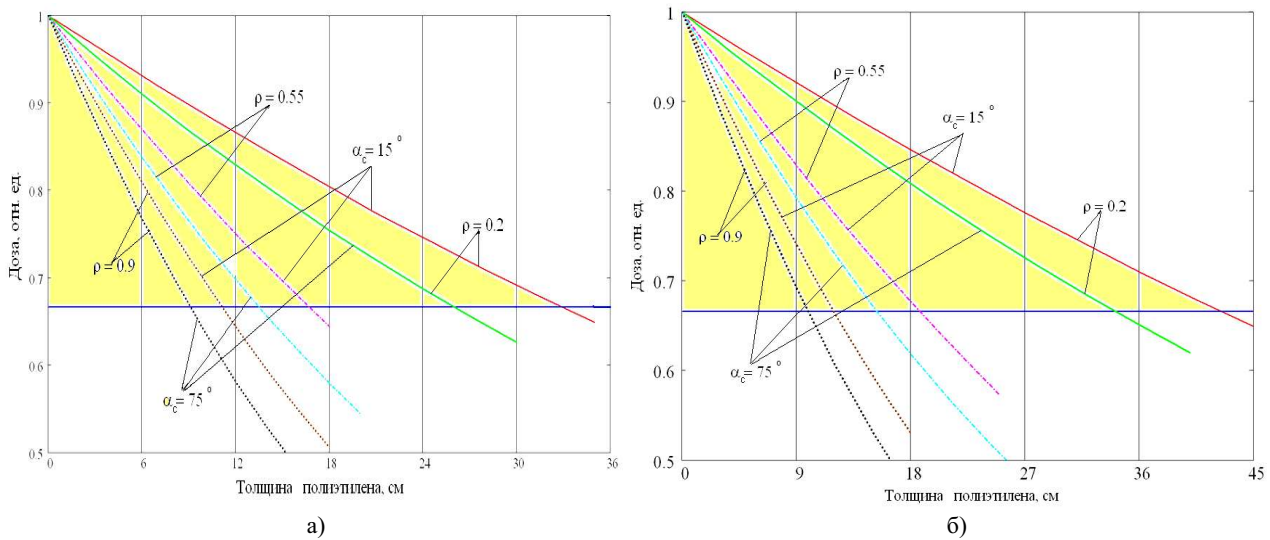


Рис.8. Дозовое распределение против центра конвертера в полиэтилене.  
а) конвертер с размерами  $Y_C = 100$  см; б) конвертер с размерами  $Y_C = 200$  см.

Решая уравнение, аналогичное 14б, получим значения  $Z_{max}$  в зависимости от длины конвертера. На рис.9 представлены зависимости  $Z_{max}$  от длины конвертера  $Y_C$  для различных значений плотности полиэтилена, угол коллимации  $\alpha_C = 15^\circ$ . Приведенные данные показывают, что с увеличением плотности полиэтилена  $Z_{max}$  резко уменьшается, особенно для больших длин конвертера.

На рис.10 приведены относительные изменения максимальной толщины полиэтилена  $Z_{max}(Y_C, \rho)$ , удовлетворяющие условию  $DUR < 1,5$ , от  $Z_{max}$  для длины конвертера 200 см в соответствии с соотношением:

$$\frac{(Z_{max}(Y_C, \rho) - Z_{max}(200, \rho))}{Z_{max}(200, \rho)}. \quad (16)$$

Данные, приведенные на рис.9 показывают, что при больших значениях плотности полиэтилена, начиная с длин конвертера  $\approx 80$  см, дальнейшее увеличение  $Y_C$  практически не приводит к росту  $Z_{max}$  (меньше 10%).

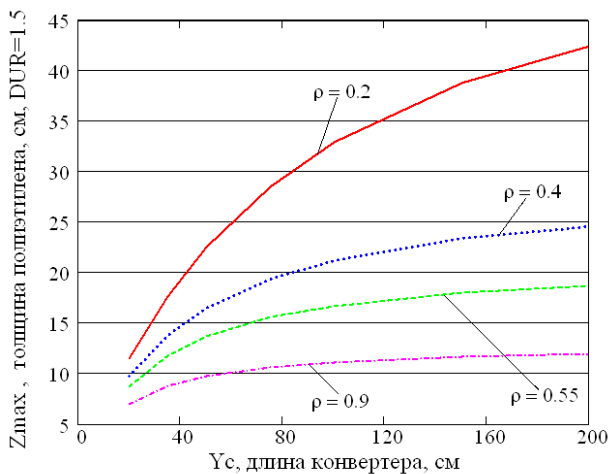


Рис.9. Максимальная толщина полиэтилена  $Z_{max}$  против центра конвертера, удовлетворяющая условию  $DUR < 1,5$  в зависимости от длины конвертера  $Y_C$ .

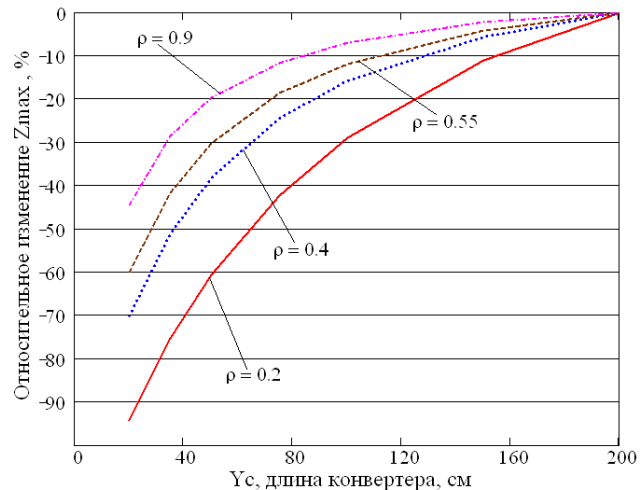


Рис.10. Относительные изменения максимальной толщины полиэтилена в зависимости от длины конвертера  $Y_C$ .

На рис.11а представлены зависимости максимальной глубины «полезного» объема ( $Z_{max}$ ) от расстояния «конвертер-поверхность» ( $L$ ) для разных значений плотности полиэтилена, угол коллимации  $\alpha_C = 15^\circ$ ,  $Y_C = 100$  см. Для сравнения аналогичные зависимости приведены на рис.11б для угла коллимации  $75^\circ$ . Данные, приведенные на рис.11 показывают, что уменьшение угла коллимации (или зоны облучения) приводит к увеличению зоны «полезного объема». При этом в случае большой плотности объекта глубина зоны «полезного объема» слабо зависит от дистанции конвертер-поверхность объекта.

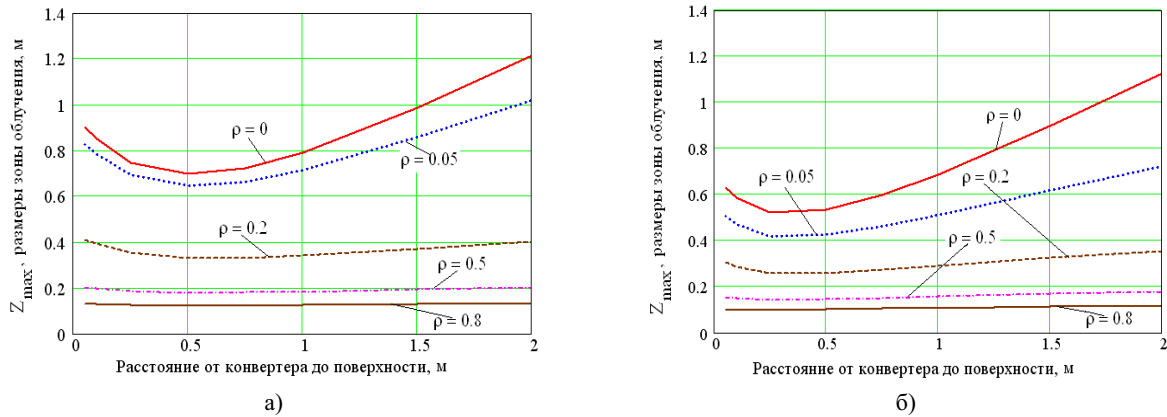


Рис.11. Зависимость максимальной глубины зоны «полезного объема» от расстояния «конвертер-поверхность»  $L$  для разных значений плотности полиэтилена.  
а)  $\alpha_C = 15^\circ$ ; б)  $\alpha_C = 75^\circ$ .

На рис.12 приведены отношения максимальных глубин зон «полезного объема» для углов коллимации  $\alpha_C = 15^\circ$  к  $\alpha_C = 75^\circ$  от расстояния «конвертер-поверхность»  $L$  для разных значений плотности полиэтилена.

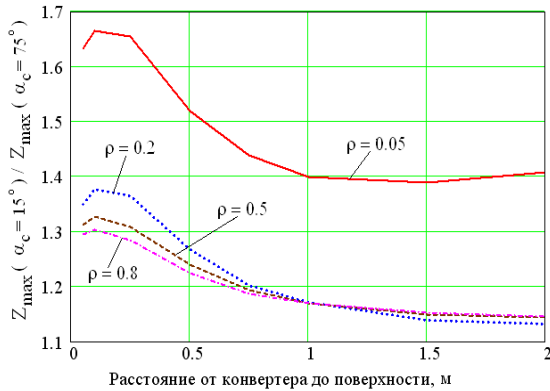


Рис.12. Зависимость отношения максимальных глубин зон «полезного объема» для углов коллимации  $\alpha_C = 15^\circ$  к  $\alpha_C = 75^\circ$  от расстояния «конвертер-поверхность»  $L$  для разных значений плотности полиэтилена.

Применение соотношения (15), дает возможность рассчитать дозовые распределения в объеме параллелепипеда с заданными размерами, при этом оптимизируются как размеры конвертера  $Y_C$ , так и размеры зоны облучения  $K_B$  (или угол коллимации  $\alpha_C$ ). Кроме этого, в соотношении (15) можно ввести различные характеристики пучка электронов, влияющие на дозовые распределения – плотность потока электронов вдоль конвертера, разные углы падения электронов на конвертер и т.д. Однако предложенная методика не учитывает вынос излучения за пределы объекта вблизи его границ.

Гамма-кванты с более высокой энергией обладают большей проникающей способностью. Однако энергия электронов не должна превышать 5 МэВ, то нами были исследована возможность изменения параметров конвертера, при которых спектральный состав ТИ имеет большую долю высокоэнергетических гамма-квантов по сравнению с ТИ, генерируемом на ИВА конвертере. Один из вариантов такого конвертера может быть увеличение толщины 1-го слоя из Та, а 2-й и 3-й слои такие же, как в конвертере ИВА (2 мм воды и 2 мм стали).

Увеличение толщины слоя из тантала приводит к значительному поглощению низкоэнергетической компоненты ТИ и росту доли высокоэнергетических гамма-квантов. А соответственно, растет средняя энергия ТИ.

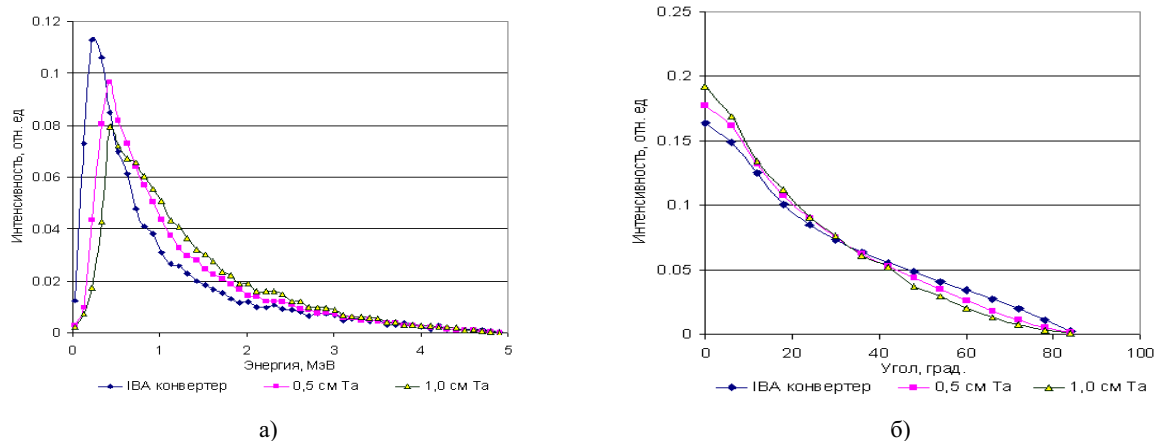


Рис.13. Конвертер ИВА и конвертеры с толщиной 1-го слоя 0.5 и 1.0 см Та при энергии электронов 5 МэВ.  
а) спектральные распределения ТИ; б) угловые распределения ТИ

На рис.13 приведены спектральные и угловые распределения создаваемые: конвертером ИВА, а также



конвертерами с первым слоем 0,5 см и 1,0 см Та, соответственно. Выход гамма-квантов в конвертерах с утолщенным первым слоем меньше чем в конвертере ИВА (выход фотонов вперед на 1 падающий электрон составляет 0,6; 0,23 и 0,13, а средние энергии 1,0; 1,15 и 1,30 МэВ, соответственно). Отметим также, что угловое распределение «высокоэнергетического» конвертера более острое.

Используя представленные на рис.13 спектральные и угловые распределения были выполнены расчеты  $Z_{max}$ .  $Z_{max}$  в зависимости от плотности полиэтилена, для конвертера с 1-м слоем = 1,0 см Та, приведены на рис.14. Для сравнения приведены значения  $Z_{max}$  для конвертера ИВА. Максимальная толщина объекта  $Z_{max}$ , при которой  $DUR < 1,5$ , для «высокоэнергетического» конвертера 6,5-8% больше чем для конвертера ИВА.

Используя представленные на рис.13 спектральные и угловые распределения были выполнены расчеты  $Z_{max}$ .  $Z_{max}$  в зависимости от плотности полиэтилена, для конвертера с 1-м слоем = 1,0 см Та, приведены на рис.14. Для сравнения приведены значения  $Z_{max}$  для конвертера ИВА. Максимальная толщина объекта  $Z_{max}$ , при которой  $DUR < 1,5$  для «высокоэнергетического» конвертера 6,5-8% больше чем для конвертера ИВА.

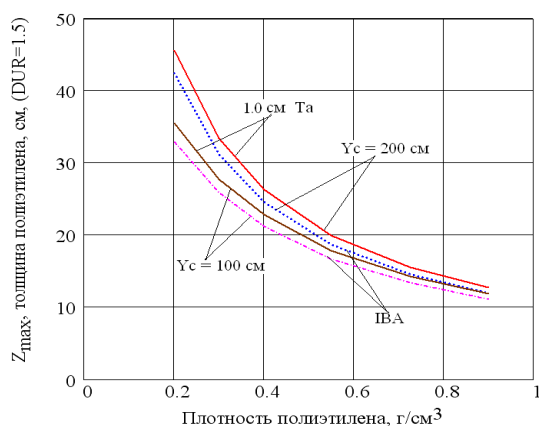


Рис.14. Максимальная толщина полиэтилена  $Z_{max}$  против центра конвертера, удовлетворяющая условию  $DUR < 1,5$  в зависимости от плотности полиэтилена.

увеличение длины конвертера не приводит к росту  $Z_{max}$ . Показана возможность увеличения максимальной толщины облучаемых объектов, при  $DUR < 1,5$  за счет увеличения средней энергии ТИ от электронов с энергией 5 МэВ. Это достигается увеличением толщины 1-го танталового слоя конвертера, из-за поглощения низкоэнергетических гамма-квантов в тантале, при этом происходит уменьшение выхода ТИ на один падающий электрон.

## ВЫВОДЫ

Разработана методика расчета дозовых распределений, создаваемых тормозным излучением в объектах, перемещающихся на конвейере. Исследованы особенности формирования дозовых распределений протяженным конвертером, генерирующим излучение от электронов с энергией 5 МэВ. Показано, что максимальная толщина облучаемых объектов с малой плотностью -  $Z_{max}$ , при допустимой неоднородности дозы  $DUR < 1,5$  пропорциональна длине конвертера. Исследовано влияние геометрических параметров радиационно-технологической линии (расстояния конвертер-поверхность, размера зоны облучения вдоль конвертера) на величину  $Z_{max}$ . Выполнен анализ влияния плотности облучаемых объектов на распределение дозы в них. Показано, что при большой плотности объекта, увеличение длины конвертера не приводит к росту  $Z_{max}$ . Показана возможность увеличения максимальной толщины облучаемых объектов, при  $DUR < 1,5$  за счет увеличения средней энергии ТИ от электронов с энергией 5 МэВ. Это достигается увеличением толщины 1-го танталового слоя конвертера, из-за поглощения низкоэнергетических гамма-квантов в тантале, при этом происходит уменьшение выхода ТИ на один падающий электрон.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. I. Meissner, M. Abs, M.R. Clealand at all. X-ray treatment at 5 MeV and above // Rad. Phys. Chem. – 2000.-Vol.57. – P.647-651.
2. F. Stichelbaut, I.L. Bol, M.R. Clealand 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.-Vol.71. –P. 297-299.
4. Руководство по радиационной защите для инженеров. - Т.1. / Под ред. Д.Л. Бродера и др. - М.: Атомиздат, 1972 – 424 с.
5. В.Т. Лазурик, С.А. Письменецкий, Г.Ф. Попов, В.Г. Рудычев, Д.В. Рудычев Выравнивание дозы на поверхности объектов при использовании тормозного излучения // Вісник Харківського університету, серія фізична «Ядра, частинки, поля. - 2005. - №664, вип.2(27). - С.40-44.
6. V.T. Lazurik, S.A. Pismenesky, G.F. Popov, D.V. Rudychev and V.G. Rudychev An increase of utilization efficiency of X-ray beam // Radiat. Phys. Chem. – 2007.-Vol.76. – P.1787-1791.

## OPTIMIZATION OF THE IRRADIATION PARAMETERS WITH THE AIM OF X-RAY TREATMENT OF MAXIMAL THICKNESS ARTICKS

V.T. Lazurik, V.G. Rudychev, D.V. Rudychev

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

Some particularities of dose distribution forming in radiation-technological lines (RTL) have been investigated, which correspond to X-rays from 5 MeV electrons, extensive converter and running objects. It is shown, in the low density irradiated objects the heterogeneity of absorbed dose field is determined by the next geometrical parameters: converter to object distance and length of irradiated area along the converter. It is found, that a maximum thickness of such irradiated objects  $Z_{max}$  is well-proportioned to the converter length under  $DUR < 1,5$  condition. It is shown, that in high density objects the converter extension does not lead to  $Z_{max}$  growth. The analysis of the converter modification with the aim of obtaining the maximal processed thickness showed the way of increase of X-ray mean energy.

**KEY WORDS:** radiation technology, X-ray, bremsstrahlung, extensive converter, electron