
ФИЗИКА

УДК 539.2
ББК 22.373.41
Х 70

Хоконов А.Х.

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики конденсированного состояния физического факультета, заведующий лабораторией астрофизики и физики нейтрино Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х.М. Бербекова, тел. (8662) 77-51-11

Хамукова Л.А.

Ассистент кафедры физики конденсированного состояния физического факультета Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х.М. Бербекова, тел. (8662) 77-51-11

Ионизационные потери энергии и пробеги релятивистских электронов в высокомолекулярных соединениях (Рецензирована)

Аннотация

Для релятивистских электронов с энергией до 10 МэВ рассчитаны распределения удельных ионизационных потерь по глубине в полиэтилене и оргстекле. Найдены эффективные толщины поглощения электронов.

Ключевые слова: ионизационные потери, полиэтилен, оргстекло, поглощение электронов.

Khokonov A.Kh.

Doctor of Physics and Mathematics, Professor of the Department of Physics of Condensed State at Physics Faculty, Head of Astrophysics and Physics of Neutrino Laboratory of Kh.M. Berbekov Kabardian-Balkar State University, ph. (8662) 77-51-11

Khamukova L.A.

Assistant Lecturer of the Department of Physics of Condensed State at Physics Faculty of Kh.M. Berbekov Kabardian-Balkar State University, ph. (8662) 77-51-11

Ionization energy losses and relativistic electron ranges in the macromolecular compounds

Abstract

The distribution of specific ionization energy losses by depth in polyethylene and plexiglass is calculated for relativistic electrons with energies of up to 10 MeV. The effective thicknesses of the electron absorption are found.

Key words: ionization losses, polyethylene, plexiglass, absorption of electrons.

Введение

В настоящее время широко используется радиационная модификация полимеров для улучшения эксплуатационных характеристик материалов на их основе. Одним из основных способов радиационного воздействия на полимерные материалы является их экспонирование электронами МэВ-ных энергий [1]. Для энергии электронов $E \ll 800/Z$ (МэВ) основным механизмом потери энергии электронов являются ионизационные потери. Ионизационное воздействие электронов на вещество проявляется в возбуждении молекул с последующим их развалом на свободные радикалы. Вторичные процессы определяют конечные изменения химического строения полимеров, а именно: взаимодействие радикала с полимерной цепью, рекомбинация двух радикалов и об-

разование поперечных связей (сшивание) [2]. Целью настоящей работы является определение эффективных толщин радиационного воздействия МэВ-ных электронов на полимерные материалы, а также расчет распределения удельных ионизационных потерь по глубине проникновения.

Удельные ионизационные потери энергии электронов в полимерах

Ионизационные потери энергии электронов при кинетических энергиях, заметно превышающих усредненный потенциал ионизации атомов среды, достаточно строго описываются соотношением Бете-Блоха [3]. Для однокомпонентной атомарной среды формулу Бете-Блоха удобно переписать в виде [4]:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{dT}{dz} = \frac{2\pi N_A e^4}{mc^2} \frac{Z}{A} f(T, Z), \quad (1)$$

где T – кинетическая энергия, m – масса электрона, ρ – плотность среды, N_A – число Авогадро, Z – заряд молекулы, A – атомарный вес.

Функция $f(T, Z)$ имеет вид:

$$f(T, Z) = \frac{(1+x)^2}{x(2+x)} \left[f_0(T) - 2 \ln \left(\frac{J(Z)}{mc^2} \right) - \delta(T, Z) \right], \quad (2)$$

где

$$f_0(T) = \ln \left(\frac{x^2(2+x)}{2} \right) + \frac{1}{8} \frac{(8+x^2)}{(1+x)^2} - \frac{(1+2x)}{(1+x)^2} \ln 2,$$

$x = \frac{T}{mc^2}$, $J(Z) = 16 Z^{0.9}$ – средняя энергия возбуждения, $\delta(T, Z)$ – поправка на эффект плотности, которая в релятивистском пределе ($v \rightarrow c$) стремится к виду:

$$\delta(T, Z) \rightarrow 2 \ln(\hbar\omega_p / J(T, Z)) + 2 \ln(x+1) - 1, \quad \hbar\omega_p = 28,8 \sqrt{\rho Z / A}.$$

В случае однокомпонентной молекулярной среды с химической формулой вида

$$(X_1)_{P_1} (X_2)_{P_2} \dots (X_n)_{P_n} = \prod_{\alpha=1}^n (X_\alpha)_{P_\alpha}$$

обобщением формулы (1) является выражение:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{dT}{dz} = \frac{2\pi N_A e^4}{mc^2} \frac{1}{\mu} \sum_{\alpha} Z_\alpha P_\alpha \left(f(T, Z) - 2 \ln \frac{J_\alpha}{mc^2} \right), \quad (3)$$

где $\mu = \sum_{\alpha=1}^n P_\alpha A_\alpha$ – молярная масса молекулы соединения.

Удельные ионизационные потери энергии электронов в полиэтилене приведены на рисунке 1.

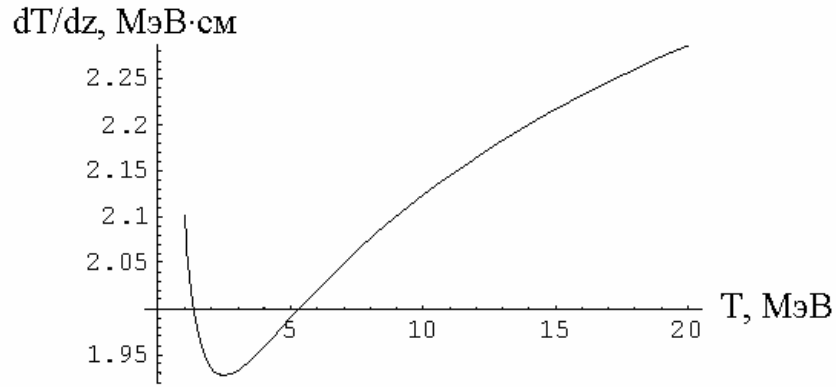


Рис. 1. Удельные ионизационные потери

Распределения удельных ионизационных потерь электронов по глубине в оргстекле и полиэтилене показаны на рисунке 2.

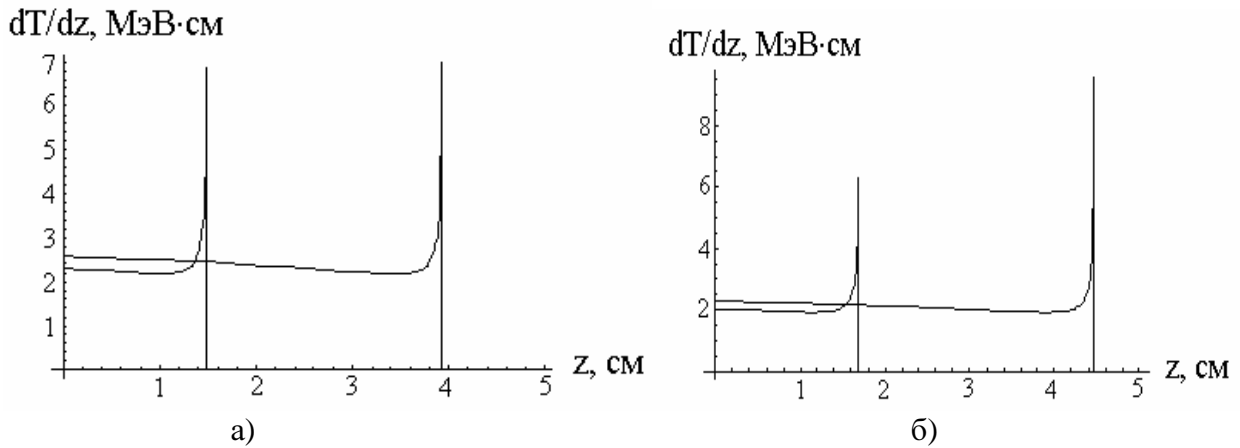


Рис. 2. Удельные ионизационные потери электронов в оргстекле (а) и в полиэтилене (б)

Изменение кинетической энергии электронов по мере прохождения через оргстекло и полиэтилен показано на рисунке 3.

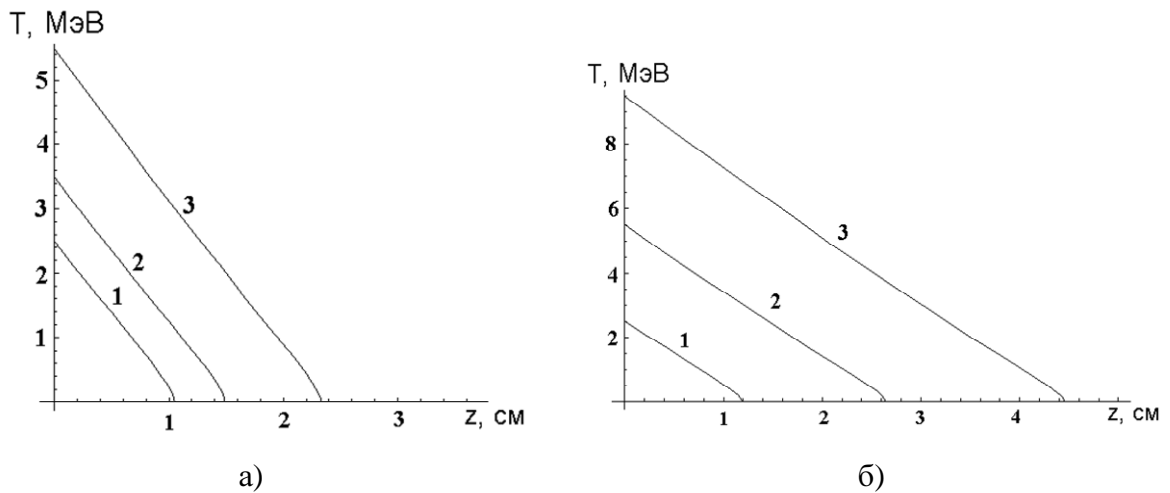


Рис. 3. Зависимость кинетической энергии электронов от глубины проникновения при прохождении через оргстекло (а) и полиэтилен (б)

Кривые 1, 2 и 3 соответствуют начальным энергиям электронов 3, 4 и 6 МэВ. Как видно из рисунка 3, уменьшение энергии электронов происходит по линейному закону по всей толщине материала. Удельные ионизационные потери не меняются вплоть до малой области остановки, составляющей 2-3 процента от полного пробега.

Приведенные выше результаты не учитывают тормозное излучение электронов, что допустимо при рассмотренных энергиях и зарядах ядер мишени $Z \leq 8$.

Примечания:

1. Финкель Э.Э., Карпов В.Л., Берляд С.М. Технология радиационного модифицирования полимеров // Радиационно-химическая технология. Вып. 15. М.: Энергоатомиздат, 1983.
2. Радиационно-химическая модификация полимерных материалов: сб. докладов. Т. 1, 2. Варшава: ИЯИ, 1978.
3. Группен К. Детекторы элементарных частиц: справ. изд.: пер. с англ. Новосибирск: Сибирский хронограф, 1999. 408 с.
4. Seltzer S.M., Berger M.J. Procedure for calculating the radiation stopping power for electrons // Int. J. Appl. Radiat. Isot. 1982. Vol. 33. P. 1219-1226.