

УДК 550. 835

О КОЭФФИЦИЕНТАХ ОСЛАБЛЕНИЯ ГАММА-КВАНТОВ

О. С. Маренков, Р. С. Держиманов

При прохождении узкого пучка γ -излучения через вещество в результате рассеяния и поглощения фотоны выбывают из пучка. В диапазоне энергий γ -квантов 0,03—10 Мэв, представляющем интерес для радиометрии и ядерной геофизики, основными процессами, приводящими к ослаблению потока γ -квантов, являются: фотоэлектрическое поглощение, когерентное и комптоновское рассеяния, образование электронно-позитронных пар. Потеря фотонов из идеально узкого пучка монохроматического излучения с энергией ϵ на единице длины пути определяет соответственно полный линейный коэффициент ослабления

$$\mu(\epsilon) = \sum_{p=1}^4 \mu_p(\epsilon) = N \sum_{p=1}^4 \sigma_p(\epsilon),$$

где μ_p — парциальный линейный коэффициент ослабления для указанных выше процессов взаимодействия γ -квантов с веществом; σ_p — парциальное поперечное сечение взаимодействия; N — число атомов в единице объема.

Умножая линейный коэффициент ослабления μ на $A(\rho N_0)^{-1}$, $A(\rho N_0 Z)^{-1}$ и ρ^{-1} (A , Z , ρ — атомный вес, атомный номер и плотность, N_0 — число Авогадро), получим коэффициенты ослабления соответственно на атом μ_a , электрон μ_e и единицу массы μ_ρ .

Первые общедоступные сводные данные о коэффициентах ослабления γ -квантов для различных элементов в диапазоне энергий 0,1—6,0 Мэв опубликованы в 1952 г. К. Дэвиссоном и Р. Ивенсом. Они не учитывали когерентного рассеяния фотонов на связанных электронах атома.

Г. Уайт [1952] систематизировала сведения о коэффициентах ослабления (парциальных и полных) в широком диапазоне энергий, рассчитанных по теории взаимодействия γ -квантов с веществом. При этом сечение рассеяния представляет сумму сечений когерентного и комптоновского рассеяния. Вследствие различных приближений в теориях, использованных для разных интервалов энергии и атомных номеров, точность табулированных величин не везде одинакова. В частности, при малых ϵ и Z истинная точность не выше 10%.

В пересмотренном варианте этой работы [White-Grodsstein, 1957] детально проанализированы теоретические и экспериментальные данные и опубликованы значения парциальных и полных массовых коэффициентов ослабления (с учетом и без учета когерентного рассеяния). При этом оказалось, что ошибки в значениях приведенных коэффициентов

для энергий ниже 50 *кэв* достигают 10%, особенно для легких элементов, и не превышают 3—5% для энергии выше 100 *кэв*.

Экспериментальные данные, полученные после опубликования этой работы, дали возможность пересмотреть значения коэффициентов для малых энергий [Mc Ginnies, 1959] и определить их с такой же степенью точности (3—5%), как и остальные значения. Таблицы, приведенные в работе Мак-Джинс [1959], предназначены для замены тех частей таблиц Уайт-Гродштейн [1957], которые относятся к интервалу энергий 0,01—0,1 *Мэв*. При этом данные по сечению рассеяния с учетом и без учета когерентного рассеяния остались без изменения. Исследование Уайт-Гродштейн с некоторыми исправлениями Мак-Джинс содержит наиболее современные и полные данные для широкого круга элементов и некоторых веществ в области энергий 0,01—100 *Мэв*.

Аналитическая аппроксимация энергетической зависимости полных коэффициентов ослабления γ -квантов. Полные коэффициенты ослабления γ -квантов в веществе являются сложной функцией энергии. Упрощенные аналитические выражения для $\mu(\epsilon)$ можно получить лишь в ограниченных пределах изменения аргумента.

В настоящей статье рассмотрен возможный вариант аналитического представления зависимости $\mu(\lambda)$ (λ — длина волны в комптоновских единицах) в диапазоне энергий 0,03—10 *Мэв*. В общем виде зависимость $\mu(\lambda)$ можно представить полиномом n -й степени

$$\mu(\lambda) = \rho \sum_{h=0}^n C_h \lambda^h \quad (1)$$

или

$$\mu(\epsilon) = \rho \sum_{h=0}^n b_h \epsilon^{-h},$$

где ϵ — энергия фотонов, *Мэв*; ρ — плотность вещества, *г/см³*; $b_h = C_h (0,511)^h$; C_h — неопределенные коэффициенты.

Чтобы вычисления при расчете γ -полей не были слишком громоздкими, удобно аппроксимировать $\mu(\lambda)$ формулой (1) с небольшим n .

Рассмотрим случаи аппроксимации полных массовых коэффициентов ослабления в энергетическом интервале 0,03—0,3 *Мэв*

$$\frac{\mu}{\rho}(\lambda) = C_0 + C_1 \lambda + C_2 \lambda^2 + C_3 \lambda^3, \quad (2)$$

в интервале 0,3—10 *Мэв*

$$\frac{\mu}{\rho}(\lambda) = C_0 + C_1 \lambda + C_2 \lambda^2. \quad (3)$$

По табличным данным [White-Grodstein, 1957; Mc Ginnies, 1959] формулами (2), (3) нами аппроксимирована функция $\frac{\mu}{\rho}(\lambda)$ с учетом и без учета когерентного рассеяния бериллия, углерода, кислорода, натрия, магния, алюминия кремния, фосфора, серы, калия, кальция, железа, меди, воздуха, воды, песка, фосфата кальция, бетона. Коэффициенты C_h вычислены методом наименьших квадратов на машине БЭСМ-2М.

Результаты расчетов приведены в прилагаемой таблице. Максимальная относительная ошибка аппроксимации не превышает 4% в интервале энергий 0,03—0,3 *Мэв*, 5% — в интервале 0,3—10 *Мэв*. В последнем

**Коэффициенты полиномиальной аппроксимации без учета (числитель)
и с учетом (знаменатель) когерентного рассеяния**

Элемент, вещество	$\varepsilon = 0,03 - 0,3 \text{ Мэв}$				$\varepsilon = 0,3 - 10 \text{ Мэв}$		
	$C_0, 10^{-3}$	$C_1, 10^{-3}$	$C_2, 10^{-3}$	$C_3, 10^{-3}$	$C_0, 10^{-3}$	$C_1, 10^{-3}$	$C_2, 10^{-3}$
Бериллий	66,5	19,5	-1,56	0,0453	12,3	103	-34,5
	65,2	20,3	-1,65	0,0498	12,3	103	-34,5
Углерод	70,6	24,5	-2,13	0,0739	15,0	113	-37,2
	70,6	25,1	-2,17	0,0788	15,0	113	-37,2
Кислород	67,5	27,5	-2,73	0,120	16,2	109	-34,9
	65,0	29,1	-2,82	0,128	16,2	109	-34,9
Натрий	58,8	30,8	-3,59	0,227	17,2	99,5	-30,8
	58,8	31,0	-3,36	0,225	17,2	99,2	-30,3
Магний	63,1	30,7	-3,71	0,277	18,3	100	-30,5
	59,8	33,4	-3,88	0,296	18,3	100	-30,0
Алюминий	57,4	32,8	-4,12	0,330	18,4	97,1	-29,3
	58,1	32,2	-3,68	0,323	18,4	96,9	-29,8
Кремний	58,9	34,7	-4,53	0,410	19,7	98,4	-29,1
	60,7	33,1	-3,79	0,390	19,7	98,4	-28,7
Фосфор	56,1	34,5	-4,66	0,469	19,6	94,1	-27,4
	54,8	35,5	-4,34	0,469	19,6	94,0	-27,0
Сера	59,7	34,7	-4,69	0,548	20,8	95,0	-26,9
	58,9	34,9	-4,16	0,542	20,8	95,2	-26,5
Калий	57,2	34,9	-5,10	0,837	22,0	87,1	-22,9
	55,0	36,7	-4,73	0,844	22,0	87,0	-22,2
Кальций	58,5	35,5	-5,13	0,970	23,1	88,0	-22,7
	62,1	33,3	-3,95	0,939	23,2	87,6	-21,5
Железо	58,2	29,2	-3,63	1,73	24,8	72,2	-14,5
	58,1	30,1	-2,70	1,72	24,8	71,9	-13,0
Медь	62,7	23,2	-1,71	2,17	25,9	65,3	-9,97
	61,0	24,8	-0,647	2,16	25,9	65,1	-8,47
Воздух	64,4	29,2	-2,94	0,124	15,8	110	-35,8
	67,4	27,3	-2,54	0,113	15,8	110	-35,3
Вода	77,5	28,1	-2,58	0,107	17,0	124	-40,6
	77,9	23,3	-2,51	0,109	17,0	124	-40,2
Песок	61,3	32,7	-3,90	0,271	17,8	104	-32,2
	60,3	31,8	-3,31	0,248	17,7	104	-32,4
Фосфат кальция	60,4	33,0	-4,23	0,528	19,5	97,0	-28,0
	63,1	31,5	-3,54	0,512	19,5	96,7	-27,1
Бетон	60,0	33,5	-4,05	0,345	18,2	103	-31,7
	60,6	33,1	-3,67	0,340	18,2	103	-31,3

случае ошибка для легких сред (бериллия, углерода, кислорода, воздуха, воды) составляет 6—8%.

Для многокомпонентных сред и химических соединений, горных пород и руд коэффициенты $\frac{\mu}{\rho}$ (λ) можно получить на основе известных зависимостей $\frac{\mu_i}{\rho_i}$ (λ) отдельных элементов:

$$\frac{\mu}{\rho}(\lambda) = \sum_i \frac{\mu_i}{\rho_i}(\lambda) a_i, \quad (4)$$

где a_i — весовая доля, с которой i -й элемент входит в смесь или химическое соединение.

Вычисления по формуле (4) для песка, фосфата кальция, бетона, некоторых горных пород и руд показали, что максимальная ошибка не превышает 5%.

ЛИТЕРАТУРА

- Davisson C., Evans R. Rev. Mod. Phys., v. 24, № 2, 79—107, 1952.
McGinnies R. Nat. Bur. Standards, supplement to Circular, № 583, 1959.
White G. Nat. Bur. Standards, Rep. № 1003, 1952.
White-Grodstein G. Nat. Bur. Standards, Circular № 583, 1957.
-