

## ФАКТОРЫ НАКОПЛЕНИЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ЗАЩИТ

Б. А. Бенецкий, М. В. Плотникова

*Факторы накопления определяют отклонения от экспоненциального закона реальной зависимости ослабления монохроматического плоскопараллельного пучка гамма-излучения при прохождении через слой вещества. Для ряда сред и защитных материалов факторы накопления хорошо известны и табулированы. Рассматривается решение задачи определения фактора накопления для композита на основе данных для его компонентов.*

**Ключевые слова:** защита, гамма-излучение, накопление.

Вначале во избежание возможных неточностей определим употребляемые в тексте термины. Композиционный радиационно-защитный материал или композит (например, волокнообразующий полимер, к молекулам которого присоединены ионы металла, или бетон, включающий в свой состав песок, щебень и связующие вещества) – это материал, состоящий из компонентов. В свою очередь компоненты (молекулы полимера и ионы металла, песок и щебень) состоят из структурных элементов, которые для химических соединений совпадают с химическими элементами, имеющими определенные атомные номера, а в других случаях имеют иную природу и иные характеристики, как, например, размер и состав гранул. Изначально закономерности взаимодействия фотонного излучения со средами классифицировались по таким параметрам, как атомные номера и плотности (например, для химических элементов в определенном агрегатном состоянии), по атомарному составу для соединений и веществ (вода и воздух). Затем в связи с решением практических задач были определены и табулированы коэффициенты ослабления и факторы накопления для некоторых строительных материалов-композитов (бетон, чугун). Такие данные ограничены, а число композиций – нет, однако имеются различные полуэмпирические методы оценок факторов накопления и для композитов. В восьми параграфах большого двухтомного компиляционного труда [1] дан солидный обзор способов учета эффектов накопления при решении задач защиты от ионизирующих

---

Учреждение Российской академии наук Институт ядерных исследований РАН, Москва; e-mail: benetsky@yandex.ru.

излучений. В нашей работе по созданию радиационно-защитных материалов и изделий мы столкнулись с необходимостью расширить арсенал средств оценки гамма-потоков и накопления доз в материалах различного назначения [2–4] и несколько дополнить отдельные результаты, приведенные в [1]. В частности, оказалось полезным ввести в соответствующие соотношения в явном виде концентрации компонентов, входящих в состав композита, что, как ни странно, отсутствует в упомянутых выше данных.

Линейный коэффициент ( $\tau$ ) или массовый коэффициент ( $\mu$ ) ослабления потока фотонов, а также толщины кратностей ослабления не являются исчерпывающими характеристиками защитных свойств материалов и изделий на их основе. Причина этой неполноты – процессы, приводящие к появлению рассеянного и вторичного излучений. Эти компоненты, наряду с первичным фотонным излучением, вносят вклад в потоки квантов и формирование доз. В ряде практически важных случаев такой вклад в дозу за защитой может превышать дозу от ослабленного первичного излучения на 1–2 порядка. Для одноэлементных материалов этот эффект учитывается введением в экспоненциальный закон ослабления первичного пучка множителя  $B$ , зависящего от атомного номера элемента  $Z$ , энергии квантов  $E$  и произведения коэффициента ослабления  $\mu$  на поверхностную плотность слоя  $d$ . Тогда соотношение начальной интенсивности падающего пучка  $I_0$  и прошедшего через слой –  $I$  будет равно

$$I = I_0 B(\mu d, E, Z) \exp(-\mu d), \quad (1)$$

где  $B(\mu d, E, Z)$  – фактор накопления потока фотонов, функционально зависящий от оптической толщины  $\mu d$ , энергии фотонов  $E$  и атомного номера элемента  $Z$ . Аналогично можно записать соотношения для факторов накопления потока энергии и доз, формируемых потоками фотонов. Они будут отличаться названиями и численными значениями при фиксированных величинах перечисленных аргументов и при сохранении функциональной зависимости (1). Существенно отметить, что с учетом биологической эффективности воздействия излучения эффект накопления доз может привести, например, к тому, что доза за защитным покровным слоем биологической ткани может превысить дозу на поверхности тела (раздел 15.6 в [3]).

Мы будем использовать в качестве основной характеристики массовый  $\mu$ , а не линейный  $\tau = \mu \times \rho$  коэффициент ослабления и ниже приведем тому объяснение. Массовый коэффициент ослабления может быть выражен через микроскопические характеристики вещества и для химических элементов, как легко показать, он равен отношению

эффективного сечения взаимодействия фотона с атомом  $\sigma$  к массе атома  $m$

$$\mu = \frac{\sigma}{m}. \quad (2)$$

Закон ослабления пучка (1) и понятие фактора накопления обобщаются с соответствующими трансформациями характеристик сред на любые гомогенные и даже (для факторов накопления) на гетерогенные защиты (см. 10.5 в [1]). Произведение массового коэффициента ослабления  $\mu$  на поверхностную плотность слоя  $d$  (по принятой терминологии “оптическая толщина слоя”  $\mu d$ ) численно равно линейной толщине слоя в единицах свободного пробега фотона в гомогенном материале. Имеется большой объем расчетных данных по факторам накопления в бесконечной среде для одноэлементных и иных гомогенных материалов (таких, как воздух, вода, бетон, алюминий, чугун, железо, свинец) и точечных изотропных источников фотонов с энергиями от 15 кэВ до 15 МэВ в интервалах оптических толщин до 20–40 длин свободного пробега. Результаты расчетов достаточно хорошо согласуются с экспериментами и имеют множество форм аналитического представления (параграф 10.4 в [1]). Для вышперечисленных, “стандартных” материалов имеется набор параметров для расчетов факторов накопления по формулам Тейлора, Бергера, “полиномиальной” и другим, причем полезно отметить, что при  $\mu d > 1.5$  факторы накопления для полубесконечной среды близки к таковым для бесконечной среды.

В систематизации данных для немноноэлементных материалов применяется понятие эффективного атомного номера  $Z_{\text{ef}}$ . Эффективный номер является результатом усреднения номеров элементов  $Z_i$ , входящих в состав материала, с весами, равными отношению оптических толщин каждого из компонентов  $\mu_i d_i$  к полной оптической толщине  $\sum \mu_i d_i$

$$Z_{\text{ef}} = \frac{\sum Z_i \mu_i d_i}{\sum \mu_i d_i}, \quad (3)$$

где  $d_i$  – поверхностная плотность либо реального  $i$ -го слоя, либо суммарная поверхностная плотность рассредоточенного в составе композита  $i$ -го компонента. Это привычное утверждение об эквивалентности суммарной поверхностной плотности рассредоточенного компонента и поверхностной плотности реального слоя является следствием принципа аддитивности свойств среды в отношении ослабления гамма-излучения. Этот принцип может быть строго обоснован для первичного излучения, но для эффектов накопления он является приближенным и подтверждением его применимости может служить только практика. Особенно четко приближенный характер упомянутого принципа проявляется в ослаблении вторичного характеристического излучения

двухслойными пакетами поглощающих материалов [5]. Поскольку характеристическое излучение мало поглощается в материале, в котором оно генерируется, соотношения интенсивностей характеристических линий и интенсивности прошедшего первичного излучения зависят от ориентации двухслойного пакета относительно источника. В области энергии первичных фотонов 100–150 кэВ и для оптических толщин слоев порядка  $\mu d \approx 1.5$  эти эффекты составляют (для комбинации, например, свинец-лютеций) величины порядка процента интенсивности прошедшего через пакет первичного излучения.

Возвращаясь к обсуждению соотношения (3), заметим, что формально химический элемент может рассматриваться как композит, состоящий из одного компонента с  $Z_{\text{ef}} = Z$ , и тогда в систематизации свойств на основе атомных номеров композиты и элементы формально равноправны. Именно формально, поскольку в формулу (3) входят коэффициенты ослабления, зависящие не только от свойств сред и материалов, но и от энергии фотонов. Практически для энергий свыше 500 кэВ эта зависимость сравнительно слабая и сравнима с точностью оценок факторов накопления упомянутыми выше способами. Одной из широко применяемых (в том числе и для гетерогенных сред [1]) оценок фактора накопления для композита  $B_k$ , состоящего из компонентов с факторами накопления  $B_i$ , является соотношение, в котором усреднение факторов накопления осуществляется аналогично усреднению атомных номеров (3):

$$B_k = \frac{\sum B_i \mu_i d_i}{\sum \mu_i d_i}. \quad (4)$$

Легко показать, что формула (4) является следствием (3). Она может быть получена для композита из двух компонентов с атомными номерами  $Z_1$  и  $Z_2$ , факторами накопления  $B_1$  и  $B_2$  и в предположении линейной интерполяции зависимости фактора накопления композита от его эффективного атомного номера  $B_k(Z_{\text{ef}})$  в интервале от  $Z_1$  до  $Z_2$  при изменении содержания компонентов от 100% по  $Z_1$  до 100% по  $Z_2$ . Далее, рассматривая один из компонентов как композит, можно обобщить этот результат на композит из трех компонентов и затем методом математической индукции – на любое число компонентов. Кроме того, формулы (3) и (4) представлены, по нашему мнению, в неудачной форме, поскольку среди характеристик многокомпонентной среды или материала не содержатся в явном виде основные характеристики: массовые –  $\alpha_i^{\text{mass}}$  или атомарные  $\alpha_i^{\text{at}}$  концентрации их компонентов. Разделив числители и знаменатели в (3) и (4) на полную поверхностную плотность слоя  $\sum d_i$ , получим

$$Z_{\text{ef}} = \frac{\sum Z_i \mu_i \alpha_i^{\text{mass}}}{\sum \mu_i \alpha_i^{\text{mass}}} = \frac{1}{\mu_k} \sum Z_i \mu_i \alpha_i^{\text{mass}}, \quad (5)$$

где  $\mu_k = \sum \mu_i \alpha_i^{\text{mass}}$  – массовый коэффициент ослабления композита. Соответственно, для фактора накопления композита

$$B_k = \sum B_i \mu_i \alpha_i^{\text{mass}} / \sum \mu_i \alpha_i^{\text{mass}} = \frac{1}{\mu_k} \sum B_i \mu_i \alpha_i^{\text{mass}}. \quad (6)$$

Если структурными элементами компонентов являются атомы, легко получить соотношение для связи массовой и атомарной концентраций  $i$ -го компонента в композите:

$$\alpha_i^{\text{mass}} = \alpha_i^{\text{at}} \times \frac{\rho_i}{\rho_k} \times \frac{n_k}{n_i}, \quad (7)$$

где  $\rho_i$  – плотность компонента, состоящего из одного типа атомов, вне композита в том агрегатном состоянии, для которого определен коэффициент  $\mu_i$ ;  $\rho_k$  – плотность композита;  $n_k$  – количество всех атомов в единице объема композита;  $n_i$  – количество атомов компонента в единице его объема вне композита в том агрегатном состоянии, для которого определен коэффициент  $\mu$ . При применении массовых характеристик для решения задач защиты нет необходимости (см., например, формулу (2)) учитывать изменения пространственной структуры вещества в процессе превращения компонентов в композит. При переходе же к атомарной концентрации и линейному коэффициенту ослабления это необходимо, и в формуле (7) изменение структуры учитывается отношением  $\frac{n_k}{n_i}$ . Такой учет требует дополнительных данных, но является неотъемлемым при оценках компактности защит. При переходе к атомарной концентрации на основании соотношения (7) формулы (5) и (6) преобразуются в

$$Z_{\text{ef}} = \sum Z_i \tau_i \alpha_i^{\text{at}} \frac{n_k}{n_i} / \sum \tau_i \alpha_i^{\text{at}} = \frac{1}{\tau_k} \sum Z_i \tau_i \alpha_i^{\text{at}} \frac{n_k}{n_i}, \quad (8)$$

$$B_k = \sum B_i \tau_i \alpha_i^{\text{at}} \frac{n_k}{n_i} / \sum \tau_i \alpha_i^{\text{at}} = \frac{1}{\tau_k} \sum B_i \tau_i \alpha_i^{\text{at}} \frac{n_k}{n_i}, \quad (9)$$

где  $\tau_k = \sum \tau_i \alpha_i^{\text{at}}$  – линейный коэффициент ослабления гамма-излучения композитом.

При создании, например, радиационно-защитной одежды в качестве основы, как правило, используется текстильный или эластомерный материал с эффективным номером  $Z_1$ . В него химическим способом или способом сополимеризации вводится фотопоглощающая добавка с номером  $Z_2$ . В подобных случаях может оказаться полезной формула для массовой концентрации добавки, определяющей эффективный номер радиационно-защитного композита  $Z_k$ :

$$\alpha_2^{\text{mass}} = \frac{(Z_k - Z_1) \mu_1}{Z_2 \mu_2 - Z_1 \mu_1 - Z_k (\mu_2 - \mu_1)}. \quad (10)$$

Т а б л и ц а 1

Сравнения характеристик по эффекту накопления для основных защитных материалов и композитов на их основе

| Хар-ки матер., эквиваленты                | Вода, конц. в композ. зиц. | Бетон, конц. в композ. зиц. | Алюминий, конц. в композ. зиц. | Железо, конц. в композ. зиц. | Свинец, конц. в композ. зиц. | $Z_{ef}$ комп. | $\mu_k$ комп. | $B_k$ комп. |
|-------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------|---------------|-------------|
| $Z$ или $Z_{ef}$ , отн.ед.                | 6.606                      | 11.037                      | 13                             | 26                           | 82                           |                |               |             |
| $\mu$ , $см^2 / г^{-1}$                   | 0.0966                     | 0.0877                      | 0.0845                         | 0.0841                       | 0.152                        |                |               |             |
| $B$ , отн.ед.                             | 5.12                       | 4.40                        | 4.22                           | 3.03                         | 1.43                         |                |               |             |
| $\alpha_i^{mass}$ , отн.ед. экв. бетона   | 0.2793                     |                             | 0.7207                         |                              |                              | 11.037         | 0.0879        | 4.50        |
| $\alpha_i^{mass}$ , отн.ед. экв. бетона   | 0.4060                     |                             | 0.5251                         |                              | 0.0689                       | 11.037         | 0.0894        | 4.54        |
| $\alpha_i^{mass}$ , отн.ед. экв. алюминия |                            | 0.8640                      |                                | 0.1360                       |                              | 13.000         | 0.0872        | 4.22        |
| $\alpha_i^{mass}$ , отн.ед. экв. железа   |                            |                             | 0.8857                         |                              | 0.1143                       | 26.000         | 0.0922        | 3.42        |
| $\alpha_i^{mass}$ , отн.ед. экв. железа   | 0.1222                     |                             | 0.7536                         |                              | 0.1242                       | 26.004         | 0.0944        | 3.77        |
| $\alpha_i^{mass}$ , отн.ед. экв. железа   | 0.10823                    | 0.39222                     | 0.36780                        |                              | 0.13175                      | 26.000         | 0.0960        | 3.80        |

Пример применения изложенных в статье результатов, в частности, формул (5) и (6), иллюстрирующий возможности и ограничения предлагаемого способа оценки факторов накопления в композитах, представлен в таблице 1. В первых четырех строках таблицы 1 (с 1 по 5 столбец) приведены наименования и характеристики пяти стандартных материалов: их атомные  $Z$  и эффективные атомные  $Z_{ef}$  номера, коэффици-

енты ослабления  $\mu$  гамма-излучения с энергией 500 кэВ и факторы накопления  $B$  для указанной энергии и оптической толщины слоя  $\mu d = 2$ . Данные по  $\mu$  и  $B$ , приведенные в таблице 1, вычислены как средние из ряда источников. В шести последующих строках – состав и характеристики различных композитов, которые по своим свойствам в отношении эффекта накопления должны быть близки к одному из основных материалов. В первом столбце символы  $\alpha_i^{\text{mass}}$  относятся к цифрам, расположенным на пересечении данной строки с последующими пятью столбцами, эти цифры показывают концентрации входящих в композит “основных” компонентов. Значения  $Z_{\text{ef}}$  эффективных атомных номеров, коэффициентов поглощения  $\mu_k$  и факторов накопления  $B_k$  композитов представлены в трех последних столбцах таблицы 1. Например, из пятой строки таблицы 1 следует, что “эквивалент бетона” – композит, состоящий из 0.2793 воды и 0.7207 алюминия, имеет характеристики, представленные в трех ее последних столбцах ( $Z_{\text{ef}} = 11.037$ ;  $\mu_k = 0.0879$ ;  $B_k = 4.50$ ). Значения этих характеристик могут быть сопоставлены с данными в столбце “бетон” ( $Z = 11.037$ ;  $\mu = 0.0877$ ;  $B = 4.40$ ). В целом из аналогичных сравнений коэффициентов накопления  $B_k$  эквивалентов бетона, алюминия и железа, составленных из различных комбинаций основных материалов (последний столбец таблицы 1), с коэффициентами накопления  $B$  бетона, алюминия и железа (четвертая строка таблицы) следует, что расхождения не превышают 25%, что вполне удовлетворительно для оценки эффекта накопления. Эта разница уменьшается, если композит преимущественно содержит компоненты, близкие по атомным номерам к эффективному номеру композита, что вполне естественно при линейной интерполяции зависимости коэффициентов от (эффективных) атомных номеров.

Представляет определенный интерес наряду с линейной интерполяцией рассмотреть возможность экстраполяции. Легко показать, что для последовательности трех материалов с номерами  $Z_1 < Z_2 < Z_3$  и коэффициентами накопления  $B_1 > B_2 > B_3$  при экстраполяции от  $B_2$  и  $B_3$  к  $B_1$  в линейном приближении применима формула

$$B_1 = \frac{(B_2\mu_2 - B_3\mu_3)(Z_2 - Z_1)}{(Z_3 - Z_2)\mu_3} + \frac{B_2\mu_2}{\mu_1}, \quad (11)$$

а в случае экстраполяции от  $B_1$  и  $B_2$  к  $B_3$  формула

$$B_3 = \frac{(B_2\mu_2 - B_1\mu_1)(Z_3\mu_3 - Z_1\mu_1 - Z_2(\mu_3 - \mu_1))}{(Z_2 - Z_1)\mu_1\mu_3} + \frac{B_1\mu_1}{\mu_3}. \quad (12)$$

Примеры применения этих соотношений таковы. При экстраполяции от бетона и алюминия к воде по формуле (11) получим  $B_1 = 4.78$  вместо 5.11 (на 7% ниже величины

коэффициента накопления для воды), при экстраполяции от воды и алюминия к железу –  $B_3 = 3.07$  вместо 3.03 (на 1.3% выше коэффициента накопления для железа).

Надеемся, что соотношения, приведенные в статье, могут оказаться полезными при оценках радиационно-защитных свойств композиционных материалов и изделий на их основе.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Н. Г. Гусев, В. А. Климанов, В. А. Машкович, А. П. Суворов, Защита от ионизирующих излучений: В 2 т. Т.1. Физические основы защиты от излучений: Под ред. Н. Г. Гусева (М., Энергоатомиздат, 1989).
- [2] Б. А. Бенецкий, Н. Г. Гончарова, М. В. Плотникова, Исследование композиционных материалов для защиты от радиации. В сб: *Нелинейные явления в открытых системах*. Под ред. Л.Н. Лупичева (М., Гос.ИФТП, 1999), стр. 142.
- [3] Е. Е. Гогин, В. М. Емельяненко, Б. А. Бенецкий, В. Н. Филатов, *Сочетанные радиационные поражения* (М., ППО “Известия”, 2000).
- [4] Б. А. Бенецкий, М. Н. Лифанов, Изв. РАН, сер. физ, № 2, 286 (2009).
- [5] Б. А. Бенецкий, Методика выбора материалов и реализация противорадиационной индивидуальной защиты. В сб: *Радиационные поражения и перспективы развития средств индивидуальной защиты от ионизирующих излучений*. Под ред. Филатова В.Н., Бенецкого Б.А., Гогина Е.Е. (М., ЦНИИТЭИЛЕГПРОМ, 1994), стр. 26.

Поступила в редакцию 6 июня 2011 г.