

пренебречь. В последнем случае ошибка даже для спектра БР-1 составляет не более 28%, а для остальных — не более 12%.

Поступило в Редакцию 18/IX 1968 г.  
В окончательной редакции 3/III 1969 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. C. Widell. In book: Neutron Monitoring. Proceedings of a Symposium. Vienna, 29 August — 2 September 1966. Vienna, IAEA, 1967, p. 417.
2. C. Unruh et al. In book: Neutron Monitoring. Vienna, IAEA, 1967, p. 433.
3. Г. М. Обатуров и др. «Атомная энергия», 24, 479 (1968).
4. W. Davey. Nucl. Sci. and Engng, 26, p. 2, 194 (1966).

5. Neutron Cross Section. Supplement No. 2, Vol. III. Second Edition, BNL-325, 1965.
6. T. Dennis. Dosimetry in Criticality accidents. AERE-R4365, January, 1964.
7. И. Б. Кеирим-Маркус и др. In book: Neutron Monitoring. Vienna, IAEA, 1967, p. 93.
8. G. Joyet et al. In book: The Brown Bovari Betatron. Baden, 1963.
9. И. В. Гордеев и др. Справочник по ядерно-физическим константам для расчета реакторов. М., Атомиздат, 1960.
10. И. А. Бочвар и др. In book: Neutron Monitoring. Vienna, IAEA, 1967, p. 459.
11. Л. П. Абагян и др. Доклад Sm-100/63, представленный СССР на Симпозиум МАГАТЭ по физике быстрых реакторов и смежным проблемам безопасности (Карлсруэ, 3—7 ноября 1967 г.).
12. Г. М. Обатуров, Г. В. Шпкин. «Атомная энергия», 27, 234 (1969).

## Об эффективном атомном номере элементов и сложных сред для $\gamma$ -излучения малой энергии

Е. П. ЛЕМАН

УДК 550.835:539.18

Одним из параметров, характеризующих взаимодействие  $\gamma$ -излучения со средой сложного вещественного состава, является ее эффективный атомный номер  $Z_{эфф}$ . Для расчета  $Z_{эфф}$  сложной среды в отношении фотоэлектрического поглощения  $\gamma$ -излучения, энергия которого выше  $K$ -уровня элементов, входящих в состав среды, в работе [1] предложена следующая формула:

$$Z_{эфф} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^n a_i Z_i^4}{\sum_{i=1}^n a_i Z_i}} \approx \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^n q_i Z_i^3}{\sum_{i=1}^n q_i Z_i^2}} \quad (1)$$

где  $a_i$  — число грамм-атомов элементов с атомным номером  $Z_i$  в единице объема среды;  $q_i$  — весовая концентрация элементов. Если же среда содержит хотя бы один элемент,  $K$ -уровень которого превышает энергию  $\gamma$ -излучения, то формула (1) становится непригодной для расчета ее эффективного атомного номера. Каждый элемент по отношению к  $\gamma$ -квантам с энергией, лежащей между его  $K$ - и  $L$ -уровнями поглощения, проявляет себя как элемент с меньшим атомным номером. Иными словами,  $\bar{Z}_{эфф}$  такого элемента для  $\gamma$ -излучения в указанном интервале энергий отличен от атомного номера  $Z$  этого элемента, что необходимо учитывать при использовании формулы (1) для расчета  $Z_{эфф}$  сложных сред. Таким образом, задача состоит в определении  $Z_{эфф}$  элемента для  $\gamma$ -излучения с энергией ниже его  $K$ -уровня. Эта же задача может быть сформулирована так: найти в таблице Менделеева такой элемент, для которого коэффициенты фотопоглощения выше  $K$ -уровня совпадали бы с коэффициентами фотопоглощения другого элемента в интервале между  $K$ - и  $L$ -уровнями. Тогда атомный номер первого элемента в указанном интервале энергий будет эффективным атомным номером для второго элемента.

Для решения поставленной задачи воспользуемся выражением электронного коэффициента фотопогло-

щения  $\tau_e$  через атомный коэффициент  $\tau_a$ , так как  $\tau_e$  характеризует средний коэффициент фотопоглощения на один электрон данного элемента с атомным номером  $Z$  [1]:

$$\tau_e = \frac{\tau_a}{Z} \quad (2)$$

Значения  $\tau_a$  определяются формулами Вальтера [2]. Для  $\gamma$ -излучения с энергией выше  $K$ -уровня элемента

$$\tau_a = 2,64 \cdot 10^{-26} Z^{3,94} \lambda^3, \quad (3)$$

а для  $\gamma$ -излучения с энергией в интервале от  $K$ - до  $L$ -уровня элемента

$$\tau_a = 8,52 \cdot 10^{-28} Z^{4,3} \lambda^3. \quad (4)$$

В этих формулах длина волны  $\gamma$ -излучения  $\lambda$  выражена в ангстремах. Подставив выражения (3) и (4) в (2), получим значения  $(\tau_e)_1$  и  $(\tau_e)_2$ . По условию задачи эти значения должны быть равны, если в выражении для  $(\tau_e)_1$  заменить  $Z$  на  $\bar{Z}_{эфф}$ , т. е.

$$2,64 \cdot 10^{-26} \bar{Z}_{эфф}^{2,94} = 8,52 \cdot 10^{-28} Z^{3,3}.$$

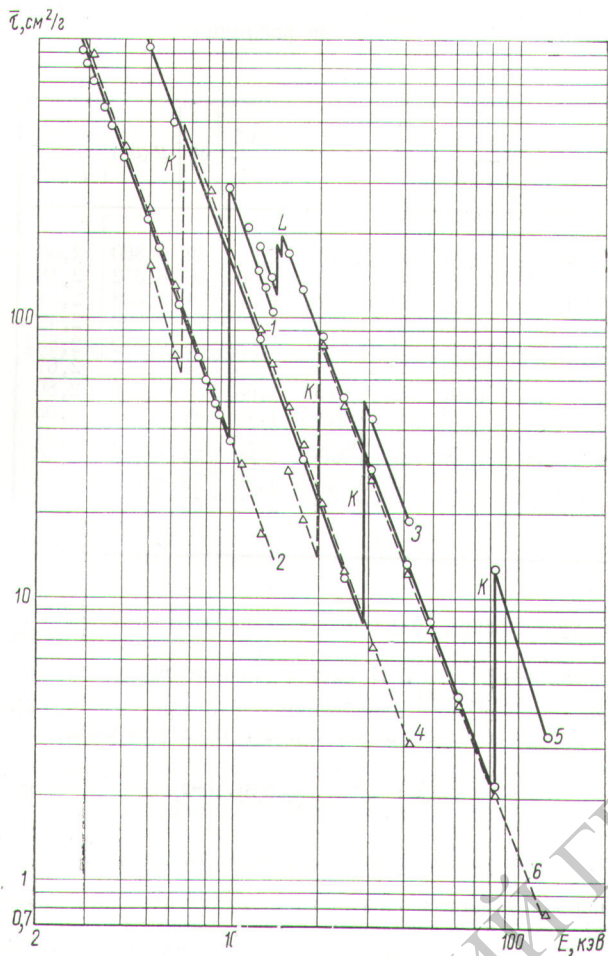
Отсюда следует, что  $\bar{Z}_{эфф}$  элемента для  $\gamma$ -излучения с энергией, лежащей между его  $K$ - и  $L$ -скачками поглощения, связан с  $Z$  этого элемента следующим соотношением:

$$\bar{Z}_{эфф} = 0,3112 Z^{1,12}. \quad (5)$$

Таким образом, если среда сложного состава содержит элементы,  $K$ -уровень которых выше энергии  $\gamma$ -излучения, то при расчете  $Z_{эфф}$  такой среды по формуле (1) необходимо заменить атомные номера этих элементов на их эффективные атомные номера, которые определяются соотношением (5).

В качестве примера рассмотрим цинк, олово и ртуть, имеющие соответственно атомные номера 30, 50 и 80. У цинка  $K$ - и  $L_1$ -уровни поглощения равны 9,66 и 1,20 кэв. Расчет по формуле (5) показывает, что по отношению к  $\gamma$ -квантам с энергиями, лежащими





Графики массовых коэффициентов фотоэлектрического поглощения  $\gamma$ -излучения с энергиями ниже 100 кэВ для цинка (1), кремния (2), олова (3), марганца (4), ртути (5) и молибдена (6); K и L обозначены соответствующие скачки поглощения.

в этом интервале, цинк проявляет себя как кремний, Z которого равен 14. Для олова K- и L-уровни определяются соответственно энергиями 29,2 и 4,5 кэВ. Согласно расчету по формуле (5),  $\bar{Z}_{эфф}$  олова в интервале энергий 6,6—29,0 кэВ равен 25, т. е. атомному номеру марганца. K- и L-скачки поглощения ртути соответствуют 83,11 и 14,84 кэВ. По формуле (5) было получено значение  $\bar{Z}_{эфф}$  ртути для  $\gamma$ -квантов в интервале энергий 20—83 кэВ, равное 42, что соответствует атомному номеру молибдена. В правильности расчетов нетрудно убедиться, сравнив значения массовых коэффициентов фотопоглощения соответствующих элементов [3] в указанных интервалах энергий (см. рисунок). Как видно из рисунка, результаты совпадают с высокой точностью. Следует отметить, что точность расчета  $\bar{Z}_{эфф}$  элементов по формуле (5) определяется точностью аппроксимации атомных коэффициентов фотопоглощения формулами Вальтера. Результаты расчетов по формуле (5) показывают, что значения  $\bar{Z}_{эфф}$  элементов примерно в два раза меньше их порядковых Z. Таким образом, атомный номер элемента по отношению к  $\gamma$ -квантам, энергия которых находится в интервале между его K- и L-уровнями, уменьшается примерно вдвое, т. е.

$$\bar{Z}_{эфф} \approx \frac{Z}{2}. \quad (6)$$

Это соотношение может быть использовано для приближенного расчета  $Z_{эфф}$  сложных сред по формуле Поройкова [1].

Поступило в Редакцию 18/II 1969 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. В. Поройков. Рентгенометрия. М.—Л., Гостеортехиздат, 1950.
2. М. А. Блохин. Физика рентгеновских лучей. М., Гостеортехиздат, 1957.
3. Х. А. Либхафски и др. Применение поглощения и испускания рентгеновских лучей (рентгеновский спектрохимический анализ). М., «Металлургия», 1964.

## Граница применимости адиабатической теории движения заряженных частиц, колеблющихся между магнитными зеркалами

А. И. ДУБИНИНА

УДК 621.384.6.01

При сооружении термоядерного реактора необходимо учитывать, что при нарушении условий адиабатического движения заряженные частицы будут покидать рабочий объем даже в том случае, когда можно пренебречь рассеянием на остаточном газе и неустойчивостями плазмы.

В качестве параметра, характеризующего движение частиц, обычно выбирается величина  $\rho_L/R$ , где  $\rho_L$  —

лармеровский радиус, R — характерный размер поля. Согласно экспериментам [1, 2], критический параметр адиабатичности  $(\rho_L/R)_1$  разделяет области устойчивого и неустойчивого движения заряженных частиц в неоднородном в пространстве магнитном поле. При  $\rho_L/R > (\rho_L/R)_1$  время жизни  $\tau$  частиц, колеблющихся между зеркалами, определяется только рассеянием на остаточном газе, а при  $\rho_L/R < (\rho_L/R)_1$   $\tau =$