

УДК 543.53

## УЧЕТ САМООСЛАБЛЕНИЯ $\beta$ -ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ РАДИОМЕТРИИ $\beta$ -НАСЫЩЕННЫХ СЛОЕВ ВЕЩЕСТВА

Е.А. Солдатов

*(Кафедра радиохимии)*

**Показано, что для большинства радионуклидов при определении удельной радиоактивности бета-насыщенных слоев вещества можно использовать коэффициенты ослабления для “узкого” пучка. При этом погрешность не превышает 25%, тогда как без учета самоослабления возможна ошибка в несколько раз.**

Проблема учета самоослабления  $\beta$ -излучения возникла в поисках возможности применения экспоненциального закона ослабления для определения удельной радиоактивности ( $a$ )  $\beta$ -насыщенных слоев вещества. Такие слои имеют толщину больше максимального пробега  $\beta$ -излучения. При этом поток излучения с поверхности слоя достигает насыщения и с дальнейшим увеличением толщины не изменяется.

Известно [1], что при справедливости экспоненциального закона ослабления для скорости счета ( $I$ ) излучения  $\beta$ -насыщенного слоя имеет место следующая формула:

$$I = \varphi a S / \mu. \quad (1)$$

Здесь  $\varphi$  – коэффициент регистрации без множителя, учитывающего самоослабление излучения,  $S$  – меньшая из площадей образца или детектора, а  $\mu$  – массовый коэффициент ослабления потока  $\beta$ -излучения. Если учесть выход ( $p$ )  $\beta$ -частиц на один распад, эта формула приобретет вид:

$$I = \varphi a S p / \mu. \quad (2)$$

Если у нуклида несколько групп  $\beta$ -излучения, то в формуле (2) возникает суммирование. Тогда в формуле (1) следует использовать эффективный коэффициент ослабления  $\mu_3$  с учетом коэффициентов ослабления всех групп  $\beta$ -излучения в образце:

$$I = \varphi a S / \mu_3, \quad (3)$$

где

$$\mu_3 = (\sum p_i \mu_i^{-1})^{-1}, \quad (4)$$

а  $p_i$  – доля  $i$ -й группы  $\beta$ -излучения, приходящаяся на один распад.

Коэффициенты ослабления узкого пучка  $\beta$ -излучения обстоятельно изучены для 20 нуклидов в [2].

Данные обработаны по авторской программе – метод наименьших квадратов с анализом отклонений на соответствие нормальному распределению. Перед этим максимальные энергии  $\beta$ -частиц были скорректированы по последним результатам [3]. Обработка привела к получению зависимости массового коэффициента ослабления ( $\text{см}^2/\text{г}$ ) от максимальной энергии  $\beta$ -излучения  $E$  (МэВ) в виде формулы:

$$\mu = 17 / E^{1.5}. \quad (5)$$

К сожалению, из обработки пришлось исключить данные по Cs-137, Bi-210, K-40 и Rh-106 как значимо отличающиеся от нормального распределения отклонений. При расчетах по этой формуле 95%-й доверительный интервал отдельного коэффициента ослабления получился не такой уж малый (25%). Как утверждается в [2], эта погрешность обусловлена тем, что формы  $\beta$ -спектра у разных нуклидов различны.

Так как в “Рекомендациях МКРЗ” [4] полные и официально признанные данные представлены только для средних энергий ( $E_c$ )  $\beta$ -спектров, можно привести результаты нашей обработки логарифмов коэффициентов ослабления, взятых из работы [2] от логарифмов значений средних энергий, взятых из работы [4]. Проверка отклонений точек от расчетной зависимости показала, что по вышеуказанной причине необходимо исключить из обработки данные для Na-22, Cs-137, Sr-89 и Rh-106.

На основании вышеизложенного можно заключить, что коэффициент ослабления узкого пучка излучения (только для электронных  $\beta$ -излучателей) можно рассчитывать по формуле:

$$\mu = 4,2 / E_c^{4/3}. \quad (6)$$

При этом 95%-й доверительный интервал отдель-

ного коэффициента ослабления равен 20%. Хотя средняя энергия частично учитывает форму  $\beta$ -спектра, а погрешность расчетов по формуле (5) не намного хуже. Такая точность вполне пригодна для большинства практических целей определения удельной радиоактивности.

Но при радиометрии насыщенных слоев вещества мы имеем заведомо широкий пучок излучения. Поэтому возникла необходимость экспериментально проверить выполнимость экспоненциального закона ослабления в случае широкого пучка и выявить отличие коэффициентов ослабления для узкого и широкого пучков  $\beta$ -излучения.

Для экспериментов использовали счетную установку с торцовым счетчиком Гейгера типа СБТ-10А. Площадь окна счетчика составляла 36 см<sup>2</sup>. Тонкий (чтобы в нем не было самоослабления) источник  $\beta$ -излучения площадью не более 1 см<sup>2</sup> помещали по центру окна на минимальном расстоянии, достаточном лишь для помещения поглотителя. В качестве поглотителя использовали набор пластин из органических пленок или алюминия. Таким образом, была реализована геометрия широкого пучка  $\beta$ -излучения.

Для шести нуклидов была измерена зависимость скорости счета от толщины поглотителя. В измеренные скорости счета вводили поправку на разрешающее время. Зависимость поправленной скорости счета от толщины поглотителя обрабатывали по стандартной программе SIGMAPLOT на экспоненциальную зависимость.

Выяснилось, что для широкого пучка хорошо выполняется экспоненциальный закон ослабления  $\beta$ -излучения.

Результаты расчетов и эксперимента представлены в таблице, где приведены параметры нуклидов и массовые коэффициенты ослабления: экспериментальные данные из работы [2], результаты расчетов для узкого пучка, проведенных по формулам (5) и (6) соответственно для максимальных и средних энергий  $\beta$ -излучения, а также результаты нашего эксперимента с широким пучком.

В таблице показано, что экспериментальные данные [2] укладываются в доверительные интервалы значений, рассчитанных по формулам (5) и (6). Только коэффициент ослабления Cs-137 резко выпадает из монотонной последовательности экспериментальных данных [2], а также из монотонных зависимостей значений, рассчитанных по формулам (5) и (6). Из колонки расчетов по формуле (6) естественно “выпадает” Na-22 как позитронный излучатель, максимум спектра излучения которого резко сдвинут в сторону высоких энергий.

Как видно из таблицы, при максимальных энергиях  $\beta$ -излучения выше 300 кэВ измеренные нами индивидуальные коэффициенты ослабления для широкого пучка лежат в доверительном интервале данных, рассчитанных по формулам (5) и (6). И если допустима 25 или 20%-я погрешность, то для обработки данных радиометрии  $\beta$ -насыщенных слоев вещества можно использовать формулу (3) с коэффициентами ослабления, рассчитанными по фор-

**Массовые коэффициенты ослабления, см<sup>2</sup>/г (экспериментальные и расчетные для узкого пучка и экспериментальные для широкого пучка  $\beta$ -излучения)**

Нуклид	Энергия $E$ , кэВ	Литература [2]	Формула (5)	Формула (6)	Широкий пучок
Y-90	2274	4,5±0,1	5±1	4,6±0,9	4,5±0,4
Tl-204	736	26,3±0,5	27±7	28±5	27±2
Na-22	545	44±1	42±10	33±6	43±2
Cs-137	512	31±0,5	46±11	44±9	33±1
Co-60	318	104±2	94±23	96±20	110±2
C-14	156	–	270±70	230±50	410±30

мулам (5) или (6) для узкого пучка. При этом можно избежать больших систематических погрешностей. Расчеты по формуле (6) показывают, что, например, при калибровке детектора по солям калия ( $K-40$ ,  $\mu_{\beta} = 9,7 \text{ см}^2/\text{г}$ ), без учета коэффициента ослабления, данные по  $Sr-90$  и  $Y-90$  ( $\mu_{\beta} = 4,1 \text{ см}^2/\text{г}$ ) завышены в 2,5 раза, а данные по  $Cs-137$  ( $\mu_{\beta} = 40 \text{ см}^2/\text{г}$ ) занижены в 4 раза.

Однако при энергиях, меньших 300 кэВ, коэффициенты ослабления в широком пучке явно больше, чем в узком. Но в радиоактивных рядах при большом числе  $\beta$ -составляющих, во-первых, неизбежно компенсируются различия в формах спектров. Во-

вторых, завышенные коэффициенты ослабления для малых энергий  $\beta$ -излучения в силу их малого вклада в общее излучение образца практически не сказываются на эффективном коэффициенте ослабления. Расчеты для рядов  $U-238$  и  $Th-232$  дали значения эффективных коэффициентов ослабления 2,0 и 4,1  $\text{см}^2/\text{г}$  (для  $U$  и  $Th$  соответственно). При заведомом удвоении коэффициентов ослабления при малых энергиях эффективные коэффициенты увеличиваются лишь на 0,5 и 2% соответственно. Для индивидуальных нуклидов при точных расчетах достаточно измерить экспериментально коэффициент ослабления в широком пучке.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукьянов В. Б., Симонов Е. Ф. // Измерение и идентификация  $\beta$ -радиоактивных препаратов. М., 1982. С. 62.
2. Baltakmens T. // Nuclears Instruments and Methods. 1977. **142**. С. 535.
3. Характеристики излучений радиоактивных нуклидов, применяемых в народном хозяйстве. М., 1980, 1982, 1984.
4. Схемы распада радионуклидов. Рекомендации МКРЗ. М., 1978.

Поступила в редакцию 16.06.03

## ACCOUNTING FOR BETA-RAY SELF-ABSORPTION IN RADIOMETRY OF THE SATURATED LAYERS OF SUBSTANCE

E.A. Soldatov

(Division of Radiochemistry)

**It is shown, that upon determination of specific radioactivity of the saturated layers of substance for majority of radionuclides one can use the absorption coefficients for "narrow" beam. In this case error of calculation is less then 25%, while without accounting for self-absorption the error is several times more.**