

САМОПОГЛОЩЕНИЕ БЕТА-ИЗЛУЧЕНИЯ В ОБРАЗЦЕ

При измерении активности радиоактивных образцов, имеющих значительную толщину, происходит поглощение излучения в самом образце. Особенно важно учитывать это поглощение при регистрации бета-излучения, так как бета-частицы обладают энергиями, лежащими в интервале от нуля до определенного максимального значения. Частицы с малой энергией будут поглощены уже сравнительно тонкими слоями вещества данного образца и не достигнут чувствительного объема счетчика. Поэтому при измерении активности радиоактивных образцов, испускающих бета-излучение, а также при сравнении скоростей счета бета-излучающих образцов, имеющих разную толщину или содержащих различные радионуклиды, приходится вводить поправку на ослабление бета-излучения в толще самого образца.

Эффект **самопоглощения** (самоослабления) заключается в том, что некоторое количество испускаемых радионуклидами бета-частиц поглощается и рассеивается в веществе самого образца, не доходя до его поверхности. Поэтому регистрируемая счетчиком в пределах данного телесного угла Ω скорость счета N будет занижена по сравнению с той скоростью счета N_0 , которая регистрировалась, если бы отсутствовало самопоглощение в образце (при прочих равных условиях измерения).

Рассмотрим следующий пример. Пусть имеется несколько радиоактивных образцов, одинаковых по площади, но различных по толщине d ($\text{г}/\text{см}^2$); кроме того, допустим, что радионуклиды в образцах распределены равномерно, а удельная активность всех образцов (число распадов в единицу времени на 1г вещества) одна и та же, то есть $a_m = A/m = \text{const}$.

Предположим, что наши образцы разбиты на слои одинаковой толщины, каждый из которых испускает в сторону счетчика 300 бета-частиц (изображено тремя стрелками). На рисунке 43 изображены 6 таких образцов, каждый из которых условно разбит на слои одинаковой толщины. Из первого и второго слоев (образец 1 и 2) счетчика достигают все частицы: для образца 1 – 300 частиц; для образца 2 – 600 частиц (изображено шестью стрелками). По мере увеличения толщины образца частицы, испускаемые радионуклидами, начинают поглощаться. Из третьего слоя (образец 3) через образец проходит лишь 200 частиц, а всего счетчика достигает 800 бета-частиц вместо 900 (изображено восемью стрелками).

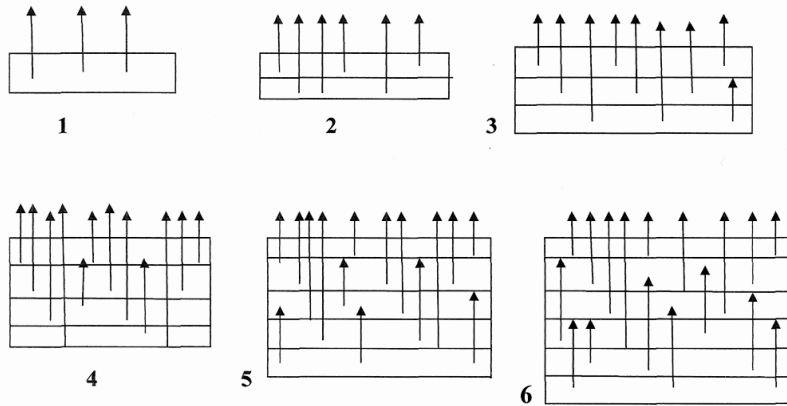


Рис.43. Схема поглощения излучения в толще самого образца.

Из четвертого слоя (образец 4) поверхности образца достигает только 200 частиц, а всего 1000 вместо 1200 (изображено десятью стрелками). Из пятого, шестого и последующих слоев (образцы 5 и 6) ни одна частица не выходит из образца и, соответственно, не попадает на счетчик, который регистрирует для 5-го и 6-го образцов те же 1000 частиц (изображено десятью стрелками), что и для 4-го образца.

Дальнейшее увеличение толщины образца за счет увеличения новых слоев не меняет картины – скорость счета N остается постоянной и определяется лишь активностью верхних слоев, суммарная толщина которых соответствует величине максимального пробега R_{max} бета-частиц данного радионуклида. Это объясняется тем, что в относительно тонких слоях образца поглощается преимущественно та часть бета-частиц, которая имеет малую энергию. По мере увеличения толщины образца бета-частицы с большей энергией, взаимодействуя с веществом, теряют возможность выйти из образца и, наконец, при достаточно большой толщине даже частицы, обладающие максимальной энергией E_{max} , не могут преодолеть толщину образца, так как величина их пробега R_{max} меньше или сравнима с толщиной данного образца. При $d \approx R_{\text{max}}$ наступает "насыщение" скорости счета N : при дальнейшем увеличении толщины образца будет регистрироваться одна и та же скорость счета N .

Насыщенным слоем для бета-излучения называют слой радиоактивного образца, при дальнейшем увеличении толщины которого не происходит увеличение потока бета-частиц (или скорости счета N). Практически толщина насыщенного слоя $d_{\text{нас}}$ равна максимальной величине пробега R_{max} бета-частиц в данном веществе.

На рисунке 44 графически изображена зависимость скорости счета N от толщины образцов d . На оси абсцисс (горизонтальная ось) в условном масштабе отложены толщины образцов d в $г/см^2$, а на оси ординат (вертикальная ось) – соответствующие скорости счета N в имп/мин.

В отсутствие самопоглощения бета-излучения зависимость между скоростью счета N (или активностью) и толщиной образца d должна быть выражена прямой, так как общая активность пропорциональна толщине радиоактивного образца. На самом деле измеренная скорость счета N (активность), начиная с некоторой толщины будет меньше ожидаемой, и эта разница будет увеличиваться с ростом толщины образца (рис.43, образец 1). Если мы обратимся к рис. 44, то заметим, что измеренная скорость счета N для третьего образца меньше, чем теоретически ожидаемая.

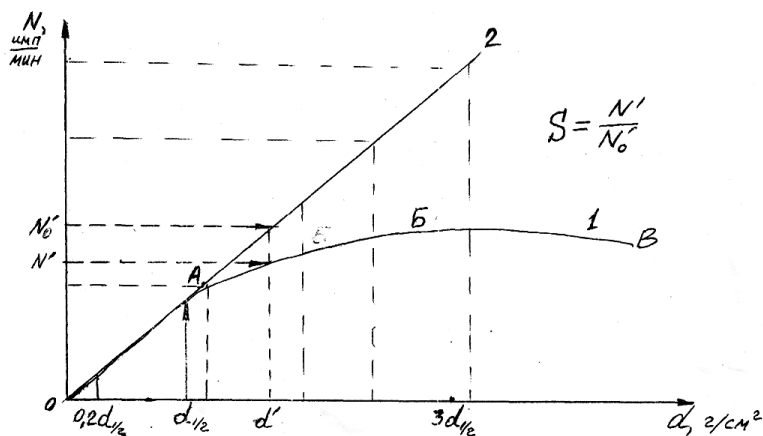


Рис. 44. Кривая самопоглощения бета-излучения.

Для четвертого и пятого образцов эти величины будут еще в большей степени отличаться от теоретически ожидаемых. Наблюдается, что в дальнейшем скорость счета N не меняется, как бы ни была велика толщина образца. При этом измеряется излучение только верхних слоев. Отклонение полученной кривой от теоретически ожидаемой прямой указывает на наличие эффекта самопоглощения.

Необходимо отметить, что ослабление бета-излучения в веществе радиоактивного образца является сложной комбинацией эффектов самопоглощения и саморассеяния. Кривая самопоглощения 1 учитывает не только истинное поглощение бета-частиц в веществе образца в результате полной потери ими своей энергии, но и их рассеяние в веществе образца, приводящее к изменению потока частиц в данном телесном угле счетчика.

Поправка на самопоглощение. Для учета эффекта самопоглощения вводят коэффициент самопоглощения S . Коэффициент самопоглощения S – это отношение скорости счета образца данной толщины d к скорости счета непоглощающего образца. Если обозначить соответствующие скорости счета после введения поправок на мертвое время и фон через N и N_0 , то коэффициент самопоглощения равен

$$S = N/N_0. \quad (1)$$

По экспериментальному графику, аналогичному рис. 44, для любой толщины образца d можно найти значение коэффициента S как отношение ординат соответствующих точек на кривой 1 и прямой 2. Если величина коэффициента самопоглощения S в идентичных условиях опыта известна, то ее вводят в результаты конкретного измерения скорости счета образца по формуле

$$N_0 = N/S. \quad (2)$$

Величина коэффициента самопоглощения кроме толщины образца зависит также от атомного номера вещества образца и максимальной энергии бета-частиц. Точный вид зависимости коэффициента S от указанных факторов пока не установлен, поэтому учет самопоглощения при измерении активности образцов (в тех случаях, когда это необходимо делать) должен быть проведен путем опытного определения коэффициента S для каждого изучаемого радионуклида в отдельности, причем именно в том веществе (соединении), с которым предполагается работать, так как образцы, подлежащие исследованию, могут быть в виде как кристаллического осадка, так и пористой массы, а иногда и жидкости.

Экспериментальное определение коэффициента самопоглощения производится способом, аналогичным рассмотренному выше. Берутся радиоактивные образцы разной толщины, но имеющие одну и ту же удельную активность. При этом необходимо соблюдать условие, чтобы все образцы имели одинаковую площадь и равномерное распределение радионуклидов в образце. Зависимость измеренной скорости счета от толщины образца в этом случае изобразится графически кривой. Истинной скорости счета на том же графике будет соответствовать прямая линия, проходящая через начало координат, поскольку скорость счета образцов с одинаковой удельной активностью пропорциональна толщине образца. Поэтому к полученной кривой самопоглощения необходимо провести касательную в начале координат (то есть к начальной части экспериментальной кривой), по которой будет определяться N_0 – истинная скорость счета

для каждой толщины образца. Отношение ординат экспериментальной кривой и касательной прямой будет давать величину коэффициента самопоглощения S , определяемую по формуле (1).

Данный метод определения коэффициента S , а затем и введения поправки на самопоглощение, определяемой по формуле (2), довольно прост, но является весьма приближенным. Из-за рассеяния бета-частиц в образце форма кривой самопоглощения становится сложной, и практически затруднительно точно определить направление касательной, так как касательная на участке OA (рис.2) оказывается в то же время и секущей. Это связано с тем, что при толщине образцов $d \approx (3-10\%) \cdot R_{\max}$ кривая 1 идет несколько выше прямой 2 (на рисунке это не показано), что соответствует увеличению скорости счета N по сравнению с истинным значением ($N > N_0$). Этот эффект объясняется фокусирующим действием вещества образца, то есть рассеянием бета-частиц, приводящим к увеличению числа частиц, направленных в сторону счетчика. При увеличении толщины образца эффект самопоглощения перекрывает эффект саморассеяния – кривая идет ниже прямой,

Следовательно, достоверность графического определения коэффициента S ограничивается трудностями проведения касательной к кривой самопоглощения. Поэтому данный метод нельзя применять, если необходимо более точно определить поправку на самопоглощение.

В этом случае пользуются следующим способом. Изготавливают серию образцов **одинаковой** общей активности, но различной толщины. Таким образом, удельная активность ($a_m = A/m$) образцов в этом случае является величиной переменной. Это достигается, например, путем подмешивания неактивного вещества – носителя – к образцам одинаковой активности. Проводят ряд измерений, начиная с самого тонкого образца, вводят поправки на мертвое время и фон. Результаты измерений изображают в виде графика (рис.45). По оси абсцисс – (горизонтальная ось) откладывается толщина образца d (г/см^2), а по оси ординат (вертикальная ось) – соответствующие значения скорости счета N (имп/мин). Вследствие влияния различных взаимно компенсирующихся факторов получающаяся кривая имеет почти линейный вид и может быть с достаточной степенью точности экстраполирована (продолжена) на нулевую толщину образца ($d=0$). Пересечение экстраполированной кривой с осью ординат даст скорость счета N_0 , соответствующую случаю полного отсутствия эффекта самопоглощения.

Далее на основе полученных данных и найденной скорости счета N_0 строится кривая зависимости коэффициента самопоглощения S (отношение измеренной скорости счета N к истинной скорости счета N_0) от толщины образцов d . По такому графику (рис. 46) непосредственно определяется поправка на самопоглощение, что более точно, чем в первом методе, особенно при наличии образцов большой удельной активности.

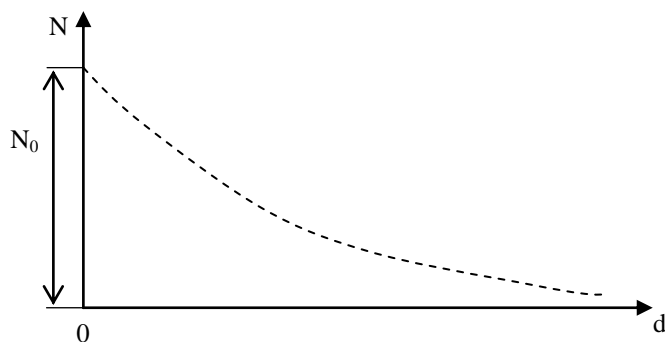


Рис. 45. Зависимость d от N .

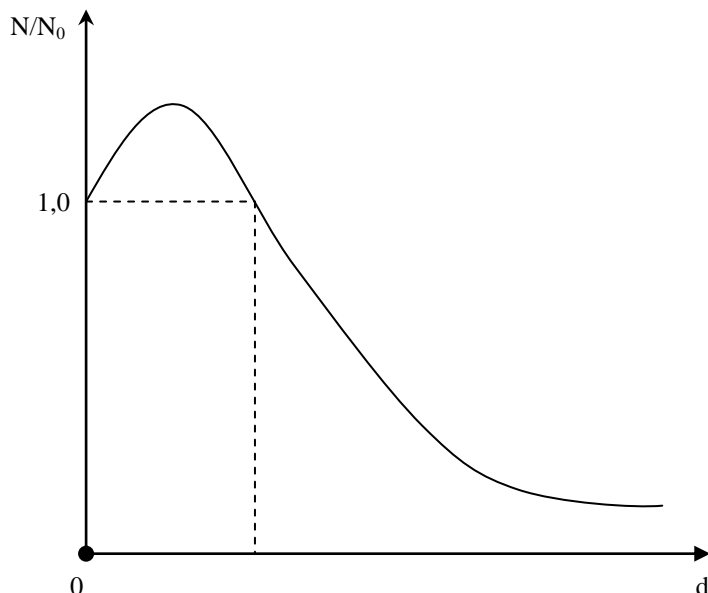


Рис. 46. Зависимость коэффициента самопоглощения S от толщины образца d .

Преимущества рассмотренного метода особенно проявляются для образцов толщиной $d \approx 3-10\% \cdot R_{\max}$ (рис. 45, участок ОА). Полученная кривая в этой области имеет отчетливо выраженный максимум, обусловленный рассеянием бета-частиц в веществе образца и увеличением тем самым числа частиц, направленных в сторону счетчика. Этот эффект был замаскирован в ранее рассмотренном методе, что создавало неопределенность и уменьшало точность определения поправки в данном интервале толщин.

Введение поправки на самопоглощение в зависимости от толщины образца. По толщине радиоактивные образцы делят на **тонкослойные, средние (промежуточные) и толстослойные (бесконечно толстые)**.

Толстослойным образцом называется образец такой толщины, дальнейшее увеличение которой не приводит к увеличению выхода бета-частиц, поступающих из нижних слоев этого образца. Экспериментально установлено, что практически рост выхода бета-частиц прекращается при толщине слоя, равной утроенному значению слоя половинного ослабления вещества образца, то есть $d=3 \cdot d_{1/2}$.

Слоем половинного ослабления $d_{1/2}$ называют слой вещества, ослабляющий бета-излучение вдвое.

Тонкослойные образцы должны иметь возможно меньшую толщину которая ориентировочно лежит в пределах $0 < d < d_{1/2}$. Образцами **промежуточной толщины** принято называть такие образцы, толщина которых лежит в пределах между тонко- и толстослойными образцами.

Если обратиться к рис.44, то кривую самопоглощения можно разбить на 3 участка: ОА, АВ и БВ. Соответствующие этим участкам образцы называют тонкими, промежуточными и толстыми.

Участок ОА характерен для тонких образцов, то есть $0 < d < d_{1/2}$. Поправку на самопоглощение для тонких образцов вводят описанными выше экспериментальными методами. При работе с очень тонкими образцами, для которых толщина составляет $0 < d < 0,2 \cdot d_{1/2}$, как правило, поправку вводить не нужно ($S=1$), так как эффекты рассеяния и самопоглощения на таких толщинах сказываются очень слабо. Однако, если требуется высокая точность ($< 1\%$), то пренебрегать самопоглощением можно лишь при толщине $d=0,01 \cdot d_{1/2}$.

Участок АВ кривой самопоглощения обычно более протяженный, чем показано на рис.44. Эта часть кривой отвечает самопоглощению в промежуточных образцах, толщина которых находится в широком интервале $d_{1/2} < d < 3 \cdot d_{1/2}$ (можно встретить $d_{1/2} < d < R_{\max}$, так как $3 \cdot d_{1/2} \approx R_{\max}$). Поправку на самопоглощение для промежуточных образцов можно также найти по графику вышеуказанными методами. Достоверность графического определения коэффициента S и в этом случае ограничивается трудностями при проведении касательной к кривой самопоглощения.

Значение поправки на самопоглощение в интервале АВ можно получить и теоретически, если исходить из экспоненциального закона поглощения бета-частиц в веществе. Эта формула (вывод ее не приводится) имеет вид

$$S = \frac{N}{N_0} = \frac{1 - e^{-\mu d}}{\mu d}, \quad (3)$$

где μ – массовый коэффициент ослабления бета-излучения в веществе, $\text{см}^2/\text{г}$;

d – толщина образца, $\text{г}/\text{см}^2$.

Если учесть, что $\mu = 0,693/d_{1/2}$, то формулу (3) можно записать в виде

$$S = \frac{d_{1/2}}{0,693 \cdot d} \left(1 - 2^{-\frac{d}{d_{1/2}}} \right), \quad (4)$$

где $d_{1/2}$ – слой половинного ослабления для бета-излучения данной энергии, $\text{г}/\text{см}^2$;

d – толщина образца, $\text{г}/\text{см}^2$.

При $(d/d_{1/2}) > 4$ можно пренебречь вторым членом, стоящим в скобках, так как он в этом случае стремится к нулю. Тогда выражение (4) для коэффициента поглощения S упрощается и имеет вид

$$S = \frac{d_{1/2}}{0,693 \cdot d}. \quad (5)$$

Величина $d_{1/2}$, входящая в формулу (4) или (5), должна определяться экспериментально в процессе измерения скорости счета (активности) исследуемого образца. Необходимость измерения $d_{1/2}$ для каждого образца обусловлена тем, что слой половинного ослабления зависит от энергии бета-частиц, а следовательно, и от "возраста" радиоактивного образца. Полагая эффективный атомный номер алюминиевого фильтра (тонкой пластины) примерно равен эффективному атомному номеру вещества, образца, величину $d_{1/2}$ можно определить по данным двух измерений, одно из которых произведено с фильтром, другое – без фильтра.

Скорость счета от образца с фильтром N_ϕ и скорость счета от образца без фильтра N связаны между собой соотношением

$$N_\phi = N \cdot e^{-\mu_\phi d_\phi},$$

где μ_ϕ - массовый коэффициент ослабления фильтра, см²/г;

d_ϕ - толщина фильтра, г/см².

Учитывая связь $\mu_\phi = 0,693/d_{1/2}$.

$$N_\phi = N \cdot e^{-0,693d_\phi/d_{1/2}},$$

откуда

$$\frac{N_\phi}{N} = e^{-0,693d_\phi/d_{1/2}} \quad \text{или} \quad \frac{N}{N_\phi} = e^{0,693d_\phi/d_{1/2}}.$$

Произведя логарифмирование этого выражения, получим:

$$\ln \frac{N}{N_\phi} = 0,693 \frac{d_\phi}{d_{1/2}}, \quad \text{откуда} \quad d_{1/2} = \frac{0,693}{\ln(N/N_\phi)}. \quad (6)$$

Если использовать это соотношение, то формула (5) примет вид:

$$S = \frac{d_\phi}{d \cdot \ln(N/N_\phi)}. \quad (7)$$

Однако формулы (3), (4) и (7) не учитывают рассеяние бета-излучения в образце и могут внести погрешность в определение активности до 10-20% за счет неучета саморассеяния. Экспериментальные исследования показывают, что изменение потока бета-частиц за счет эффектов самопоглощения и саморассеяния в веществе образца в телесном угле, меньшем 2π , не подчиняется экспоненциальной зависимости. Это особенно проявляется для образцов толщиной $d > 3 \cdot d_{1/2}$ и объясняется возрастающим влиянием многократного рассеяния бета-частиц. Если для тонкослойных образцов бета-излучение можно считать изотропным (равномерно распределенным по всем углам вылета), то по мере увеличения толщины активного слоя изотропное распределение частиц нарушается в сторону роста числа бета-частиц, вылетающих по направлениям, близким к нормали (перпендикулярно) на поверхность образца. Поэтому фактическая поправка на самопоглощение в образце зависит от телесного угла (геометрического фактора ω), в пределах которого бета-частицы попадают в чувствительный объем счетчика.

Для образцов толщиной $d \geq (2 \div 3) \cdot d_{1/2}$ анизотропия бета-излучения приводит к тому, что коэффициент S отличается от величины, рассчитанной по формуле (4), и определяется выражением

$$S = \xi \cdot \frac{d_{1/2}}{0,693 \cdot d} \left(1 - 2^{-\frac{d}{d_{1/2}}} \right), \quad (8)$$

$$\text{где } \xi = 1 + 0,8 \cdot \cos(\alpha/2). \quad (9)$$

Здесь $\xi \geq 1$ - коэффициент саморассеяния (поправка на саморассеяние), то есть дополнительный множитель, учитывающий влияние не изотропного распределения бета-частиц на скорость счета; $\alpha/2$ - половинная апертура торцового счетчика (рис. 5). Формула (9) справедлива (с ошибкой 10%) при условии $d \geq 3 \cdot d_{1/2}$ и для образцов, радиус которых не превышает половины радиуса окна торцового счетчика. Если вспомнить (работа "Влияние геометрического фактора на регистрацию бета-излучения"), что геометрический фактор K для торцового счетчика связан с углом $\alpha/2$ формулой $\omega = 0,5 \cdot (1 - \cos(\alpha/2))$, то получим $\omega = 0,5 - 0,5 \cdot \cos(\alpha/2)$, откуда $\cos(\alpha/2) = 1 - 2 \cdot \omega$. Тогда, подставляя в формулу (9), имеем:

$$\xi = 1 + 0,8 \cdot (1 - 2 \cdot \omega) = 1,8 - 1,6 \cdot \omega, \quad (10)$$

причем $0 \leq \omega \leq 0,05$. Из формулы (10) следует, что чем меньше геометрический фактор ω , тем больше коэффициент саморассеяния ξ , то есть относительно больше частиц попадает в счетчик по сравнению с тонким образцом, для которого $\xi = 1$.

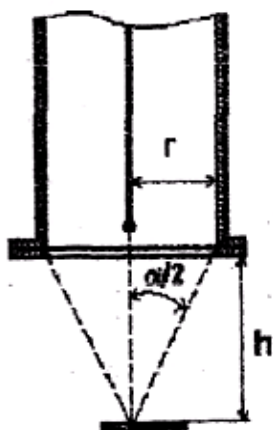


Рис. 47. Поправка на саморассеяние.

Для предельного случая, когда образец помещают вплотную к окну счетчика (телесный угол $\Omega=2\cdot\pi$ и $\omega=0,5$), получим $\xi=1$ и, следовательно, учитывается только коэффициент самопоглощения S . Это и понятно: в условиях "2 π -геометрии" независимо от углового распределения бета-частиц, выходящих из поверхности образца в верхнюю полусферу, все они попадут в эффективный телесный угол счетчика. Если же образец толщиной $d \geq (2 \div 3) \cdot d_{1/2}$ находится на большом расстоянии h от окна счетчика, то геометрический фактор очень мал ($\omega \rightarrow 0$) и, следовательно, $\xi=1,8$, то есть коэффициент самопоглощения ($S \cdot \xi=1,8 \cdot S$) будет почти вдвое превышать величину, рассчитанную по формуле (4).

В табл. 17 приведены значения фактора саморассеяния ξ в зависимости от отношения h/r , где h – расстояние от образца до границы чувствительного объема счетчика, а r – радиус окна счетчика (рис. 47).

Т а б л и ц а 17. Коэффициент саморассеяния ξ

| | | | | | | | | | |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| h/r | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 3,0 | 7,0 |
| ξ | 1,16 | 1,30 | 1,40 | 1,50 | 1,57 | 1,67 | 1,71 | 1,76 | 1,80 |

В табл. 18 даны рассчитанные по формуле (4) значения фактора самопоглощения в зависимости от отношения $d/d_{1/2}$.

Т а б л и ц а 18. Коэффициент самопоглощения S

| $d/d_{1/2}$ | S | $d/d_{1/2}$ | S | $d/d_{1/2}$ | S | $d/d_{1/2}$ | S |
|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|---------------|-----------------|
| 0,01 | 0,995 | 0,20 | 0,935 | 2,0 | 0,540 | 7,0 | 0,205 |
| 0,02 | 0,992 | 0,30 | 0,903 | 2,5 | 0,476 | 7,5 | 0,192 |
| 0,03 | 0,989 | 0,40 | 0,874 | 3,0 | 0,421 | 8,0 | 0,180 |
| 0,04 | 0,986 | 0,50 | 0,845 | 3,5 | 0,376 | 8,5 | 0,169 |
| 0,05 | 0,982 | 0,60 | 0,818 | 4,0 | 0,339 | 9,0 | 0,159 |
| 0,06 | 0,979 | 0,70 | 0,793 | 4,5 | 0,307 | 9,5 | 0,151 |
| 0,07 | 0,976 | 0,80 | 0,768 | 5,0 | 0,281 | 10,0 | 0,143 |
| 0,08 | 0,973 | 0,90 | 0,744 | 5,5 | 0,257 | 12,0 | 0,120 |
| 0,09 | 0,970 | 1,00 | 0,721 | 6,0 | 0,237 | 14,0 | 0,103 |
| 0,10 | 0,966 | 1,50 | 0,621 | 6,5 | 0,220 | 15 и более | $d_{1/2}/0,693$ |

Таким образом, если требуется определить действительную поправку S на самопоглощение с учетом саморассеяния для некоторого образца толщиной $d \geq (2 \div 3) \cdot d_{1/2}$, следует воспользоваться формулой (8), подставив в нее значение ξ , рассчитанное по формуле (10). Скорость счета N_0 в этом случае находится по формуле (2). Либо необходимо взять из таблиц 17 и 18 значения коэффициентов саморассеяния E , и самопоглощения S для конкретных условий измерения. В итоге – с учетом самопоглощения и исправлением на саморассеяние бета-излучения, скорость счета будет равна

$$N_0 = \frac{N}{S \cdot \xi} \quad (11)$$

Отметим, что для получения на практике более точных результатов следует отдать предпочтение экспериментальному методу определения поправки на самопоглощение с учетом саморассеяния для образцов промежуточной толщины.

Участок БВ кривой самоослабления называют участком **"насыщения"**. Здесь скорость счета N не зависит от толщины образца d и является постоянной величиной $N = \text{const}$. Этот участок характерен для $d \geq R_{\text{max}}$ ($d \geq 3 \cdot d_{1/2}$) – **"бесконечно толстых"** образцов. Факт "насыщения" объясняется тем, что счетчик не регистрирует бета-частицы из слоев образца, лежащих на глубинах больше, чем R_{max} . Практически уже при $d \approx 0,75 \cdot R_{\text{max}}$ скорость счета достигает "насыщения".

Методом "бесконечно толстых" образцов можно с успехом пользоваться при **относительных измерениях активности**. Пусть два однородных толстослойных образца толщиной d_1 и d_2 (г/см^2) и одинаковой площадью S (см^2) имеют удельные активности a_1 и a_2 (Бк/г) и дают скорости счета соответственно N_1 и N_2 . Очевидно, что эти скорости счета определяются активностью одинаковых "насыщенных" слоев ($d \approx R_{\text{max}}$) того и другого образцов. Поскольку эти слои имеют одну и ту же массу m , то скорости счета пропорциональны удельной активности сравниваемых образцов:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{a_1}{a_2}.$$

И, наоборот, удельные активности толстослойных образцов относятся как соответствующие скорости счета, измеренные в идентичных условиях:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Для определения удельной активности толстослойного образца, а на практике часто применяют метод сравнения с эталонным толстослойным образцом, удельная активность которого $a_{\text{эт}}$ заранее известна и их энергетические спектры бета-излучения совпадают. Измерения соответствующих скоростей счета N и $N_{\text{эт}}$ проводят в одинаковых условиях и на одном и том же счетчике. Удельную активность находят по соотношению:

$$a = a_{\text{эт}} \cdot \frac{N_1}{N_{\text{эт}}}.$$

При этом площадь образцов S должна быть одинаковой, а толщина d и, следовательно, масса m образца и эталона могут быть различными, лишь бы соблюдалось условие $d \geq R_{\text{max}}$.

Метод "бесконечно толстых" образцов позволяет определить и соотношение **активностей** сравниваемых образцов. Так как активность образца $A = a \cdot m = a \cdot d \cdot S$, то получим

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{a_1 \cdot d_1 \cdot S}{a_2 \cdot d_2 \cdot S} = \frac{N_1 \cdot d_1}{N_2 \cdot d_2}. \quad (12)$$

Следовательно, если оба образца имеют одинаковую толщину, то их активности относятся как соответствующие скорости счета и, наоборот, при одинаковых скоростях счета активности образцов относятся как их толщины.

Метод "бесконечно толстых" образцов чрезвычайно прост и поэтому часто применяется при сравнительных (относительных) измерениях активности проб.

Итак, в зависимости от толщины образцов необходимо использовать тот или иной метод введения поправки на самопоглощение.

Обычно рекомендуется» вести работу либо с очень тонкими образцами ($d < 0,2 \cdot d_{1/2}$), для которых можно пренебречь эффектами самопоглощения, либо с образцами, толщина которых является "бесконечно большой" ($d > R_{\text{max}}$).

Если по условиям опыта образцы имеют промежуточную толщину ($d_{1/2} < d < R_{\text{max}}$), то поправка определяется формулой (3) или (7), либо путем предварительного эксперимента и построения графика самопоглощения.

Поправка на самопоглощение особенно существенна для радионуклидов, испускающих **мягкое** бета-излучение. Например, для ^{14}C ($d_{1/2} = 2,7 \text{ мг/см}^2$) при $d = 0,2 \cdot d_{1/2} = 0,54 \text{ мг/см}^2$ отношение N_0/N составляет по данным конкретного опыта $-1,06$, а при $d = 4 \text{ мг/см}^2$ $N_0/N = 1,58$. Если же по условию опыта требуется, чтобы самопоглощение не превосходило 1% от скорости счета, то в случае ^{14}C толщина образца не должна превышать 25 мкг/см^2 ($d \approx 0,01 \cdot d_{1/2}$), т.е. образцы должны быть практически "невесомыми".

Для жесткого бета-излучения, например ^{32}P , поправку на самопоглощение можно не принимать во внимание вплоть до толщин образцов порядка $10-20 \text{ мг/см}^2$, допуская при этом ошибку в 4-6%. При $d = 1$

мг/см² поправка составляет менее 1% от скорости счета. Изготовление таких образцов на практике не представляет труда.

Отсюда ясно, что для жесткого бета-излучения удобнее пользоваться методом "очень тонких образцов", в то время как метод "бесконечно толстых образцов" находит применение для радионуклидов, обладающих бета-излучением малой энергии.

И, наконец, поправку на самопоглощение вообще не нужно вводить в случае одинаковой толщины (г/см²) всех измеряемых образцов, если речь идет о сравнении их активностей (относительные измерения). Это, однако, относится к образцам, содержащим один и тот же радионуклид и измеряемым в тождественных условиях. Форма кривой самопоглощения зависит от конкретных условий измерения: взаимного расположения образца и счетчика, материала подложки и т.д., и нарушение стандартизации условий в течение измерений всей серии образцов влечет за собой различие в величине самопоглощения.

Особо важным является учет поправки на самопоглощение при относительных измерениях активности образцов, содержащих различные радионуклиды, например ⁹⁰Sr и ⁴⁵Ca, ³²P и ¹³⁷Cs и т.п. Игнорирование эффекта самопоглощения в этих случаях приводит к ошибочным результатам.

Рассмотрим несколько конкретных примеров.

Пример 1. Необходимо ли учитывать поправки на самопоглощение при относительных измерениях активности двух образцов ³²P, представляющих собой осадки массой 40 мг и 60 мг, равномерно распределенные на чашечках диаметром 2 см. Для бета-излучения ³²P принять $d_{1/2}=115$ мг/см².

Решение. Площадь образцов $S=\pi \cdot r^2=3,14$ см². Толщина (поверхностная плотность) образцов $d=m/S$, поэтому $d_1=40/3,14=12,7$ мг/см² и $d_2=60/3,14=19,1$ мг/см². Получили, что $d_1 < 0,2 \cdot d_{1/2}$ и $d_2 < 0,2 \cdot d_{1/2}$, следовательно, оба образца являются "очень тонкими" и поправку на самопоглощение вводить не нужно ($S=1$).

Пример 2. Пусть сравниваются активности двух образцов, один из которых содержит радионуклид ³³S, а другой – ³²P. Оба образца представляют собой осадки по 0,1 г, равномерно распределенные по площади 5 см². Найти отношение активностей данных образцов, если скорости счета составляют: $N(^{35}\text{S})=200$, $N(^{32}\text{P})=500$ имп/мин. Учесть, что для ³⁵S: $d_{1/2} = 3$ мг/см², $R_{\max}=21$ мг/см², $\mu=0,230$ см²/мг; для ³²P: $d_{1/2}=115$ мг/см², $R_{\max} = 780$ мг/см², $\mu = 0,006$ см²/мг.

Решение. Для обоих образцов $d = 100/5=20$ мг/см². В случае ³⁵S ($3 < d < 21$) образец промежуточный, и необходимо вводить поправку по формуле:

$$N_0 = \frac{N}{S} = 200 \cdot \frac{\mu d}{1 - e^{-\mu d}} = 200 \cdot \frac{4,6}{0,99} = 930 \text{ имп/мин.}$$

Для бета-излучения ³²P образец является очень тонким ($d < 0,2 \cdot d_{1/2}$) и поправку можно не учитывать (с погрешностью ~ 6%). Таким образом, отношение активностей (скоростей счета) составляет:

$$\frac{N_0(^{35}\text{S})}{N_0(^{32}\text{P})} = \frac{930}{500} = 1,86.$$

Без учета самопоглощения это отношение было бы равно 0,4, что могло привести, например, к ошибочному выводу о степени поступления серы и фосфора в исследуемые объекты.

Пример 3. Имеются два образца, содержащие ⁴⁵Ca ($d_{1/2}=5,5$ мг/см², $\mu = 0,13$ см²/мг, $R_{\max} = 57$ мг/см²). Образцы представляют собой срезы костной ткани площадью 2,5 см² и массой $m_1=300$ мг и $m_2=1200$ мг. Определить относительное содержание ⁴⁵Ca в пробах, если: а) $N_1=N_2$; б) $N_1=6000$ имп/мин, $N_2=500$ имп/мин.

Решение. Оба образца являются "бесконечно толстыми", так как $d_{1/2}=m_1/S=300/2,5=120$ мг/см² и $d_2=m_2/S=500/2,5=480$ мг/см², и, следовательно, выполняется условие $d > R_{\max}$. В этом случае можно произвести сравнение активностей образцов соотношением (12). Для условия а):

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{N_1 \cdot d_1}{N_2 \cdot d_2} = 1 \cdot \frac{120}{480} = \frac{1}{4}.$$

Для условия б):

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{N_1 \cdot d_1}{N_2 \cdot d_2} = \frac{6000 \cdot 120}{500 \cdot 480} = 3.$$

Пример 4. Исследуемый образец почвы, содержащий ³²P, в виде сухой навески массой $m=361$ мг помещен на алюминиевую чашечку диаметром 1 см ($S=0,785$ см²). Образец находится на расстоянии $h=2,5$ см от чувствительного объема торцового счетчика СИЗБ с радиусом окна $r=1,25$ см. Скорость счета образца составляет $N=1000$ имп/мин. Найти истинную скорость счета N_0 . Для ³²P принять $d_{1/2}=115$ мг/см² и $R_{\max}=780$ г/см².

Решение. Прежде всего определим толщину образца $d=m/S=361/0,785=460$ мг/см². Выполняется условие $d_{1/2} < d < R_{\max}$ и образец является промежуточным. При отсутствии экспериментального графика

самопоглощения можно поправку определить аналитически. Так как образец относится к промежуточным, то необходимо учитывать поправку на саморассеяние ξ . Исходя из того, что $h/r = 2$, по табл. 1 находим $\xi = 1,71$. По таблице 2, учитывая отношение $d/d_{1/2} = 460/115 = 4$, находим $S = 0,339$. Подставляя найденные значения в формулу (11), имеем:

$$N_0 = \frac{1000}{0,39 \cdot 1,71} = 1724 \text{ имп/мин.}$$

Задание 1. Определение зависимости между толщиной образца и количеством регистрируемых бета-частиц и поправки на самопоглощение в зависимости от толщины образца.

Приборы и материалы:

1. Радиометр КРВП-3АБ;
2. Соль хлористого калия;
3. Набор листов фильтровальной бумаги, пропитанных радиоактивным раствором одинаковой активности;
4. Миллиметровая бумага, линейка;
5. Плексигласовый трамбователь, стеклянная воронка, фарфоровая чашка, фильтровальная бумага;
6. Торсионные или аналитические весы;
7. Калькулятор.

Выполнение работы:

1. Включите и подготовьте радиометр к работе;
2. Проверьте правильность работы пересчетного блока;
3. Измерьте фон счетчика в течение 10 минут;
4. Определите скорость счета фона N_{ϕ} по формуле: $N_{\phi} = n_{\phi}/t_{\phi}$;
5. Отвесьте 10 г хлористого калия и всю навеску высыпьте в кювету (если работа производится с кюветами малого диаметра, навеску в кювету пересыпайте с помощью воронки). Аккуратным постукиванием равномерно распределите навеску по дну кюветы;
6. Установите кювету с навеской на верхнюю позицию и измерьте скорость счета в течение 10-20 минут. Число зарегистрированных импульсов n запишите в табл. 19.

Замечание: Время отдельного измерения определяется статистической точностью регистрируемого числа импульсов, которая для данной работы не должна быть ниже 1%, то есть $n > 10000$ имп;

7. Рассчитайте толщину образца d как отношение массы навески m к площади дна кюветы S , то есть $d = m/S$ в $г/см^2$. Полученные значения с точностью до трех знаков после запятой запишите в табл. 19;

Примечание. Площадь дна круглой кюветы определяется по формуле $S = \pi r^2$. Для кюветы, используемой при радиометрических измерениях на КРВП-3АБ, диаметр составляет 8,7 см и $S = 59,42$ $см^2$.

8. Рассчитайте скорость счета $N = n/t$, введите поправку на мертвое время счетчика (если это необходимо). Результаты расчетов запишите в табл. 19;

9. Определите скорость счета образца без фона $N_{об} = N - N_{\phi}$. Полученный результат запишите в табл. 19;

Таблица 19. Самопоглощение бета-излучения ^{40}K в образцах KCl разной толщины d при постоянной удельной активности.

| Суммарная масса образца m , г | Суммарная толщина образца d , $г/см^2$ | Время измерения t , мин | Кол-во зарегистрированных импульсов n | Скорость счета N , имп/мин | Скорость счета без фона $N_{об}$, имп/мин |
|---------------------------------|--|---------------------------|---|------------------------------|--|
| 10 | | | | | |
| 20 | | | | | |
| ... | | | | | |
| ... | | | | | |

10. Отвесьте навеску 10 г хлористого калия и досыпьте ее в ту же кювету, равномерно распределяя по дну;

11. Повторите пункты 6-9. Начиная с третьей навески, образец после разравнивания следует аккуратно уплотнить трамбователем для уменьшения ошибки, вносимой изменением геометрического фактора. Воронку и трамбователь после употребления каждый раз необходимо помещать в фарфоровую чашку. Измерения необходимо проводить до тех пор, пока число регистрируемых импульсов не перестанет увеличиваться (примерно 7 измерений). Измерения с повторяющимися в пределах ошибок результатами свидетельствуют о достижении слоя насыщения;

12. Постройте график зависимости скорости счета $N_{об}$ от суммарной толщины образца d . По оси ординат (вертикальная ось) отложите скорость счета $N_{об}$ в имп/мин, по оси абсцисс – суммарную толщину d в $г/см^2$. Масштаб выберите сами, исходя из полученных результатов. Кривая самопоглощения проводится так, чтобы усреднить имеющийся разброс точек;

13. Проведите касательную к кривой самопоглощения. Определите слой половинного ослабления $d_{1/2}$ образца.

14. Пользуясь полученными графиками, определите истинную скорость счета N_0 (в отсутствие самопоглощения) для образцов толщиной 250 мг/см^2 и 500 мг/см^2 (или для образцов других толщин, указанных преподавателем);

15. Используя формулу (1), определите коэффициент самопоглощения $S_{\text{экс}}$;

16. На основании полученной кривой самопоглощения сделайте вывод о том, при какой толщине образцы, содержащие ^{40}K , будут являться толстослойными.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается эффект самопоглощения бета-излучения в веществе?
2. Дайте определение насыщенного слоя для бета-излучения.
3. Как соотносятся толщина насыщенного слоя и максимальная величина пробега бета-частиц в данном веществе?
4. Что называется коэффициентом самопоглощения?
5. Как определить по кривой самопоглощения величину коэффициента самопоглощения?
6. Поясните, чем отличается эффект самопоглощения от эффекта саморассеяния?
7. Какие экспериментальные методы определения коэффициента самопоглощения вы знаете?
8. Как называются радиоактивные образцы в зависимости от их толщины?
9. Что называется слоем половинного ослабления бета-излучения в веществе?
10. Какие радиоактивные образцы являются толстослойными?
11. Какие радиоактивные образцы относятся к тонкослойным?
12. Кагане радиоактивные образцы относятся к очень тонким?
13. Какие радиоактивные образцы являются промежуточными?
14. При толщине каких радиоактивных образцов и в каких случаях не вводится поправка на самопоглощение?
15. Можно ли рассчитать поправку на самопоглощение теоретически? Если да, приведите формулу.
16. Как определить экспериментально слой половинного ослабления с помощью фильтра?
17. В каком случае учитывается и коэффициент саморассеяния?
18. Какой метод используется при относительных измерениях активности радиоактивных образцов?
19. Какой метод измерения активности используется в зависимости от вида бета-излучения (для мягкого и для жесткого бета-излучения)?
20. Как изготовить тонкослойный образец?
21. Как изготовить толстослойный образец?