

# **РАДИОАКТИВНЫЕ ИНДИКАТОРЫ В ХИМИИ**

## **Проведение эксперимента и обработка результатов**

---

Допущено  
Министерством высшего и среднего  
специального образования СССР  
в качестве учебного пособия  
для студентов университетов,  
обучающихся  
по специальности «Химия»



# Влияние свойств исследуемого изотопа и условий измерения на величину регистрируемой активности

---

## § 1. Связь между абсолютной и регистрируемой активностью

В исследованиях с использованием радиоактивных индикаторов о содержании изучаемого элемента судят на основании результатов измерения активности. В большинстве случаев достаточно проводить лишь относительные измерения, при которых сравниваются только значения регистрируемой активности. Однако иногда бывает нужно определить и абсолютную активность образцов, содержащих радиоактивный изотоп. Отметим, что в тех случаях, когда говорят о регистрируемой активности образца, то, если не сделано каких-либо специальных оговорок, имеют в виду истинную (т. е. исправленную на разрешающее время и фон) регистрируемую активность.

*Фоном* называют показания прибора в отсутствие исследуемых источников излучения. Фон газового счетчика обусловлен следующими факторами: космическим излучением, самопроизвольными разрядами в счетчике (ложные импульсы), наличием радиоактивных веществ в материале счетчика, радиоактивными загрязнениями рабочих помещений, присутствием в воздухе радиоактивных изотопов и др. Фон сцинтилляционного счетчика вызван действием перечисленных факторов, а также наличием в ФЭУ темного тока (тока при отсутствии световых импульсов) и существованием у сцинтилляторов явления послесвечения.

*Разрешающим временем*  $\tau$  счетчика или регистрирующей установки в целом называют минимальный промежуток времени между двумя последовательными импульсами, которые регистрируются раздельно. Разрешающее время имеет размерность с/имп или мин/имп, однако для краткости его выражают обычно в секундах или минутах. Потери при регистрации импульсов, обусловленные разрешающим временем ре-

гистрирующей установки в целом, складываются из потерь за счет разрешающего времени детектора и отдельных блоков регистрирующего устройства. Разрешающее время наиболее употребительных самогасящихся счетчиков Гейгера — Мюллера составляет примерно  $10^{-4}$  с, сцинтилляционных детекторов —  $10^{-9}$  —  $10^{-6}$  с, а усилительных блоков разных типов — от  $5 \cdot 10^{-5}$  до  $1 \cdot 10^{-6}$  с и ниже. Общее разрешающее время радиометрической установки определяется разрешающим временем того из блоков, для которого  $\tau$  максимально.

Если скорость счета, измеренная прибором, равна  $I_{\text{изм}}$ , то исправленная на разрешающее время суммарная скорость счета препарата с фоном  $I_c$  составит

$$I_c = \frac{I_{\text{изм}}}{1 - I_{\text{изм}} \tau} \quad (3.1)$$

Истинная скорость счета препарата будет равна величине  $I_c$  за вычетом скорости счета фона  $I_\phi$ :

$$I = I_c - I_\phi \quad (3.2)$$

Величина регистрируемой активности  $I$  связана с абсолютной радиоактивностью  $a$  измеряемого объекта соотношением

$$I = \varphi a, \quad (3.3)$$

где  $\varphi$  — коэффициент регистрации, учитывающий ряд поправочных коэффициентов.

Для определения абсолютной активности применяют различные способы в зависимости от того, каким путем — экспериментальным или расчетным — найден коэффициент регистрации  $\varphi$ .

Экспериментально  $\varphi$  можно определить только тогда, когда наряду с исследуемым препаратом имеют аналогичным образом приготовленный стандартный препарат того же радиоактивного изотопа с известной абсолютной радиоактивностью  $a_{\text{ст}}$ . Измерив регистрируемую активность стандартного препарата  $I_{\text{ст}}$  (в условиях, полностью идентичных с условиями измерения активности исследуемого препарата), по уравнению (3.3) рассчитывают коэффициент регистрации

$$\varphi = I_{\text{ст}} / a_{\text{ст}} \quad (3.4)$$

Полученное значение  $\varphi$  может быть использовано для нахождения абсолютной активности исследуемого препарата; на основании (3.3) и (3.4) имеем:

$$a = I / \varphi = (I / I_{\text{ст}}) a_{\text{ст}} \quad (3.5)$$

Это — процедура определения абсолютной активности методом относительных измерений.

Расчетный способ нахождения  $\varphi$  связан с количественным учетом всех факторов, влияющих на величину регистрируемой активности  $I$  препарата с абсолютной радиоактивностью  $a$ . При фиксированном значении  $a$  величина  $I$  зависит от:

- 1) разветвленности схемы распада измеряемого радиоактивного изотопа, учитываемой поправкой на схему распада  $p$ ;
- 2) эффективности детектора к данному виду излучения (поправочный коэффициент эффективности  $\epsilon$ );

3) степени ослабления излучения данной энергии на пути от препарата до рабочего объема детектора (поправочный коэффициент ослабления  $k$ );

4) степени ослабления излучения в материале препарата (поправочный коэффициент самоослабления  $S$ );

5) относительной толщины и материала подложки, на которую нанесен измеряемый препарат (коэффициент обратного рассеяния  $q$ );

6) конфигурации и взаимного расположения препарата и детектора. Соответствующую поправку учитывают введением геометрического коэффициента  $\eta$ .

Для изотопов с простой схемой распада величина коэффициента регистрации  $\varphi$  равна произведению всех перечисленных поправочных коэффициентов

$$\varphi = \eta p \epsilon k S q. \quad (3.6)$$

Принимая во внимание (3.3), можно записать, что

$$I = \eta p \epsilon k S q a, \quad (3.7)$$

где  $I$  и  $a$  выражены числом соответственно импульсов и актов распада, отнесенных к одной и той же единице времени.

Если измеряют активность изотопа со сложной схемой распада или равновесной смеси изотопов, то произведение коэффициентов  $p \epsilon k S q$  необходимо выписать для каждой  $i$ -й компоненты излучения в отдельности, и результаты суммировать. В этом случае формула (3.7) приобретает вид

$$I = a \eta \sum_i p_i \epsilon_i k_i S_i q_i. \quad (3.8)$$

Следует отметить, что знание поправочных коэффициентов нужно не только для расчета абсолютной активности препарата  $a$  по результатам измерения  $I$  (или, напротив, для оценки  $I$  при известном  $a$ ), но и в ряде других случаев, например, при сравнении между собой результатов измерений, проведенных на разных радиометрических установках или в разных условиях на одной и той же установке.

Далее будут рассмотрены способы нахождения коэффициента эффективности, поправочных коэффициентов ослабления, самоослабления и обратного рассеяния, поправки на схему распада и геометрического коэффициента. Заметим, что анализ влияния на величину регистрируемой активности условий измерения и свойств измеряемого радиоактивного изотопа в основных своих чертах справедлив при применении детекторов различных типов. Однако в связи с тем, что в лабораториях радиоактивных индикаторов наиболее распространенными детекторами являются газовые счетчики, рассуждения будут проводиться преимущественно к этому типу детекторов.

## § 2. Эффективность счетчиков к $\beta$ - и $\gamma$ -излучению

Эффективностью счетчика к данному виду излучения называют вероятность того, что частица или квант, проникшие в чувствительный объем счетчика, вызовут в нем процессы, позволяющие осуществить регистрацию этой частицы или кванта. Коэффициент эффективности  $\epsilon$

определяется как отношение числа частиц или квантов  $I$ , вызвавших процессы, позволяющие осуществить их регистрацию, к полному числу частиц или квантов  $I_d$ , попавших в чувствительный объем детектора за время регистрации:

$$\varepsilon = I/I_d. \quad (3.9)$$

Обычно коэффициент эффективности называют просто эффективностью.

Следует обратить внимание на то, что в определении эффективности говорится не о числе зарегистрированных прибором частиц или квантов, а об их числе, способном вызвать процессы, позволяющие осуществить регистрацию частиц или квантов используемой радиометрической

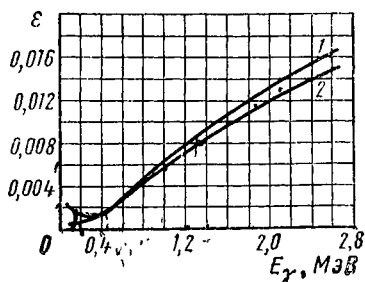


Рис. 18. Эффективность счетчиков Гейгера — Мюллера к  $\gamma$ -излучению различных энергий при оптимальной толщине катода:

1 — алюминий; 2 — латунь

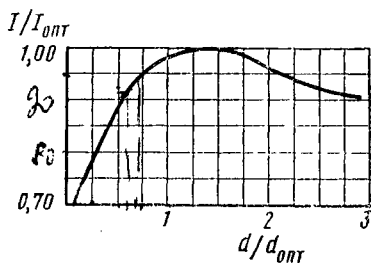


Рис. 19. Зависимость отношения скорости счета  $\gamma$ -квантов  $I$ , регистрируемой счетчиком с катодом толщиной  $d$ , к скорости счета  $I_{опт}$ , регистрируемой счетчиком при оптимальной толщине катода  $d_{опт}$ , от отношения  $d/d_{опт}$

аппаратурой. Отношение числа зарегистрированных частиц или квантов к числу частиц или квантов, попавших в чувствительный объем детектора, зависит от разрешающего времени радиометрической установки в целом; эффективность же — характеристика детектора, не связанная с разрешающим временем.

Эффективность  $\varepsilon$  счетчиков Гейгера — Мюллера к  $\beta$ -частицам близка к единице ( $\varepsilon \sim 0,995$ ). Эффективность же этих счетчиков к  $\gamma$ -квантам зависит от энергии квантов, материала и толщины катода счетчика. Для  $\gamma$ -квантов с энергией 1 МэВ при наиболее благоприятной (оптимальной) толщине катода из латуни или алюминия эффективность газового счетчика составляет всего 0,5%, а для  $\gamma$ -квантов с энергией 0,5 МэВ не превышает 0,2%. Значения коэффициентов эффективности для данных условий измерения могут быть найдены из эмпирических графиков, приведенных на рис. 18 и 19.

**Пример 15.** Определим эффективность счетчика Гейгера — Мюллера с толщиной катода  $60 \text{ мг/см}^2$  к  $\gamma$ -излучению  $^{51}\text{Cr}$ .

Изотоп  $^{51}\text{Cr}$  испускает монохроматические  $\gamma$ -кванты с энергией 0,32 МэВ (см. табл. П.1). Из графика (рис. 18) находим, что при оптимальной толщине катода эффективность  $\varepsilon_{опт}$  счетчика Гейгера — Мюллера к  $\gamma$ -излучению энергией 0,32 МэВ составляет приблизительно 0,001. Для того чтобы оценить, насколько действительная толщина катода  $d$  отличается от оптимальной, определим максимальный пробег комптоновских электронов с энергией, равной энергии  $\gamma$ -кван-

тов. Линейная интерполяция значений  $R_{\max}$ , приведенных в табл. П. 4, дает для  $E = 0,32$  МэВ:  $R_{\max} = d_{\text{опт}} = 84$  мг/см<sup>2</sup>. Таким образом,

$$d/d_{\text{опт}} = 60/84 \approx 0,7.$$

Из графика на рис. 19 следует, что такому значению отношения  $d/d_{\text{опт}}$  соответствует  $I/I_{\text{опт}} = 0,97$ . Эффективность к  $\gamma$ -излучению счетчика с реальной толщиной катода будет равна

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{опт}} (I/I_{\text{опт}}) = 0,97 \cdot 0,001 \approx 0,001.$$

Эффективность сцинтилляционных счетчиков к  $\gamma$ -излучению в десятки и сотни раз выше, чем эффективность счетчиков Гейгера — Мюллера к квантам такой же энергии. Например,  $\gamma$ -кванты с энергией 1 МэВ регистрируются сцинтилляционным счетчиком с эффективностью 30—40%, а  $\gamma$ -кванты с энергией 0,5 МэВ — с эффективностью 35—55%. Теоретически эффективность сцинтилляционных счетчиков к  $\beta$ -излучению может достигать 100%, но в действительности из-за рассеяния светового излучения в сцинтиллирующем кристалле часто имеет меньшую величину.

### § 3. Ослабление излучения в стенках детектора и в слое воздуха между препаратом и детектором

Поправочный коэффициент ослабления  $k$  определяют как отношение числа частиц  $I_d$ , проникающих в чувствительный объем детектора, к числу частиц  $I_q$ , испускаемых препаратом в направлении детектора. Если толщина стенки счетной трубки  $d_1$  г/см<sup>2</sup>, а толщина слоя воздуха между препаратом и счетчиком  $d_2$  г/см<sup>2\*</sup>, то для  $d = d_1 + d_2 \leq 0,3R_{\max}$  с точностью до 10—15% (достаточной для большинства расчетов) поправочный коэффициент ослабления  $\beta$ -излучения

$$k = e^{-\mu d}. \quad (3.10)$$

Оценку поправочного коэффициента ослабления  $\beta$ -излучения для  $d > 0,3R_{\max}$  следует проводить по эмпирическому графику (рис. 20), который дает значения коэффициента  $k = I_d/I_q$  как функцию от  $d/R_{\max}$ .

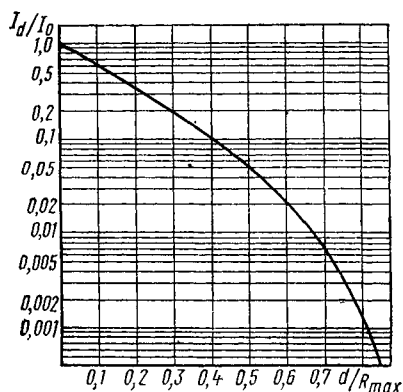


Рис. 20. График для определения поправки на поглощение  $\beta$ -излучения в стенке счетчика и в слое воздуха между препаратом и счетчиком:

$d$  — суммарная толщина стенки счетчика и воздушного промежутка, г/см<sup>2</sup>

\* Толщина слоя воздуха при 760 мм рт. ст. и 25° С  $0,0012 \cdot l_{\text{возд}}$  (г/см<sup>2</sup>), где  $l_{\text{возд}}$  — толщина воздушного промежутка в см. При проведении расчетов обычно пренебрегают изменениями плотности воздуха, возникающими в результате колебаний атмосферного давления и окружающей температуры.

Поправочный коэффициент ослабления  $\gamma$ -излучения при любых значениях толщины поглотителя может быть рассчитан по формуле (3.10). В большинстве случаев поглощением  $\gamma$ -излучения в стенках счетных трубок пренебрегают, принимая  $k = 1$ .

## § 4. Самоослабление излучения

Самоослабление излучения вызвано наложением эффектов поглощения и рассеяния излучения веществом препарата. *Поправочный коэффициент самоослабления*  $S$  определяется как отношение числа частиц или квантов  $I_S$ , испускаемых с поверхности препарата в направлении детектора, к полному числу частиц или квантов  $I_\eta$ , испускаемых в веществе препарата в направлении детектора:

$$S = I_S / I_\eta \quad (3.11)$$

Поправочный коэффициент самоослабления показывает, какая доля испускаемых частиц достигает поверхности препарата. При регистрации  $\gamma$ -квантов поправку на самоослабление обычно не учитывают ( $S = 1$ ). Наибольшее значение эта поправка имеет при измерении мягкого  $\beta$ -излучения.

Величина поправочного коэффициента самоослабления зависит от толщины препарата, атомного номера материала препарата и от энергии испускаемых препаратом частиц или квантов. Точная зависимость величины  $S$  от указанных факторов теоретически не установлена.

Для приближенной оценки  $S$  можно воспользоваться формулой

$$S = \frac{1 - e^{-\mu d_{\text{пр}}}}{\mu d_{\text{пр}}}, \quad (3.12)$$

где  $d_{\text{пр}}$  — толщина препарата, г/см<sup>2</sup>;  $\mu$  — массовый коэффициент ослабления исследуемого излучения. Эта формула выведена в предположении, что  $\beta$ -излучение ослабляется по экспоненциальному закону, и потому справедлива лишь для значений  $d_{\text{пр}}/R_{\text{max}} \leq 0,3$ . Для ориентировочных расчетов формулу (3.12) используют и при более высоких значениях  $d_{\text{пр}}/R_{\text{max}}$ .

**Пример 16.** Рассчитаем значение поправочного коэффициента самоослабления  $S$  для препарата  $\text{Ba}^{35}\text{SO}_4$  толщиной 10 мг/см<sup>2</sup>. Будем полагать, что величина максимального пробега  $\beta$ -частиц  $^{35}\text{S}$  в  $\text{BaSO}_4$  такая же, как и в алюминии, и равна 30 мг/см<sup>2</sup>.

Так как  $10/30 \approx 0,3$ , то для расчета  $S$  можно воспользоваться формулой (3.12). Массовый коэффициент ослабления для излучения  $^{35}\text{S}$  определим путем линейной интерполяции значений, приведенных в табл. П.4; он равен 246 см<sup>2</sup>/г. Подставляя в формулу (3.12)  $d_{\text{пр}} = 0,01$  г/см<sup>2</sup> и  $\mu = 246$  см<sup>2</sup>/г, находим:

$$S = \frac{1 - e^{-246 \cdot 0,01}}{246 \cdot 0,01} \approx 0,37.$$

В работах, требующих более высокой точности, поправку на самоослабление находят экспериментально для каждого изучаемого изотопа и именно в веществе того соединения, в котором изотоп поступает

на измерение. Кривые, характеризующие зависимость самоослабления от толщины препарата, имеют различный вид в зависимости от условий постановки эксперимента. Рассмотрим два метода экспериментального определения поправки на самоославление.

В первом методе используется серия препаратов с постоянной массовой удельной активностью и различной толщиной, например, серия  $\beta$ -излучающих образцов, полученных путем осаждения из кратных объемов радиоактивного раствора. (Предполагается, что все образцы имеют одинаковую площадь и что радиоактивные атомы равномерно распределены в веществе каждого препарата.) Очевидно, что при нулевой

толщине препарата (т. е. в отсутствие радиоактивного вещества) скорость счета также должна быть равной нулю ( $I = 0$ ), а при некоторой предельной толщине препарата, отвечающей полному поглощению  $\beta$ -частиц с нижних слоев, скорость счета должна достигать насыщения ( $I = I_\infty$ ). Этому случаю соответствует кривая, приведенная на рис. 21. Если из начала координат провести касательную к этой кривой, то полученная прямая будет характеризовать скорость счета импульсов в зависимости от толщины «непоглощающего»

препарата. На начальном участке кривая самоослабления сливается с касательной, следовательно, для достаточно тонких препаратов потери излучения в слое радиоактивного вещества практически отсутствуют. Для препарата данной толщины поправка на самоославление определяется как отношение ординат калибровочной кривой и касательной (рис. 21). Предельное значение скорости счета  $I_\infty$  при данных условиях измерения пропорционально удельной активности образца.

Последнее обстоятельство используют при проведении относительных измерений препаратов, которые содержат  $\beta$ -радиоактивные изотопы, испускающие частицы с низкой максимальной энергией. В этом случае не нужно вводить поправок на самоославление, но измеряемые образцы должны быть достаточно толстыми, обладать однородной поверхностью и одинаковым химическим составом. Минимальная толщина образцов, необходимая для таких измерений, не превышает максимального пробега  $\beta$ -излучения  $R_{\max}$  в материале образцов, а для большинства практических целей в результате незначительного влияния нижних слоев и ослабления излучения в окошке счетчика достаточна толщина  $0,75 R_{\max}$ .

Во втором методе применяют серию препаратов различной толщины с одинаковой общей активностью (и, стало быть, с различной удельной активностью). Например, используют серию  $\beta$ -радиоактивных препаратов, которые изготовлены осаждением из растворов с одинаковым количеством радиоактивного изотопа, но с различными количествами

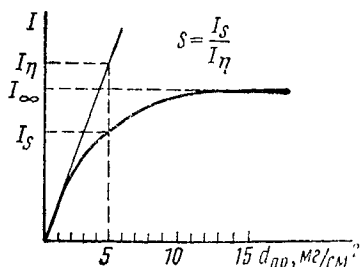


Рис. 21. Кривая самоослабления при постоянной величине удельной активности (для образцов, содержащих  $^{14}C$ )

кривая самоослабления сливается с касательной, следовательно, для достаточно тонких препаратов потери излучения в слое радиоактивного вещества практически отсутствуют. Для препарата данной толщины поправка на самоославление определяется как отношение ординат калибровочной кривой и касательной (рис. 21). Предельное значение скорости счета  $I_\infty$  при данных условиях измерения пропорционально удельной активности образца.

Последнее обстоятельство используют при проведении относительных измерений препаратов, которые содержат  $\beta$ -радиоактивные изотопы, испускающие частицы с низкой максимальной энергией. В этом случае не нужно вводить поправок на самоославление, но измеряемые образцы должны быть достаточно толстыми, обладать однородной поверхностью и одинаковым химическим составом. Минимальная толщина образцов, необходимая для таких измерений, не превышает максимального пробега  $\beta$ -излучения  $R_{\max}$  в материале образцов, а для большинства практических целей в результате незначительного влияния нижних слоев и ослабления излучения в окошке счетчика достаточна толщина  $0,75 R_{\max}$ .

Во втором методе применяют серию препаратов различной толщины с одинаковой общей активностью (и, стало быть, с различной удельной активностью). Например, используют серию  $\beta$ -радиоактивных препаратов, которые изготовлены осаждением из растворов с одинаковым количеством радиоактивного изотопа, но с различными количествами



носителя. Зависимость скорости счета таких препаратов от их толщины показана на рис. 22. Начальный участок кривой самоослабления экстраполируют к нулевой толщине препарата; поправочный коэффициент самоослабления определяют как отношение скорости счета препарата данной толщины к скорости счета бесконечно тонкого препарата (рис. 22).

На начальных участках кривых самоослабления, построенных для препаратов с одинаковой общей активностью, имеется максимум (рис. 22). Этот максимум наблюдается при толщине препаратов, равной  $0,03—0,1R_{\max}$ , и объясняется рассеянием  $\beta$ -частиц в материале самого препарата. В результате рассеяния нарушается изотропность углового распределения  $\beta$ -частиц и увеличивается число частиц, вылетающих под большими углами к плоскости препарата. При небольшой толщине препаратов этот эффект превосходит эффект самопоглощения и приводит к возрастанию скорости счета. По достижении максимума скорость счета убывает с увеличением количества носителя по экспоненциальному закону.

В заключение следует отметить, что форма кривых самоослабления в значительной степени зависит от конкретных условий измерения (взаимного расположения препарата и детектора, материала подложки и т.п.).

## § 5. Обратное рассеяние излучения

Подложки, на которые наносят предназначенные для измерения радиоактивные препараты, могут быть выполнены из различных веществ и иметь разную толщину. В качестве подложек используют органические пленки, бумагу, плексиглас, стекло, металлы. В результате процессов рассеяния некоторая часть излучения, испускаемого в направлении подложки, может отклониться более чем на  $90^\circ$  от своего первоначального пути, т. е. отражаться атомами подложки.

Коэффициентом обратного рассеяния  $q$  называется отношение числа частиц  $I_q$ , испускаемых в направлении детектора с поверхности препарата, нанесенного на подложку определенной толщины, к числу частиц  $I_s$ , испускаемых в направлении детектора с поверхности препарата при бесконечно малой толщине подложки:

$$q = I_q / I_s. \quad (3.13)$$

Так как за счет обратного рассеяния скорость счета только увеличивается, то  $q \geq 1$ .

Обратное рассеяние относительно велико при регистрации  $\beta$ -частиц и, как правило, очень мало (около 1—2% и менее) в случаях измерения препаратов, содержащих  $\alpha$ - и  $\gamma$ -радиоактивные изотопы. При

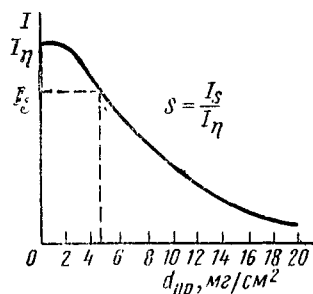


Рис. 22. Кривая самоослабления при постоянной величине общей активности (для образцов, содержащих  $^{14}\text{C}$ )

измерениях изотопов, испускающих  $\alpha$ -частицы и (или)  $\gamma$ -кванты, величину  $q$  обычно принимают равной 1. Большая степень обратного рассеяния в случае  $\beta$ -излучения объясняется тем, что  $\beta$ -частицы при движении через вещество испытывают сильное отталкивающее действие со стороны электронов. Ясно, что чем больше электронов в веществе, тем выше и вероятность встречи  $\beta$ -частиц с электронами атомов и тем больше доля обратно рассеянного излучения. Поэтому коэффициент обратного рассеяния  $\beta$ -излучения увеличивается с толщиной подложки и достигает насыщения при толщинах, равных  $0,2-0,4R_{\max}$  (рис. 23). При толщинах подложек, равных слою насыщения, обратное рассеяние возрастает с увеличением атомного номера вещества подложки, также обнаруживая тенденцию к насыщению при больших  $Z$  (рис. 24).

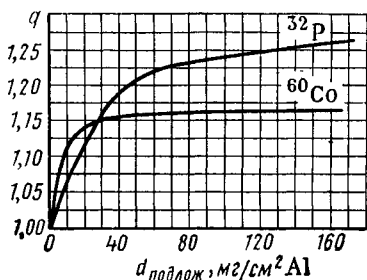


Рис. 23. Зависимость коэффициента обратного рассеяния  $\beta$ -излучения  $q$  от толщины подложки  $d_{\text{подложка}}$  из алюминия, на которую нанесен препарат

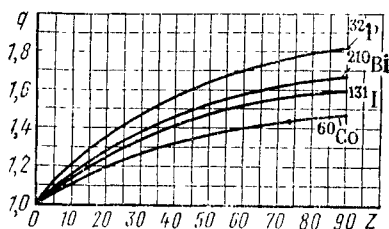


Рис. 24. Зависимость коэффициентов обратного рассеяния  $q$  при насыщении для различных  $\beta$ -излучателей от атомного номера подложки

Зависимость обратного рассеяния от максимальной энергии первичного излучения изображена на рис. 25. Как видно из рисунка, коэффициент  $q$  возрастает с увеличением энергии излучения приблизительно до  $E_{\max} = 0,6 \text{ МэВ}$ , после чего величина коэффициента обратного рассеяния остается практически постоянной. Такой вид зависимости объясняют поглощением обратно рассеянного излучения в слое воздуха между препаратом и счетчиком и в стенке счетчика. Если учесть эти эффекты, то оказывается, что истинные коэффициенты обратного рассеяния не зависят от энергии  $\beta$ -частиц (рис. 26).

Из рис. 23, 24, 25 и 26 следует, что величина  $q$  всегда лежит в границах  $1 \leq q < 2$ , т. е. количество излучения, попадающего в счетчик вследствие отражения от плоской подложки, никогда не превышает количество излучения, исходящего от препарата непосредственно в направлении детектора. Эффект обратного рассеяния уменьшается, если толщина препарата возрастает. Для достаточно толстых препаратов (практически начиная с  $d_{\text{пр}} > 0,2 R_{\max}$ ) коэффициент  $q$  становится равным единице.

Экспериментальное определение коэффициента обратного рассеяния проводится сравнением скорости счета препарата на данной подложке со скоростью счета препарата равной активности, нанесенного

на очень тонкую пленку. Такие пленки изготовляют из веществ с малой величиной эффективного атомного номера (например, из плексигласа); толщина подобных пленок может быть доведена до 10—20 мкг/см<sup>2</sup> при достаточной их прочности.

Здесь уместно заметить, что при измерении  $\beta$ -радиоактивного препарата, находящегося в защитном домике, в счетчик могут попасть  $\beta$ -частицы, отраженные от внутренних стенок домика. Для уменьшения

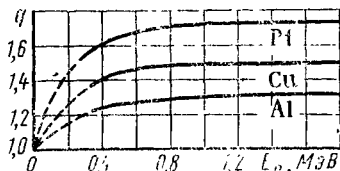


Рис. 25. Зависимость коэффициентов обратного рассеяния  $q$  от энергии  $\beta$ -частиц без учета поправки на поглощение обратно рассеянного излучения

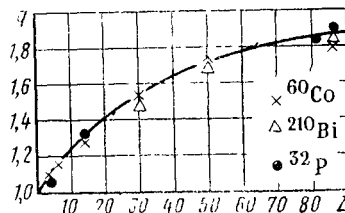


Рис. 26. Зависимость истинных коэффициентов обратного рассеяния (с учетом поправки на поглощение обратно рассеянного излучения) от атомного номера подложки  $Z$

отражения  $\beta$ -частиц от стенок домика последние покрывают плексигласом. Толщину плексигласа подбирают такой, чтобы все  $\beta$ -частицы, прошедшие через него и достигшие свинцовых стенок, при отражении от них поглотились бы на обратном пути в плексигласе.

## § 6. Поправка на схему распада изотопа

Если регистрируемое излучение обладает сложным составом, т. е. состоит из нескольких компонент, из которых могут регистрироваться не обязательно все, то необходимо учитывать вероятности  $p$  таких способов распада, при которых испускаются частицы или кванты излучения данного вида или данной энергии. Эта вероятность, численно равная доле излучения данного вида (или данной энергии) по отношению к общему числу актов распада, в рассматриваемом случае называется *поправкой на схему распада*.

Величины поправок  $p$  можно найти в таблицах изотопов (см. например, табл. П.1) либо непосредственно из схем распада. Так, например, из схемы распада  $^{131}\text{I}$  (рис. 27) находим:  $p_{\beta_1} = 0,028$ ;  $p_{\beta_2} = 0,093$ ;  $p_{\beta_3} = 0,872$ ;

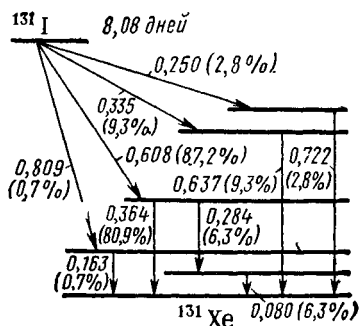


Рис. 27. Схема распада  $^{131}\text{I}$

$p_{\beta_1} = 0,007^*$ . Из табл. П.1 следует, например, что для  $^{60}\text{Co}$  можно принять  $p_{\gamma_1} = 1$  и  $p_{\gamma_2} = 1$  (практически каждый акт распада изотопа сопровождается испусканием двух  $\gamma$ -квантов).

В большинстве случаев поправка на схему распада  $p \leq 1$ . При наличии большого числа электронов внутренней конверсии величина поправки может превышать единицу, так как в этом случае один акт распада может, в принципе, обусловить появление в регистрирующей аппаратуре нескольких электрических импульсов.

## § 7. Учет геометрических условий измерения

Потери излучения, обусловленные взаимным расположением препарата и счетчика, учитываются поправкой, называемой геометрическим коэффициентом. Геометрический коэффициент  $\eta$  равен отношению телесного угла  $\omega$ , под которым детектор облучается источником излучения, к полному телесному углу  $4\pi$ . Геометрический коэффициент определяет, какая доля от общего числа  $a$  частиц или квантов испускается препаратом в направлении чувствительного объема детектора. Таким образом,

$$\eta = \omega/4\pi \quad (3.14)$$

или

$$\eta = I_{\eta}/a, \quad (3.15)$$

где  $I_{\eta}$  — число частиц или квантов, испускаемых в направлении чувствительного объема детектора.

Геометрический коэффициент в ряде случаев можно рассчитать. Рассмотрим один из методов расчета.

Пусть, например, точечный препарат расположен на продолжении оси торцового счетчика. Обозначим радиус окна счетчика через  $r$ , а расстояние от препарата до начала нити счетчика через  $h$  (рис. 28).

Телесные углы измеряются отношением площади, вырезаемой телесным углом на поверхности шара произвольного радиуса, к квадрату радиуса этого шара. В рассматриваемом случае телесный угол  $\omega$  будет равен

$$\omega = \sigma/R^2,$$

где  $\sigma$  — поверхность шарового сегмента;  $R = \sqrt{h^2 + r^2}$ . Принимая во внимание, что

$$\sigma = 2\pi R(R-h)$$

\* Отметим, что в разных таблицах часто приводятся несколько различные значения энергий излучения и поправок на схему распада того или иного изотопа, что связано с экспериментальными погрешностями определения соответствующих величин. Эти различия, как правило, невелики, и при рассматриваемых расчетах ими можно пренебречь.

и заменяя  $R$  на  $\sqrt{h^2 + r^2}$ , имеем

$$\omega = 2\pi \left( 1 - \frac{h}{\sqrt{h^2 + r^2}} \right).$$

Подставив найденное значение  $\omega$  в формулу (3.14), окончательно получим:

$$\eta = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{h}{\sqrt{h^2 + r^2}} \right). \quad (3.16)$$

Следует отметить, что при  $h > 2r$  для препаратов, радиус которых не превышает  $0,5 r$ , можно с точностью до 2% рассчитывать величину  $\eta$  по формуле (3.16), т. е. такие препараты можно рассматривать как точечные.

Кроме расчетного существует и экспериментальный метод нахождения величины  $\eta$ . Последний метод оказывается единственно применимым, когда вследствие сложной конфигурации препарата рассчитать  $\eta$  невозможно.

При экспериментальном определении геометрического коэффициента используют выражение (3.8), из которого следует, что

$$\eta = \frac{I}{a(p_1 \epsilon_1 k_1 S_1 q_1 + p_2 \epsilon_2 k_2 S_2 q_2 + \dots + p_n \epsilon_n k_n S_n q_n)}. \quad (3.17)$$

Задача сводится к нахождению скорости счета  $I$  стандартного препарата, абсолютная активность  $a$  которого известна, а форма и размеры соответствуют форме и размерам измеряемых препаратов. Кроме того, необходимо определить значения поправочных коэффициентов, которые входят в знаменатель формулы (3.17). Точность величины  $\eta$  будет тем выше, чем точнее определены поправочные коэффициенты  $\epsilon$ ,  $k$ ,  $S$ ,  $q$ . Поэтому стремятся проводить измерения в таких условиях, когда возможно большим числом поправок можно пренебречь. Рекомендуется использовать стандартные препараты, в которых радиоактивное вещество распределено в виде равномерного тонкого слоя на тонкой подложке из материала с малым атомным номером. В этом случае значения поправочных коэффициентов самоослабления  $S$  и обратного рассеяния  $q$  близки к единице, и формула (3.17) запишется в виде

$$\eta = \frac{I}{a(p_1 \epsilon_1 k_1 + p_2 \epsilon_2 k_2 + \dots + p_n \epsilon_n k_n)}, \quad (3.18)$$

где  $I$  — скорость счета стандартного препарата после внесения поправки на разрешающее время счетной установки  $\tau$  (согласно формуле 3.1) и после вычитания фона (формула 3.2), а коэффициенты  $\epsilon$ ,  $k$  и  $p$  определяются так, как было показано в § 2, 3 и 6 этой главы.

**Пример 17.** Рассчитаем величину геометрического коэффициента  $\eta$ , если при измерении препарата, содержащего радиоактивные изотопы  $^{90}\text{Sr}$  и дочерний  $^{90}\text{Y}$ , регистрируемая скорость счета (без фона) 2880 имп/мин. Для приготовления препарата было использовано 0,025 мкКи  $^{90}\text{Sr}$  без носителя. В качестве подложки использовалась тонкая органическая пленка. Со времени приготовления до момента измерения прошел 1 месяц. Измерение проводили с помощью цилиндри-

ческого счетчика Гейгера — Мюллера со стальным катодом толщиной 40 мг/см<sup>2</sup>. (При расчетах можно пренебречь поглощением излучения в воздухе.)

Из табл. П.1 находим, что период полураспада материнского <sup>90</sup>Sr  $T_{1/2(1)} = 28,4$  года, период полураспада дочернего <sup>90</sup>Y  $T_{1/2(2)} = 64,8$  ч. Каждый изотоп испускает β-частицы только одного вида.  $E_{\max}$  для <sup>90</sup>Sr равна 0,54 МэВ, для <sup>90</sup>Y — 2,26 МэВ.

Условия приготовления препарата (изотоп без носителя, тонкая подложка из органической пленки) дают возможность считать коэффициенты самоослабления и обратного рассеяния для излучения обоих изотопов равными 1. Поэтому для расчета геометрического коэффициента воспользуемся формулой (3.18). В рассматриваемом случае в знаменателе (3.18) будет только 2 слагаемых (будем считать, что величины с индексом 1 относятся к <sup>90</sup>Sr, а с индексом 2 — к <sup>90</sup>Y).

Принимая во внимание, что эффективность счетчика Гейгера — Мюллера к β-излучению равна 1, т. е.  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1$ , а также, что  $\rho_1 = \rho_2 = 1$ , формулу (3.18) можно переписать в виде

$$\eta = \frac{I}{a(k_1 + k_2)}, \quad (3.19)$$

Вследствие того, что  $T_{1/2(1)} \gg T_{1/2(2)}$  и с момента приготовления препарата прошел период, больший, чем  $10 T_{1/2(2)}$ , можно считать, что изотопы <sup>90</sup>Sr и <sup>90</sup>Y в измеряемом образце находятся в состоянии векового равновесия, т. е. что  $a_1 = a_2 = a$ . Равновесная активность  $a$  составляет

$$a = 0,025 \text{ мкКи} = 0,025 \cdot 2,22 \cdot 10^6 = 5,6 \cdot 10^4 \text{ расп/мин.}$$

Учитывая, что величина скорости счета не слишком велика (менее 6000 имп/мин), поправку на разрешающее время можно не вводить.

С помощью табл. П.4 определяем, что в алюминии максимальные пробеги  $R_{\max}$  β-частиц с  $E_{\max} = 0,54$  и  $E_{\max} = 2,26$  МэВ равны соответственно 184 мг/см<sup>2</sup> и 1090 мг/см<sup>2</sup> (значения найдены линейной интерполяцией). Приближенно можно принять, что в материале стенок счетчика  $R_{\max}$  β-излучения <sup>90</sup>Sr и <sup>90</sup>Y также равны 184 и 1090 мг/см<sup>2</sup>.

Отношение  $d_{\text{сч}}/R_{\max}$  в обоих случаях меньше 0,3, поэтому для нахождения  $k_1$  и  $k_2$  можно использовать формулу (3.10). Из табл. П.4 путем линейной интерполяции находим, что массовые коэффициенты ослабления  $\mu_1$  и  $\mu_2$  равны соответственно 36 и 4,5 см<sup>2</sup>/г. Таким образом,

$$k_1 = e^{-36 \cdot 0,040} = e^{-1,44} = 0,237; \quad k_2 = e^{-4,5 \cdot 0,040} = e^{-0,18} = 0,835.$$

Подставив в формулу (3.19) найденные значения  $k_1$  и  $k_2$ , находим

$$\eta = \frac{2880}{5,6 \cdot 10^4 (0,237 + 0,835)} = 0,048.$$

## § 8. Расчеты с использованием зависимости между абсолютной и регистрируемой активностью

В общем виде зависимость между активностью препарата и его регистрируемой активностью (скоростью счета)  $I$  выражается формулой (3.8). Если учесть, что 1 мкКи =  $2,22 \cdot 10^6$  расп/мин, то формулу (3.8) можно переписать в виде

$$I = 2,22 \cdot 10^6 a \eta \sum_i \rho_i \epsilon_i k_i S_i q_i, \quad (3.20)$$

где  $I$  выражено в имп/мин, а  $a$  — в микрокюри.

Из (3.20) следует, что

$$a = \frac{I}{2,22 \cdot 10^6 \eta (p_1 \varepsilon_1 k_1 S_1 q_1 + p_2 \varepsilon_2 k_2 S_2 q_2 + \dots + p_n \varepsilon_n k_n S_n q_n)}. \quad (3.21)$$

Необходимо подчеркнуть, что в этих формулах речь идет о так называемой истинной скорости счета  $I$ , т. е. о скорости счета, исправленной на разрешающее время  $\tau$  и фон  $I_{\phi}$  регистрирующей установки. Поправки на  $\tau$  и  $I_{\phi}$  предварительно вносят в результаты измерений.

С помощью формул (3.20) и (3.21) можно, во-первых, найти абсолютную активность препарата  $a$  по результатам определения его скорости счета  $I$  и, во-вторых, оценить истинную скорость счета  $I$ , которую следует ожидать при измерении препарата с известной абсолютной активностью  $a$  на данной измерительной аппаратуре.

**Пример 18.** Определим абсолютную активность препарата  $^{60}\text{Co}$  без носителя, если скорость счета, измеренная на установке с торцовым счетчиком Гейгера — Мюллера (радиус окна которого 19 мм, а толщина окна 3 мг/см<sup>2</sup>), оказалась равна  $I_{\text{изм}} = 20\,000$  имп/мин. Радиус препарата 3 мм. Препарат приготовлен на подложке из тантала толщиной 300 мг/см<sup>2</sup>. Центр препарата лежит на продолжении оси торцового счетчика. Расстояние от препарата до слюдяного окошка 40 мм. Разрешающее время регистрирующей установки в целом  $\tau = 3 \cdot 10^{-4}$  с, фон — 22 имп/мин. Согласно схеме распада (рис. 29)  $^{60}\text{Co}$  при радиоактивном распаде испускает  $\beta$ -частицы с  $E_{\text{max}} = 0,31$  МэВ и  $\gamma$ -кванты с  $E_{\gamma} = 1,17$  и 1,33 МэВ. Во всех случаях  $p = 1$ .

Учитывая схему распада  $^{60}\text{Co}$ , запишем формулу (3.21) в виде

$$a = \frac{I}{2,22 \cdot 10^6 \eta (p_1 \varepsilon_1 k_1 S_1 q_1 + p_2 \varepsilon_2 k_2 S_2 q_2 + p_3 \varepsilon_3 k_3 S_3 q_3)}, \quad (3.22)$$

где коэффициенты с индексом 1 относятся к  $\beta$ -излучению, с индексом 2 — к  $\gamma$ -излучению с  $E_{\gamma} = 1,17$  МэВ, с индексом 3 — к  $\gamma$ -излучению с  $E_{\gamma} = 1,33$  МэВ.

Сначала введем поправки на разрешающее время. Скорость счета с фоном, исправленная по формуле (3.1) на значение разрешающего времени  $\tau = 3 \times 10^{-4}$  с ( $5 \cdot 10^{-6}$  мин), составляет

$$I_c = \frac{I_{\text{изм}}}{1 - I_{\text{изм}} \tau} = \frac{20\,000}{1 - 20\,000 \cdot 5 \cdot 10^{-6}} = 22\,222 \text{ имп/мин.}$$

Скорость счета  $I$ , исправленная на фон [см. формулу (3.2)], равна

$$I = I_c - I_{\phi} = 22\,222 - 22 = 22\,200 \text{ имп/мин}$$

(в принципе, фон при столь большом значении  $I_c$  можно было и не принимать во внимание). Далее перейдем к нахождению поправочных коэффициентов. Так как препарат не содержит носителя, самоослабление  $\beta$ -частиц и, конечно,  $\gamma$ -квантов в материале препарата отсутствует, поэтому  $S_1 = S_2 = S_3 = 1$ .

Значение геометрического коэффициента  $\eta$  определим расчетным методом. Примем, что расстояние от препарата до нити счетчика равно расстоянию от препарата до слюдяного окна, т. е.  $h = 40$  мм. Так как в нашем случае  $h > 2r$  (радиус окна счетчика  $r = 19$  мм) и радиус препарата (3 мм) меньше, чем  $0,5r$ , то пре-

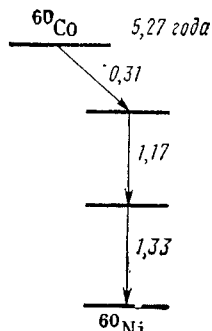


Рис. 29. Схема распада  $^{60}\text{Co}$

парат можно считать точечным (см. стр. 75) и для расчета  $\eta$  использовать формулу (3.16):

$$\eta = 0,5 \left( 1 - \frac{40}{\sqrt{1600 + 381}} \right) \approx 0,056.$$

Значения коэффициентов обратного рассеяния  $q_1$ ,  $q_2$  и  $q_3$  находим из следующих соображений. Согласно табл. П.4  $R_{\max}$  для  $\beta$ -излучения с  $E_{\max} = 0,31$  МэВ равно 80 мг/см<sup>2</sup>. Подложка имеет толщину  $d_{\text{подлож}} = 300$  мг/см<sup>2</sup>. Следовательно, отношение  $d_{\text{подлож}}/R_{\max} > 0,4$ , и толщина подложки достаточно для того, чтобы обеспечить насыщение отраженного излучения. С помощью графика, данного на рис. 24, находим, что при использовании танталовой подложки ( $Z = 73$ ) величина  $q_1 = 1,4$ . Для  $\gamma$ -излучения принимаем  $q_2 = q_3 = 1$ .

Эффективность торцового счетчика к  $\beta$ -частицам равна 1, т. е.  $\epsilon_1 = 1$ . Эффективности  $\epsilon_2$  и  $\epsilon_3$  к регистрации  $\gamma$ -квантов определяем следующим образом. Из графика, приведенного на рис. 18, находим, что при оптимальной толщине алюминиевого или латунного катода  $d_{\text{опт}}$  эффективность счетчика Гейгера — Мюллера к  $\gamma$ -квантам  $^{60}\text{Co}$  равна  $\epsilon_{2,\text{опт}} \approx 0,005$  и  $\epsilon_{3,\text{опт}} \approx 0,007$ . Можно допустить, что эффективность останется такой же, когда  $\gamma$ -кванты попадают в счетчик не через слой алюминия или латуни, а через слой слюды.

Учитывая, что согласно табл. П.4 для комптоновских электронов с энергиями, равными энергии  $\gamma$ -квантов  $^{60}\text{Co}$  ( $E_{\max} = 1,17$  МэВ и  $E_{\max} = 1,33$  МэВ) величина  $R_{\max} \approx 500$  мг/см<sup>2</sup>, найдем отношение действительной толщины слюды (3 мг/см<sup>2</sup>) к оптимальной толщине катода  $d_{\text{опт}} = R_{\max}$ :

$$d/d_{\text{опт}} = 3/500 = 0,006.$$

Из графика, данного на рис. 19, следует, что такому значению отношения  $d/d_{\text{опт}}$  соответствует  $I/I_{\text{опт}} \approx 0,7$ . Таким образом, величина  $\epsilon_2 = \epsilon_{2,\text{опт}} \times 0,7 = 0,0035$ , а  $\epsilon_3 = 0,7 \cdot \epsilon_{3,\text{опт}} = 0,0049$ .

Осталось определить еще значение поправочных коэффициентов ослабления излучения в слюдяном окошке и в воздухе. Препарат находится на расстоянии 40 мм от счетчика, следовательно, общая толщина слоя, ослабляющего излучение, равна

$$d = 3 + 1,12 \cdot 4 = 7,48 \approx 7,5 \text{ мг/см}^2.$$

Значение  $k_1$  найдем с помощью графика, изображенного на рис. 20. Для  $E_{\max} = 0,31$  МэВ отношение  $d/R_{\max} = 7,5/84 \approx 0,1$  и  $k_1 \approx 0,8$ . Ослабление  $\gamma$ -квантов  $^{60}\text{Co}$  можно не учитывать, положив  $k_2 = k_3 = 1$ .

Подставив в (3.22) найденные значения  $\eta = 0,056$ ,  $k_1 = 0,8$ ,  $q_1 = 1,4$ ,  $\epsilon_2 = 0,0035$  и  $\epsilon_3 = 0,0049$  (все остальные коэффициенты равны единице), получим

$$a = \frac{22\,200}{2,22 \cdot 10^6 \cdot 0,056 (0,8 \cdot 1,4 + 0,0035 + 0,0049)} = 0,152 \text{ мкКи.}$$

Следует отметить, что если бы при расчетах не учитывалось  $\gamma$ -излучение (из-за низкой эффективности его регистрации на торцовом счетчике), то для величины  $a$  было бы найдено значение

$$a = \frac{22\,200}{2,22 \cdot 10^6 \cdot 0,056 \cdot 1,4 \cdot 0,8} \approx 0,159 \text{ мкКи,}$$

что в пределах погрешности измерения  $I$  (обычно не менее 1 -- 3%) не отличается от значения  $a$ , найденного с учетом всех компонент излучения.

В общем случае целесообразно проводить предварительную оценку вклада каждой компоненты излучения в скорость счета препарата. Если оказывается, что величина вклада не превышает 1% (из-за низкой эффективности к данному виду излучения, из-за малой вероятности его выхода при распаде или по другим причинам), то соответствующую



компоненту можно не принимать во внимание при дальнейших расчетах.

**Пример 19.** Рассчитаем скорость счета в имп/мин, которую будет фиксировать регистрирующая установка при измерении препарата  $\text{NaH}_2^{32}\text{PO}_4$ , имеющего абсолютную активность 0,30 мкКи. Препарат приготовлен на мягкой органической пленке, толщина препарата 2,5 мг/см<sup>2</sup>. Детектором излучения служит цилиндрический газовый счетчик с толщиной стенок  $d_{\text{сч}} = 0,04$  г/см<sup>2</sup>. Размеры препарата и геометрические условия измерения соответствуют приведенным в примере 17. Разрешающее время установки  $\tau = 1,8 \cdot 10^{-4}$  с, а фон составляет 50 имп/мин.

Согласно табл. П. I  $^{32}\text{P}$  при радиоактивном распаде испускает только  $\beta$ -частицы с  $E_{\text{max}} = 1,711$  МэВ ( $p = 1$ ), поэтому расчет скорости счета будем вести по формуле

$$I = 2,22 \cdot 10^6 \text{ апек}Sq, \quad (3.23)$$

которая является частным случаем формулы (3.20).

Поскольку известно, что геометрические условия измерения не отличаются от условий, описанных в примере 17, можно воспользоваться найденным в этом примере значением геометрического коэффициента  $\eta = 0,048$ . Эффективность газового счетчика к  $\beta$ -излучению  $\epsilon = 1$ . Излучение  $^{32}\text{P}$  обладает сравнительно высокой проникающей способностью (для  $^{32}\text{P}$   $R_{\text{max}} = 785$  мг/см<sup>2</sup>), а так как толщина препарата по сравнению с  $R_{\text{max}}$  очень мала (2,5 мг/см<sup>2</sup>), то самоослаблением излучения в материале препарата можно пренебречь, положив  $S = 1$ . Отношение  $d/R_{\text{max}} < 0,3$ , поэтому для нахождения поправочного коэффициента ослабления  $k$  используем формулу (3.10). Из табл. П.4 находим, что массовый коэффициент ослабления  $\beta$ -излучения в алюминии  $\mu = 6,0$  см<sup>2</sup>/г. Можно считать, что и в материале стенок счетчика (нержавеющая сталь) величина  $\mu$  практически такая же. Следовательно,

$$k = e^{-6,0 \cdot 0,04} = e^{-0,240} \approx 0,79.$$

Обратное рассеяние от подложки из тонкой органической пленки практически отсутствует, поэтому  $q = 1$ .

Подставляя величину абсолютной активности препарата и значения найденных коэффициентов в формулу (3.23), находим

$$I = 2,22 \cdot 10^6 \cdot 0,30 \cdot 0,048 \cdot 0,79 = 25\ 250 \text{ имп/мин.}$$

Суммарная скорость счета препарата вместе с фоном  $I_{\text{с}}$  равна

$$I_{\text{с}} = 25\ 250 + 50 = 25\ 300 \text{ имп/мин.}$$

При разрешающем времени установки  $\tau = 1,8 \cdot 10^{-4}$  с =  $3 \cdot 10^{-6}$  мин доля незарегистрированных импульсов составит

$$I_{\text{с}} \tau = 25\ 300 \cdot 3 \cdot 10^{-6} \approx 0,076.$$

Ожидаемая регистрируемая скорость счета, которую будет фиксировать прибор, окажется равной [см. формулу (3.1)]

$$I_{\text{изм}} = \frac{I_{\text{с}}}{1 + I_{\text{с}} \tau} = \frac{25\ 300}{1 + 0,076} = 23\ 500 \text{ имп/мин.}$$

Из примеров 18 и 19 видно, что расчеты по формулам (3.20), (3.21) существенно облегчаются, когда условия измерения позволяют часть поправочных коэффициентов считать равными единице. Поскольку сами значения поправочных коэффициентов определяются с некоторыми ошибками, то выбор таких условий способствует повышению точности измерения абсолютной активности. С этой целью желательно применять «бесконечно тонкие» препараты, нанесенные на тонкую подложку из органической пленки или бумаги, располагая их на расстоянии 40—50 мм от дна домика. Для регистрации активности рекомендуется ис-

пользовать торцовые счетчики; диафрагмирование окна счетчика позволяет повысить точность расчета геометрического коэффициента и улучшить эффективность счетчика к  $\beta$ -частицам. Тем не менее даже в этом случае из-за погрешностей, связанных с определением поправочного коэффициента ослабления, средняя точность метода составляет 10—15%. Точность определений абсолютной радиоактивности с помощью цилиндрических счетчиков, работающих в гейгеровском режиме, не превышает 25—30%. Калибровка аппаратуры с помощью 4л-счетчиков, заключающаяся в экспериментальном определении коэффициента регистрации для данного образца, позволяет довести точность измерений до 1—3%. Такая погрешность лежит в пределах аппаратурных ошибок.

## § 9. Условия проведения относительных измерений

Относительные измерения радиоактивности заключаются в сравнении скорости счета измеряемого препарата со скоростью счета стандартного препарата, содержащего известное количество такого же изотопа, или в сравнении между собой значений активности двух препаратов, содержащих одинаковые изотопы.

При проведении относительных измерений коэффициент  $\varphi$  должен оставаться постоянным, т. е. для различных препаратов

$$I_1/a_1 = I_2/a_2 = \dots = I_n/a_n = \varphi. \quad (3.24)$$

Для правильного проведения относительных измерений радиоактивности исследуемых препаратов необходимо соблюдать ряд условий. Форма препаратов и их размеры (площадь, толщина) должны быть идентичны. Препараты нужно одинаково располагать относительно счетчика. Необходимо, чтобы радиоактивное вещество было равномерно распределено во всем объеме препарата.

В случае регистрации излучения газообразных радиоактивных препаратов, которую обычно проводят на счетчиках внутреннего наполнения, рекомендуется смешивать регистрируемый газ и рабочий газ (обычно метан) в неизменном соотношении и наполнять счетчик газовой смесью до одного и того же давления. Наиболее просто проводить относительные измерения радиоактивности жидких препаратов. При этом следует использовать одинаковые по размерам кюветы, изготовленные из одного и того же материала. В кюветы с помощью пипетки помещают равные объемы радиоактивной жидкости; желательно, чтобы толщина слоя жидкости в кювете была больше слоя, соответствующего максимальному пробегу  $\beta$ -частиц, испускаемых регистрируемым изотопом. При регистрации радиоактивности твердых препаратов добиться равномерного распределения вещества по поверхности подложки довольно трудно. Если твердые препараты готовят выпариванием раствора, то перед измерением препараты высушивают до исчезновения признаков влаги или до постоянной массы. Подложки, на которые нанесены измеряемые препараты, следует изготавливать из однородного материала и одинаковой толщины.

Все измерения желательно проводить на одной и той же установке с одним и тем же счетчиком и с одной и той же подставкой (кассетой) для крепления образцов. Нужно стремиться обеспечивать одинаковую точность всех измерений. В процессе работы необходимо систематически контролировать стабильность работы прибора.

Следует иметь в виду, что погрешности, обусловленные некоторым различием во взаимном расположении препаратов и счетчика, резко возрастают по мере приближения препарата к счетчику; одновременно сильно сказывается и неравномерность распределения активности в препаратах. Поэтому при относительных измерениях рекомендуется помещать образцы на расстояние не ближе 20—30 мм от счетчика.

Для устранения погрешности, связанной с самоослаблением  $\beta$ -излучения, стараются сравнивать либо бесконечно тонкие препараты, либо препараты, толщина которых превосходит толщину слоя насыщения, так как изготовление препаратов строго одинаковой толщины — весьма трудоемкая операция. По этой же причине в качестве подложек используют либо достаточно тонкую органическую пленку или бумагу, либо, если это невозможно, толстые подложки, толщина которых превышает слой насыщения.

При измерении  $\gamma$ -излучения такие ограничения несущественны, так как небольшое различие в толщине препаратов или толщине подложек не оказывает заметного влияния на коэффициент регистрации.

Чтобы при проведении серии измерений избежать систематической погрешности, связанной с неточной фиксацией препарата, а также неравномерным распределением радиоактивного вещества в объеме препарата, проводят ряд измерений, каждый раз поворачивая препарат вокруг оси на некоторый случайный угол. Полученные результаты усредняют.

При сравнительных измерениях учитываются лишь поправки на разрешающее время счетной установки и фон, а при длительной работе — также и поправки на нестабильность работы прибора. Существенное достоинство относительных измерений заключается в их чрезвычайной простоте и высокой точности, если сравнение активности препаратов производится в строго тождественных условиях.

## Вопросы

1. Перечислите факторы, обуславливающие фон: а) газового счетчика; б) сцинтилляционного счетчика. Укажите возможные пути снижения фона.

2. Дайте определение разрешающего времени. Какова размерность разрешающего времени?

3. У каких детекторов излучения — газовых или сцинтилляционных — величина разрешающего времени обычно больше?

4. Электронный блок регистрации излучения радиометрической установки имеет разрешающее время  $10^{-4}$  с. Каково разрешающее время установки в целом, если в качестве детектора использован сцинтилляционный счетчик (разрешающее время  $10^{-6}$  с), а разрешающее время остальных узлов установки составляет  $10^{-7}$  с?

5. Приведите формулу, с помощью которой можно ввести поправку на разрешающее время в скорость счета, измеренную прибором.

6. Какие методы определения коэффициента регистрации вам известны?

7. Перечислите факторы, от которых зависит регистрируемая активность препарата  $I$ , абсолютная активность которого равна  $a$ .

8. Регистрируемый жидкий препарат содержит смесь радиоактивных изотопов. Будет ли значение геометрического коэффициента для этих изотопов в данном случае одинаково или различно?

9. Зависит ли величина коэффициента эффективности от разрешающего времени детектора?

10. Может ли величина коэффициента эффективности быть больше единицы? Почему?

11. К какому излучению эффективность счетчиков Гейгера — Мюллера выше — к  $\beta$ -частицам или  $\gamma$ -квантам? Чем это можно объяснить?

12. Укажите условия, при которых оценку поправочного коэффициента ослабления  $\beta$ -излучения можно проводить по формуле (3.10).

13. Какими факторами вызвано самоослабление излучения веществом препарата?

14. Дайте определение поправочного коэффициента самоослабления. Укажите формулу, по которой можно провести приближенную оценку этого коэффициента.

15. Укажите пределы, в которых могут изменяться значения поправочного коэффициента самоослабления.

16. В чем заключаются экспериментальные методы определения поправочного коэффициента самоослабления? Как следует готовить препараты для измерения активности, чтобы коэффициентом самоослабления можно было пренебречь?

17. Дайте определение коэффициента обратного рассеяния.

18. Чем объясняется то, что обратное рассеяние относительно велико при регистрации  $\beta$ -частиц и, как правило, ничтожно мало при измерении  $\alpha$ - и  $\gamma$ -излучения?

19. Как зависит коэффициент обратного рассеяния от: а) толщины подложки; б) порядкового номера материала подложки?

20. В каких пределах может изменяться коэффициент обратного рассеяния?

21. Объясните, с какой целью стенки защитного свинцового домка, в котором находятся счетчик и регистрируемый препарат, изнутри покрывают плексигласом.

22. В каких случаях нужно вводить поправку на схему распада?

23. Дайте определение геометрического коэффициента. Какие методы его определения вам известны?

24. Как можно рассчитать величину геометрического коэффициента при измерении точечного препарата? Какой препарат можно назвать точечным?

25. Укажите условия измерения радиоактивных препаратов, при которых величина коэффициента регистрации  $\phi$  практически равна единице.

26. Какие измерения радиоактивных препаратов называют относительными? Укажите условия, при которых можно проводить такие измерения.