

Основы радиохимии и радиологии

3 курс ХФ

309 гр. Занятие № 2
27 сентября

Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом

Ионизация среды (газ, жидкость, твердое тело), возникновение электронов и ионов (первичных или вторичных). Возникновение импульса электрического тока если среда находится в электрическом поле.

Ионизационные детекторы:
ионизационные камеры, газоразрядные, полупроводниковые, pin-диодные,

Возбуждение атомов среды с последующей релаксацией системы с испусканием квантов фотонного излучения - сцинтилляции

Сцинтилляционные детекторы:
жидкие, твердые, газовые, детекторы Черенковского излучения и тд.

Первичные или вторичные химические реакции, приводящие к визуализации частицы или ее трека

Разнообразные трековые детекторы, компьютерная и авто-радиография

При поглощении ионизирующего излучения также возможно изменение температуры объекта – основа калориметрических детекторов

Измерили радиоактивность препарата $^{58}\text{Co}^{35}\text{SO}_4$ с помощью торцового счетчика Гейгера-Мюллера с окном толщиной 4 мг/см^2 . Скорость счета этого препарата составила 6100 имп/мин при фоне 20 имп/мин . Определите суммарную радиоактивность препарата, если разрешающее время счетчика $1 \cdot 10^{-4} \text{ с}$, диаметр окна детектора 2 см , расстояние от препарата до счетчика 5 см . Препарат без носителя (тонкий), покрыт алюминиевой фольгой толщиной $0,01 \text{ см}$. При расчете отражением излучения от подложки можно пренебречь. Плотность алюминия $2,7 \text{ г/см}^3$. Некоторые характеристики радионуклидов и их излучений приведены в таблице

Радионуклид	Тип распада	Период полураспада	$E_{\beta, max}$, МэВ	R_{max} , Г/см ²	μ , см ² /Г
^{35}S	β^- (100%)	87 сут	0,167	0,032	210
^{58}Co	β^- (15%) ЭЗ (85%)	71 сут	0,475	0,147	43

Примеры задач для подготовки к контрольной № 1

Краткая характеристика заданий контрольной работы № 1

Схемы распада, энергия распада, энергия частиц

Основной закон радиоактивного распада

Равновесия подвижное и вековое

Накопление РН при реакторном облучении мишени

Ослабление потока ионизирующего излучения

Зависимость скорости счета от условий измерения

Задача 6. Зависимость скорости счета от условий измерения

Регистрируемая активность I связана с абсолютной активностью **A** образца, содержащего нуклид с простой схемой распада, соотношением

$$I = \varphi A = [\eta (p \varepsilon k S q)] A$$

Эффективностью детектора (ε) к данному виду излучения - вероятность того, что частица (квант), передав часть своей энергии атомам рабочего вещества детектора, вызовет в нем процессы, позволяющие зарегистрировать эту частицу или квант. **Коэффициент эффективности ε** - отношение числа частиц (квантов) I_ε , вызвавших такие процессы, к общему числу частиц (квантов) I_d , проникших в рабочий объем детектора ($\varepsilon = I_\varepsilon / I_d$)

Коэффициент ослабления k учитывает потери излучения на пути от источника до **рабочего вещества** детектора.

Ослабление потока β -частиц сравнительно тонкими поглотителями ($d \leq 0,3 R_{max}$) описывается эмпирической экспоненциальной зависимостью. В этом случае коэффициент k можно определить по формуле:

$$k = \exp(-\mu d)$$

где μ - массовый коэффициент ослабления в $\text{см}^2/\text{г}$ (табл. П.4); $d = d_1 + d_2$ - суммарная толщина слоя воздуха и окна в $\text{г}/\text{см}^2$

Поправка на схему распада p . Доля излучения данного вида (или данной энергии) в спектре испускаемых ядром частиц (квантов) называется поправкой на схему распада p . Значения коэффициентов p_i приведены в таблицах изотопов (табл. П.1)

Геометрический коэффициент η учитывает потери излучения, обусловленные взаимным расположением препарата и счетчика. Равен отношению числа частиц (квантов) I_η , испускаемых препаратом, находящимся на бесконечно тонкой подложке, в направлении чувствительного объема детектора к общему числу частиц (квантов).

Коэффициент самоослабления S учитывает поглощение (рассеяние) ядерного излучения в самом радиоактивном веществе

Коэффициент обратного рассеяния q – отношение числа частиц I_{qS} , испускаемых в направлении детектора с поверхности препарата, находящегося на подложке конечной толщины, к числу частиц I_S , испускаемых в направлении детектора с поверхности того же препарата при бесконечно тонкой подложке ($q = I_{qS} / I_S$)

Измерили радиоактивность препарата $^{58}\text{Co}^{35}\text{SO}_4$ с помощью торцового счетчика Гейгера-Мюллера с окном толщиной 4 мг/см^2 . Скорость счета этого препарата составила 6100 имп/мин при фоне 20 имп/мин . Определите суммарную радиоактивность препарата, если разрешающее время счетчика $1 \cdot 10^{-4} \text{ с}$, диаметр окна детектора 2 см , расстояние от препарата до счетчика 5 см . Препарат без носителя (тонкий), покрыт алюминиевой фольгой толщиной $0,01 \text{ см}$. При расчете отражением излучения от подложки можно пренебречь. Плотность алюминия $2,7 \text{ г/см}^3$. Некоторые характеристики радионуклидов и их излучений приведены в таблице

Радионуклид	Тип распада	Период полураспада	$E_{\beta, \max}$, МэВ	R_{\max} , Г/см ²	μ , см ² /Г
^{35}S	β^- (100%)	87 сут	0,167	0,032	210
^{58}Co	β^- (15%) ЭЗ (85%)	71 сут	0,475	0,147	43

Расчетные формулы

Поправка на схему распада p - из таблиц изотопов

Истинная скорость счета (поправка на время τ)

$$I = [I_c / (1 - I_c \cdot \tau)] - I_{\text{фон}}$$

Геометрический коэффициент $\eta = S_{\text{окно}} / S_{\text{шар}} = \pi \cdot r^2 / 4\pi \cdot R^2$

Определение d (г/см²) и коэффициента ослабления

$$\text{значение } d = d_{\text{Al}} + d_{\text{возд.}} + d_{\text{окно}}$$

$k = \exp(-\mu d)$ для случая $(d/R_{\text{max}}) < 0.3$; или значение k по эмпирическому графику

Коэффициент самоослабления $S = [1 - \exp(-\mu d_{\text{пр.}})] / \mu d_{\text{пр.}}$

Расчет коэффициента ϕ и активности $A = \phi I$

Решение. Поправка на разрешающее время

$$[I_c = (6100)/60 = 101.67 \text{ (имп/с)}]$$

$$I = [I_c / (1 - I_c \cdot \tau)] - I_{\text{фон}} = [101.67 / (1 - 101.67 \cdot 10^{-4})] - 0.33 = 102.38 \text{ (имп/с)}$$

$$\text{геометрический коэффициент } \eta = \pi \cdot 1^2 / 4\pi \cdot 5^2 = 0.01$$

$$\text{значение } d = d_{\text{Al}} + d_{\text{возд.}} + d_{\text{окно}} = 0.01 \cdot 2.7 + 0.0013 \cdot 5 + 0.004 = 0.0375 \text{ г/см}^2$$

^{35}S $d > R_{\text{max}}$. **β -частицы ^{35}S не регистрируются**

$$^{58}\text{Co} \quad k = \exp(-\mu d) = \exp(-43 \cdot 0.0375) = 0.2; \quad (d/R_{\text{max}}) < 0.3.$$

$$I = I_{\text{Co}} = (\eta \cdot p \cdot k \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1) \cdot A = (0.01 \cdot 0.15 \cdot 0.2) \cdot A = 102.38; \quad A_{\text{Co}} = 341267 \text{ (Бк)}$$

$$N_{\text{S}} = N_{\text{Co}}; \quad N_{\text{Co}} = A / \lambda = 3.0915 \cdot 10^{12}$$

$$A_{\text{S}} = \lambda N = [\ln 2 / (87 \cdot 24 \cdot 3600)] \cdot 3.0915 \cdot 10^{12} = 285077 \text{ (Бк)}$$

$$A_{\text{препарат}} = 341267 + 285077 = 626344 \text{ (Бк)}$$

Задачи для домашней подготовки к КР

Для измерения активности нуклида *А, содержащегося в препарате толщиной 20 мг/см^2 , использовали торцовый счетчик. Точечный препарат находился на расстоянии 6 см от окна детектора диаметром 1 см . Измеренная скорость счета препарата составила 4070 имп/мин , скорость счета фона – 30 имп/мин .

Вычислите коэффициент регистрации и определите активность радионуклида, если известно, что разрешающее время установки $\tau = 2,1 \cdot 10^{-4} \text{ с}$, толщина окна счетчика 6 мг/см^2 . Эффективность счетчика принять равной 1 , коэффициент обратного рассеяния – $1,3$.

Тип распада	$E_{\beta, \max}$, МэВ	R_{\max} , г/см ²	$d_{1/2}$, г/см ²	μ , см ² /г
β^- (93%) Э.З. (7%)	0,650	0,235	0,027	26,0

«Равновесия»

Задача (решение на слайде 13)

Имеется цепочка превращений ${}^{95}\text{Zr} \rightarrow {}^{95}\text{Nb} \rightarrow {}^{95}\text{Mo}_{\text{стаб.}}$. В начальный момент радиоактивность препарата ${}^{95}\text{Zr}$, очищенного от ${}^{95}\text{Nb}$, равнялась 20 МБк. Определите активность ${}^{95}\text{Nb}$ через 128 суток и его максимальную активность. Периоды полураспада ${}^{95}\text{Zr}$ и ${}^{95}\text{Nb}$ равны, соответственно, 64 и 35 сут.

Задача «равновесие»

Имеется цепочка превращений $^{95}\text{Zr} \rightarrow ^{95}\text{Nb} \rightarrow ^{95}\text{Mo}_{\text{стаб.}}$. В начальный момент радиоактивность препарата ^{95}Zr , очищенного от ^{95}Nb , равнялась 20 МБк. Определите активность ^{95}Nb через 128 суток и его максимальную активность. Периоды полураспада ^{95}Zr и ^{95}Nb равны, соответственно, 64 и 35 сут.

По условию подвижное равновесие ещё НЕ наступило. $128 < 10 \cdot 35$

Универсальная формула (при $N_{1,0} = 0$)

$$a_2 = a_{1,0} [\lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1)] [\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)];$$

$$\lambda_1 = \ln 2 / 64 = 0,01083 \text{ (сут}^{-1}\text{)}; \quad \lambda_2 = 0,019804 \text{ (сут}^{-1}\text{)};$$

$$(\lambda_2 - \lambda_1) = 0,0089738 \text{ (сут}^{-1}\text{)}; \quad \lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1) = 2,20687$$

При $t = 128$ сут.

$$a_{2,128} = 20 \cdot 2,20687 \cdot [\exp(-128\lambda_1) - \exp(-128\lambda_2)] = 7,5356 \text{ (МБк)};$$

$$t_{\text{max}} = T = [1 / (\lambda_2 - \lambda_1)] \ln(\lambda_2 / \lambda_1) = 67,2586 \text{ сут.}$$

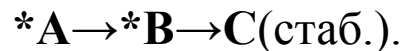
$$a_{2,T} = 20 \cdot 2,20687 \cdot [\exp(-T\lambda_1) - \exp(-T\lambda_2)] = 9,654 \text{ (МБк)}$$

Примечание. Формулу $a_2/a_1 = \lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1)$ можно применять лишь при наступления подвижного равновесия, т.е. в случае $t > 10 T_{1/2,2}$

Если её использовать (ошибка), то получим $a_{2,128} = 11,035 \text{ МБк}$

Задача для домашней подготовки

Ниже приведена цепочка превращений:



Нуклид **A** после очистки от продуктов распада имел радиоактивность 100 МБк. Период полураспада **A** составляет 50 суток, **B** – 1 час. Определите: а) через какое минимальное время накопится 70 МБк нуклида **B**; б) радиоактивность нуклида **B** в препарате через 100 суток; в) отношение чисел атомов $N(A):N(B)$ в препарате через 15 суток; г) через какое время суммарная активность препарата составит 80 МБк.

Вековое равновесие

III.3. Препарат ^{210}Pb , активность которого после отделения продуктов распада составляла 20 кБк, хранился в лаборатории в течение несколько лет. Проведенные в настоящее время измерения показали, что поток α -частиц, испускаемых препаратом, равен 5530 част./с. Определите время хранения препарата и рассчитайте количества вещества атомов ^{210}Bi , ^{210}Po и ^{206}Pb , накопившихся в препарате за это время.

Схема ядерных превращений (ряд ^{235}U): $^{210}\text{Pb} \rightarrow ^{210}\text{Bi} \rightarrow ^{210}\text{Po} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$.

Периоды полураспада радионуклидов свинца, висмута и полония: 22 года, 5 суток и 138 суток, соответственно.

Решение III.3.

Вековое равновесие (по условию $t \gg 138$ сут.)

В настоящее время (t) $a(^{210}\text{Pb}) = a(^{210}\text{Po}) = a(^{210}\text{Bi}) = 5530$ Бк

$5530 = a_0 \exp(-\lambda t) = 20 \cdot 10^3 \exp(-\lambda t)$; $\lambda(^{210}\text{Pb}) = t \cdot \ln 2 / 22 \Rightarrow t = 40,8$ года;

$\lambda(^{210}\text{Bi}) = 1,604507 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ $\lambda(^{210}\text{Po}) = 5,81343 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$

$v(^{210}\text{Bi}) = a / \lambda N_A = (5530 / \lambda N_A) = 5,72515 \cdot 10^{-15}$ (моль)

$v(^{210}\text{Po}) = a / \lambda N_A = (5530 / \lambda N_A) = 1,58014 \cdot 10^{-13}$ (моль)

Расчет $v(^{206}\text{Pb})$.

$N(^{206}\text{Pb}) =$ число распавшихся ядер $^{210}\text{Pb} = \Delta N$; Для расчета используем

следующие данные: $t_1 = 0$, $t_2 = 40,8 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600$ (с); $I_0 = 20000$ (с $^{-1}$);

$\lambda = \ln 2 / (22 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600)$

$$\Delta N = \int_{t_1}^{t_2} I_0 e^{-\lambda t} dt = I_0 \left(\frac{e^{-\lambda t_2}}{-\lambda} - \frac{e^{-\lambda t_1}}{-\lambda} \right) = 1,4483 \cdot 10^{13}$$

Из $\Delta N(\text{Pb})$ надо вычесть $N(\text{Bi})$ и $N(\text{Po})$, содержащиеся в образце в момент t .

Второй вариант. Учитывая тот факт, что время наблюдения (40,8 лет) $>$ периода полураспада (22 года), можно определить ΔN по разности числа ядер ^{210}Pb в момент $t_1 = 0$ и $t_2 = 40,8$ года.

$\Delta N = (20000 / \lambda) - (5530 / \lambda) = 1,44835 \cdot 10^{13} \Rightarrow$ далее вычесть число атомов висмута и полония.

Задачи «основной закон распада»

Удельная радиоактивность океанической воды по ^{40}K составляет 12 кБк/м^3 . Рассчитайте концентрацию солей калия в океане (моль/л).
Период полураспада ^{40}K составляет $1,28 \cdot 10^9$ лет, его содержание в природной смеси изотопов калия $0,012\%$.

$$a = \lambda N; \quad \lambda = \ln 2 / T_{1/2} = 1,7171525 \cdot 10^{-17} \text{ (с}^{-1}\text{)};$$

В 1000 л океанической воды $N(^{40}\text{K}) = a/\lambda = 12000/\lambda = 6,9883 \cdot 10^{20} \text{ (Бк)}$;

Число атомов K $N(\text{K}) = N(^{40}\text{K})/\omega = 5,82354 \cdot 10^{24}$;

$C = N(\text{K})/1000N_A = 0,00967 \text{ (моль/л)}$

Основной закон распада.

Задачи для домашней подготовки к КР

1. Элемент калий помимо двух стабильных нуклидов ^{39}K и ^{41}K (массовая доля 93,08 и 6,91%), содержит также радионуклид ^{40}K (0,012 %). Период полураспада ^{40}K $1,28 \cdot 10^9$ лет, При распаде ^{40}K испускаются или β -частицы (вероятность 89,3 %) или γ -кванты (вероятность 10,7 %). Калий является биогенным (жизненно необходимым) элементом и входит в состав всех продуктов питания. Рассчитайте массовую долю элемента калий в образце зерен кофе, если установлено, что за 10 минут 10 г этого образца испускает 321 гамма-квант.

Ответ: массовая доля калия в зернах $\omega = 1.61 \%$

2. В радиоизотопном термоэлектрогенераторе «ИЗУ-1М» кинетическая энергия β -частиц, появляющихся при распаде ^{90}Sr (^{90}Y), преобразуется сначала в тепловую, затем - в электрическую. Через 14,35 лет после начала эксплуатации тепловая мощность «ИЗУ-1М» составила 1500 Дж/с. Определите тепловую мощность этого генератора и соответствующую массу находившегося в нем $^{90}\text{SrTiO}_3$ через 30 дней после начала эксплуатации. При расчете полагать, что кинетическая энергия частиц полностью преобразуется в тепловую.

Периоды полураспада ^{90}Sr и ^{90}Y равны 28,7 лет и 64,4 ч, соответственно.

Максимальная энергия β -частиц ^{90}Sr равна 546 кэВ ($p = 100\%$), β -частиц ^{90}Y – 2274 кэВ ($p = 100\%$)

Ответ: $m(^{90}\text{SrTiO}_3) \dots(\text{г})$

Задание «Ослабление потоков ИИ»

Параллельные потоки моноэнергетических электронов, β^- - частиц и α - частиц проходят через алюминиевые экраны толщиной 1 мм. Энергия частиц каждого типа равна 1,0 МэВ, плотность их потоков $1000 \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$. Оцените плотность потока частиц за экраном.

Экран $d = 2,7 \cdot 0,1 = 0,27 \text{ г/см}^2$.

Для электронов $R_{\text{max}} = 412 \text{ мг/см}^2$ (см. решение 1). Задерживается 65,5% потока, проходит 34,5%; за экраном плотность потока электронов $\sim 340 \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$.

Для β -частиц с энергией 1 МэВ $R_{\text{max}} = 0,410 \text{ г/см}^2$, $\mu = 13 \text{ см}^2/\text{г}$ (табл. П.4).

Отношение $d/R_{\text{max}} = 0,659 > 0,3$. По графику зависимости коэффициента ослабления k от отношения d/R_{max} находим значение $k \approx 0,01$. Только 1 из 100 частиц проходит за экран; плотность потока за экраном $\sim 10 \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$.

Ответ II. 2 . $F_e \sim 340 \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$; $F_\beta \sim 10 \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$; $F_\alpha = 0$