

НАБЛЮДЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ РАДИОАКТИВНОСТИ КАЛИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДА ПОЛУРАСПАДА

1.1. Цель работы

1. Целью работы является практическое изучение естественной радиоактивности и измерение периода полураспада калия.

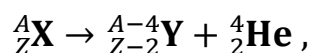
1.2. Основные теоретические сведения

1.2.1. Радиоактивность

Атомные ядра (нуклиды) состоят из протонов и нейтронов – частиц, называемых нуклонами, между которыми действуют ядерные силы притяжения. Любое ядро характеризуется двумя целыми числами. Это зарядовое число Z , равное числу протонов в ядре, и массовое число A , равное числу протонов и нейтронов. Химические свойства элемента зависят от величины Z , а свойства ядра – от Z и A . Атомные ядра с одинаковым значением Z , но разными значениями A , называются изотопами.

Некоторые ядра, называемые радионуклидами, нестабильны и самопроизвольно превращаются в другие ядра. Такое явление называют радиоактивностью. Практически все превращения сводятся к двум типам распадов.

Альфа-распад, при котором распадающееся ядро испускает ядро гелия (α - частицу):



где X и Y – символы химических элементов.

Бета-распад, при котором массовое число A не изменяется, а зарядовое число изменяется на ± 1 . Бета-распад протекает тремя разными способами:

а) с испусканием электрона e^- (β^- -частицы)



б) с испусканием позитрона e^+ – античастицы электрона (β^+ -частицы)



в) захват ядром электрона из электронной оболочки собственного атома



В процессе бета-распада ядро испускает нейтрино ν или антинейтрино $\bar{\nu}$ – электрически нейтральные частицы с очень малой, но по последним данным, ненулевой массой покоя, которые чрезвычайно слабо взаимодействуют с веществом.

Электроны и позитроны, отсутствующие в ядрах, возникают в результате превращений внутри ядра нейтрона в протон $n \rightarrow p + e^- + \nu$, или протона в нейтрон $p \rightarrow n + e^+ + \nu$, или при захвате ядром электрона $p + e^- \rightarrow n + \nu$.

1.2.2. Закон радиоактивного распада

Распад ядра – случайное событие. По-видимому, нельзя узнать в принципе, когда распадется данное ядро. Однако для большого числа ядер имеют место определённые статистические закономерности. Опыты показывают, что если в произвольный начальный момент $t = 0$ имелось N_0 нераспавшихся атомов, то со временем T оно уменьшается по экспоненциальной зависимости (закон радиоактивного распада):

$$N = N_0 e^{-\lambda t}. \quad (1.4)$$

Коэффициент λ , называемый постоянной распада, характеризует скорость распада данного радионуклида. За время $t = t_{\text{ср}} = 1/\lambda$ количество радиоактивного вещества уменьшается в $e = 2,72$ раз. Это время называется средним временем жизни радионуклида.

Часто также пользуются другой характеристикой – периодом полураспада $T_{1/2}$ – временем, за которое распадается половина ядер вещества. Из (1.4) легко получить связь между периодом полураспада и постоянной распада:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0,693}{\lambda}. \quad (1.5)$$

В результате закон радиоактивного распада имеет вид:

$$N = N_0 e^{-\frac{0,693t}{T_{1/2}}}. \quad (1.6)$$

1.2.3. Активность

Введём ещё одну характеристику радиоактивного препарата, которая представляет собой количество распадов за единицу времени. Эта характеристика называется активностью. В системе СИ единица активности – беккерель (Бк): 1 Бк = 1 распад за секунду. Часто используется также внесистемная единица активности кюри (Ки): 1 Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк.

Активность A по определению равна отношению среднего числа распадов dN за малое время dt к величине dt : $A = |dN/dt|$. Дифференцируя (1.6) по переменной t и беря модуль, получим выражение для активности:

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N = \frac{0,693 N_0}{T_{1/2}} e^{-\frac{0,693t}{T_{1/2}}}. \quad (1.7)$$

Формулу (1.7) с учётом (1.6) можно записать следующим образом:

$$A = 0,693 \frac{N}{T_{1/2}}. \quad (1.8)$$

Следовательно, активность пропорциональна количеству атомов радиоактивного вещества N и обратно пропорциональна периоду полураспада. Это соотношение можно использовать для нахождения активности, если известны N и $T_{1/2}$, или для нахождения периода полураспада для известных значений величин A и N .

Формулу (1.7) можно также представить в виде

$$A = A_0 e^{-\frac{0,693t}{T_{1/2}}}, \quad (1.9)$$

где $A_0 = 0,693 \frac{N_0}{T_{1/2}}$ – начальная активность. Как и следовало ожидать, активность уменьшается по закону радиоактивного распада.

1.2.4. Радиоактивность природного калия

Калий встречается на Земле в смеси трёх изотопов в определённом, всегда одинаковом соотношении. Изотопы с массовыми числами 39 и 41 стабильны, а калий-40 радиоактивен. Его доля составляет 0,012%,

- период полураспада составляет $T_{1/2} = 1,248 \cdot 10^9$ лет,
- активность 1 грамма изотропно чистого ^{40}K равна $2,652 \cdot 10^5$ Бк,
- удельная активность ^{40}K примерно 31 Бк/г.

Слабая активность калия есть следствие большого периода полураспада и малого процентного содержания ^{40}K .

Калий-40 распадается по схемам (1.1) и (1.3) бета-распада:



То есть калий на 100 распадов испускает в среднем 89 электронов с максимальной энергией $E = 1,36$ МэВ и 11 гамма-квантов с энергией 1,46 МэВ, что в миллион раз больше энергии видимых фотонов. В последней схеме распада (1.11) γ -квант испускается возбуждённым ядром аргона.

В теле человека имеется приблизительно 140 г калия, из них 15 мг радиоактивного изотопа. Это количество радиоактивного калия даёт примерно 4000 распадов в секунду.

Калий – распространённый элемент в земной коре. Его радиоактивность вносит заметный вклад во внутреннее тепло Земли. Калий необходим для жизнедеятельности растений и животных, он в огромных количествах вносится в почву в качестве удобрения. Соли калия, используемые в данной работе – доступный и безопасный источник слабой радиоактивности.

1.3. Счётчик Гейгера – Мюллера

Счётчик Гейгера, является детектором ионизирующего излучения, который срабатывает, когда через его рабочий объём проникают заряженные частицы. Счётчик устроен как герметичный резервуар с инертным газом и с сильно неоднородным электрическим полем между двумя электродами, к которым прикладывается напряжение примерно 400 В.

Когда заряженная β -частица пролетает через счётчик, она ионизирует небольшое количество атомов газа, отрывая от них электроны. Электроны разгоняются электрическим полем и при столкновении с атомами ионизируют их – число электронов лавинообразно нарастает. В результате развивается электрический пробой газа (возникает коронный разряд) и по цепи проходит ток, который с помощью специальных мер быстро прекращается. Импульс тока, возникающий при вспышках разряда, во внешней цепи усиливается и регистрируется пересчётным устройством. Таким образом, каждый пробой

счётчика (или импульс) означает прохождение заряженной β -частицы через счётчик Гейгера – Мюллера. В этой лабораторной работе используются счётчики торцевого типа, у которых на входном окне есть тонкая плёнка из полимера, хорошо пропускающая бета-излучение.

Осторожно! Не порвите её!

Иначе обстоит дело с γ -квантами, которые сами по себе не ионизируют газ. Счётчик может сработать только от вторичных заряженных частиц (электронов и позитронов). Поскольку в плотном веществе электроны имеют малый пробег, счётчик регистрирует только те γ -кванты, которые провзаимодействовали в газе или в тонком слое поверхности, примыкающего к газу. Вероятность взаимодействия γ -кванта в тонком слое мала, поэтому мала и вероятность регистрации γ -квантов (менее 1%).

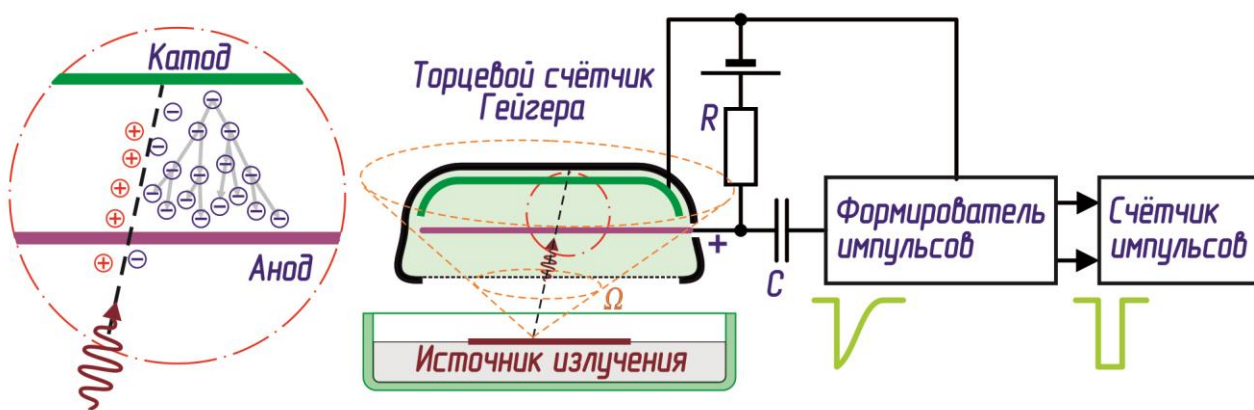


Рисунок 1.1

Если небольшой препарат калиевой соли поднести к счётчику, то он будет срабатывать почти исключительно от β -частиц, так как распады с испусканием γ -кванта редки и мала вероятность их регистрации. Для регистрации гамма-излучения необходимо взять большую массу соли (несколько кг), а счётчик закрыть экраном, через который β -частицы не проникнут.

Для исследования гамма-излучения в нашем физпрактикуме используют контейнеры с 3–6 кг хлорида калия. Стенки контейнера задерживают бета-излучение.

Показания приборов (у которых нет прошивки, учитывающей всю статистику) в процессе счёта изменяются случайным образом (флуктуируют) около среднего значения, что связано со случайным характером процесса распада. Например, при естественном гамма-фоне последовательные показания могут отличаться в 1,5–2 раза. Чем слабее излучение, тем длиннее относительные флуктуации, то есть требуется больше времени на достоверное определение среднего значения. Отклонение показаний от среднего значения есть случайная погрешность измерения, влияние которой можно уменьшить, произведя вместо одного несколько измерений и вычислив среднее значение.

$$\langle I \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i, \quad (1.12)$$

где I_i – результаты отдельных измерений, n – количество измерений.

Чем больше n , тем точнее среднее значение $\langle I \rangle$.

Когда показания прибора флуктуируют, оператор может внести дополнительные ошибки, если будет отдавать предпочтение большим или малым показаниям. Чтобы исключить такие субъективные погрешности, отсчёты следует производить по секундомеру через определённые интервалы.

В современных приборах арифметические действия оператора выполняются автоматически через прошивку и на экран выводится среднее значение, посчитанное с учётом ряда факторов, о которых будет упомянуто ниже в методике расчёта.

Так как при измерении параметров ионизирующего излучения и его дозиметрии существуют случайные ошибки, обусловленные наряду со статическим характером ядерных процессов целым рядом случайных внешних воздействий на измеряемую величину, то и число импульсов, регистрируемых счётчиком от источника излучения, является случайной величиной.

При радиометрических и дозиметрических приборных измерениях часто определяют скорость счёта импульсов, возникающих в различных детекторах под воздействием регистрируемых ими частиц. $I = N/t$, где N – число импульсов, зарегистрированных счётчиком за время t . Прошивкой прибора скорость счёта импульсов пересчитывается в другие измеряемые параметры такие как, например, в наших дозиметрах – мощность дозы и плотность потока бета-частиц.

Все эти параметры радиоактивности источника излучений обычно приходится измерять при наличии фона. Фон – это показание прибора при отсутствии исследуемых источников излучения. Фон газоразрядного счётчика обусловлен такими факторами, как: космическое излучение, самопроизвольные разряды (ложные импульсы), наличие радиоактивных веществ в материале счётчика, присутствие в воздухе или поблизости радиоактивных изотопов и др.

В таких случаях измеряемые параметры источника излучения находят как разность:

$$I = I_{\Sigma} - I_{\text{фон}}, \quad (1.13)$$

где I_{Σ} – счёт импульсов от источника излучения вместе с фоном;

$I_{\text{фон}}$ – счёт импульсов от фона.

Чем больше время измерения, тем больше число зарегистрированных частиц и, следовательно, меньше относительная ошибка определения скорости счёта. Но также очевидно – время измерения не может быть безграничным.

1.4. Методика расчёта периода полураспада

Если период полураспада небольшой, то его находят по убыванию активности в процессе измерений. Для долгоживущих ядер калия этот метод неприемлем, поэтому воспользуйтесь соотношением (1.8):

$$A = 0,693 \frac{N_{40}}{T_{1/2}} \rightarrow T_{1/2} = 0,693 \frac{N_{40}}{A}, \quad (1.14)$$

где N_{40} – количество атомов калия-40 в препарате.

Величину N_{40} находят, зная массу калия m (в граммах) в составе калийсодержащего препарата:

$$N_{40} = \frac{\delta N_A m}{M}, \quad (1.15)$$

где $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ – число Авогадро,
 $M = 39,1$ г/моль – молярная масса калия,
 $\delta = 1,2 \cdot 10^{-4}$ – доля радиоактивного изотопа ⁴⁰K в калии.

Источником излучения служит тонкий слой одного грамма соли, в котором поглощение β -частиц незначительное. Счётчик детектирует частицы, испущенные в телесный угол Ω (см. рис. 1.1).

Это угол вершины осевого сечения условного конуса, вершина которого находится на источнике излучения, а образующие конуса – касательные линии к усреднённому периметру рабочей поверхности детектора.

В препарате происходит A распадов в секунду (это активность), из них регистрируется $I_{\text{рег}}$ распадов в секунду (это скорость счёта импульсов). Отношение

$$f = \frac{A}{I_{\text{рег}}} \quad (1.16)$$

называют коэффициентом регистрации. Коэффициент регистрации $f < 1$ по нескольким причинам, основная из них геометрическая – не все частицы испускаются в направлении счётчика, зарегистрировать можно только те, что оказались в телесном угле Ω .

Коэффициент регистрации учитывает ряд величин: эффективность детектора к данному виду излучения, упомянутый уже геометрический коэффициент, учитывающий взаимное расположение препарата и детектора, коэффициент ослабления в воздушной прослойке, защитной решётке, коэффициент самоослабления и др.

Определение активности методом относительных измерений

Экспериментально определить f можно тогда, когда вместе с исследуемым препаратом имеется таким же образом приготовленный стандартный (эталонный) препарат того же радиоактивного изотопа с известной из справочников радиоактивностью $A_{\text{эт}}$. Если у эталонного препарата измерить активность $I_{\text{эт}}$, то можно рассчитать коэффициент регистрации

$$f = \frac{A_{\text{эт}}}{I_{\text{эт}}}. \quad (1.17)$$

Полученное значение можно использовать для определения активности любого исследуемого препарата. На основании (1.16) и (1.17) имеем:

$$A = fI = \frac{I}{I_{\text{эт}}} A_{\text{эт}}. \quad (1.18)$$

Такой метод называется методом относительных измерений. Для его правильного проведения необходимо соблюдать ряд условий: форма препаратов и их размеры, распределение по поверхности, расположение относительно счётчика должны быть идентичны. Все измерения желательно проводить одним и тем же прибором.

Имеющиеся в лаборатории дозиметры могут регистрировать φ – плотность потока β -частиц в режиме **част./мин $\times$ см²**, а по такому параметру, как скорость счёта, они не калиброваны. Но плотность потока φ можно выразить через скорость счёта с учётом единицы площади рабочей поверхности детектора (одной и той же постоянной величины, если пользоваться одним прибором). Значит отношение скоростей счёта из (1.18) выражается через отношение

регистрируемых параметров. После сокращения одинаковых постоянных величин получим:

$$\frac{I}{I_{\text{эт}}} = \frac{\varphi}{\varphi_{\text{эт}}}. \quad (1.19)$$

Не забудьте, что в (1.18) и (1.19) регистрируемые прибором параметры надо учитывать как разницу между суммарным и естественным фоном (1.13).

Тогда

$$A = \frac{\varphi_{\Sigma} - \varphi_{\text{фон}}}{\varphi_{\Sigma \text{ эт}} - \varphi_{\text{фон}}} A_{\text{эт}}. \quad (1.20)$$

Согласно п. 2.1.6 и 2.3.8 Методических указаний по внедрению и применению ГОСТ 8.417-81 «ГСИ. Единицы физических величин» в области ионизирующих излучений (РД 50-454-84) плотность потока ионизирующего излучения рекомендовано обозначать как φ , а мощность эквивалентной дозы рекомендовано как обозначать H .

1.5. Описание экспериментальной установки

В качестве измерительного прибора используется дозиметр-радиометр типа ИРД-02Б1 (разработан в 80е годы) или Радиаскан-701А (разработан в 2020 г.) (рис. 1.2). Окно счётчика Гейгера у них находится с обратной стороны и защищено решёткой с тонкой пленкой. Для измерения гамма-излучения окно закрывается экраном, поглощающим бета-излучение, но прозрачным для гамма-излучения.

Дозиметр ИРД-02Б1 подключается к лабораторному источнику постоянного напряжения 12-15 В (**будьте внимательны с полярностью на клеммах!**) и включается тумблером **ВКЛ** слева на корпусе.

ИРД-02Б1 имеет два режима измерений, которые устанавливаются переключателем справа на корпусе прибора. В положении переключателя «мк Зв/ч» прибор откалиброван в единицах мощности эквивалентной дозы (МЭД) гамма-излучения. В режиме **част./мин × см²** (это обозначает: «количество частиц за одну минуту на один квадратный сантиметр детектора») прибор показывает плотность потока β -частиц.

В качестве источника излучений используются доступные и неопасные калийсодержащие минеральные удобрения **KCl** и **K₂O** с примесями, а для сравнения имеется морская соль, содержащая в составе хлор без калия (в чашках Петри с жёлтыми наклейками их 100-граммовые образцы). Эти же удобрения также имеются в образцах по 1 г. В качестве эталонных образцов имеется по 1 г чистого **KCl** и **K₂SO** (они в чашках Петри с белыми наклейками). Что важно: эталонные образцы нанесены минимально тонким слоем на окружность диаметром 40 мм (это меньше или сопоставимо с размером окна детектора) и закреплены в чашках так, чтобы их поверхности были на одинаковом расстоянии от горловины чашки (то есть до детектора).



Рисунок 1.2

1.6. Порядок выполнения работы с дозиметром ИРД-02Б1

Дозиметр РадиоСкан-701А используется для работы пока по желанию, если вам интересно узнать его возможности, после устного инструктажа у инженера.

Включите блок питания от сети, а переключатель питания на корпусе ИРД-02Б1 переведите в положение **ВКЛ** – на табло должна появиться цифровая индикация излучения, обновляющаяся примерно раз в секунду, и должны быть слышны отчётливые звуковые сигналы, сопровождающие срабатывание счётчика.

В каждой серии измерений перед первым отсчётом показаний, а также после изменения условий (при смене препарата или места измерения) должно пройти время установления $t_{уст}$ не менее 30 секунд.

В каждой серии измерений, то есть для естественного фона и для каждого препарата, выполняйте n замеров с интервалом между ними 10 с. Количество замеров указано в заданиях.

1.6.1. Задание 1. Наблюдение радиоактивности калия в минеральных удобрениях (чашки Петри с жёлтой наклейкой)

1. Включите ИРД-2Б1 и установите режим измерения МЭД (**мкЗв/ч**).

2. Снимите с прибора экран (он закрывает окно датчика) и разместите ИРД-2Б1 на удалении более 0,5 м от других источников излучения.

2. Выполните измерения фона (без препарата) и посчитайте среднее значение фона по n измерениям. Запишите результаты в соответствующий столбец таблицы 1.1.

3. Установите под счётчик на подставку чашку со 100 г 57% хлорида калия **KCl** и выполните такие же измерения, как с фоном. Результат занесите в табл. 1.1.

4. Замените препарат на чашку со 100 г хлорида натрия **NaCl**, содержащий хлор, но не содержащий калия. Выполните с ним столько же измерений, занесите результаты в табл. 1.1.

5. Повторите замеры со 100 г 48% оксида калия **K₂O**, посчитайте разницу между средними суммарным и фоновым значением для каждого препарата. Сделайте выводы.

Таблица 1.1

Номер измерения МЭД i	Фоновое излучение	KCl 57% (минеральное удобрение) 100 г	NaCl 95% (морская соль) 100 г	K₂O 48% (минеральное удобрение) 100 г
1				
2				
...				
$n = 10$				
Среднее значение МЭД, $\langle H \rangle$ мкЗв/ч				
$H = \langle H_{\Sigma} \rangle - \langle H_{фон} \rangle$, мкЗв/ч				

Поскольку в чашках находится максимум до 100 г вещества, изменение регистрируемых параметров на приборе по сравнению с фоном возможно в основном от β -частиц, так как распады в калии с испусканием γ -кванта редки и мала вероятность их регистрации.

1.6.2. Задание 2. Определение периода полураспада калия-40 (чашки Петри с белой наклейкой)

Методика расчёта изложена в п. 1.4. Используются препараты массой 1 г. Среди них чистый **KCl** считается эталонным.

1. Переключите ИРД-02Б1 в режим измерения плотности потока β -частиц **част./мин $\times$ см²**

2. Установите экран на прибор и поместите его в подставку над эталонным препаратом. Выполните измерения фона и посчитайте среднее значение по 15-ти измерениям. Запишите результаты в соответствующий столбец таблицы 1.2.

3. Снимите экран и повторите измерения из п. 2 для всех препаратов, указанных в табл. 1.2.

4. Выключите приборы и можете приступать к расчётам. Результаты записывайте в табл.1.2. По результатам измерений вычислите период полураспада в секундах и годах. Сравните полученный результат с табличным значением ($T = 1,3 \cdot 10^9$ лет).

Таблица 1.2

		Фон	KCl чистый (эталон)	KCl 57% (минеральное удобрение)	K₂O 48% (минеральное удобрение)
φ_i част./ мин $\times$ см ²	1				
	2				
	...				
	$n = 15$				
$\langle \varphi \rangle$, част./мин $\times$ см ²					
$\varphi = \langle \varphi_{\Sigma} \rangle - \langle \varphi_{\text{фон}} \rangle$, част./мин $\times$ см ²			$\varphi_{\text{эт}} =$		
$A = \frac{\varphi}{\varphi_{\text{эт}}} A_{\text{эт}}$, Бк			$A_{\text{эт}} =$		
Масса препарата, г			1	1	1
Масса калия в соединении, г					
Число атомов ⁴⁰ K N_{40}					
Период полураспада $T_{1/2}$ в годах $T_{1/2} = 0,693 \frac{N_{40}}{A}$					

*Справочные данные:

- период полураспада для калия $T_{1/2} = 1,248 \cdot 10^9$ лет;

- удельная активность калия-40 в хлориде калия составляет около $A_m = 16,3$ Бк/г;

$$A = m \cdot A_m ;$$

- секунд в году: $(31\,536\,000 \cdot 3 + 31\,622\,400) / 4 = 31557600 = 3,156 \cdot 10^7$;

- молярная масса чистого **KCl** $M = 74,55$ г/моль.

K – №19 = 39,1 а.е.м.; Cl – №17 = 35,45 а.е.м.; C – №6 = 12,01 а.е.м.; O – №8 = 16 а.е.м.

Внимание! Спасибо преподавателю химии И.И. Якуниной за эту подсказку:
На чашках с препаратами (это важно для калия) указан процент. Поскольку калий-содержащие препараты приобретены в виде удобрения, то указанный процент – это почвоведческий ГОСТ 4568-95, в котором указано, что этот «процент относится к массовой доли калия в пересчёте на K_2O ».

«Они умеют работать с молями и сами легко рассчитают содержание калия...»

KCl...57% означает, что в 1 г удобрения KCl содержится 57% чистого K_2O
значит масса чистого K_2O этом грамме удобрения $m_{K_2O} = 0,57$ г.

моль калия в 1 г удобрения:

$$\nu_K = 2\nu_{K_2O} = 2 \frac{m_{K_2O}}{M_{K_2O}} = 2 \frac{0,57}{2 \cdot 39,1 + 16} = 0,0121 \text{ моль}$$

Тогда из этой моли вычисляем массу калия в 1 г удобрения:

$$m_K = \nu_K M_K = 0,0121 \cdot 39,1 = 0,473 \text{ г}$$

© Ирина Ивановна =)

1.7. Контрольные вопросы

1. Сформулируйте правило смещения для альфа-распада.
2. Сформулируйте правило смещения для бета-распада.
3. Почему спектр электронов при бета-распаде непрерывный?
4. Что такое период полураспада?
5. Каково устройство и принцип работы счётчика Гейгера?

1.8. Литература для изучения

1. А.Т. Глазунов, О.Ф. Кабардин и др. Физика: Учебное пособие для 11 класса школ и классов с углубленным изучением физики. Под редакцией А.А. Пинского. М.: Просвещение, 1994, § 82, 83.
2. Е.И. Бутиков, А.С. Кондратьев, В.М. Уздин. Физика: Учебное пособие: В 3 кн. Кн. 3. Строение и свойства вещества. – М.: Физматлит, 2001, § 39.

Составитель: И.Н. Фетисов

Корректировка, технологическая часть и иллюстрации: И.В. Воронин
кафедра «Основы физики» СУНЦ-2 МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021 г.