

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. Н.Э. БАУМАНА

**И.Н. ФЕТИСОВ**

# **РАДИОАКТИВНОСТЬ**

*Методические указания к выполнению лабораторной работы Я- 63  
по курсу общей физики*

Под редакцией Г.В Балабиной

Москва  
Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана  
2008

Цель работы – ознакомление с радиоактивностью и дозиметрией излучений, измерения периода полураспада калия - 40, удельной радиоактивности продукта питания и содержания калия в веществе.

## Теоретическая часть

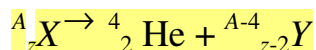
### 1. Радиоактивные превращения

Атомы состоят из ядра и электронной оболочки. Линейные размеры атома  $\approx 10^{-10}$  м, а ядра – на 4-5 порядков меньше. Ядра состоят из протонов и нейтронов – частиц, называемых нуклонами. Между нуклонами действуют ядерные силы притяжения. Протон имеет положительный элементарный заряд  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл, а нейтрон не имеет электрического заряда. Масса нуклонов примерно в 1840 раз больше массы электрона. Химические элементы различаются количеством протонов  $Z$  (зарядовое число, порядковый номер элемента). Число нуклонов  $A$  в ядре называют массовым числом. Ядро элемента  $X$  записывают в виде  ${}^A_ZX$ , например, ядро гелия  ${}^4_2\text{He}$ . Атомы одного и того же химического элемента с различным числом нейтронов называются *изотопами*. Например, для водорода известны три изотопа:  ${}^1_1\text{H}$ ,  ${}^2_1\text{H}$  и  ${}^3_1\text{H}$ .

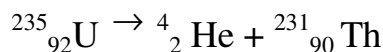
Некоторые ядра (радионуклиды) самопроизвольно (спонтанно) испускают частицы, превращаясь в другое ядро (А. Беккерель, 1896г.). Это явление получило название *радиоактивность*. Распадающееся ядро называют материнским, а образующееся после распада – дочерним. Дочернее ядро может быть как стабильным, так и радиоактивным.

К основным радиоактивным превращениям относятся  $\alpha$  - и  $\beta$  -распады.

**Альфа-распад.** При  $\alpha$  -распаде ядро (обычно тяжелое) испускает ядро гелия, состоящее из двух протонов и двух нейтронов, которое называют  $\alpha$  - частицей. Схему  $\alpha$  -распада представляют в виде



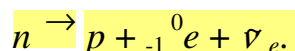
где  $X$  и  $Y$  – символы химических элементов. Например, превращение урана в торий происходит по схеме



Квантовая механика объясняет  $\alpha$  -распад туннельным эффектом – проникновением  $\alpha$  -частицы через потенциальный барьер на поверхности ядра, образующийся под действием сил ядерного притяжения нуклонов и кулоновского отталкивания протонов.

**Бета-распад.** При таком распаде в ядре происходит превращение нейтрона в протон или протона в нейтрон, при этом число нуклонов в ядре не изменяется, а зарядовое число изменяется на  $\pm 1$ . Известны три разновидности  $\beta$  -распада.

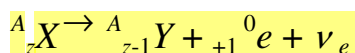
1. Электронный  $\beta$ -распад ( $\beta^-$ -распад). Примером такого распада служит превращение свободного нейтрона  $n$  в протон  $p$ , электрон  ${}_{-1}^0e$  и электронное антинейтрино  $\bar{\nu}_e$ :



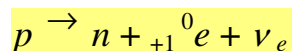
Подобные превращения нейтрона происходят во многих нестабильных ядрах, при этом электрон и антинейтрино покидают ядро. Электронный распад в ядре протекает по схеме:



2. Позитронный  $\beta$ -распад ( $\beta^+$ -распад). В этом случае ядро испускает позитрон и электронное нейтрино:



При позитронном распаде в ядре происходит превращение протона в нейтрон, позитрон и нейтрино:

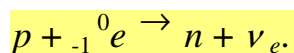


Позитрон является *античастицей* электрона, имеющей такую же массу, но противоположные по знаку электрический заряд, лептонный заряд и магнитный момент.

3. Электронный захват. Третий вид  $\beta$ -распада – захват ядром собственного орбитального электрона, чаще с ближайшей  $K$  – оболочки:



При этом в ядре протон и электрон превращаются в нейтрон и нейтрино



Нейтрино и антинейтрино – электрически незаряженные элементарные частицы, масса покоя которых много меньше массы электрона (вопрос о массе нейтрино – предмет современной физики). Они различаются знаком лептонного заряда. Эти частицы чрезвычайно слабо взаимодействуют с веществом, поэтому их можно зарегистрировать только в специальных опытах.

**Гамма-излучение.** Атомное ядро, состоящее из двух и более нуклонов, может находиться в состояниях с различными дискретными значениями внутренней энергии. Состояние с минимальной энергией называется основным, а с большей энергией – возбужденным. Материнское ядро перед распадом находится в основном состоянии, а дочернее ядро может оказаться как в основном, так и в возбужденном состоянии. В последнем случае практически мгновенно

после распада дочернее ядро переходит в основное состояние, испуская один или несколько фотонов большой энергии, называемых  $\gamma$ -квантами. Это  $\gamma$ -излучение часто сопровождает все виды распадов. Примером такого процесса является электронный распад кобальта-60.

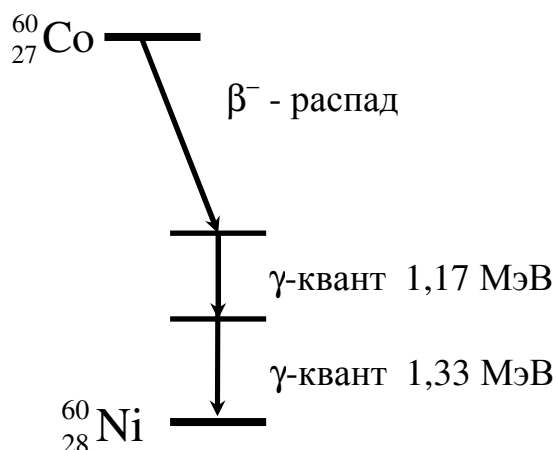


Рис. 1. Схема распада кобальта-60 с испусканием электрона и двух  $\gamma$ -квантов

Дочернее ядро (никель-60) образуется во втором возбужденном состоянии и испускает последовательно два  $\gamma$ -кванта с энергиями 1,17 МэВ и 1,33 МэВ (рис. 1). (Электрон-вольт – энергия, приобретаемая частицей с элементарным зарядом в электрическом поле с разностью потенциалов 1 В; 1 эВ =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж.)

$\gamma$ -Излучение – электромагнитное излучение, отличающееся от света значительно большей частотой  $\nu$ . Электромагнитные

волны имеют двойственную природу: волна – частица. В таких явлениях, как интерференция и дифракция, проявляются волновые свойства. Однако в процессах испускания и поглощения они выступают как частицы ( $\gamma$ -кванты, фотоны) с энергией  $E = h\nu$  и импульсом  $p = h\nu/c$ , где  $h$  – постоянная Планка. Чем выше энергия фотона, тем ярче проявляются его корпускулярные свойства и слабее волновые. Энергия  $\gamma$ -кванта радиоактивного распада может достигать нескольких МэВ, в то время как энергия фотонов видимого излучения составляет примерно 2 эВ.

Некоторые ядра находятся в возбужденном состоянии длительное время (до  $10^6$  лет). Такие состояния называются изомерными. Например, изотоп технеция  $^{99}_{43}\text{Tc}$  переходит из возбужденного состояния в основное с периодом полураспада 6 часов, испуская  $\gamma$ -квант с энергией 0,14 МэВ. Изомеры являются источниками только  $\gamma$ -излучения.

**Энергия распада.** Радиоактивный распад может происходить, если он не противоречит закону сохранения полной энергии, включающей энергию покоя  $m_0 c^2$ , т.е. если разность между массой исходного ядра и суммарной массой продуктов распада положительна. Суммарная масса покоя протона, электрона и антинейтрино меньше массы нейтрона, поэтому свободный нейтрон распадается, а свободный протон (ядро  $^1_1\text{H}$ ) – нет. В сложном ядре протон при превращении в нейтрон и позитрон получает недостающую энергию от других нуклонов.

При радиоактивном распаде выделяется определенная для данного нуклида энергия в интервале примерно от 20 кэВ до 17 МэВ. Эта энергия делится между продуктами распада таким образом, чтобы выполнялся закон сохранения импульса. Наиболее простой случай распределения энергии распада между частицами – это  $\alpha$ -распад без испускания  $\gamma$ -кванта. Материнское ядро перед

распадом практически покоится, поэтому  $\alpha$  - частица и дочернее ядро разлетаются в противоположных направлениях с одинаковыми по модулю импульсами  $p$ . При этом кинетическая энергия частиц (случай нерелятивистский) равна  $K = p^2 / 2 m_0$ , где  $m_0$  – масса частицы. Таким образом, энергия распада делится между частицами однозначно: отношение энергий  $\alpha$  - частицы и дочернего ядра обратно пропорционально отношению их масс. При распаде тяжелого ядра энергия  $\alpha$  - частицы примерно в 50 – 60 раз больше энергии дочернего ядра.

При  $\beta$ -распаде энергия делится между тремя частицами: дочерним ядром, электроном и антинейтрино. При этом реализуется множество вариантов разлета трех частиц, удовлетворяющих закону сохранения импульса. В этом случае дочернее ядро по-прежнему получает небольшую долю энергии распада. Однако деление энергии между электроном и антинейтрино неоднозначное. В результате электроны распада имеют различную энергию – от очень малой до максимальной энергии  $E_{\max}$ , близкой к энергии распада. Средняя энергия электронов обычно близка к трети максимальной энергии.

## 2. Закон радиоактивного распада

Радиоактивные превращения представляют собой случайный процесс, экспоненциальный закон распада которого имеет следующее теоретическое объяснение.

Пусть в момент времени  $t$  имеется большое число  $N$  одинаковых ядер. Вероятность  $\lambda$  распада ядра в единицу времени называется *постоянной распада*. Тогда за время  $dt$  распадется

$$dN = \lambda N dt \quad (3)$$

ядер. Среднее число распадов за единицу времени

$$A = dN / dt = \lambda N \quad (4)$$

называется *активностью* препарата. Единица активности – *беккерель* (Бк) соответствует одному распаду в секунду. Часто также используют внесистемную единицу активности *кюри*, равную  $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$  (такова активность 1 г радия). Активность единицы массы вещества, Бк/кг,

$$a = A / m. \quad (5)$$

называется *удельной активностью*.

Приращение числа нераспавшихся ядер за время  $dt$  (см. (3)):

$$dN = - \lambda N dt.$$

Интегрируя это выражение по времени, получим

$$N = N_0 \exp (- \lambda t), \quad (6)$$

где  $N(t)$  - число нераспавшихся ядер в момент времени  $t$ ;  $N_0$  - число нераспавшихся ядер в произвольный начальный момент времени  $t = 0$ .

Соотношение (6) выражает закон радиоактивного распада: число нераспавшихся ядер убывает со временем по экспоненциальной зависимости. Активность, пропорциональная числу нераспавшихся атомов, убывает по такому же закону:

$$A = \lambda N = \lambda N_0 \exp(-\lambda t) = A_0 \exp(-\lambda t), \quad (7)$$

где  $A_0 = \lambda N_0$  – активность момент времени  $t = 0$ . Опыты подтверждают зависимость (7).

Время жизни радионуклида характеризуют средним временем жизни или периодом полураспада. Можно показать, что *среднее время жизни* обратно пропорционально постоянной распада:

$$\tau = 1/\lambda.$$

Периодом полураспада  $T$  называют время, за которое распадается половина ядер. Легко получить следующее соотношение:

$$T = (\ln 2)/\lambda = 0,693/\lambda = 0,693 \tau. \quad (8)$$

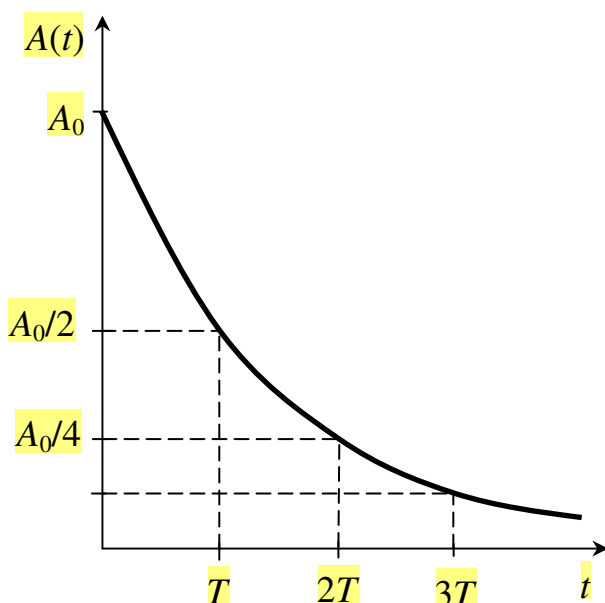


Рис. 2. Зависимость активности от времени

Период полураспада связан с активностью и числом атомов соотношением (см. (7), (8))

$$T = 0,693 N / A \quad (9)$$

Запишем закон распада через период полураспада:

$$N(t) = N_0 \exp(-0,693 t / T); \quad (10)$$

$$A(t) = A_0 \exp(-0,693 t / T). \quad (11)$$

Убывание активности показано на рис. 2. Для различных радионуклидов период полураспада изменяется от менее микросекунды до  $10^{18}$  лет.

### 3. Поглощение заряженных частиц и $\gamma$ -излучения в веществе

В веществе заряженные частицы ( $\alpha$ ,  $\beta$  и другие частицы) испытывают кулоновские взаимодействия с атомными электронами и ядрами, при которых энергия частицы теряется на ионизацию и возбуждение атомов. Такой процесс называется ионизационным торможением. На ионизацию одного атома в среднем затрачивается энергия в несколько десятков эВ. Частица с энергией 500 кэВ может ионизовать примерно  $10^4$  атомов.

Пробег частицы до остановки зависит от энергии, массы и заряда частицы, а также от вещества (его состава и плотности).

В воздухе типичный пробег  $\alpha$ -частицы  $x_0 \approx 5$  см, а в плотных веществах – не более 50 мкм. Лист обычной бумаги полностью задерживает  $\alpha$ -частицы.

При одинаковой энергии пробег  $\beta$ -частицы на три порядка больше, чем  $\alpha$ -частицы. Главная причина такого различия заключается в следующем. Тяжелые  $\alpha$ -частицы движутся медленнее и, пролетая мимо атома, дольше взаимодействуют с его электронами. Поэтому, согласно закону динамики  $\Delta p = F \Delta t$ ,  $\alpha$ -частицы могут сообщить электронам необходимый для ионизации импульс  $\Delta p$  с большего пролетного расстояния. Вследствие этого  $\alpha$ -частицы создают больше ионов на единицу пути и быстрее тормозятся.

Для  $\beta$ -частиц эмпирически установлена зависимость между максимальной энергией  $E_{max}$ , МэВ, и пробегом  $d_0$ , г / см<sup>2</sup>:

$$E_{max} = 1,85 (d_0 + 0,133).$$

Данная формула справедлива для алюминия, хлористого калия и других веществ со средним атомным номером для энергий больше 0,8 МэВ. Из формулы следует, что  $\beta$ -частицы распада калия поглощаются алюминиевой пластиной толщины 2 мм.

Рассмотрим основные процессы взаимодействия фотонов большой энергии (рентгеновского или  $\gamma$ -излучения) с веществом.

**Эффект Комптона** – упругое рассеяние фотона на свободных или слабо связанных атомных электронах, при котором часть энергии и импульса фотон передает электрону, покидающему атом. В результате энергия рассеянных фотонов меньше, а длина волны – больше.

Применяя законы сохранения энергии и импульса к процессу столкновения фотона с электроном, можно показать, что фотон с энергией  $E$ , МэВ, после рассеяния на угол  $\theta$  имеет энергию

$$E_p = E / [1 + E (1 - \cos \theta) / (m_0 c^2)],$$

где  $m_0 c^2 = 0,51$  МэВ – энергия покоя электрона. Угол рассеяния может с разной вероятностью быть любым. Например, если фотон с энергией 1 МэВ рассеялся назад ( $\theta = 180^\circ$ ), то его энергия 0,2 МэВ; следовательно, электрон получит энергию 0,8 МэВ. В среднем фотоны с энергией 1 МэВ передают электрону примерно половину своей энергии.



При *атомном фотоэффекте* фотон высокой энергии поглощается одним из атомных электронов, обычно из внутренних оболочек, и выбивает его из атома. Энергия вылетевшего электрона равна разности энергии фотона и энергии связи электрона в атоме.

*Рождение пары электрон-позитрон.* В электрическом поле атомного ядра фотон может превратиться в электрон и позитрон:  $\gamma \rightarrow e^- + e^+$ . Для этого энергия  $\gamma$ -кванта должна превышать суммарную энергию покоя электрона и позитрона, равную  $E = 2 m_0 c^2 = 1,02$  МэВ. Этот процесс наглядно демонстрирует взаимосвязь массы и энергии и превращение энергии электромагнитного поля в вещество.

Потоком  $I, \text{с}^{-1}$ , назовем число квантов, проходящих в узком пучке за единицу времени. Опыты показывают, что для  $\gamma$ -квантов одинаковой энергии поток уменьшается с увеличением толщины однородного поглотителя по экспоненциальному *закону Бугера*:

$$I = I_0 \exp(-\mu x),$$

где  $I_0$  – поток до поглотителя;  $I$  – поток после прохождения слоя толщины  $x, \text{м}$ ;  $\mu, \text{м}^{-1}$ , – *линейный коэффициент поглощения*. В слое толщины  $x_e = 1/\mu$  поток ослабляется в  $e = 2,72$  раза, а при вдвое большей толщине – в  $e^2$  раз и т.д. Слой половинного ослабления равен  $x_{0,5} = \ln 2 / \mu$ .

Коэффициент поглощения  $\mu$  зависит от вещества и энергии квантов. В свинце минимальное ослабление имеют кванты с энергией несколько МэВ (здесь преобладает комптоновское рассеяние); для них  $\mu_{\min} = 50 \text{ м}^{-1}$ , а слой половинного ослабления  $x_{0,5} = 0,014 \text{ м}$ . При энергии 100 кэВ основным механизмом поглощения является фотоэффект, при этом  $\mu$  возрастает примерно в 100 раз. При очень высоких энергиях (десятки МэВ) доминирует процесс рождения пар.

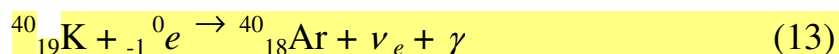
#### 4. Радиоактивность калия

Радионуклиды подразделяют на естественные и искусственные. Принципиального различия между ними нет. К основным естественным относятся радиоактивные семейства урана и тория, а также калий. Природный калий состоит из смеси трех изотопов – стабильных  $^{39}\text{K}$  и  $^{41}\text{K}$  и радиоактивного  $^{40}\text{K}$ . Доля радиоактивного изотопа составляет  $\delta = 1,18 \cdot 10^{-4}$ . Его период полураспада порядка возраста Земли.

Калий в 89% случаев испытывает  $\beta^-$ -распад (см. (1)), превращаясь в стабильный кальций:



В 11% случаев – электронный захват (см. (2)):





где  $\gamma$  –  $\gamma$ -квант.

Ядро аргона образуется в возбужденном состоянии и испускает  $\gamma$ -квант с энергией 1,46 МэВ, переходя в основное, нерадиоактивное состояние (рис. 3).

Электроны распада имеют максимальную энергию  $E_{max} = 1,3$  МэВ. Таким образом, на 100 распадов испускается в среднем 89 электронов и 11  $\gamma$ -квантов.

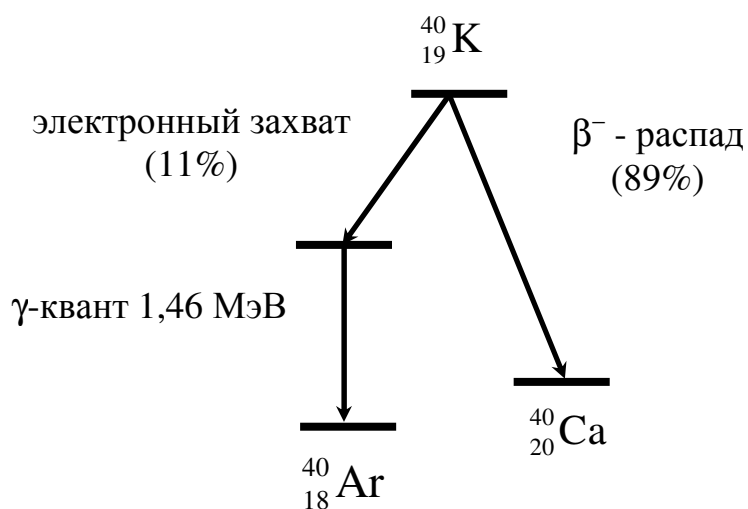


Рис. 3. Схема распада калия-40:  $\beta$ -распад в 89 % случаев и электронный захват с испусканием  $\gamma$ -кванта в 11 % случаев.

Распады первого типа регистрируют по испускаемым электронам, а распады второго типа – по  $\gamma$ -излучению.

Содержание калия в земной коре составляет 2,5%. Наиболее важные минералы – это сильвин KCl, сильвинит (K,Na)Cl и др. За счет радиоактивного распада калия Земля получает заметное количество внутреннего тепла.

Калий играет важную роль в жизнедеятельности животных и растений; поэтому в почву вносят ка-

лийные удобрения.

Соли калия – доступный и безопасный источник слабой радиоактивности, используемые в данной работе.

## 5. Счетчик Гейгера-Мюллера

Для регистрации  $\beta$ -излучения используются газоразрядные счетчики Гейгера-Мюллера (Г-М). Счетчик представляет собой тонкостенную металлическую трубку, проницаемую для  $\beta$ -частиц. Трубка заполнена инертным газом под низким давлением. По оси трубки проходит тонкая вольфрамовая нить. К нити и трубке прикладывают напряжение 400 В.

Когда заряженная частица пролетает через счетчик, она ионизирует небольшое количество атомов газа, отрывая от них электроны. Электроны разгоняются электрическим полем и при столкновении с атомами ионизируют их. В результате развивается электрический пробой газа, по цепи проходит ток, который с помощью специальных мер быстро прекращается. Импульс тока можно зарегистрировать пересчетным прибором.

Таким образом, каждый пробой счетчика (“импульс”) означает прохождение заряженной частицы через счетчик Гейгера-Мюллера. Если поднести близко к счетчику открытое радиоактивное вещество, например соль калия, то он будет регистрировать большую часть  $\beta$ -частиц, летящих в направлении счетчика.

Иначе обстоит дело с  $\gamma$ -квантами, которые сами по себе не ионизируют газ. Счетчик может сработать только от вторичных заряженных частиц (электронов и позитронов), образующиеся в рассмотренных выше процессах (эффект Комптона и др.). Поскольку электроны имеют малый пробег в плотном веществе, счетчик регистрирует только  $\gamma$ -кванты, которые провзаимодействовали в газе или в тонком слое вещества, примыкающего к газу счетчика. Вероятность взаимодействия  $\gamma$ -кванта в тонком слое мала, поэтому мала и вероятность регистрации  $\gamma$ -квантов (менее 1%).

Если небольшой препарат калиевой соли поднести к счетчику, то он будет срабатывать почти исключительно от  $\beta$ -частиц, т.к. распады с испусканием  $\gamma$ -кванта редкие и мала вероятность их регистрации. Для регистрации  $\gamma$ -излучения необходимо взять большие массы соли (несколько кг), а счетчики закрыть слоем вещества, отсекающего  $\beta$ -частицы.

## 6. Методика измерений

В данной работе выполняют три упражнения: 1) находят период полураспада калия - 40; 2) определяют удельную активность продукта питания; 3) измеряют содержание калия в веществе (зола, слюда и др.) радиометрическим методом.

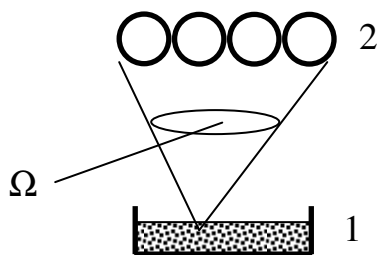


Рис. 4. Схема измерений: 1 - радиоактивный источник; 2 - счетчики Гейгера-Мюллера;  $\Omega$  - телесный угол

Радиоактивный источник  $\beta$ -излучения устанавливают под счетчиками Гейгера (рис. 4) и измеряют количество срабатываний счетчиков (импульсов)  $N$  за время  $t$ . Из результатов измерения находят среднюю скорость счета импульсов

$$n = N / t.$$

При измерении слабой радиоактивностью необходимо ввести поправку на фоновое радиоактивное излучение окружающих тел и космических лучей. Убрав радиоактивное вещество от счетчика, находят среднюю скорость счета импульсов фона

$$n_{\phi} = N_{\phi} / t.$$

Вычитая фон, получают исправленную скорость счета импульсов препарата, называемую *регистрируемой активностью*:

$$n_p = n - n_{\phi}. \quad (14)$$

*Измерение периода полураспада.* Если период полураспада небольшой, то его находят по убыванию активности в процессе измерений согласно формуле (11). Для долгоживущих ядер этот метод неприемлем, поэтому воспользуемся соотношением (9):

$$T = 0,693 N_{40} / A, \quad (15)$$

где  $N_{40}$  - количество атомов калия-40 в препарате. Величину  $N_{40}$  находим, измерив массу  $m$ , г, соли KCl:

$$N_{40} = \delta N_A m / M, \quad (16)$$

где  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup> – число Авогадро,  $M = 75$  г/моль – молярная масса соли,  $\delta = 1,18 \cdot 10^{-4}$  – доля радиоактивного изотопа.

Излучателем (рис. 4) служит тонкий слой соли, в котором поглощение  $\beta$ -частиц незначительное. Счетчики детектируют частицы, испущенные в телесном угле  $\Omega$  (см. рис. 4). В препарате происходит  $A$  распадов в секунду, из них регистрируется  $n_p$  распадов в секунду. **Отношение**

$$f = n_p / A \quad (17)$$

называют коэффициентом регистрации. Коэффициент регистрации  $f < 1$  по нескольким причинам, основная из них – геометрическая: не все частицы испущенны в направлении счетчиков (см. рис. 4). Коэффициент регистрации был рассчитан и приведен на установке.

Для нахождения периода полураспада  $T$  необходимо измерить  $n_p$  (см. (14)), вычислить  $A$  (см. (17)),  $N_{40}$  (см. (16)) и  $T$  (см. (15)).

*Измерение удельной активности вещества.* Во многих случаях необходимо знать удельную активность (см. (5))  $a$ , Бк/г, различных веществ – почвы, строительных материалов, воды, продуктов питания и т.д. Рассмотрим методику относительных измерений удельной активности.

В этом случае сравнивают интенсивности излучения препарата неизвестной удельной активности  $a$  и эталонного препарата известной активности  $a_0$ . Для получения точных результатов условия измерений должны быть одинаковыми для обоих препаратов: испускаемые частицы одного типа и одинаковой (или близкой) энергии; препараты одинаковые по массе, размерам, расположению относительно счетчиков и т.д. Тогда отношение удельных активностей равно отношению регистрируемых активностей  $n_p$  – исследуемого и  $n_{p0}$  – эталонного препаратов:

$$a / a_0 = n_p / n_{p0}$$

Эталонным источником  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения служит KCl с удельной активностью (см. (5), (15), (16)):

$$a_0 = A / m = 0,693 \delta N_A / (M T)$$

Значение периода полураспада  $T$  можно взять из собственных измерений или более точное табличное значение  $T = 1,3 \cdot 10^9$  лет. Тогда удельная активность соли KCl

$$a_0 = 16 \text{ Бк/г}$$

для обоих видов распадов (см. (12), (13)) и

$$a_0 = 14 \text{ Бк/г} \quad (18)$$

для  $\beta^-$ -распадов. Полная удельная активность самого калия

$$a_0 = 30 \text{ Бк/г} \quad (19)$$

Если все измерения выполнены за одинаковое время, то отношение удельных активностей равно

$$a / a_0 = (N - N_{\phi}) / (N_0 - N_{\phi}) , \quad (20)$$

где  $N$  и  $N_0$  – число импульсов от исследуемого и эталонного препаратов, соответственно;  $N_{\phi}$  – число фоновых импульсов;  $a_0 = 14 \text{ Бк / г}$  – удельная активность соли KCl с испусканием  $\beta$ -частиц.

*Радиметрическое определение калия.* Калий – распространенный элемент в земной коре. Доля радиоактивного изотопа  $^{40}\text{K}$  постоянна независимо от происхождения калия. Поэтому радиоактивное излучение  $^{40}\text{K}$  используют для количественного определения калия в его солях или растворах, содержащих калий. Подобный метод, называемый радиометрическим, представляет интерес для ряда отраслей промышленности: добыча калийных солей и производство калийных удобрений, цемента и др. веществ. В этих случаях можно использовать как  $\beta$ -излучение, так и  $\gamma$ -излучение калия. В данной работе регистрируют  $\beta$ -излучение.

Для анализа необходимо приготовить препараты с неизвестным содержанием калия и эталонный KCl, в котором содержание калия равно отношению молярной массы калия к молярной массе соли:  $\Omega_0 = 52,4 \%$ .

Условия измерений должны быть одинаковыми для обоих препаратов. Измерив регистрируемые активности  $n_p$  и  $n_{p0}$  исследуемого и эталонного препаратов, соответственно, находим процентное содержание калия:

$$\Omega = \Omega_0 (n_p / n_{p0}) = (n_p / n_{p0}) 52,4 \%$$

Если все измерения выполнены за одинаковое время, то

$$\Omega = (52,4 \%) (N - N_{\phi}) / (N_0 - N_{\phi}) , \quad (21)$$

где  $N$  и  $N_0$  – число импульсов от исследуемого и эталонного препаратов, соответственно;  $N_{\phi}$  – число импульсов фона.

## 7. Дозиметрия излучений

Для оценки биологических последствий воздействия ионизирующих излучений необходимо контролировать их дозы. *Поглощенной дозой* называют отношение поглощенной энергии излучения к массе поглощающего вещества:

$$D = E / m. \quad (22)$$

Единица поглощенной дозы - *грей*:  $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж / кг}$ .

Однако при одной и той же поглощенной дозе биологические последствия для разных видов излучения различны. Это связано с различием потерь энергии заряженной частицей на единицу длины трека. Чем больше эти потери, тем опаснее излучение. Поэтому поглощенную дозу умножают на коэффициент  $K$ , называемый коэффициентом качества излучения. В результате получают эквивалентную дозу

$$H = K D. \quad (23)$$

Единица эквивалентной дозы - *зиверт* (Зв). Для  $\beta$ - и  $\gamma$ - излучений  $K = 1$ . При этом поглощенной дозе 1 Гр соответствует эквивалентная доза  $H = 1$  Зв. Для  $\alpha$ - излучения  $K = 20$ , поэтому при поглощенной дозе 1 Гр эквивалентная доза составит 20 Зв.

Человек постоянно облучается частицами космического излучения и естественными радиоактивными веществами внутри организма и вне его. В различных районах дозы могут различаться. Средняя годовая эквивалентная доза от естественных источников радиации

$$H = 2 \text{ мЗв}. \quad (24)$$

Помимо естественных источников излучения имеются искусственные, связанные с производствами, рентгеновским обследованием и т.д. Вредное воздействие внешнего облучения можно уменьшить, сокращая время облучения, увеличивая расстояние до источника и применяя поглощающие экраны.

Радиоактивные вещества поступают в организм с воздухом, водой и продуктами питания. В частности, калий поступает с пищей растительного происхождения; богаты калием курага, изюм и другие продукты. В теле человека содержится примерно 140 г калия, его распад вносит ощутимый вклад в дозу естественного облучения (см. задание 5). Биологическая потребность человека составляет примерно 2,5 г калия в сутки или 1 кг за год. Удельная активность калия (см. (19))  $a_0 = 30$  Бк/г. Таким образом, годовое поступление калия составляет  $3 \cdot 10^4$  Бк.

Для каждого радионуклида установлен [5] *предел годового поступления - ПГП, Бк/год*. Для калия-40 таких ограничений нет. Однако имеется много опасных радионуклидов естественного и искусственного происхождения. К ним относятся стронций-90 ( $^{90}\text{Sr}$ ) и цезий-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ). Для  $^{90}\text{Sr}$  предел годового поступления

$$\text{ПГП} = 1 \cdot 10^4 \text{ Бк/год} \quad (25)$$

Для  $^{137}\text{Cs}$  ПГП =  $4 \cdot 10^5$  Бк/год.

Эти радионуклиды являются осколками деления урана. Стронций и цезий испускают  $\beta$ -излучение, имеют период полураспада примерно 30 лет. В больших количествах они присутствуют в ядерных реакторах и могли попасть в окружающую среду в качестве радиоактивных отходов, при испытаниях оружия, авариях или иными путями.

Практически важная задача – обнаружить радионуклиды и их идентифицировать. Задание 3, посвященное измерению удельной активности продуктов

питания, позволяет ознакомиться с этим вопросом. В работе наблюдается радиоактивность, но каких радионуклидов? Для ответа на этот вопрос обычно необходимы дополнительные измерения: активности такого же продукта из другой партии, энергии частиц, периода полураспада и т.д. Если радионуклид испускает  $\gamma$ -излучение, то с помощью полупроводникового детектора можно измерить с большой точностью энергию  $\gamma$ -квантов, что очень важно для идентификации радионуклида.

В данной работе можно сделать следующие выводы. Если активность обусловлена калием, то опасности нет. Если предположить одну из худших возможностей, что вся наблюдаемая  $\beta$ -активность принадлежит стронцию, то необходимо сопоставить полученную активность с ППП стронция и оценить, в каком количестве можно употреблять этот продукт.

## 8. Статистические погрешности при измерении радиоактивности

Случайные (статистические) погрешности обусловлены самой природой распада. Пусть за некоторое время счетчик зарегистрировал  $N_i$  частиц. Повторяя измерения в тех же условиях, получим различные значения  $N_i$ :  $N_1, N_2, \dots, N_k$ , изменяющиеся случайным образом. Вероятность появления того или иного значения  $N_i$  дается распределением Пуассона [3]. Из него следует, что случайную погрешность можно найти из одного измерения (а не из нескольких, как для обычных измерений [4]).

Для достаточно большого числа  $N$  зарегистрированных частиц средне-квадратическая статистическая погрешность

$$\sigma = \sqrt{N}.$$

Следовательно, с доверительной вероятностью  $P$  искомая величина находится в доверительном интервале

$$\begin{aligned} N^* &= (N - \sigma) \dots (N + \sigma) \text{ для } P = 0,68 \text{ или} \\ N^* &= (N - 2\sigma) \dots (N + 2\sigma) \text{ для } P = 0,95. \end{aligned}$$

Например, для  $N = 100$  доверительный интервал  $N^* = 90 \dots 110$  с вероятностью  $P = 0,68$  или  $N^* = 80 \dots 120$  с вероятностью  $P = 0,95$ . Если счетчик регистрировал все распады, а фоновое излучение мало, то  $N^*$  - искомое число распадов за данное время.

Относительная погрешность измерения величины  $N$  равна

$$\varepsilon = \sigma / N = 1 / \sqrt{N}.$$

С ростом  $N$  абсолютная погрешность  $\sigma = \sqrt{N}$  растет, а относительная  $\varepsilon$  – уменьшается. Например,  $\varepsilon = 0,1 = 10\%$  при  $N = 100$  и  $\varepsilon = 0,01 = 1\%$  при  $N = 10^4$ .

Рассмотрим погрешности в случае, когда фоновым излучением пренебречь нельзя. Пусть за одинаковое время  $t$  зарегистрировано  $N_\phi$  импульсов фона и  $N$  импульсов - с препаратом. Вычитая из последнего фон, получим количество импульсов от самого препарата



$$N_p = N - N_{\Phi}.$$

Статистические погрешности равны  $\sigma_1 = \sqrt{N}$  для препарата вместе с фоном и  $\sigma_2 = \sqrt{N_{\Phi}}$  - для фона. Складывая погрешности [4], получим среднеквадратическую погрешность для величины  $N_p$ :

$$\sigma_p = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{1/2} = (N + N_{\Phi})^{1/2}.$$

Предположим, что счетчик регистрирует все распады. Тогда истинное число распадов за время  $t$  с вероятностью  $P = 0,68$  лежит в доверительном интервале

$$N_p^* = (N - N_{\Phi}) \pm \sigma_p = (N - N_{\Phi}) \pm (N + N_{\Phi})^{1/2}.$$

Относительная погрешность измерения величины  $N_p$  равна

$$\varepsilon_p = \sigma_p / N_p = (N + N_{\Phi})^{1/2} / (N - N_{\Phi})$$

Определяя удельную активность препарата  $a$  (см. (20)) или содержание калия  $\Omega$  (см. (21)), измеряют количество импульсов фона  $N_{\Phi}$ , эталонного препарата  $N_0$  и исследуемого препарата  $N$ . Тогда относительная погрешность измерения

$$\varepsilon = 100\% \frac{\Delta a}{a} = 100\% \frac{\Delta \Omega}{\Omega} = 100\% \sqrt{\frac{N + N_{\Phi}}{(N - N_{\Phi})^2} + \frac{N_0 + N_{\Phi}}{(N_0 - N_{\Phi})^2}} \quad (26)$$

## Экспериментальная часть

**Задание 1. Ознакомиться с установкой, измерить фоновое излучение.**

В установке (рис. 5) используется дозиметр со счетчиками Гейгера-Мюллера, установленными вне корпуса дозиметра, для того чтобы счетчики

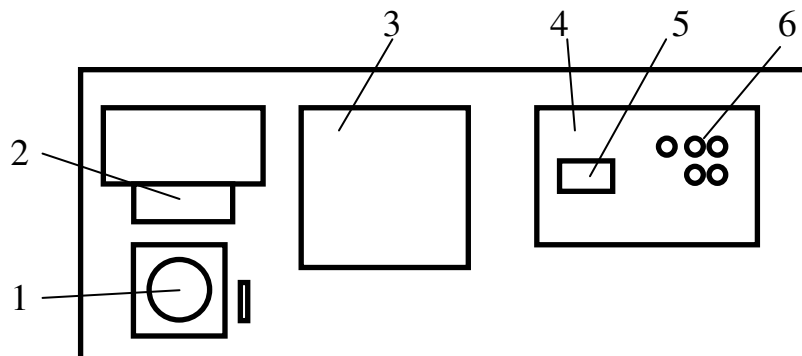


Рис. 5. Схема установки: 1- выключатель; 2 – адаптер; 3 – бокс для препаратов; 4 – дозиметр; 5 - счетчики Гейгера-Мюллера



могли детектировать  $\beta$ -излучение. Радиоактивный препарат располагают под счетчиками. Дозиметр питается от 9-вольтового адаптера с сетевым выключателем. К установке прилагаются препараты, описание которых приведено на установке.

1. Записать в табл. 1 характеристики препаратов.

Таблица 1

Характеристики препаратов			
№ препарата	Состав	Масса	Назначение
0			
1			
2			
3			

2. Включить питание дозиметра: вставить в розетку сетевую вилку и включить сетевой выключатель (рис. 5). При этом должен загореться светодиод адаптера. (*Примечание.* На правой боковой стенке дозиметра имеется выключатель; нормально он должен быть включен и заклеен скотчем).

3. Ознакомиться с работой дозиметра и его индикатором (рис. 6). Прибор работает в автоматическом циклическом режиме. При каждом срабатывании счетчиков издается звуковой щелчок, а электрический импульс поступает в пересчетное устройство. В течение 18 с прибор считает импульсы, при этом положение десятичной точки на индикаторе показано на рис. 6, а. По окончании счета прибор издает звуковой сигнал, а на индикаторе в течение нескольких секунд высвечивается результат измерения (рис. 6, б). Затем результат сбрасывается и начинается новый цикл.

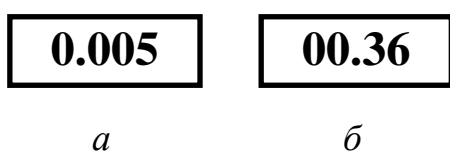


Рис. 6. Индикатор дозиметра: *а* – во время счета; *б* – при считывании показаний

пересчетное устройство. В течение 18 с прибор считает импульсы, при этом положение десятичной точки на индикаторе показано на рис. 6, а. По окончании счета прибор издает звуковой сигнал, а на индикаторе в течение нескольких секунд высвечивается результат измерения (рис. 6, б). Затем результат сбрасывается и начинается новый цикл.

Данный прибор предназначался для измерения мощности дозы  $\gamma$ -излучения в микрозивертах в час (мкЗв/ч). При использовании в данной работе число на индикаторе необходимо увеличить в сто раз (т.е. отбросить десятичную точку), тогда получим число пар зарегистрированных импульсов. В таком виде результат записывают.

4. Подготовить табл. 2 для записи показаний дозиметра, где  $i$  - порядковый номер измерения (15 измерений для препаратов и фона).

Таблица 2

Результаты измерений дозиметром					
$i$	Фон	Препарат №0	Препарат №1	Препарат №2	Препарат №3
1					
2					
	$N_{\phi} =$	$N_0 =$	$N_1 =$	$N_2 =$	$N_3 =$
		$N_0 - N_{\phi} =$	$N_1 - N_{\phi} =$	$N_2 - N_{\phi} =$	$N_3 - N_{\phi} =$

*Примечание:* в таблице 15 результатов измерений

5. Измерить фоновое излучение. Для этого убрать от счетчика препарат. Результаты 15 измерений записать во второй столбец табл. 2.

6. Найти полное число зарегистрированных импульсов фона  $N_{\phi}$ . Для этого найти сумму пятнадцати измерений и умножить ее на два. Результат  $N_{\phi}$  записать в табл. 2. Аналогично обработать результаты измерений с препаратами.

### **Задание 2. Измерить период полураспада калия**

1. Ознакомиться с методикой измерения в разделе 6 “Теоретической части”.

1. Препарат № 3 установить до упора под счетчиками. Результаты 15 измерений записать в последний столбец табл. 2.

2. По результатам измерений вычислить  $N_3$  и  $N_3 - N_{\phi}$ , результат записать в табл. 2.

3. Подготовить табл. 3.

*Таблица 3*

Коэффициент регистрации	$f =$
Масса, г, KCl в препарате 3	$m =$
Количество атомов $^{40}\text{K}$ в препарате 3	$N_{40} =$
Скорость счета для калия, 1/с	$n_p =$
Активность калия, Бк	$A =$
Период полураспада (в секундах и годах)	$T =$
Погрешность измерения $T$ , %	$\varepsilon =$

4. Записать в табл. 3 значения  $f$ ,  $m$ , приведенные на установке.

5. По результатам измерений с препаратом № 3 вычислить регистрируемую активность  $n_p$  (см. (14))

$$n_p = (N_3 - N_{\phi}) / t,$$

где  $t = 270$  с – полное время 15 измерений. Значение  $n_p$  записать в табл. 3.

6. Вычислить и записать в табл. 3 следующие величины:  $N_{40}$  (см. (16));  $A$  (см. (17)),  $T$  (см. (15)).

7. Вычислить отклонение полученного результата от табличного значения  $T_{\text{табл}} = 1,3 \cdot 10^9$  лет:

$$\varepsilon = 100 \% (T - T_{\text{табл}}) / T_{\text{табл}}.$$

Результат записать в табл. 3.

### **Задание 3. Измерить удельную активность**

1. Для эталонного препарата №0 выполнить 15 измерений, результаты записать в табл. 2.

2. Для исследуемого препарата №1 выполнить 15 измерений, результаты записать в табл. 2.

3. Вычислить удельную  $\beta$ -активность  $a$  препарата №1 (см. (18), (20)). Результат записать в табл. 4.

4. Вычислить статистическую погрешность  $\varepsilon$  (см. (26)), результат записать в табл. 4.

~~5. Сравнить полученный результат с ПГП стронция (см. (25)) и сделать выводы.~~

#### **Задание 4. Измерить содержание калия**

1. Для препарата №2 выполнить 15 измерений, результаты записать в табл. 2.
2. Вычислить процентное содержание калия  $\Omega$  (см. (21)). Результат записать в табл. 4.
3. Вычислить погрешность (см. (26)). Результат записать в табл. 4.

Таблица 4

Удельная активность, Бк/г, препарат 1	$a =$	$\varepsilon =$
Содержание калия, %, препарат 2	$\Omega =$	$\varepsilon =$
Активность калия в теле человека, Бк	$A_{\text{ч}} =$	
Поглощенная энергия, Дж	$E =$	
Поглощенная доза, Гр	$D_{\text{к}} =$	
Эквивалентная доза, Зв	$H_{\text{к}} =$	
Доля годовой дозы	$H_{\text{к}}/H =$	

#### **Задание 5. Вычислить годовую дозу излучения калия в теле человека**

1. Для массы калия  $m_{\text{ч}} = 140$  г, который содержится в теле человека, вычислить активность калия  $A_{\text{ч}} = m_{\text{ч}} a_0$ , где  $a_0 = 30$  Бк / г - удельная активность калия (см. (19)). Результат записать в табл. 4.

2. Вычислить поглощенную за год энергию  $E$ , Дж. Принять, что при одном распаде поглощается энергия 0,5 МэВ. Результат записать в табл. 4. *Примечание:* 1 эВ =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж.

3. Вычислить годовую поглощенную дозу  $D_{\text{к}}$  (см. (22)) и эквивалентную дозу  $H_{\text{к}}$  (см.(23)). Принять, что энергия распадов поглощается в массе, равной массе человека. Результат записать в табл. 4.

4. Вычислить отношение  $H_{\text{к}}/H$ , где  $H$  – средняя годовая доза естественного излучения (см. (24)). Результат записать в табл. 4. Сделать выводы.

#### **Контрольные вопросы**

1. Объясните процесс распада нейтрона.
2. Из какой части атома вылетает электрон при  $\beta$ - распаде?
3. Что такое электронный захват?
4. Нарисуйте схему распада калия-40.
5. Сформулируйте закон радиоактивного распада.
6. Что такое постоянная распада, среднее время жизни и период полураспада? Какая связь между ними?
7. Что такое активность и в каких единицах она измеряется?

8. Какие измерения необходимо выполнить, чтобы найти большой период полураспада?
9. Какие процессы приводят к торможению заряженных частиц в веществе?
10. Какие взаимодействия испытывает  $\gamma$ -квант в веществе?
11. Каковы абсолютная и относительная погрешности измерения скорости счета, если за некоторое время (точно) зарегистрировано 400 импульсов?
12. Как устроен и работает счетчик Гейгера-Мюллера?
13. Объяснить радиометрический метод определения калия.

### Список литературы

1. Мартинсон Л.К., Смирнов Е.В. Квантовая физика: Учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 496 с.
2. Савельев И.В. Курс общей физики в 3 т. М.: Наука, 1988. т. 3. 496 с.
3. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок: Пер. с англ. – М.: Мир, 1985.
4. Савельева А.И., Фетисов И.Н. Обработка результатов измерений при проведении физического эксперимента. Мет. указ. к лаб. работе М-1. – М.: МВТУ, 1984.
5. Нормы радиационной безопасности НРБ – 76 и основные санитарные правила ОСП – 72/80. М.: Энергоиздат, 1981. 96 с.

### ОГЛАВЛЕНИЕ

#### Теоретическая часть

1. Радиоактивные превращения
2. Закон радиоактивного распада
3. Поглощение заряженных частиц и  $\gamma$ -излучения в веществе
4. Радиоактивность калия
5. Счетчик Гейгера-Мюллера
6. Методика измерений
7. Дозиметрия излучений
8. Статистические погрешности при измерении радиоактивности

#### Экспериментальная часть

#### Контрольные вопросы

#### Список литературы