

И.Н.ФЕТИСОВ

**МЕТОДЫ РАДИОАКТИВНЫХ ИНДИКАТОРОВ
И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДА ПОЛУРАСПАДА**

Методические указания к лабораторной работе Я-4 по курсу общей физики.
Москва, 1990

Изложена методика измерения радиоактивности и определения периода полураспада долгоживущего изотопа калия.

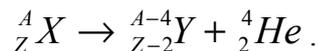
Цель работы - ознакомление с явлением радиоактивности и методами ее измерения.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

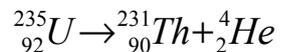
1. Радиоактивность

Ядра некоторых атомов могут самопроизвольно (спонтанно) превращаться в другие ядра, испуская частицы. Такое явление называется радиоактивностью [1,2].

К основным радиоактивным превращениям относятся α - и β - распады. При α - распаде испускается ядро атома гелия (α -частица):



где X и Y - символы химических элементов; Z - число протонов; A - число протонов и нейтронов в исходном ядре. Пример α - распада:



Различают три вида β - распада:

а) с испусканием электрона e^- :



б) с испусканием - позитрона e^+ - античастицы электрона:



в) захват ядром электрона атома из собственной электронной оболочки:



При β - распаде ядро испускает электронное нейтрино ν_e или антинейтрино $\tilde{\nu}_e$ - электрически нейтральные, чрезвычайно слабо взаимодействующие с веществом частицы. В атомных ядрах, состоящих из протонов и нейтронов, при β - распаде происходят превращения нейтрона в протон ($n \rightarrow p + e^- + \tilde{\nu}_e$) или протона в нейтрон ($p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$).

Нуклиды - это общее название атомных ядер, отличающихся числом протонов и нейтронов. Примеры различных нуклидов: ${}^{235}_{92} U$, ${}^{238}_{92} U$, ${}^{40}_{19} K$ Нестабильные ядра называются радионуклидами с одинаковым числом протонов и разным числом нейтронов называются изотопами.

Например, в природе калий состоит из смеси двух стабильных изотопов ${}^{39}_{19} K$, ${}^{41}_{19} K$, и

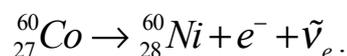
небольшого количества радиоактивного изотопа ${}^{40}_{19} K$.

Покоящееся ядро как квантовая система взаимодействующих протонов и нейтронов имеет дискретные значения энергии. Обычно ядра находятся в состоянии с наименьшей энерги-

ей (в основном состоянии). Вследствие дискретности энергии при распаде данного нуклида выделяется определенное количество энергии, которая уносится продуктами распада. При ядерных превращениях выполняются законы сохранения энергии, импульса, момента импульса и др. В соответствии с законами сохранения энергии и импульса при распаде покоящегося ядра ни две частицы, например α - распаде, энергия распределяется между α - частицей, и дочерним ядром однозначным образом. Поэтому α - частицы данного радиоактивного вещества моноэнергетичны. Типичные значения энергии α - частиц около 5 МэВ. (Энергию микрочастиц измеряют в электрон-вольтах; 1 эВ – это энергия, приобретаемая частицей с элементарным зарядом в электрическом поле с разностью потенциалов 1 В; 1 эВ=1,6·10⁻¹⁹ Дж).

При β - распаде, когда образуются три частицы, энергия распределяется между частицами неоднозначно. Поэтому энергетический спектр β - частиц сплошной - он простирается от нуля до некоторого максимального значения E_β . Типичные значения E_β составляют 0,01... 1 МэВ.

В некоторых случаях распад происходит не на основной, а на возбужденный уровень дочернего ядра. Возбужденное ядро, переходя в основное состояние, испускает один или несколько γ - квантов (фотонов большой энергии). Например, ⁶⁰Co распадается по схеме (1), превращаясь в никель в возбужденном состоянии:

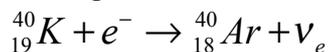


Ядро никеля практически мгновенно излучает последовательно два γ - кванта, переходя в основное (стабильное) состояние (рис.1, а). ⁶⁰Co широко используется в качестве источника γ - излучения.

Из общего числа (~2000) известных радионуклидов лишь около 300 - природные, остальные получены в результате ядерных реакций. Из естественных радионуклидов широко распространён ⁴⁰K, который β - радиоактивен и в 89% случаев испускает электрон, превращаясь в стабильный кальций:



а в 11% случаев захватывает ближайший орбитальный электрон, переходя в стабильный аргон:



Возбужденное ядро аргона испускает γ - квант с энергией 1,46 МэВ. Схема распада ⁴⁰K дана на рис.1б.

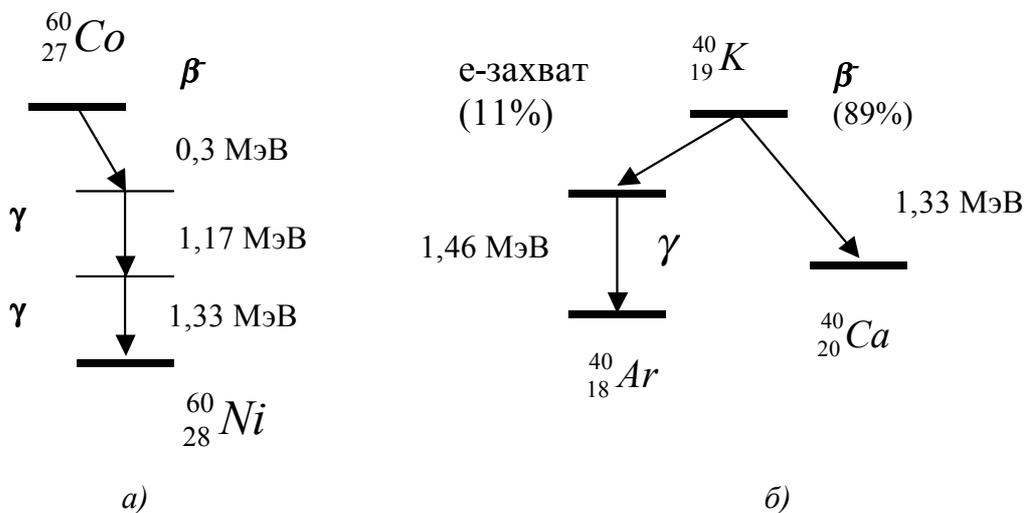


Рис.1

2. Закон радиоактивного распада.

Распад ядра представляет собой случайное событие. Вероятность того, что ядро распадется в течение короткого интервала $t \dots t+dt$, равна $dp=\lambda dt$, где λ - постоянная распада, характеризующая скорость распада данного радионуклида. Вероятность распада не зависит от значения t , т.е. от того, сколько времени ядро существовало до данного момента. Количество ядер будем обозначать буквой N , а количество зарегистрированных счетчиком распадов - буквой N . Если в момент t имеется N радионуклидов, то их убыль за время dt в среднем равна $-dN=N \cdot dp=N \lambda dt$. Проинтегрировав это уравнение, получим закон радиоактивного распада:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (4)$$

где N_0 - число радионуклидов в произвольный начальный момент $t=0$. За время $\tau=1/\lambda$, представляющее собой среднее время жизни ядер, количество радиоактивного вещества уменьшается в e раз, т.е. примерно в 2,72.

Время жизни ядер часто характеризуют периодом полураспада T - интервал, за который количество радиоактивного вещества уменьшается в два раза. Подставив в выражение (4) $N=N_0/2$ при $t=T$ получим соотношение

$$T = \ln 2 / \lambda = 0,69\tau$$

Закон распада (4) можно представить через период полураспада (рис.2):

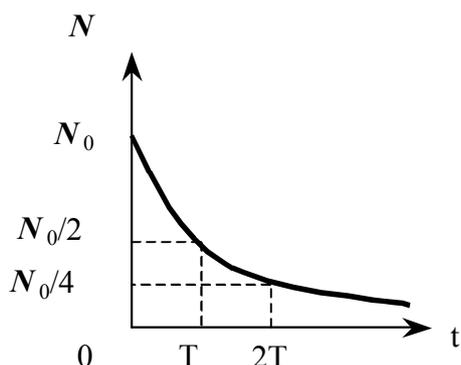


Рис.2

$$N = N_0 \cdot e^{-0,69t/T} \quad (5)$$

Активность радиоактивного препарата равна числу распадов за единицу времени:

$$A = \Delta N / \Delta t$$

где ΔN - среднее число распадов за время Δt ($\Delta t \ll T$). В системе СИ за единицу активности принят один распад в секунду, эту единицу называют **беккерель**: $1 \text{ Бк} = 1 \text{ с}^{-1}$. Внесистемная единица активности кюри: $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$.

Продифференцировав (5), получим

$$A = -\frac{dN}{dt} = \frac{0,69N_0}{T} e^{-0,69t/T}$$

или

$$A = A_0 e^{-0,69t/T}, \quad (6)$$

где $A_0 = 0,69N_0 / T$ - начальная активность. Из выражений (5) и (6) следует, что

$$A = 0,69N / T. \quad (7)$$

Активность прямо пропорциональна количеству радиоактивного вещества и обратно пропорциональна периоду полураспада. За период полураспада активность убывает в 2 раза. Радиоактивный препарат обычно характеризуют его активностью (числом распадов за 1 с), а не массой радиоактивного вещества или числом радионуклидов N .

3. Взаимодействие излучений с веществом

Заряженные частицы растрачивают энергию на ионизацию и возбуждение атомов среды. Ионизирующая способность α - частиц выше, чем β - частиц, так как первые обладают большим зарядом и, главным образом, дольше взаимодействуют с атомом (скорость α - частиц меньше). Пробег до остановки в алюминии составляет несколько микрометров для α - частиц и около 2 мм для электронов с энергией 1 МэВ.

При взаимодействии γ -кванта с атомами происходят следующие основные процессы: эффект Комптона, фотоэффект и рождение электронно-позитронной пары.

Эффект Комптона - это упругое рассеяние кванта на свободных или слабо связанных с атомом электронах, при котором часть энергии и импульса γ -квант передает электрону.

При **фотоэффекте** γ -квант поглощается, а его энергия передается электрону, который покидает атом.

При высоких энергиях γ -квант может **образовать в веществе электрон и позитрон**: $\gamma \rightarrow e^- + e^+$. При этом γ -квант исчезает, а его энергия $h\nu$ трансформируется в энергию покоя $2m_0c^2$ и кинетическую энергию электрона и позитрона. В соответствии с законом сохранения полной релятивистской энергии рождение пар возможно при энергии квантов

$$h\nu \geq 2m_0c^2 = 1,02 \text{ МэВ}$$

Узкий пучок моноэнергетического γ -излучения ослабляется в веществе по закону Бугера

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

где I, I_0 - интенсивность пучка на глубине x и $x=0$ соответственно; μ - коэффициент поглощения, зависящий от вещества поглотителя и энергии γ -квантов. В слое толщиной $1/\mu$ излучение ослабляется в e раз. Для γ -квантов с энергией примерно 1 МэВ отношение $1/\mu=15$ см для воды и 1 см для свинца.

4. Методы измерения активности

Активность представляет собой одну из основных характеристик радиоактивного препарата, которую необходимо измерять во многих практических случаях. Рассмотрим общую схему измерения активности с помощью счетчика (рис.3). Счетчик

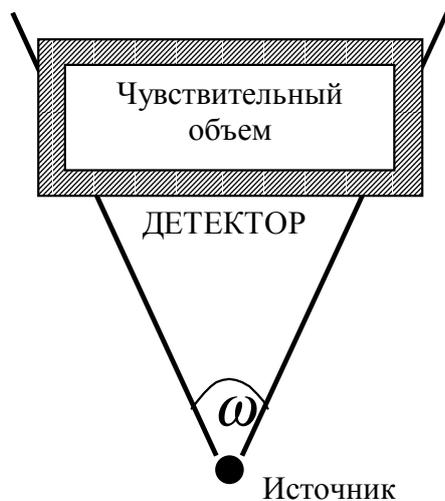


Рис.3

детектирует отдельно заряженные частицы или γ -кванты, т.е. вырабатывает электрический импульс. Импульсы считаются электронным пересчетным устройством. Пусть за время t , малое по сравнению с периодом полураспада, зарегистрировано N импульсов. Средней скоростью счета называется $n=N/t$. В отсутствие радиоактивного препарата скорость счета уменьшается до n_ϕ , называемой фоновой скоростью счета. Фон обусловлен космическими лучами, естественной радиоактивностью и процессами в самом счетчике.

Вычитая из средней скорости счета фоновую скорость, получают регистрируемую активность, препарата a , измеряемую в импульсах за секунду:

$$a = n - n_\phi$$

Во многих практических случаях достаточно знать регистрируемую активность. В некоторых же случаях необходимо измерять абсолютное значение активности A , т.е. число распадов за секунду, связанной с регистрируемой активностью соотношением

$$a = fA \tag{8}$$

Коэффициент регистрации f зависит от условий опыта и может быть найден экспериментальным или расчетным способом.

1. Экспериментальный способ. Численное значение f можно определить, если помимо исследуемого препарата имеется аналогичным образом приготовленный стандартный препарат того же радионуклида с известной абсолютной активностью $A_{ст}$. Измерив регистрируемую активность $a_{ст}$ стандартного препарата (в условиях, полностью идентичных условиям измерения

исследуемого препарата), рассчитывают по формуле (8) коэффициент регистрации $f = a_{CT} / A_{CT}$. Полученное значение f используют для нахождения активности исследуемого препарата:

$$A = a/f = A_{CT} a/a_{CT} \quad (9)$$

Такой способ определения абсолютного значения активности называется методом относительных измерений.

2. Расчетный способ нахождения f связан с количественным учетом всех факторов, влияющих на значение регистрируемой активности. Рассмотрим наиболее важные факторы. Представим f в виде произведения четырех поправочных множителей:

$$f = f_{ГЕОМ} f_{ЭФ} f_{ПОГЛ} f_{СХ} \quad (10)$$

и определим каждый из них.

а. Геометрический коэффициент $f_{ГЕОМ}$ равен отношению телесного угла ω , под которым счетчик облучается источником излучения, к полному телесному углу, равному 4π (рис.3):

$$f_{ГЕОМ} = \omega / 4\pi \quad (10a)$$

Геометрический коэффициент определяет, какая доля излучения испускается источником в направлении счетчика.

б. Не все попавшие в счетчик частицы, а особенно γ -кванты, будут детектированы. Доля зарегистрированных частиц из числа, попавших в счетчик называется эффективностью счетчика $f_{ЭФ}$; она зависит от устройства счетчика, вида и энергии излучения.

в. Поправочный коэффициент $f_{ПОГЛ}$ учитывает потерю частиц вследствие их поглощения в препарате, в стенках препарата и счетчика и т.д. Эта поправка более существенна для α - и β -излучения, чем для γ -квантов, обладающих большей проникающей способностью.

г. Поправка на схему распада $f_{СХ}$ равна среднему числу частиц или γ -квантов, которые испускаются в одном распаде и могут быть зарегистрированы данным счетчиком. Например, пусть счетчик детектирует только γ -излучение, так как заряженные частицы задерживаются стенками счетчика и препарата. Тогда для ^{60}Co $f_{СХ} = 2$ (в одном распаде испускаются два γ -кванта), а для ^{40}K $f_{СХ} = 0,11$ (γ -квант излучается в 11 распадах).

5. Метод радиоактивных индикаторов

Этот метод, называемый также методом меченых атомов, заключается в использовании небольшого количества радиоактивного вещества в качестве индикатора (метки) при различных исследованиях в физике, химии, технике, биологии, медицине и т.д. За перемещениями радиоактивных атомов легко следить по их излучению.

Этим методом в основном определяют:

1. Каков путь перемещения вещества в исследуемой системе или как оно распределяется в ней?
2. С какой скоростью перемещается вещество или протекает реакция?

Рассмотрим пример использования метода радиоактивных индикаторов в технике - определение износа движущихся частей машин. Введение радионуклидной метки в исследуемые системы возможно:

- 1) путем активирования облучением нейтронами в реакторе;
- 2) добавлением радионуклидов при плавке или разливке;
- 3) встраиванием радиоактивных штифтов в детали;
- 4) гальваническим нанесением или диффузией радиоактивного вещества.

При определении износа чаще всего находят активность продуктов износа, перешедших в смазочно-охлаждающие жидкости. Другой метод - измерение уменьшения активности самой детали.

Поскольку области применения метода радиоактивных индикаторов весьма разнообразные, то и различна техника измерения радиоактивности. В данной работе представлен один из типичных случаев определения содержания калия по γ -излучению изотопа ^{40}K . Этот изотоп,

распадающийся очень медленно, составляет небольшую, но одинаковую долю среди других изотопов калия во всех образцах калия и его соединений. Поэтому активность A препаратов калия пропорциональна массе калия m (всех его изотопов): $A=km$, где k - коэффициент пропорциональности. Активность образца можно определить методом относительных измерений. Для этого в одинаковых условиях необходимо измерить регистрируемую активность исследуемого препарата

$$a=fA=fkm \quad (11)$$

и регистрируемую активность стандартного препарата

$$a_{СТ}=fA_{СТ}=fkm_{СТ} \quad (12)$$

с известной массой калия $m_{СТ}$ и активностью $A_{СТ}$.

Из выражений (11) и (12) получаем соотношение для нахождения массы калия

$$m=m_{СТ}a/a_{СТ} \quad (13)$$

6. Методы определения периода полураспада.

Для различных радионуклидов период полураспада T изменяется в очень широких пределах (от 10^{-7} с до 10^{16} лет). Непосредственно измерить период полураспада по убыванию активности можно, если он составляет от нескольких секунд до нескольких дней. В этом случае измеряют регистрируемую активность и строят кривую распада (см. рис.2). Если намерения активности проводить течение нескольких T , то точность определения периода полураспада будет выше.

В случае больших периодов полураспада, когда за время опыта убывание активности слишком мало, чтобы быть измеренным с достаточной точностью, применяется другая методика. С помощью счетчика определяют абсолютную активность A препарата, зная массу препарата, находят число радиоактивных атомов N и, наконец, используя соотношение (7), вычисляют T по формуле

$$T=0,69N/A \quad (14)$$

В данной работе этот метод применяют для определения периода полураспада ^{40}K , равного по порядку величины возрасту Земли.

Рассмотрим методику измерения периода полураспада ^{40}K . Препарат приготовлен из хлористого калия KCl (используется калийное удобрение, содержащее более 95% KCl). Исходя из массы хлористого калия m_0 , вычислим количество атомов изотопа по формуле

$$N=\epsilon_{40} N_A m_0/M \quad (15)$$

где ϵ_{40} - доля изотопа ^{40}K в природном калии (может быть найдена с помощью масс-спектрометра; в данной работе значение ϵ_{40} берут из справочника); N_A - число Авогадро (число атомов в 1 моле вещества); M - масса 1 моля KCl .

Поскольку радиоактивность калия очень слабая, то чтобы обеспечить подходящую скорость счета, масса препарата должна быть большой ($m_0 \geq 1$ кг). Препарату придана специальная форма - в виде половины сферического слоя, упрощающая расчет коэффициента регистрации f . Как отмечалось выше (см. рис. 1б), калий при распаде испускает β - частицы (в среднем 89 β - частиц на 100 распадов) и γ - кванты с энергией 1,46 МэВ (в среднем 11 γ -квантов на 100 распадов). В данной работе детектируется только γ - излучение (β -частицы полностью задерживаются стенками препарата и счетчика). Детектором γ - излучения является сцинтиллятор, центр которого совпадает с центром сферы калиевого препарата (рис.4).

Активность калия A определяется методом относительных измерений - сравнением с известной активностью $A_{СТ}$ стандартного источника γ - излучения. Для наших целей пригодны промышленные γ - источники с изотопами кобальта ^{60}Co , испускающие γ - кванты примерно с такой же энергией, что и калий. Однако следует учитывать, что в отличие от препарата калия стандартный источник является практически точечным, а также то, что ^{60}Co испускает 200 γ - квантов на 100 распадов, а ^{40}K - всего 11.

Для нахождения активности калия необходимо выполнить ряд измерений. Для начала определить скорости счета фона n_{ϕ} и калиевого препарата n , по которым находят его регистрируемую активность $a=n-n_{\phi}$, связанную с A следующим соотношением:

$$a=fA=f_{\text{ГЕОМ}}f_{\text{ЭФ}}f_{\text{ПОГЛ}}f_{\text{СХ}}A \quad (16)$$

Далее провести эксперимент со стандартным источником. В середине толщины слоя препарата калия имеется «колодец» для ^{60}Co . Измеряя скорость счета стандартного источника ($n_{\text{СТ}}$) и исключая фон и излучение калия, следует найти регистрируемую активность стандартного источника $a_{\text{СТ}}=n_{\text{СТ}}-(a+n_{\phi})=n_{\text{СТ}}-n$, которая связана с активностью кобальта $A_{\text{СТ}}$ соотношением, аналогичным (16):

$$a_{\text{СТ}}=f_{\text{ГЕОМ}}^{\text{СТ}}f_{\text{ЭФ}}^{\text{СТ}}f_{\text{ПОГЛ}}^{\text{СТ}}f_{\text{СХ}}^{\text{СТ}}A_{\text{СТ}} \quad (17)$$

Из соотношений (16) и (17) получаем

$$A=A_{\text{СТ}}\frac{a}{a_{\text{СТ}}}\cdot\frac{f_{\text{ГЕОМ}}^{\text{СТ}}f_{\text{ЭФ}}^{\text{СТ}}f_{\text{ПОГЛ}}^{\text{СТ}}f_{\text{СХ}}^{\text{СТ}}}{f_{\text{ГЕОМ}}f_{\text{ЭФ}}f_{\text{ПОГЛ}}f_{\text{СХ}}} \quad (18)$$

Как отмечалось выше, поправка на схему распада $f_{\text{СХ}}^{\text{СТ}}=2$ для кобальта и $f_{\text{СХ}}=0,11$ для калия. Условия измерений, о которых сказано ниже, выбраны таким образом, чтобы остальные поправочные множители в выражении (18) были попарно равны для кобальта и калия.

Эффективность счетчика для обоих излучателей примерно одинаковая ($f_{\text{ЭФ}}\approx f_{\text{ЭФ}}^{\text{СТ}}$), так как энергии γ -квантов калия и кобальта близки.

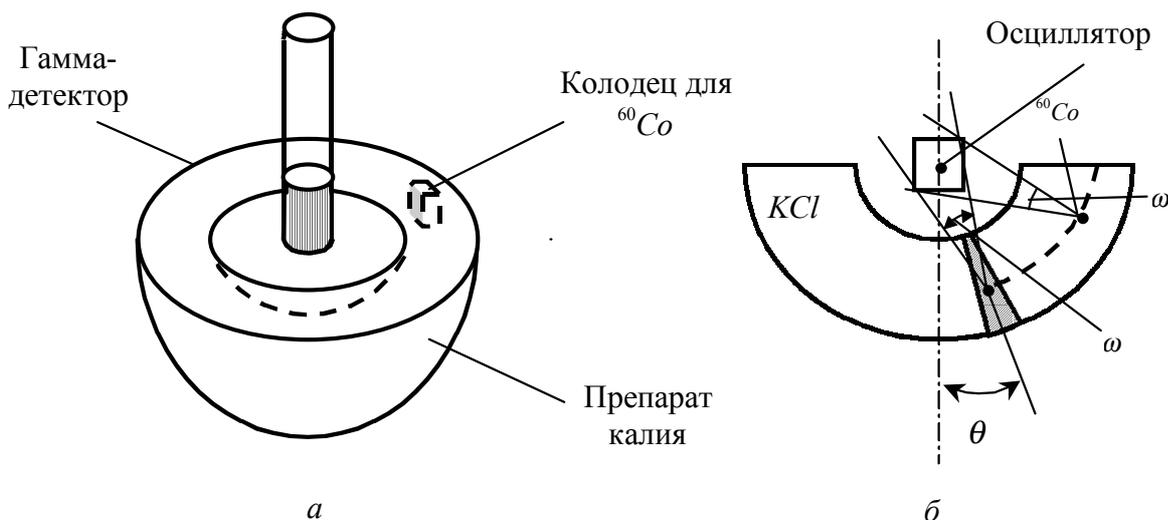


Рис.4

Рассмотрим теперь геометрическую поправку. Калиевый препарат, показанный в разрезе на рис.4б, разделим мысленно на большее количество микроисточников, один из которых на рисунке заштрихован. Угол θ отсчитывается от оси симметрии счетчика, совпадающей с осью цилиндрического сцинтиллятора. Геометрический коэффициент для микроисточника равен $f_{\text{ГЕОМ}}=\omega/4\pi$ (см. формулу (10а)). Поскольку сцинтиллятор изготовлен не в форме шара, а в форме цилиндра с высотой, примерно равной диаметру, то телесный угол ω зависит от угла θ . Однако специальный опыт показал, что этот эффект мал и им можно пренебречь. Таким образом, для каждого микроисточника, а, следовательно, и для препарата в целом геометрический коэффициент равен $f_{\text{ГЕОМ}}=\omega/4\pi$. Такой же коэффициент будет и у ^{60}Co , поскольку его положение совпадает с центром одного из микроисточников.

Поправка на поглощение γ -излучения в обоих случаях одинаковая; так как излучение проходит в среднем одинаковую толщину вещества. (С более строгим обоснованием условий измерений можно ознакомиться в работе [3]).

Сократив в формуле (18) поправочные коэффициенты (с учетом того, что $f_{ГЕОМ} = f_{ГЕОМ}^{CT}$, $f_{ЭФ} = f_{ЭФ}^{CT}$ и $f_{ПОГЛ} = f_{ПОГЛ}^{CT}$) и подставив значения $f_{СХ}^{CT} = 2$ и $f_{СХ} = 0,11$ получим следующее выражение для нахождения активности калия:

$$A = \frac{2}{0,11} A_{СТ} \frac{a}{a_{СТ}} \quad (19)$$

Из соотношений (14), (15) и (19) получаем формулу для нахождения периода полураспада ^{40}K (T , с) по экспериментальным данным:

$$T = \frac{0,038 \cdot \epsilon_{40} m_0 N_A a_{СТ}}{M A_{СТ} a} \quad (20)$$

где $\epsilon_{40} = 1,2 \cdot 10^{-4}$ - доля радиоактивного изотопа ^{40}K в естественной смеси трех изотопов калия, $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$, $M = 0,075$ кг/моль. Значение m_0 указано на препарате. В формуле (20) $A_{СТ}$ - активность стандартного источника на день выполнения работы.

Стандартный источник прошел проверку, дата которой и активность A_0 на день проверки указаны на держателе источника. Для нахождения активности источника $A_{СТ}$ на день выполнения лабораторной работы воспользуемся законом распада

$$A_{СТ} = A_0 \exp(-0,69t/T_1), \quad (20a)$$

где t - время, прошедшее с момента проверки до выполнения лабораторной работы; $T_1 = 5,27$ лет - период полураспада ^{60}Co .

7. Случайные погрешности измерения радиоактивности.

В физике, технике и других областях встречаются измерения, в которых подсчитывают число событий, происходящих случайно, например число радиоактивных распадов или вызовов на телефонном коммутаторе за определенное время. Результат подобных измерений выражается целым числом, а методика оценки погрешности имеет особенности.

Пусть при измерении радиоактивного излучения счетчик зарегистрировал N_1 частиц за некоторое время t , малое по сравнению с периодом полураспада. Повторяя измерения в тех же условиях, получим различные значения N_1, N_2, \dots, N_k , изменяющиеся случайным образом, что отражает вероятностный характер процесса распада. Из результатов k измерений найдем среднее число зарегистрированных частиц за время t .

$$\bar{N} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k N_i.$$

Радиоактивный распад подчиняется определенным статистическим закономерностям, которые описываются распределением Пуассона [4]: вероятность $P_{\bar{N}}(N)$ того, что в результате измерения за определенный промежуток времени счетчик регистрирует N частиц при среднем числе частиц \bar{N} , равна

$$P_{\bar{N}}(N) = (\bar{N})^N \frac{e^{-\bar{N}}}{N!} \quad (21)$$

В качестве примера на рис.5а приведено распределение Пуассона для $\bar{N} = 0,8$; с наибольшей вероятностью результат измерения будет равен 0 или 1 и с меньшей вероятностью 2 или 3. При малых \bar{N} распределение асимметрично. Однако по мере увеличения \bar{N} характер распределения изменяется - оно становится симметричным, а его огибающая стремится к распределению Гаусса с тем же средним значением и средним квадратическим отклонением. Напомним, что распределение Гаусса (нормальное распределение) обычно описывает случайные

погрешности измерения непрерывных величин [5]. Из рис.5б, где вертикальными линиями показано распределение Пуассона для $\bar{N} = 9$, а пунктирной кривой представлено соответствующее распределение Гаусса, видно, что оба распределения близки уже при $\bar{N} = 9$. Для практики очень удобно, что при $\bar{N} \geq 10$ распределение Пуассона можно аппроксимировать соответствующим гауссовым.

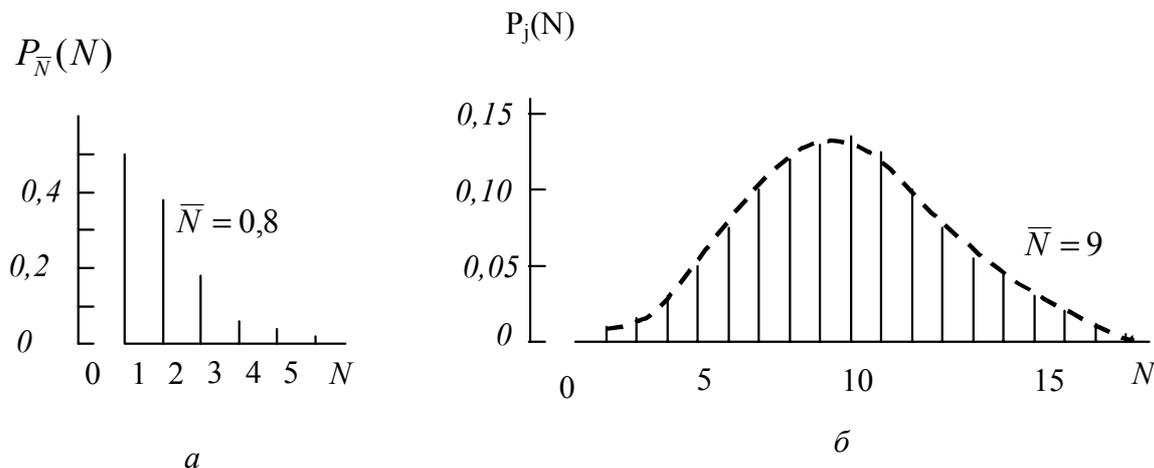


Рис.5

Измеренные значения N_i флуктуируют около среднего \bar{N} со средним квадратическим отклонением

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (N_i - \bar{N})^2}$$

В теории вероятностей получен важный вывод: если результаты измерений подчиняются пуассоновскому распределению, то среднее квадратическое отклонение равно корню из среднего значения:

$$\sigma = \sqrt{\bar{N}} \quad (22)$$

При больших N ($N \gg 100$), когда, согласно распределению Пуассона (21), значения N мало отличаются от среднего \bar{N} , в формуле (22) можно произвести замену \bar{N} на N , т.е. на результат единственного измерения:

$$\sigma = \sqrt{N} \quad \text{для } N > 100 \quad (23)$$

Таким образом, случайная погрешность

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

с доверительной вероятностью $P=0,68$. Другими словами, если за некоторое время счетчик зарегистрировал N частиц (или распадов), то искомое число частиц (распадов) лежит в доверительном интервале $N - \sqrt{N} \dots N + \sqrt{N}$ с вероятностью $P=0,68$.

Относительная погрешность измерения для $P=0,68$ равна

$$\varepsilon = \Delta N / N = 1 / \sqrt{N}$$

С ростом N абсолютная погрешность $\Delta N = \sqrt{N}$ растет, а относительная погрешность $\varepsilon = 1 / \sqrt{N}$ убывает. Например, если $N=100$, то $\Delta N=10$, $\varepsilon=0.1$ или 10%; при $N=10\,000$ имеем $\Delta N=100$, $\varepsilon=0,01$ или 1%.

Среднюю квадратическую погрешность Δn измерения скорости счета частиц $n=N/t$ вычислим по формулам, справедливым для косвенных измерений [5]:

$$(\Delta n / n)^2 = (\Delta N / N)^2 + (\Delta t / t)^2 = 1 / N + (\Delta t / t)^2 \quad (24)$$

Погрешностью измерения времени счета $\Delta t/t$ в этой формуле можно пренебречь, так как современных счетных устройствах время счета подается автоматически с большой точностью. Следовательно, можно записать

$$\Delta n / n = 1 / \sqrt{N} \quad (25)$$

т.е. относительная погрешность измерения скорости счета зависит только от числа зарегистрированных импульсов.

Погрешность для регистрируемой активности $a = n - n_{\phi}$ с учетом (25) равна

$$(\Delta a)^2 = (\Delta n)^2 + (\Delta n_{\phi})^2 = \frac{n^2}{N} - \frac{n_{\phi}^2}{N_{\phi}} \quad (26)$$

где $n_{\phi} = N_{\phi}/t_{\phi}$, N_{ϕ} - число фоновых импульсов за время t_{ϕ} .

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.

1. Техника безопасности

Для оценки последствий воздействия ионизирующих излучений на вещества используется величина поглощенной энергии на единицу массы: $D = \Delta E / \Delta n$, которая называется поглощенной дозой ионизирующих излучений. За единицу поглощенной дозы в системе СИ принят джоуль на килограмм; эта единица называется, грей: 1 Гр = 1 Дж/кг. Допускается использование внесистемной единицы рад: 1 рад = 0,01 Гр.

При одной и той же поглощенной тканью организма энергии биологическое действие разных видов излучения оказывается неодинаковым. Так, α - частицы, обладающие высокой ионизирующей способностью, при одной и той же поглощенной дозе оказывают значительно более сильное вредное биологическое действие, чем электроны или γ - кванты. Для оценки биологического действия излучения любого вида введено понятие эквивалентной дозы. Наиболее используемой единицей эквивалентной дозы излучения служит биологический эквивалент рада - бэр. Один бэр есть поглощенная доза - одного ионизирующего излучения, которая обладает той же биологической эффективностью, что и 1 рад рентгеновского или γ - излучения. Для α - частиц и быстрых протонов или нейтронов эквивалентной дозе 1 бэр соответствует поглощенная доза всего лишь примерно 0,1 рад.

Для измерения дозы рентгеновского или γ - излучения используется также внесистемная единица рентген (Р), равная примерно 1 раду: 1 Р \approx 1 рад = 1 бэр.

Человек постоянно находится в условиях естественного фонового облучения, обусловленного космическими частицами, внешним γ - излучением от почвы, строительных материалов и воздуха, а также естественными радиоактивными веществами, входящими в состав тканей организма. В различных географических районах доза естественного облучения составляет 20...200 мбэр за год.

Организация работ с радиоактивными источниками обеспечивающая максимально возможную безопасность, регламентируется официальными документами («Нормы радиационной безопасности», «Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений»). Профессиональная предельно допустимая доза (ПДД) установлена такой, чтобы радиация не вызывала неблагоприятных изменений в состоянии здоровья самого облучаемого и его потомства. При облучении всего организма ПДД равна 5 бэр за год (при равномерном облучении в течение года). Доза 5 бэр в десятки раз превышает годовую дозу от естественных фоновых излучений и в 30 раз ниже дозы однократного облучения, способного вызвать симптомы лучевой болезни. Однократное облучение при большой дозе наносит больший вред, чем та же доза за длительное время, например за год.

Дозу от неизвестного γ - источника можно рассчитать следующим образом. Точечный γ - источник активности А (в милликюри) создает на расстоянии r (в сантиметрах) за время t (в часах) дозу (в рентгенах)

$$D = A \cdot \Gamma \cdot t / r^2 \quad (27)$$

Коэффициент Γ , называемый γ - постоянной, зависит от энергии и количества γ - квантов, испускаемых на один распад. Например, для ^{60}Co : $\Gamma=13 \text{ Р}\cdot\text{см}^2/(\text{ч}\cdot\text{мКи})$. Как видно из формулы (27), дозу можно уменьшить, увеличивая расстояние до источника и сокращая время облучения. Дозу можно уменьшить, применяя защитный экран из свинца, стали и других материалов.

Для оценки радиационного воздействия на человека при выполнении лабораторной работы рассчитайте по формуле (27) дозу от используемого γ - источника ^{60}Co и сравните с дозой от естественных источников за сутки или за неделю (активность источника указана на его держателе и примерно равна 1 мКи).

2. Сцинтилляционный детектор γ - квантов.

В некоторых веществах, называемых сцинтилляторами, под действием быстрых заряженных частиц возникают световые вспышки - сцинтилляции (разновидность люминесценции). Для детектирования отдельных γ -квантов используют кристаллы NaI с небольшой добавкой таллия, размером несколько сантиметров. В результате взаимодействия с веществом сцинтиллятора (эффект Комптона, фотоэффект или рождение электронно-позитронной пары) γ -квант передает энергию электрону (и позитрону). Сцинтилляция производится заряженной частицей. Устройство детектора γ - квантов схематично показано на рис.6.

Ф Э У

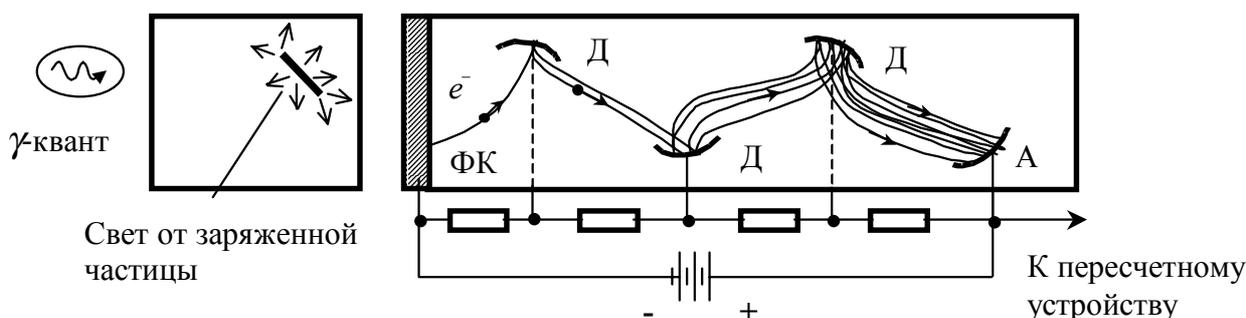


Рис.6

Регистрация слабой световой вспышки производится с помощью фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), состоящего из фотокатода (ФК), тонким слоем нанесенного на внутреннюю поверхность стеклянного баллона, анода (А) и нескольких промежуточных электродов - динодов (Д). Высокое напряжение (до 1000...1500 В) с помощью делителя на резисторах подается на диноды и анод. Потенциал каждого последующего электрода, считая от ФК, возрастает примерно на 100 В.

Под действием света ФК испускает электроны (внешний фотоэффект), которые электрическим полем ускоряются и фокусируются на первом диноде. Ускоренные электроны выбивают из динода вторичные электроны, число которых в δ раз ($\delta>1$) превышает число первичных электронов. Этот процесс повторяется на каждом последующем диноде (число динодов $n=10...15$). Коэффициент усиления тока достигает значения $K=\delta^n=10^9 \dots 10^{11}$. Лавина электронов достигает анода и создает в его цепи значительный электрический импульс, который можно зарегистрировать пересчетным устройством.

3. Лабораторная установка

Структурная схема лабораторной установки дана на рис.7. Установка состоит из блока детектора, пересчетного устройства типа ПС02-4 и низковольтного источника питания. Блок детектора содержит сцинтиллятор, ФЭУ, дискриминатор и преобразователь низкого напряжения в высокое, требуемое для работы ФЭУ. На аноде ФЭУ помимо импульсов тока, вызванных сцинтилляцией имеются импульсы, порожденные термоэлектронной эмиссией с фотокатода,

происходящей с небольшой вероятностью и при комнатной температуре. Амплитуда таких импульсов в среднем меньше, чем сцинтилляционных, поэтому их можно не пропустить на пересчетное устройство с помощью порогового устройства - дискриминатора. Варьируя напряжение источника питания, можно изменять усиление ФЭУ, а, следовательно, и уровень дискриминации импульсов. Рабочее напряжение следует выбирать таким, чтобы пропустить больше сцинтилляционных импульсов и отсеять импульсы, возникающие в результате термоэлектронной эмиссии.

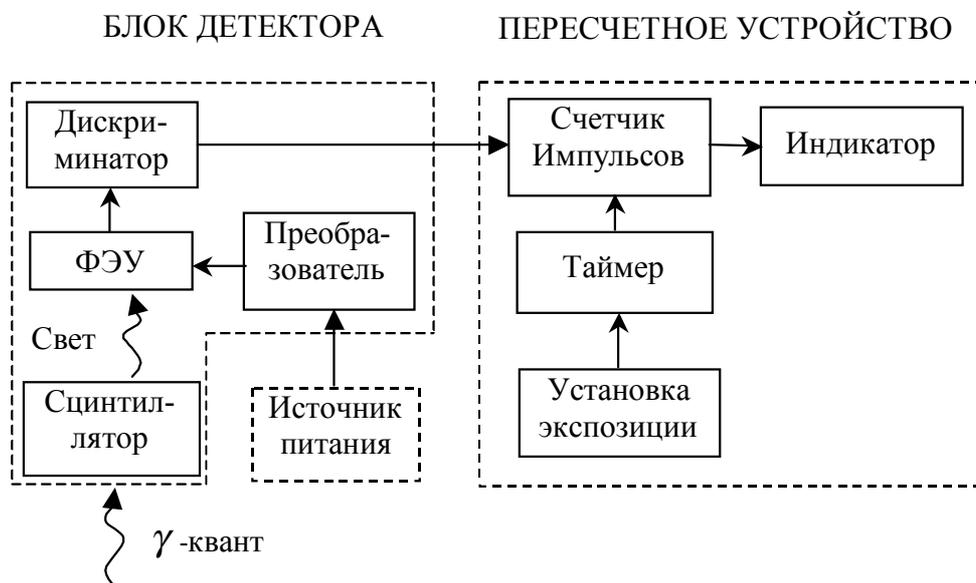


Рис. 7

Пересчетный прибор имеет таймер, с помощью которого можно обеспечить заданное время счета от 0,1 до 1000 с, по окончании которого счет прекращается.

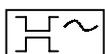
Внешний вид лабораторной установка изображен на рис.8. Сцинтиллятор 1 и ФЭУ 2 расположены в нижней части блока детектора Щ. Перемещаемый по вертикали БД можно установить в двух фиксированных положениях: при одном из них выступ 3 должен войти в длинную прорезь, при другом в короткую.

К установке прилагаются источник ^{60}Co , активностью < 1 мкКи, в стальной герметичной ампуле и препараты калия. Препарат в виде полусферы используется для нахождения периода полураспада. Препараты в стеклянных банках предназначены для определения кассы калия. Из них препарат №1 (стандартный) состоит из хлористого калия, масса всех изотопов которого $m_{ст}$ указана на стеклянной банке. Препарат №2 из нерадиоактивной поваренной соли служит для измерения фона. Остальные препараты исследуемые, количество калия в них требуется определить (они приготовлены из хорошо перемешанных солей KCl и $NaCl$)

4. Выполнение эксперимента

Задание 1. Подготовка установки к работе и измерение фона.

1. Включить СЕТЬ источника питания и установить рабочее напряжение (указано на источнике).
2. Включить СЕТЬ пересчетного устройства ПС02-4. В рабочем положения должны быть утоплены только следующие клавиши:

СЕТЬ,  НЕПРЕРЫВНО ОДНОКРАТНО

и одна из клавиш ЭКСПОЗИЦИЯ; для начала установить время экспозиции, равное 10 с.

3. Препарат № 2 с поваренной солью установить в рабочее положение (см. рис.8). Для этого

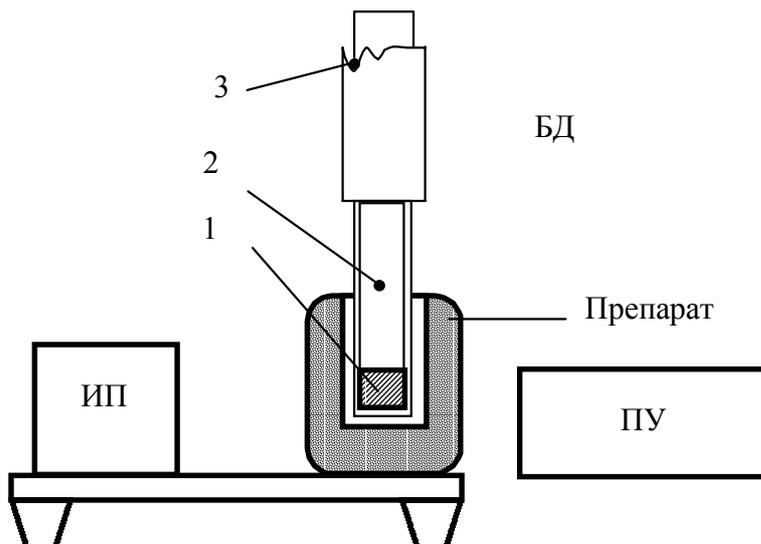


Рис.8

приподнять блок детектора БД, поставить препарат и опустить детектор в колодец так, чтобы выступ 3 попал в длинную прорезь.

ВНИМАНИЕ: детектор опускать осторожно, за кабель не брать!

Примечание: для того чтобы излучение остальных препаратов не искажало результаты измерений, их необходимо держать на расстоянии не менее 0,5 м для калиевых препаратов и не менее 2 м для ^{60}Co .

4. Выполнить несколько пробных измерений нажав последовательно клавиши СБРОС, ПУСК. Через 10 с лампочка СЧЕТ погаснет и на цифровом индикаторе можно прочесть число полученных импульсов фона. У исправной установки фоновая скорость счета равна примерно 2...5 имп/с. Если скорость счета фона меньше 2 имп/с, то следует немного увеличить напряжение источника питания, а если больше 5 имп/с, то уменьшить его.

5. Установить с помощью клавиш ЭКСПОЗИЦИЯ время, равное 300 с, измерить число фоновых импульсов $N_{\text{ф}}$ и рассчитать скорость счета фона $n_{\text{ф}}=N_{\text{ф}}/300$. Результаты записать в отчет.

Задание 2. Определение содержания калия в образцах.

1. Вместо препарата с поваренной солью установить препарат с хлористым калием (стандартный, №1). Масса калия $m_{\text{СТ}}$ в препарате №1 указана на стеклянной банке. Подсчитать число импульсов $N_{\text{СТ}}$ для стандартного препарата за 300 с и вычислить регистрируемую активность $a_{\text{СТ}}$. Результаты измерений и расчетов записать в табл.1.

Таблица 1

Препарат	Число имп. за 300 с.	Скорость счета, имп/с	Регистрируемая активность, имп/с	Масса калия, кг
№ 1 из KCl (стандартный)	$N_{\text{СТ}}=$	$n_{\text{СТ}}=$	$a_{\text{СТ}}=n_{\text{СТ}} - n_{\text{ф}}=$	$m_{\text{СТ}}=$
Исследуемый (не менее трех)	$N=$	$n=$	$a=n - n_{\text{ф}}=$	$m \pm \Delta m=$

2. Повторить измерения, описанные в п.1. с исследуемыми препаратами (не менее трёх препаратов). Вычислить, но формуле (13) массу калия m .

3. Вычислить погрешность Δm измерения массы по формуле

$$(\Delta m / m)^2 = (\Delta a_{\text{СТ}} / a_{\text{СТ}})^2 + (\Delta a / a)^2 + (\Delta m_{\text{СТ}} / m_{\text{СТ}})^2 \quad (28)$$

в которой значения Δa и Δa_{CT} определяются по формуле (26); для стандартного препарата $\Delta m_{CT}/m_{CT}=0,03$.

4. Для некоторых препаратов результат измерения m должен оказаться отрицательным. Объяснить отрицательный результат и указать верхний предел содержания калия. Как повысить точность анализа?

Задание 3. Определение периода полураспада ^{40}K .

1. Препарат калия в форме полусферы установить под блоком детектора. Центр сцинтиллятора, отмеченный на блоке детектора, должен быть примерно на уровне верхней плоскости препарата. Перемещая препарат в горизонтальной плоскости, совместить центр с осью детектора.
2. Определить регистрируемую активность калия, результаты записать в табл.2. Использовать определенное в задании 1 значение фона n_{ϕ} .

Таблица 2

Препарат	Число имп. за 300 с.	Скорость счета, имп/с	Регистрируемая активность, имп/с
Калий	$N=$	$n=$	$a=n - n_{\phi}=$
Стандартный источник	$N_{CT}=$	$n_{CT}=$	$a_{CT}=n_{CT} - n_{\phi}=$
Масса хлористого калия $m_0=$			

3. Получить у лаборанта стандартный источник ^{60}Co . Записать в табл. 3 активность источника A_0 и дату его проверки. Опустить источник в колодец в препарате калия, определить его регистрируемую активность a_{CT} , записать результаты в табл. 2.

Таблица 3

Дата выполнения работы	Дата проверки источника	Время t , прошедшее с проверки	A_0 , Бк	A_0 , Бк

4. Сдать γ - источник лаборанту. Выключить СЕТЬ источника питания и пересчетного прибора.
5. Вычислить по формуле (20а) активность стандартного источника A_{CT} в день выполнения работы (период полураспада ^{60}Co равен $T_{1/2}=5,27$ лет= $63,2$ мес.= 275 нед.). При расчете времени t допустима погрешность в 1 мес.
6. Используя результаты измерений, определить по формуле (20) период полураспада калия. Полученное значение выразить в годах ($1 \text{ год}=3,15 \cdot 10^7 \text{ с}$).
7. Оценить погрешность измерения периода полураспада по формуле, полученной для косвенных измерений [5]:

$$(\Delta T / T)^2 = (\Delta a_{CT} / a_{CT})^2 + (\Delta a / a)^2 + (\Delta A_{CT} / A_{CT})^2 + (\Delta m_0 / m_0)^2 \quad (29)$$

где $\Delta A_{CT}/A_{CT}=0,02$, $\Delta m_0/m_0=0,03$. Значение Δa вычислить по формуле (26).

Первым слагаемым в правой части формулы (29) можно пренебречь, так как оно мало по сравнению со вторым слагаемым (вследствие большего числа зарегистрированных распадов).

Контрольные вопросы.

1. Сформулируйте закон радиоактивного распада.
2. Что такое активность? Какие существуют методики измерения активности?
3. Как измерить период полураспада для короткоживущих и долго живущих нуклидов?
4. Какова абсолютная и относительная погрешности измерения скорости счета, если зарегистрировано N импульсов?
5. Как устроен и действует сцинтилляционный детектор γ - квантов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики. - М.: Наука, 1987. - Т.3.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. - М.: Высшая школа, 1979. - Т.3
3. Фетисов И.Н. Определение большого периода полураспада в учебной лаборатории // Изв. вузов. Физика. 1987. - № 8.
4. Тейлор Дж. Введение в теорию ошибок: Пер. с англ. - М.; Мир, 1985.
5. Савельева А.И., Фетисов И.Н. Обработка результатов измерений при проведении физического эксперимента. - М.: МВТУ, 1984.