

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. Н.Э. БАУМАНА

И.Н. Фетисов

**РАДИОАКТИВНОСТЬ. ОСЛАБЛЕНИЕ  $\gamma$ -ЛУЧЕЙ В ВЕЩЕСТВЕ**

*Методические указания к выполнению лабораторной работы Я-66  
по курсу общей физики*

Москва  
2015

## ВВЕДЕНИЕ

*Радиоактивность* – способность некоторых атомных ядер самопроизвольно (спонтанно) превращаться в другие ядра с испусканием частиц [1 – 3].

Радиоактивность открыл французский физик А. Беккерель в 1896 г., который обнаружил испускание ураном неизвестного проникающего излучения, названного радиоактивным. Открытие радиоактивности оказало огромное влияние на развитие науки и техники. За работы, связанные с исследованием и применением радиоактивности, было присуждено более 10 Нобелевских премий по физике и химии.

*Цель работы* – ознакомление с радиоактивностью, взаимодействием  $\gamma$ - излучения с веществом, дозиметрией; в экспериментальной части – изучение ослабления  $\gamma$ - лучей в железе и дозиметрия  $\gamma$ - излучения.

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 1. Радиоактивные превращения

Атомы состоят из ядра и электронной оболочки. Линейные размеры атома  $\sim 10^{-9}$  м, а ядра – на 5 порядков меньше.

Ядра (нуклиды) 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.

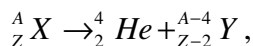
Химические элементы различаются количеством протонов – зарядовым числом  $Z$ , порядковым номером элемента. Число нуклонов в ядре называют массовым числом  $A$ . Ядро элемента  $X$  записывают в виде  ${}^A_Z X$ , например ядро гелия  ${}^4_2 \text{He}$ .

Атомы одного и того же химического элемента, различающиеся только числом нейтронов, называются *изотопами*. Например, для водорода известны три изотопа:  ${}^1_1 \text{H}$ ,  ${}^2_1 \text{H}$  и  ${}^3_1 \text{H}$ . В химическом отношении изотопы неразличимы, а характеристики ядра могут существенно отличаться. Например, два легких изотопа водорода стабильны, а  ${}^3_1 \text{H}$  – радиоактивен.

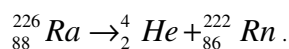
Распадающееся ядро называют материнским, а образующееся после распада – дочерним. Дочернее ядро может быть как стабильным, так и радиоактивным.

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

**Альфа-распад.** При  $\alpha$ - распаде, который наблюдается для тяжелых ядер, ядро испускает ядро гелия, состоящее из двух протонов и двух нейтронов, которое называют  $\alpha$ - частицей. Схему  $\alpha$ - распада представляют в виде

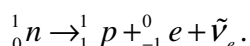


где  $X$  и  $Y$  – символы химических элементов. Например, превращение радия в радон происходит по схеме



**Бета-распады.** При бета-распадах зарядовое число  $Z$  изменяется на  $\pm 1$ , а массовое число  $A$  не изменяется. Известны три разновидности  $\beta$ - распада.

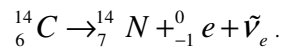
1. **Электронный  $\beta$ - распад ( $\beta^-$ - распад).** Примером такого распада служит превращение свободного нейтрона  $n$  в протон  $p$ , электрон  ${}^0_{-1}e$  и электронное антинейтрино  $\bar{\nu}_e$ :



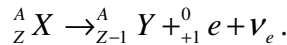
Подобные превращения нейтрона происходят во многих нестабильных ядрах, при этом электрон и антинейтрино покидают ядро. Электронный распад в ядре протекает по схеме:



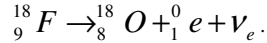
Например, ядро радиоактивного углерода превращается в ядро азота:



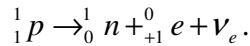
2. *Позитронный  $\beta$ -распад* ( $\beta^+$ -распад). В этом случае ядро испускает позитрон и электронное нейтрино:



Например, радиоактивный изотоп фтора, испуская позитрон, превращается в кислород:



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

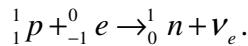


Позитрон является *античастицей* электрона, имеющей такую же массу, но противоположные по знаку электрический заряд, лептонный заряд и магнитный момент [1].

3. *Электронный захват* – захват ядром собственного орбитального электрона:



При этом в ядре происходит превращение протона и электрона в нейтрон и нейтрино



Нейтрино и антинейтрино – электрически незаряженные элементарные частицы, различающиеся знаком лептонного заряда [1]. Масса покоя этих частиц много меньше массы электрона (вопрос о массе нейтрино – предмет современных исследований). Нейтрино и антинейтрино чрезвычайно слабо взаимодействуют с веществом, поэтому их можно зарегистрировать только в специальных опытах.

К радиоактивным превращениям относится также спонтанное деление ядра урана, плутония и др. тяжелых ядер на два осколка сравнимой массы с испусканием нейтронов.

**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 дочернее ядро практически мгновенно после распада переходит в основное состояние, испуская один или несколько фотонов большой энергии, называемых  $\gamma$ -квантами.  $\gamma$ -Излучение часто сопровождает все виды распадов.

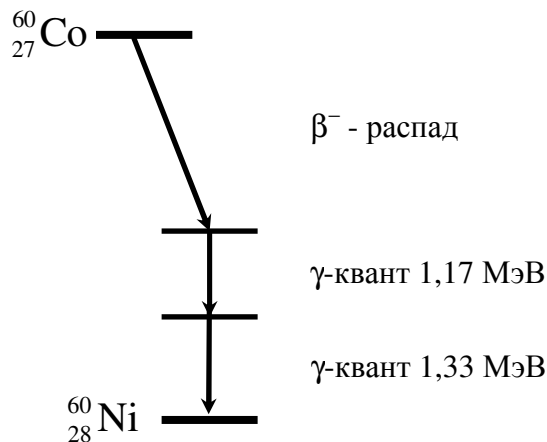


Рис. 1. Схема распада кобальта-60 с испусканием электрона и двух  $\gamma$ -квантов

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

$\gamma$ -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 (фотоны,  $\gamma$ -кванты) 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.

## 2. Естественная радиоактивность калия

Радионуклиды подразделяют на естественные и искусственные, полученные в ядерных реакциях. В настоящее время известно около 2 000 различных радионуклидов, из них 300 радионуклидов – естественные. Между естественными и искусственными радионуклидами нет принципиального различия.

К основным естественным радионуклидам относятся радиоактивные семейства урана и тория, а также калий, рубидий и др.

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 примерно  $10^9$  лет.

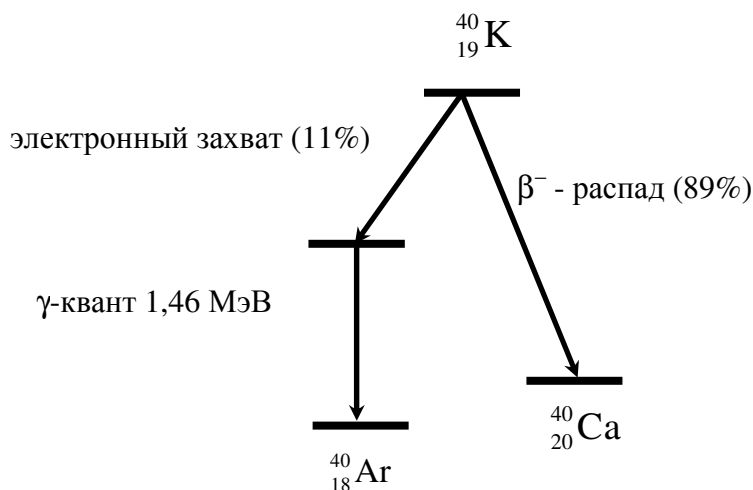


Рис. 2. Схема распада калия-40:  $\beta^-$  распад в 89 % случаев и электронный захват с испусканием  $\gamma$ -кванта в 11 % случаев.

Схема распада калия-40 представлена на рис. 2. В 89% случаев происходит  $\beta^-$ -распад (см. формулу (1)), при этом калий превращается в стабильный кальций:



В 11% случаев калий-40 захватывает собственный орбитальный электрон (см. формулу (2)) и превращается в аргон:



Ядро аргона образуется в возбужденном состоянии и испускает  $\gamma$ -квант, переходя в основное, нерадиоактивное состояние (см. рис. 2).

Таким образом, на 100 распадов испускается в среднем 89 электронов с максимальной энергией  $E_{\text{max}} = 1,3 \text{ МэВ}$  и 11  $\gamma$ -квантов с энергией 1,46 МэВ. Распады (3) регистрируют по испускаемым электронам, а распады (4) – 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. В теле человека содержится 160 – 180 г калия. По рекомендации ВОЗ суточная норма потребления калия не менее 4 г. Калий поступает в организм человека с продуктами питания. В случае недостатка калия врачи рекомендуют употреблять поваренную соль с добавкой соли калия.

Соли калия – доступный и безопасный источник слабой радиоактивности. В лабораторной работе используется хлористый калий KCl, поступающий в продажу в качестве калийного удобрения.

### 3. Закон радиоактивного распада

Радиоактивные превращения представляют собой случайный процесс. Вероятность распада ядра в единицу времени называется *постоянной распада*  $\lambda$  . Пусть в момент времени  $t$  имеется большое число  $N$  одинаковых нестабильных ядер. Тогда за время  $dt$  в среднем распадется

$$dN = -\lambda N dt \quad (5a)$$

ядер. Среднее число распадов за единицу времени, равное

$$A = \frac{dN}{dt} = -\lambda N, \quad (5b)$$

называется *активностью* препарата. Единица активности – *беккерель*: 1 Бк = 1 расп./с. Часто используют также внесистемную единицу активности – *кюри*, 1 Ки =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк (такова активность 1 г радия).

Формула (5a) с добавкой «минус» описывает приращение числа нераспавшихся ядер за время  $dt$ :

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

Интегрируя это выражение, получим

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

где  $N$  и  $N_0$  – соответственно, число нераспавшихся ядер в момент времени  $t$  и 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 (см. формулу (5b)), 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).

*Периодом полураспада*  $T$  называют время, за которое распадается половина ядер. Из формулы (6) логарифмированием получаем следующее соотношение:

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

Запишем закон распада через период полураспада:

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

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

Для различных радионуклидов период полураспада может находиться в интервале от очень малой доли секунды до  $10^{18}$  лет.

### 4. Детекторы ионизирующих излучений

Для детектирования ионизирующих излучений используются в основном два физических явления – ионизация газов и сцинтилляция.

В некоторых веществах, называемых сцинтилляторами, возникает вспышка света (сцинтилляция) при прохождении быстрой заряженной частицы через сцинтиллятор. Сцинтилляция – это разновидность люминесценции. Сцинтилляцию можно наблюдать на экране электронно-лучевой

трубки осциллографа под воздействием огромного количества электронов, падающих на люминофор. Вспышка света от одной  $\alpha$ - или  $\beta$ - частицы чрезвычайно слабая, и для ее регистрации используются специальные фотоэлементы, называемые фотоэлектронными умножителями (ФЭУ).

Газоразрядный детектор Гейгера-Мюллера (ГМ - счетчик) представляет собой баллон с двумя электродами, заполненный разреженным инертным газом со специальными добавками. На рис. 3 представлен ГМ - счетчик цилиндрической конструкции. Он состоит из тонкостенной металлической трубки с двумя изолирующими пробками. По оси трубки натянута металлическая нить. К нити и трубке прикладывают высокое напряжение  $U$ , причем «плюс» источника подключен к нити. Вследствие того, что нить тонкая, напряженность электрического поля около нити – большая.

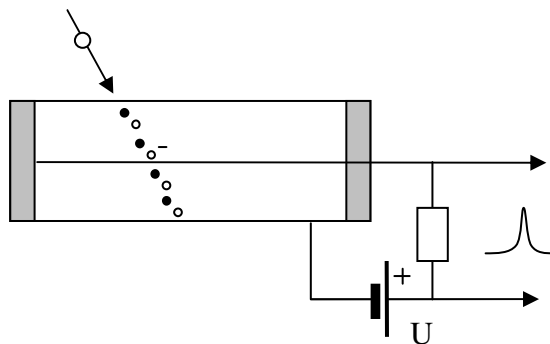


Рис. 3. Счетчик Гейгера-Мюллера

Когда быстрая заряженная частица, например  $\beta$ - частица, пролетает через ГМ- счетчик, она ионизирует небольшое количество атомов газа, отрывая от атомов электроны. Электроны, разгоняясь в сильном электрическом поле около нити, вызывают вторичную ионизацию атомов газа. В результате возникает электрический пробой газа. При этом через резистор с большим сопротивлением  $R$  протекает кратковременный импульс тока, создавая на резисторе импульс напряжения. Импульсы можно считать специальным пересчетным устройством. Таким образом, каждый зарегистрированный импульс свидетельствует о прохождении заряженной частицы через ГМ- счетчик.

Сцинтилляционный или газоразрядный детектор непосредственно от  $\gamma$ - квантов не срабатывает, т.к. они не вызывают сцинтилляций и не ионизируют газ. Срабатывание детектора вызывают вторичные электроны или позитроны, образующиеся в рассмотренных ниже процессах (эффект Комптона, фотоэффект и рождение электронно-позитронной пары).

Поскольку образующиеся электроны имеют небольшой пробег в плотном веществе, счетчик Гейгера-Мюллера регистрирует только те  $\gamma$ - кванты, которые образовали электрон (или пару электрон-позитрон) в тонком слое вещества, примыкающего к газу счетчика, или в самом газе. Взаимодействия  $\gamma$ - квантов в тонком слое происходят редко, поэтому ГМ - счетчик детектирует только малую часть  $\gamma$ -квантов, пролетевших через счетчик (порядка 1%).

Как отмечалось выше (см. рис. 2), в 11% распадов калий испускает  $\gamma$ - квант, а в остальных случаях – быстрый электрон ( $\beta$ - частицу). В лабораторной работе изучают  $\gamma$ - излучение калия. Для создания потока  $\gamma$ - квантов, с которым можно выполнить исследования за время лабораторной работы, необходимо взять несколько кг калиевой соли. При этом  $\beta$ - излучение отсекают от ГМ- счетчиков стенкой контейнера с солью.

## 5. Взаимодействия $\gamma$ - квантов в веществе.

При взаимодействии фотонов большой энергии (рентгеновского или  $\gamma$ -излучения) с атомами происходят три основных процесса: эффект Комптона, атомный фотоэффект и рождение пары электрон-позитрон [1– 3].

*Эффект Комптона* – упругое рассеяние фотона на свободных или слабо связанных атомных электронах, при котором часть энергии и импульса фотон передает электрону, покидающему атом.

С применением законов сохранения энергии и импульса получена формула для энергии фотонов  $E$ , МэВ, рассеянных на угол  $\theta$  :

$$E = \frac{E_0}{1 + \frac{E_0}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)} , \quad (8)$$

где  $E_0$ , МэВ, – энергия фотона до рассеяния,  $m_0 c^2 = 0,51$  МэВ – энергия покоя электрона. Угол рассеяния  $\theta$  с различной вероятностью может быть любым – от нуля до  $\pi$ .

Например, по формуле (8) легко произвести следующий расчет. Если до взаимодействия  $\gamma$ - квант имел энергию  $E_0 = 1$  МэВ, то после рассеяния назад ( $\theta = \pi$ ) его энергия  $E = 0,2$  МэВ. Разность энергий, равная  $E_0 - E = 0,8$  МэВ, была передана электрону, вылетевшему из атома. Таким образом, в одном акте рассеяния электрон может получить значительную часть энергии кванта, составляющую в среднем половину для квантов с энергией 1 МэВ.

Известно несколько видов фотоэффекта. Например, фотон видимого или ультрафиолетового света выбивает электрон проводимости с поверхности металла; такой фотоэффект называют внешним. При *атомном фотоэффекте* фотон большой энергии (рентгеновского или  $\gamma$ -излучения) выбивает электрон из внутренних оболочек атома, при этом энергия вылетевшего электрона равна разности энергии фотона и энергии связи электрона в атоме. При всех видах фотоэффекта фотон поглощается.

*Рождение пары электрон-позитрон.* В электрическом поле атомного ядра фотон  $\gamma$  может превратиться в пару частица – античастица: электрон и позитрон

$$\gamma \rightarrow e^- + e^+ .$$

По закону сохранения энергии этот процесс возможен, если энергия  $\gamma$ - кванта превышает суммарную энергию покоя электрона и позитрона, равную  $E = 2 m_0 c^2 = 1,02$  МэВ.

Рождение пары электрон-позитрон наглядно демонстрирует несколько фундаментальных законов природы: взаимосвязь массы и энергии, превращение энергии электромагнитного поля в вещество, закон сохранения электрического заряда.

## 6. Ослабление $\gamma$ - лучей в веществе

Ослабление пучка  $\gamma$ - излучения в веществе измеряют в различных условиях, отличающихся шириной пучка (рис. 4 а, б).

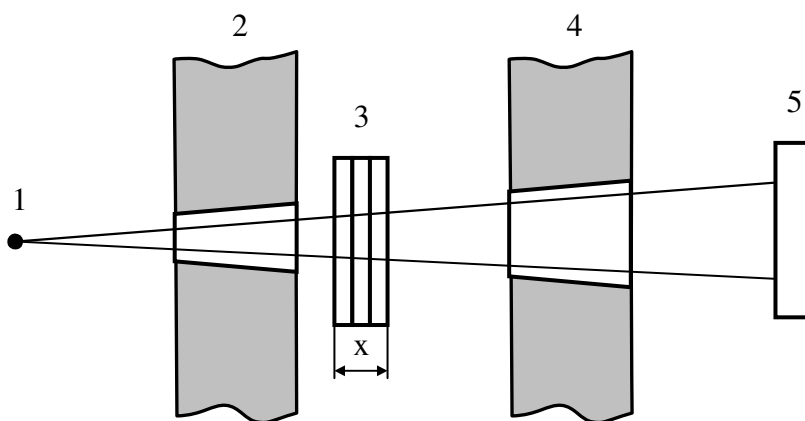


Рис. 4 а. Схемы измерения ослабления  $\gamma$ - лучей для узкого пучка:  
1–  $\gamma$ - источник, 2, 4 – коллиматоры, 3 – поглотитель, 5 – счетчики.

Схема измерения ослабления узкого пучка показана на рис. 4 а. Источником  $\gamma$ - квантов служит радиоактивный препарат 1. Излучение проходит через поглотитель 3, толщину которого  $x$  можно

изменять, и детектируется счетчиками 5. Две толстые свинцовые пластины с малыми отверстиями, называемые коллиматорами, формируют узкий пучок  $\gamma$  - лучей.

Если в поглотителе произошли такие процессы, как рождение пары электрон-позитрон или атомный фотоэффект, то  $\gamma$  - квант исчезает, а образовавшиеся заряженные частицы поглощаются в тонком слое вещества. В случае комптоновского рассеяния  $\gamma$  - квант выбывает из узкого пучка и не попадает в детектор. Как видно из изложенного, все три процесса приводят к ослаблению узкого пучка  $\gamma$  - квантов.

Число  $\gamma$  - квантов, проходящих в пучке за единицу времени, назовем интенсивностью пучка  $I$ .

Интенсивность  $I$  узкого пучка  $\gamma$  - квантов одинаковой энергии уменьшается экспоненциально по мере увеличения толщины  $x$  поглотителя (закон Бугера):

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-\mu x), \quad (9)$$

где  $I_0$  – интенсивность без поглотителя;  $\mu$  – линейный коэффициент ослабления. Линейный коэффициент ослабления зависит от энергии фотона, зарядового числа  $Z$  вещества поглотителя и его плотности.

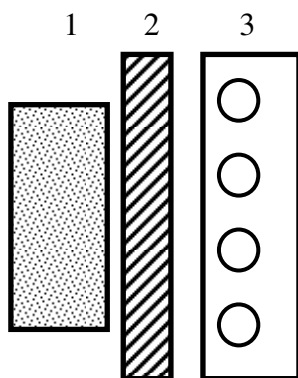


Рис. 4 б. Схемы измерения ослабления  $\gamma$ - лучей для широкого пучка:

1 –  $\gamma$ - источник, 2 – поглотитель, 3 – счетчики

Если толщину  $x$  измерять в см, то  $\mu$  будет в  $\text{см}^{-1}$ . В слое толщиной  $x_e = 1 / \mu$  излучение будет ослаблено в  $e = 2,72$  раза, а при вдвое большей толщине – в  $e^2$  раз и т.д. Слой половинного ослабления равен

$$x_{0,5} = (\ln 2) / \mu = 0,69 / \mu. \quad (10)$$

На рис. 5 представлена для железа зависимость линейного коэффициента ослабления  $\mu$  от энергии  $E$   $\gamma$  - квантов [4]. В зависимости от энергии доминирует тот или иной процесс взаимодействия  $\gamma$  - квантов с атомами. В области средних энергий (несколько МэВ) преобладает комптоновское рассеяние. Для  $E > 10$  МэВ коэффициент ослабления  $\mu$  возрастает за счет процесса рождения пары электрон-позитрон. В области малых энергий доминирует атомный фотоэффект, причем коэффициент ослабления сильно возрастает с уменьшением энергии, а также с увеличением атомного номера  $Z$  вещества поглотителя. Поэтому железо, а особенно свинец, очень сильно поглощают  $\gamma$  - кванты малой энергии (менее 100 кэВ). К этой области энергии относится и рентгеновское излучение.

Схема опыта для измерения ослабления широкого пучка  $\gamma$ - лучей (см. рис. 4 б) отличается от рассмотренной выше геометрии узкого пучка отсутствием коллиматоров. В этом случае  $\gamma$  - квант, испытавший комптоновское рассеяние, может остаться в широком пучке. Вследствие этого широкий пучок ослабляется в меньшей степени, чем узкий. Поэтому закономерности ослабления  $\gamma$ - лучей в широком пучке несколько иные, чем в узком пучке, причем это различие возрастает с увеличением толщины поглотителя.



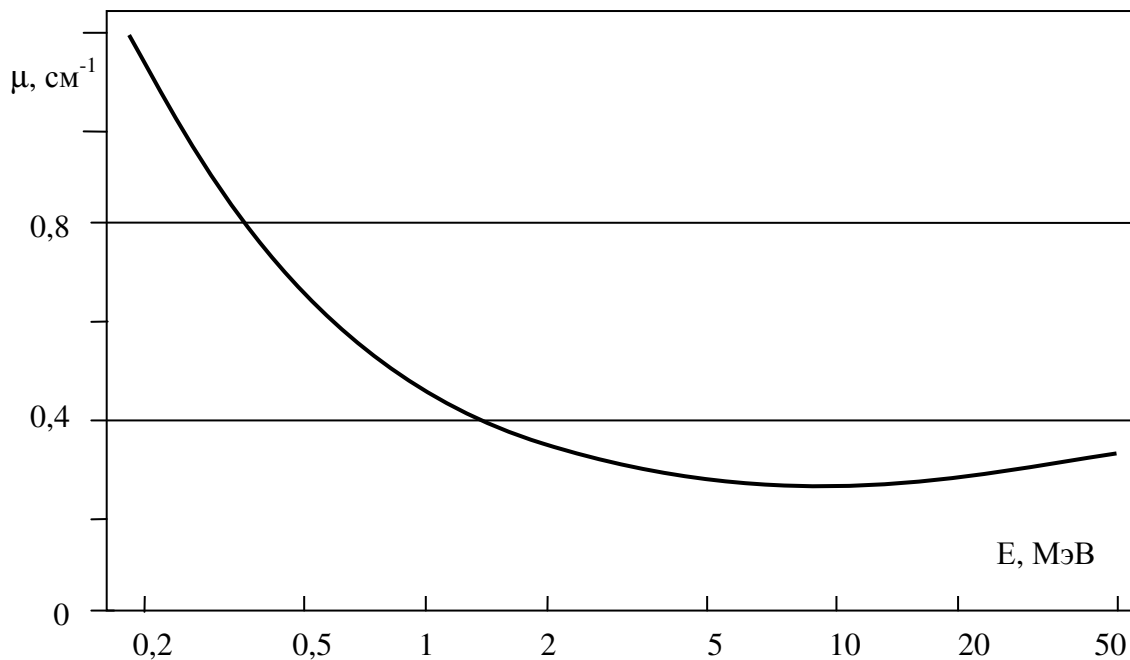


Рис. 5. Зависимость линейного коэффициента ослабления в железе от энергии  $\gamma$ -квантов для узкого пучка [4].

В лабораторной работе изучают ослабление широкого пучка  $\gamma$ -лучей в веществе (см. рис. 4 б). Между источником  $\gamma$ -излучения 1 и четырьмя счетчиками Гейгера-Мюллера 3 располагают железные поглощающие пластины 2, суммарную толщину  $x$  которых можно изменять.

Интенсивность  $\gamma$ -излучения, проходящего через ГМ-счетчики, определяют следующим способом. С помощью пересчетного устройства измеряют количество импульсов  $N$ , поступающих от ГМ-счетчиков за некоторое фиксированное время измерения.

Поскольку активность  $\gamma$ -источника малая, большую помеху вносят естественное фоновое радиоактивное излучение окружающих тел, а также космические лучи. Убрав контейнер с радиоактивным веществом от счетчиков, за то же время измерения определяют количество импульсов фона ( $N_{\text{ф}}$ ).

Разность

$$N_{\gamma} = N - N_{\text{ф}} \quad (11)$$

есть число зарегистрированных  $\gamma$ -квантов, испущенных радиоактивным источником. Величина  $N_{\gamma}$  пропорциональна интенсивности  $I$  потока  $\gamma$ -излучения в формуле (9).

В лабораторной работе находят величину  $N_{\gamma}$  для различной толщины  $x$  поглотителя, включая случай, когда  $x = 0$  (интенсивность для  $x = 0$  обозначим  $N_{\gamma 0}$ ).

В законе Бугера (см. формулу (9)) отношение интенсивностей  $\frac{I}{I_0}$  приравняем отношению числа зарегистрированных  $\gamma$ -квантов:

$$\frac{N_{\gamma}}{N_{\gamma 0}} = \exp(-\mu x). \quad (12)$$

Логарифмируя выражение (12), получим

$$\ln N_{\gamma} = \ln N_{\gamma 0} - \mu x. \quad (13)$$

По результатам измерений величины  $N_{\gamma}$  для различной толщины поглотителя  $x$  строят графическую зависимость  $\ln N_{\gamma}$  от  $x$  (рис. 6). Статистическая погрешность измерения величины  $N_{\gamma}$  показана на рис. 6 вертикальной чертой. Через экспериментальные точки проводят (с учетом погрешностей) наилучшую прямую линию.

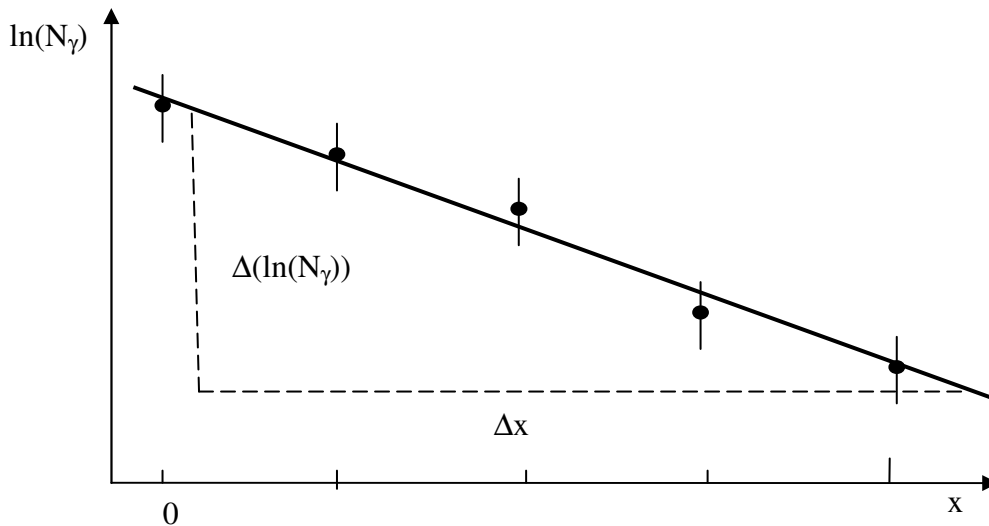


Рис. 6. Графическое представление результатов измерения ослабления  $\gamma$ -лучей в поглотителе

Если на рис. 6 экспериментальные точки с учетом статистической погрешности измерений согласуются с прямой линией, то это служит подтверждением закона Бугера (см. формулу (9)).

Возьмем дифференциалы (приращения) в формуле (13):

$$\Delta(\ln N_{\gamma}) = -\mu \Delta x \quad (14)$$

Из формулы (14) получаем выражение для нахождения линейного коэффициента ослабления  $\mu$  (пояснение см. на рис. 6):

$$\mu = \frac{\Delta(\ln N_{\gamma})}{\Delta x}. \quad (15)$$

## 7. Статистические погрешности при измерении радиоактивности

При измерении радиоактивности случайные (статистические) погрешности измерений обусловлены самой природой распада, который является случайным событием.

Измеряя радиоактивность с помощью ГМ- счетчиков, интенсивность излучения можно характеризовать, например, числом импульсов  $N$ , зарегистрированных ГМ- счетчиками за некоторое фиксированное время.

Повторяя измерения в тех же условиях, получают различные значения  $N$ , изменяющиеся случайным образом. Вероятность появления того или иного значения  $N$  дается распределением Пуассона [5]. Из него следует, что случайную (статистическую) погрешность можно найти из одного измерения, а не из нескольких, как для обычных измерений [6].

Для достаточно большого числа  $N$  зарегистрированных частиц среднеквадратическая статистическая погрешность измерения величины  $N$

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

Следовательно, с доверительной вероятностью  $P$  искомая величина  $N$ , которую обозначим  $N^*$ , находится в доверительном интервале

$$N^* = (N - \sigma) \dots (N + \sigma) \quad \text{для } P = 0,68$$

или

$$N^* = (N - 2\sigma) \dots (N + 2\sigma) \quad \text{для } P = 0,95.$$

Например, было зарегистрировано  $N = 100$  импульсов, при этом  $\sigma = 10$ . Тогда искомая величина  $N^*$  с доверительной вероятностью  $P = 0,68$  находится в доверительном интервале

$$N^* = 90 \dots 110$$

или с доверительной вероятностью  $P = 0,95$  в доверительном интервале

$$N^* = 80 \dots 120.$$

Обычно используют записи результатов измерений в следующей форме :

$$N^* = 100 \pm 10, P = 0,68; \text{ или } N^* = 100 \pm 20, P = 0,95;$$

Если счетчик зарегистрировал все распады, а фоновое излучение было пренебрежимо малым, то  $N^*$  – искомое число распадов за данное время.

С доверительной вероятностью  $P = 0,68$  относительная погрешность  $\varepsilon$  измерения величины  $N$  есть отношение абсолютной погрешности  $\sigma$  к измеренной величине  $N$ :

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}}. \quad (16)$$

Из формулы (16) видно, что для уменьшения относительной погрешности  $\varepsilon$  необходимо регистрировать большое число частиц (импульсов). Например, при  $N=100$  погрешность  $\varepsilon = 0,1 = 10\%$ , а при  $N = 10^4$  –  $\varepsilon = 0,01 = 1\%$ .

Рассмотрим расчет погрешности, когда фоновым излучением пренебрегать нельзя. Погрешность измерения величины  $N_\gamma = N - N_\phi$  (см. формулу (11)) складывается из погрешностей  $\sigma_1 = \sqrt{N}$  для величины  $N$  и  $\sigma_2 = \sqrt{N_\phi}$  – для  $N_\phi$ . По правилам сложения погрешностей [6], получаем среднеквадратическую статистическую погрешность измерения величины  $N_\gamma$

$$\sigma_\gamma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{N + N_\phi}. \quad (17)$$

Искомая величина  $N_\gamma$  вероятностью  $P = 0,68$  находится в доверительном интервале

$$N_\gamma = (N_\gamma - \sigma_\gamma) \dots (N_\gamma + \sigma_\gamma). \quad (18)$$

## 8. Дозы излучений

Ионизирующие излучения оказывают вредное воздействие на живые организмы и их потомства [7]. Для оценки биологических последствий воздействия ионизирующих излучений необходимо контролировать их дозы.

*Поглощенной дозой* называют отношение поглощенной энергии излучения к массе поглощающего вещества:

$$D = \frac{E}{m}. \quad (19)$$

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

Экспериментально установлено, что при одинаковой поглощенной дозе различного вида излучения оказывают неодинаковые по степени тяжести биологические последствия. Более вредными являются такие ионизирующие частицы, которые теряют больше энергии на единицу длины трека. К ним относятся  $\alpha$  - частицы и протоны отдачи при прохождении быстрых нейтронов через вещество.

Этот фактор учитывает *эквивалентная доза*, которую получают умножением поглощенной дозы на коэффициент  $K$ , зависящий от ионизирующей способности излучения и называемый коэффициентом качества излучения:

$$H = K D. \quad (20)$$

Единица эквивалентной дозы – *зиверт* (Зв). Для  $\alpha$  - излучения  $K = 20$ , поэтому при поглощенной дозе  $D = 1 \text{ Гр}$  эквивалентная доза  $H = 20 \text{ Зв}$ . Для  $\beta$  - излучения, а также для фотонного излучения (рентгеновского и  $\gamma$  - излучений)  $K = 1$ , при этом поглощенной дозе  $1 \text{ Гр}$  соответствует эквивалентная доза  $H = 1 \text{ Зв}$ .

Кроме того, следует учесть, что разные органы и ткани имеют различную чувствительность к облучению [7]. Поэтому была введена *эффективная эквивалентная доза* – эквивалентная доза, умноженная на коэффициент радиационного риска, учитывающий разную чувствительность различных тканей и органов к облучению. Эффективная эквивалентная доза также измеряется в зивертах.

В различных районах земного шара дозы могут различаться. Основную часть облучения население земного шара получает от естественных источников радиации (см. рис. 7 из работы [7]). Как видно из рис. 7 слева, средние годовые эффективные эквивалентные дозы (далее – дозы) составляют:  $2 \text{ мЗв}$  от естественных источников,  $0,4 \text{ мЗв}$  – от медицинской рентгеновской

диагностики и намного меньше – от радиоактивных осадков ядерных испытаний в атмосфере и работы атомных электростанций.

На рис. 7 справа показан вклад различных естественных источников радиации (в мЗв за год). Различают облучение космическими лучами (0,3 мЗв) и радионуклидами земного происхождения (примерно 1,7 мЗв). Облучение радионуклидами складывается из внешнего облучения (0,35 мЗв) и внутреннего облучения (1,33 мЗв) радиоактивными веществами, находящимися в организме. Таким образом, из дозы 2 мЗв естественного облучения на внутреннее облучение приходится 2/3 части. Внутреннее облучение обусловлено главным образом продуктами распада радиоактивного газа радона, выделяющегося из почвы и строительных материалов [7, 8]. Небольшой вклад во внутреннее облучение (0,18 мЗв) обусловлен распадом  $^{40}\text{K}$ .

Согласно официальному документу [9], максимально допустимые дозы радиации для населения от природных источников – 5 мЗв в год и от техногенных источников – 1 мЗв в год. Дозы облучения в медицинских целях (диагностика, лечение) регламентируются отдельно.

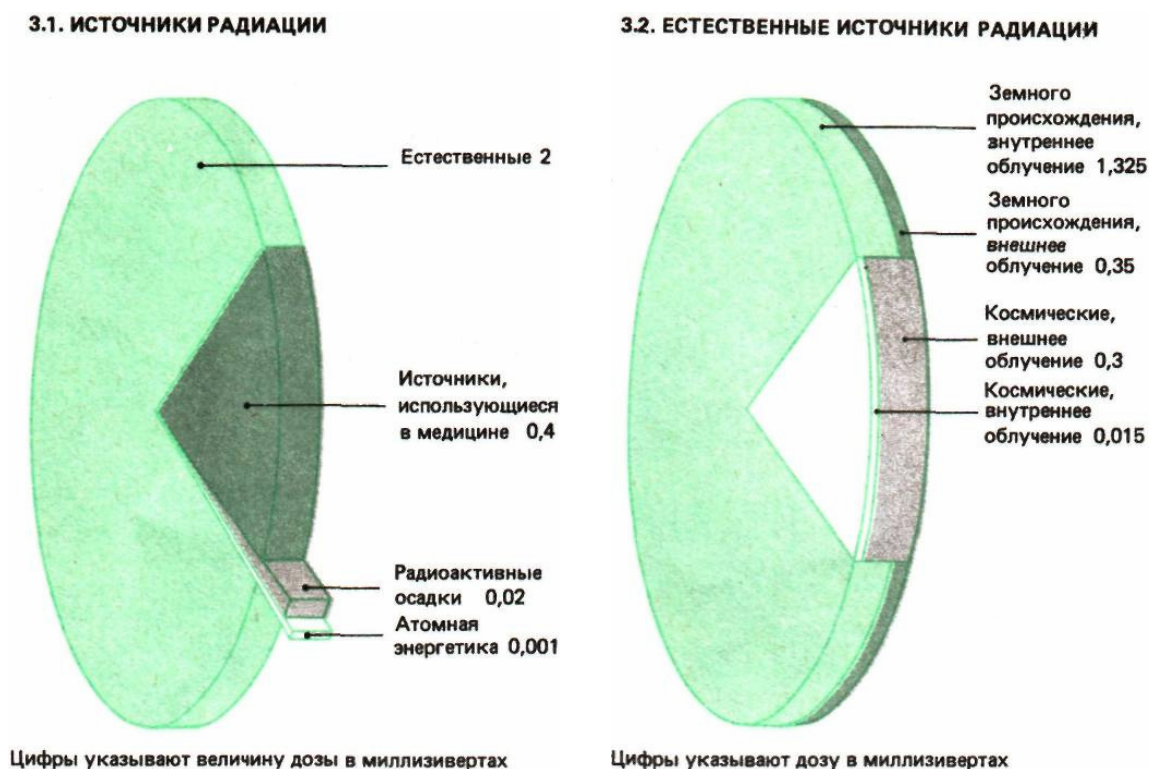


Рис. 7. Средние годовые эффективные эквивалентные дозы (в миллизивертах) [7]

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### Лабораторная установка для изучения ослабления $\gamma$ -лучей в веществе

Лабораторная установка для изучения ослабления  $\gamma$ -лучей в веществе включает в себя (см. слева направо на рис. 8):

- \* источник  $\gamma$ -излучения – контейнер с радиоактивными веществами;
- \* поглотитель (4 пластины из железа);
- \* блок с четырьмя счетчиками Гейгера-Мюллера типа СБМ-20;
- \* прибор *Universal Counter* (универсальный счетчик) фирмы RHYWE;
- \* секундомер.

В лабораторной работе источником  $\gamma$ -квантов служат распады радионуклидов  $^{40}\text{K}$  и  $^{60}\text{Co}$  (см. схемы распадов на рис.1-2).

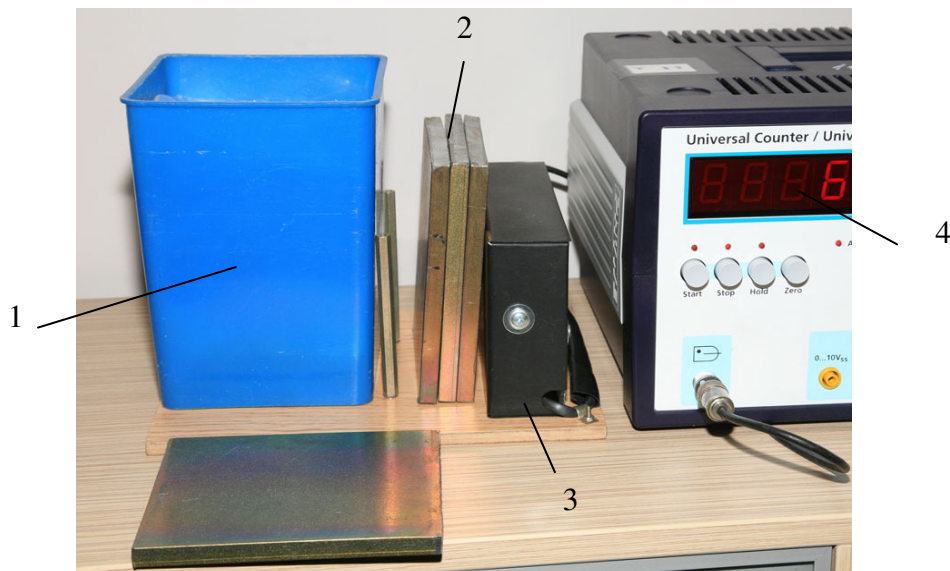


Рис. 8. Лабораторная установка для изучения ослабления  $\gamma$ -лучей в веществе: 1 –  $\gamma$ -источник, 2 – поглотитель, 3 – счетчики Гейгера-Мюллера, 4 – *Universal Counter*

Соль KCl массой несколько килограмм помещена в контейнер (см. рис. 8). Данное вещество испускает за 1 с 1700  $\gamma$ -квантов на каждый килограмм массы. Для увеличения в несколько раз интенсивности  $\gamma$ -излучения внутри контейнера с солью помещен контрольный закрытый источник  $\gamma$ -квантов типа КЗА с изотопом  $^{60}\text{Co}$ , имеющим период полураспада 5 лет. Оба изотопа испускают  $\gamma$ -кванты с близким энергиями, средняя энергия  $\gamma$ -квантов примерно 1,3 МэВ.

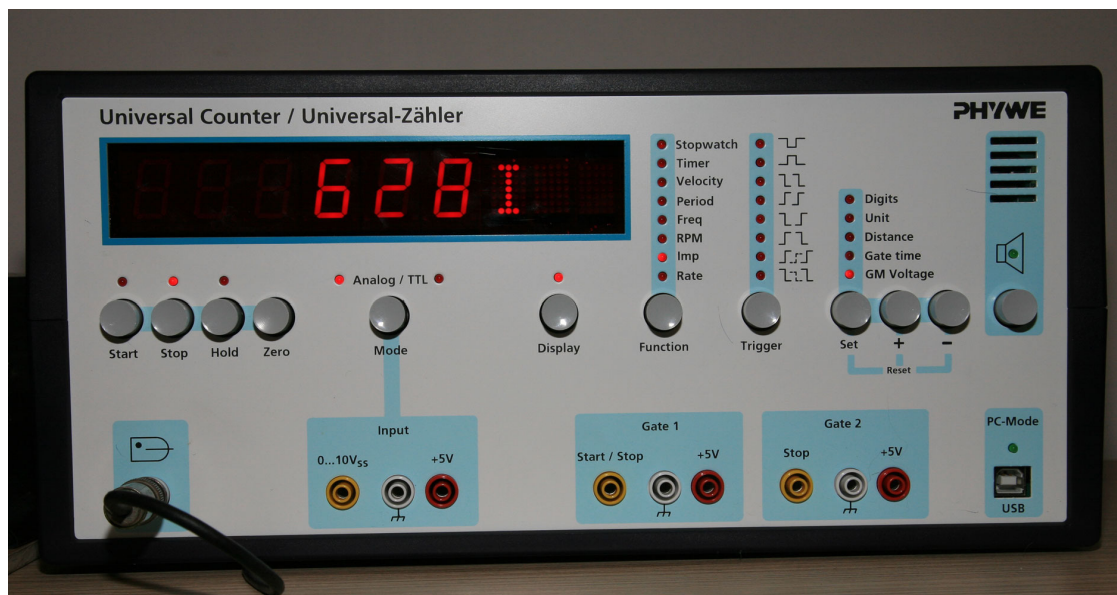


Рис. 9. *Universal Counter*

Универсальный счетчик (рис. 9) служит устройством для счета электрических импульсов, поступающих от ГМ-счетчиков, а также источником высокого напряжения для ГМ-счетчиков.

Рассмотрим назначение кнопок в приборе *Universal Counter*. При нажатой кнопке *Function* последовательно загораются светодиоды, отображающие различные режимы работы прибора. В данной работе используется режим счета импульсов (*Imp*). При этом на дисплее будет отображено «0I», где I – импульсы.

Группа из трех кнопок *Reset* используется для контроля и установки высокого напряжения на ГМ-счетчиках. При нажатой кнопке *Set* на дисплее будет показано напряжение. Его можно изменять кнопками «+» и «-». Рабочее напряжение должно быть 400 В.

Нажатием кнопки *Start* начинается процесс счета импульсов.

Для прекращения счета импульсов нажимают кнопку *Stop*. Число зарегистрированных импульсов будет отображено на цифровом дисплее.

Для сброса показаний дисплея нажимают кнопку *Zero*.

Последняя в ряду кнопка предназначена для включения динамика, который будет издавать щелчок при каждом срабатывании ГМ- счетчика.

## 1. Выполнение лабораторной работы

**Задание 1.** Подготовить прибор *Universal Counter* к работе

*Порядок выполнения задания.*

1. Вставить сетевую вилку в розетку. Включить питание прибора выключателем на задней стенке прибора. На дисплее будет отображено «0I», что обозначает: установлен режим счета импульсов (I), а счетчик обнулен (0). *Примечание:* если на дисплее указана другая функция, установить режим счета импульсов с помощью кнопки *Function*, как описано выше.
2. Нажать кнопку *Set* и проверить по дисплею напряжение на ГМ- счетчиках, которое должно быть 400 В. Если напряжение другое, выставить напряжение кнопками «+» и «-».
3. Проверить работоспособность установки. Нажать кнопку *Start*, при этом должен происходить счет импульсов, что видно на дисплее.
4. Нажать кнопку *Stop*. Число зарегистрированных импульсов будет отображено на дисплее.
5. Сбросить показания дисплея кнопкой *Zero*. Установка готова к дальнейшей работе.

**Задание 2.** Изучить ослабление  $\gamma$ - лучей в железе

В лабораторной работе в качестве меры интенсивности  $\gamma$ - излучения принимают количество импульсов, поступающих от ГМ- счетчиков за некоторое фиксированное время измерений. Чем больше это время, тем меньше статистические погрешности измерений. Время измерения должно быть 10 мин = 600 с. Предстоит выполнить 6 измерений, на что потребуется 1 час.

*Порядок выполнения задания.*

1. Получить секундомер у инженера лаборатории.
2. Измерить интенсивность  $\gamma$ - излучения источника в отсутствие поглощающих пластин. Поставить на рабочее место контейнер с радиоактивным веществом так, чтобы он примыкал к двум ограничивающим стержням (см. рис. 8). Помеченная стенка контейнера, к которой прикреплен источник  $^{60}\text{Co}$ , должна быть обращена в сторону ГМ- счетчиков. Измерить число импульсов  $N$ . Результат измерения  $N$  записать в табл. 1 для  $x = 0$ .

Таблица 1

### Результаты измерения ослабления $\gamma$ - лучей в железе

Время измерений  $t = 600$  с

Число импульсов фона  $N_{\text{ф}} = \dots$

$x$ , см	$N$	$N_{\gamma}$	$\sigma_{\gamma}$	$N_{\gamma} - \sigma_{\gamma}$	$N_{\gamma} + \sigma_{\gamma}$	$\ln N_{\gamma}$	$\ln(N_{\gamma} - \sigma_{\gamma})$	$\ln(N_{\gamma} + \sigma_{\gamma})$

*Примечания:*

- 1) в таблице должно быть 5 строк;
- 2)  $x$  – суммарная толщина железных пластин;
- 3)  $N$  – число импульсов при различной толщине  $x$  поглотителя;
- 4)  $N_{\gamma} = N - N_{\text{ф}}$ , где  $N_{\text{ф}}$  – число импульсов фона (см. задание 3);



5)  $\sigma_\gamma$  – среднеквадратическая статистическая погрешность величины  $N_\gamma$  (см. формулу (17));

6)  $(N_\gamma - \sigma_\gamma)$  и  $(N_\gamma + \sigma_\gamma)$  – границы доверительного интервала (см. формулу (18)).

3. Измерить толщину железной пластины штангенциркулем или линейкой.

4. Между радиоактивным источником и блоком ГМ- счетчиков поставить одну пластину.

Результаты измерения числа импульсов  $N$  и толщины пластины записать в табл. 1.

5. Повторить измерения п. 4 для двух, трех и четырех пластин.

6. Убрать пластины в коробку.

### Задание 3. Измерить фоновое излучение

*Порядок выполнения задания.*

1. Контейнер с радиоактивным веществом должен находиться не ближе 1,5 м от счетчиков.

2. Измерить число фоновых импульсов  $N_\phi$ . Результат измерения записать в заголовок табл. 1.

3. Выключить сетевое питание прибора выключателем на задней стенке прибора. Вернуть секундомер дежурному по лаборатории.

### Задание 4. Ознакомиться с дозиметром $\gamma$ - излучения



Рис. 10. Дозиметр  $\gamma$ - излучения (на дисплее показано положение десятичной точки при считывании результата измерения мощности дозы, равной 0,10 мкЗв /ч)

Портативные дозиметры ионизирующих излучений с ГМ- счетчиками регистрируют  $\gamma$ -излучение. Для детектирования  $\beta$ - излучения требуется дозиметр, в котором применяется счетчик Гейгера-Мюллера с тонкими стенками, а сам счетчик не закрыт материалом корпуса.

*Порядок выполнения задания.*

1. Получить дозиметр у инженера лаборатории.

2. Ознакомиться с характеристиками дозиметра  $\gamma$  - излучения типа ДБГ- 04 А с четырьмя счетчика Гейгера-Мюллера типа СБМ-20 (рис. 10). Дозиметр измеряет мощность эквивалентной

дозы  $\gamma$ - излучения (в дальнейшем – мощность дозы) в диапазоне 0,10 – 100 мкЗв/ч. Прибор регистрирует  $\gamma$ - кванты с энергией от 50 кэВ до 3,0 МэВ.

3. Включить питание дозиметра выключателем на боковой стенке прибора и ознакомиться с дозиметром в работе.

При каждом акте срабатывания счетчиков Гейгера-Мюллера электрический импульс поступает в пересчетное устройство дозиметра. Специальное устройство формирует звуковой сигнал длительностью 0,25 с при каждом срабатывании счетчиков.

В течение примерно 18 с прибор считает импульсы. По окончании счета импульсов прибор издает более длительный звуковой сигнал (1 с). Результат измерения мощности дозы в мкЗв/ч будет представлен на дисплее в форме, когда десятичная точка находится в середине дисплея (см. рис. 10).

Результат измерения сохраняется в течение нескольких секунд, затем дисплей обнуляется и начинается новый 18-секундный цикл измерения.

#### **Задание 5. Измерить мощность дозы внешнего облучения**

В данном задании измеряют мощность дозы внешнего облучения в двух ситуациях.

а) *Фоновое излучение.* Источник  $\gamma$ - излучения находится не ближе 1,5 м от дозиметра, при этом его излучение практически не влияет на результат измерения. В этом случае дозиметр измеряет мощность дозы от космического излучения и  $\gamma$ - излучения естественной радиоактивности окружающих предметов.

б)  *$\gamma$ - Источник и фоновое излучение* (источник на расстоянии 25 см от дозиметра).

При малой мощности дозы ограничиться одним измерением нельзя, так как статистическая погрешность будет большой. Для уменьшения погрешности необходимо произвести несколько измерений и вычислить среднее значение. С увеличением числа измерений статистическая погрешность уменьшается.

*Порядок выполнения задания.*

1. Контейнер с радиоактивным веществом поместить на расстоянии  $\geq 1,5$  м от дозиметра.
2. Измерить мощность дозы фонового излучения. Результаты 10 измерений записать в левый столбец табл. 2.
3. Измерить суммарную мощность дозы фонового излучения и  $\gamma$  – излучения радиоактивного источника. Расположить дозиметр на расстоянии 25 см от контейнера с радиоактивным веществом. Результаты 10 измерений записать в правый столбец табл. 2.
4. Выключить питание дозиметра и вернуть его инженеру лаборатории.

*Таблица 2*

**Мощность дозы внешнего облучения (мкЗв/ч)**

Фоновое излучение	$\gamma$ - Источник и фоновое излучение
Среднее значение мощности дозы =....	Среднее значение мощности дозы =....
Годовая доза = ...	Годовая доза = ...

*Примечание:* таблица должна содержать 10 свободных строк.

5. Для каждой серии измерений вычислить среднее значение мощности дозы для десяти измерений и записать результат в табл. 2.
6. Вычислить дозу за год и записать результат в табл. 2.
7. Проанализировать результаты измерений и сделать выводы. Сравнить измеренную фоновую годовую дозу внешнего облучения со средним значением дозы внешнего облучения 0,65 мЗв,



приведенным на рис. 7 справа. *Примечание:* доза 0,65 мЗв складывается из внешнего облучения земного происхождения (0,35 мЗв) и космического излучения (0,3 мЗв).

### Обработка результатов измерений ослабления $\gamma$ -лучей

1. По результатам измерений (см. табл. 1) вычислить  $N_\gamma = N - N_\phi$ , где  $N_\phi$  – число импульсов фона. Результаты вычислений записать в табл. 1.
2. По результатам измерений (см. табл. 1) вычислить среднеквадратическую статистическую погрешность  $\sigma_\gamma$  величины  $N_\gamma$  (см. формулу (17)).
3. Вычислить границы доверительного интервала  $(N_\gamma - \sigma_\gamma)$  и  $(N_\gamma + \sigma_\gamma)$  (см. формулу (18)). Результаты вычислений записать в табл. 1.
4. Вычислить натуральные логарифмы величин, показанных в табл. 1.
5. Построить график, характеризующий ослабление  $\gamma$ -излучения в железе (см. рис. 6). На миллиметровой бумаге формата А4 по оси абсцисс отложить толщину поглотителя  $x$  в см, а по оси ординат – величину  $\ln N_\gamma$ . (*Примечание:* шкалу ординат не следует начинать от нуля).  
Для каждого значения  $x$  нанести на графике три точки: значения  $\ln N_\gamma$ , а также значения  $\ln(N_\gamma - \sigma_\gamma)$  и  $\ln(N_\gamma + \sigma_\gamma)$ , характеризующие статистические отклонения. Соединить три точки отрезком прямой, как показано на рис. 6.
6. Через экспериментальные точки провести с учетом погрешностей измерений наилучшую прямую (см. рис. 6), которую следует ожидать из экспоненциального закона Бугера (см. формулы (9), (12), (13)).
7. По формуле (15) вычислить линейный коэффициент ослабления  $\mu$  (пояснения приведены на рис. 6). Результат вычисления записать в табл. 3.

Таблица 3

### Коэффициент ослабления $\mu$ в железе для $\gamma$ -квантов с энергией 1,3 МэВ

$\mu$ , см <sup>-1</sup>		$x_{0,5}$ , см
Результат лабораторной работы для широкого пучка	Литературные данные для узкого пучка	Результат лабораторной работы для широкого пучка

*Примечание:* в таблице должна быть 1 строка

8. Вычислить по формуле (10) толщину слоя железа  $x_{0,5}$ , в котором  $\gamma$ -излучение ослабляется в два раза. Результат вычисления записать в табл. 3.
9. По графику на рис. 5, построенному по литературным данным [4], определить линейный коэффициент ослабления  $\mu$  узкого пучка  $\gamma$ -лучей для энергии 1,3 МэВ и записать результат в табл. 3.
10. Сравнить полученное в лабораторной работе значение  $\mu$  с литературными данными для узкого пучка. *Примечание:* результат измерения величины  $\mu$  для широкого пучка может отличаться в меньшую сторону от значения  $\mu$  для узкого пучка.

### Контрольные вопросы и задания

1. Как распадается свободный нейтрон?
2. Из какого места атома вылетает электрон при  $\beta^-$ -распаде?
3. Что такое электронный захват?

4. Какая схема распада калия-40?
5. Сформулируйте закон радиоактивного распада.
6. Как устроен и работает счетчик Гейгера-Мюллера?
7. Какие взаимодействия испытывает  $\gamma$ -квант в веществе?
8. Сформулируйте закон Бугера для ослабления  $\gamma$ -излучения.
9. Что такое поглощенная доза и эквивалентная доза? В каких единицах они измеряются?
10. Чему равна средняя годовая доза облучения от естественных источников радиации?
11. Чему равна максимально допустимая доза радиации для населения от природных источников?

#### 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. *Иродов И.Е.* Квантовая физика. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001 – 272 с.
4. Таблицы физических величин. Справочник. Под ред. акад. И.К. Кикоина. М., Атомиздат, 1976, 1008 с.
5. *Тейлор Дж.* Введение в теорию ошибок: Пер. с англ. – М.: Мир, 1985.
6. *Савельева А.И., Фетисов И.Н.* Обработка результатов измерений при проведении физического эксперимента: метод. указания к выполнению лабораторной работы М-1 по курсу общей физики / – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 28 с.
7. Радиация. Дозы, эффекты, риск: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 79 с.
8. *Фетисов И.Н.* Естественная радиоактивность воздуха: метод. указания к выполнению лабораторной работы Я-65 по курсу общей физики / – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 22 с.
9. Нормы радиационной безопасности НРБ – 99/2009.