

МГТУ им. Н. Э. Баумана

И. Н. ФЕТИСОВ

## ИЗУЧЕНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ В ВЕЩЕСТВЕ

Методические указания к лабораторной работе О-51 по курсу общей физики

Под редакцией А. И. Савельевой

Москва, 1988

Цель работы - изучение закономерностей взаимодействия  $\gamma$ -излучения с веществом.

### ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.

#### Взаимодействие $\gamma$ -излучения с веществом

Гамма-излучение (а также рентгеновское излучение) - это электромагнитные волны с чрезвычайно малой длиной волны  $\lambda$ . Кванты (фотоны) этих излучений обладают большими значениями энергии  $E=h\nu=hc/\lambda$  и импульса  $p=h/\lambda$  ( $h$  - постоянная Планка,  $c$  - скорость света,  $\nu$  - частота).

Испускание  $\gamma$ -квантов сопровождает радиоактивный распад в тех случаях; когда образующиеся ядра находятся в возбужденном состоянии. При переходе ядра с верхнего энергетического уровня на нижний излучается  $\gamma$ -квант с энергией, равной разности энергии уровней, между которыми происходит переход. Для конкретного изотопа  $E$  имеет одно или несколько дискретных значений в диапазоне от  $\sim 10^4$  до  $\sim 10^6$  эВ. Большие энергии можно получить с помощью ускорителей элементарных частиц.

Рентгеновское излучение (РИ), образующееся в рентгеновской трубке при торможении быстрых электронов в металлической пластине (аноде), имеет сплошной спектр. Максимальная энергия квантов РИ равна кинетической энергии ускоренного в трубке электрона.

При взаимодействии  $\gamma$ -излучения и РИ с веществом происходят следующие основные процессы: эффект Комптона, фотоэффект и рождение пары электрон-позитрон. Все они имеют корпускулярный характер.

Эффект Комптона - упругое рассеяние фотонов на свободных (или слабо связанных атомных) электронах, сопровождающееся увеличением длины волны. Фотон передает часть своей энергии и импульса электрону и изменяет направление движения; уменьшение энергии фотона и означает увеличение длины волны рассеянного излучения.

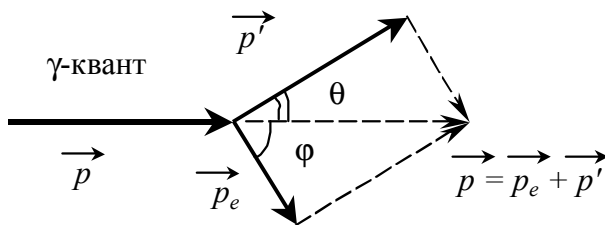


Рис. 1

Рис. 1 иллюстрирует закон сохранения импульса при комптон-эффекте: до столкновения электрон покоится;  $\vec{p}$  и  $\vec{p}'$  - импульсы налетающего и рассеянного фотонов;  $\vec{p}_e$  - импульс электрона отдачи;  $\theta$  - угол рассеяния фотона;  $\phi$  - угол, под которым летит электрон отдачи относительно направления падающего фотона. Совместное

решение уравнений, выражающих законы сохранения энергии и импульса при комптон-эффекте, дает для сдвига джиги волны формулу Комптона:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_C (1 - \cos \theta). \quad (1)$$

Здесь  $\lambda'$  - длина волны рассеянного излучения,  $\lambda_C = h/(mc) = 2,4 \cdot 10^{-12}$  м - комптоновская длина волны электрона ( $m$  - масса покоя электрона). Из (1) следует что сдвиг  $\Delta\lambda$  не зависит от

длины волны падающего излучения, а определяется лишь углом и максимален при  $\theta=180^\circ$  ( $\lambda_{\max}=2\lambda_C$ ). Однако относительный сдвиг  $\Delta\lambda/\lambda$  возрастает с уменьшением  $\lambda$ .

В действительности электроны не свободны, а связаны в атомах. Электрону необходимо сообщить энергию  $\geq E_{\text{св}}$ , чтобы вырвать его из атома. Величина  $E_{\text{св}}$  называется энергией связи электрона. Она возрастает с увеличением зарядового числа  $Z$  и уменьшением радиуса орбиты. Если энергия  $\gamma$ -кванта велика по сравнению с  $E_{\text{св}}$ , рассеяние происходит как на свободных электронах.

Фотоэффект - квантовое явление, при котором фотон поглощается, а его энергия передается электрону. В отличие от комптон-эффекта, при фотоэффекте: а) фотон исчезает; б) процесс происходит на связанных электронах, так как свободный электрон не может поглотить фотон (при этом не могут быть соблюдены одновременно законы сохранения энергии и импульса).

Различают следующие случаи фотоэффекта.

1. Внешний фотоэффект - испускание электронов твердыми телами и жидкостями в вакуум или другую среду.
2. Внутренний фотоэффект - перераспределение электронов по энергетическим состояниям в конденсированной среде, проявляющееся в полупроводниках и диэлектриках в изменении электропроводности среды. Внешний и внутренний фотоэффекты играют важную роль для излучения оптического диапазона.
3. При достаточно больших энергиях квантов ( $\gamma$ -излучение, РИ) электроны могут вырываться из внутренних оболочек атома; кинетическая энергия вылетевшего электрона выражается соотношением Эйнштейна:  $E_{\text{кин}}=h\nu - E_{\text{св}}$

Рождение пары электрон-позитрон происходит в электрическом поле ядра под действием  $\gamma$ -излучения. При этом  $\gamma$ -квант исчезает, а его энергия затрачивается на энергию покоя ( $2mc^2$ ) и кинетическую энергию электрона и позитрона. В соответствии с законом сохранения полной релятивистской энергии рождение пар возможно при  $h\nu > 2mc^2 \approx 1$  МэВ.

Вероятность того, что  $\gamma$ -квант взаимодействует с веществом путем того или иного из указанных процессов, зависит от его энергии  $E$  и зарядового числа  $Z$  вещества. С увеличением  $E$  доминируют сначала фотоэффект (особенно для больших  $Z$ ), затем комптоновское рассеяние (при  $E \approx 1 \dots 4$  МэВ для  $Pb$  и  $0,05 \dots 10$  МэВ для  $Al$ ) и, наконец, рождение пар.

#### Ослабление пучка $\gamma$ -излучения.

Выведем формулу для ослабления параллельного пучка  $\gamma$ -квантов одинаковой энергии. На поглотитель толщиной  $l$  падает поток  $I_0$  (число  $\gamma$ -квантов в секунду). Обозначим

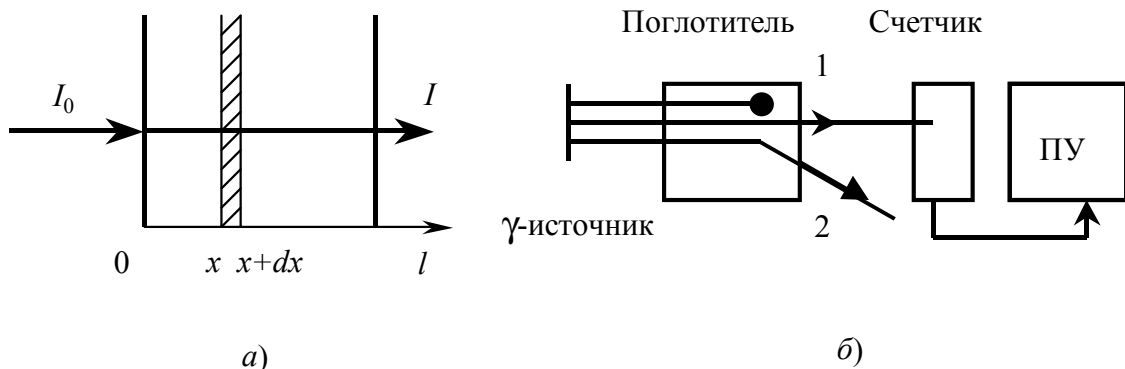


Рис.2

$I(x)$  поток на глубине  $x$ . Рассмотрим ослабление потока в слое толщиной  $dx$  на глубине  $x$ . Имеется некоторая вероятность, что квант взаимодействует в этом слое и выбудет из пучка, поглотится в результате фотоэффекта или рождения пары (луч 1 на рис. 2б) или рассеется при комптоновском взаимодействии (луч 2). В результате поток  $I(x)$ , состоящий из

большого числа квантов, уменьшится в среднем на величину  $dI$ , пропорциональную толщине  $dx$  и потоку

$$-dI = \mu I(x) dx \quad (2)$$

где  $\mu = \text{const}$  для данного вещества и  $E$ . Интегрируя (2), получим выражение для потока, прошедшего слой толщиной  $l$ :

$$I = I_0 \exp(-\mu l) \quad (3)$$

На рис. 3 представлена эта зависимость для различных значений линейного коэффициента ослабления  $\mu$ . Величина  $\mu$  измеряется в единицах  $\text{м}^{-1}$ . Она имеет следующий смысл: в слое толщиной  $1/\mu$  поток ослабляется в  $e \approx 2,72$  раза.

Для одного и того же вещества, например, воздуха,  $\mu$  пропорционально плотности  $\rho$ . Поэтому часто удобнее пользоваться массовым коэффициентом ослабления:

$$\mu_m = \mu / \rho \quad (4)$$

Тогда из (3) получаем

$$I = I_0 \exp(-\mu_m l \rho), \quad (5)$$

Где  $l\rho$  – «толщина» поглотителя,  $\text{кг}/\text{м}^2$ ;  $\mu_m$  – массовый коэффициент ослабления,  $\text{м}^2/\text{кг}$ .

На рис. 4 представлены теоретические зависимости  $\mu_m$  от  $E$  для свинца и алюминия. Не показанные на рис. 4 зависимости для элементов с промежуточными значениями  $Z$  (между  $Al$

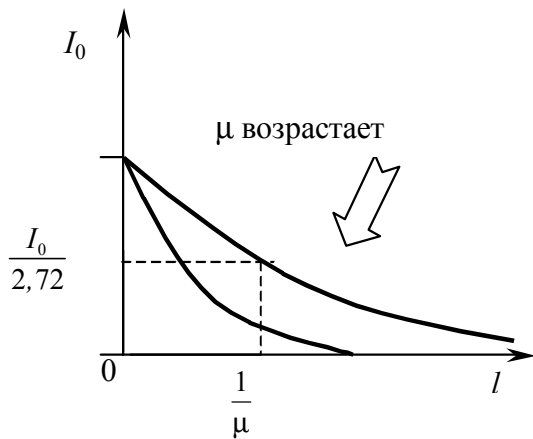


Рис. 3

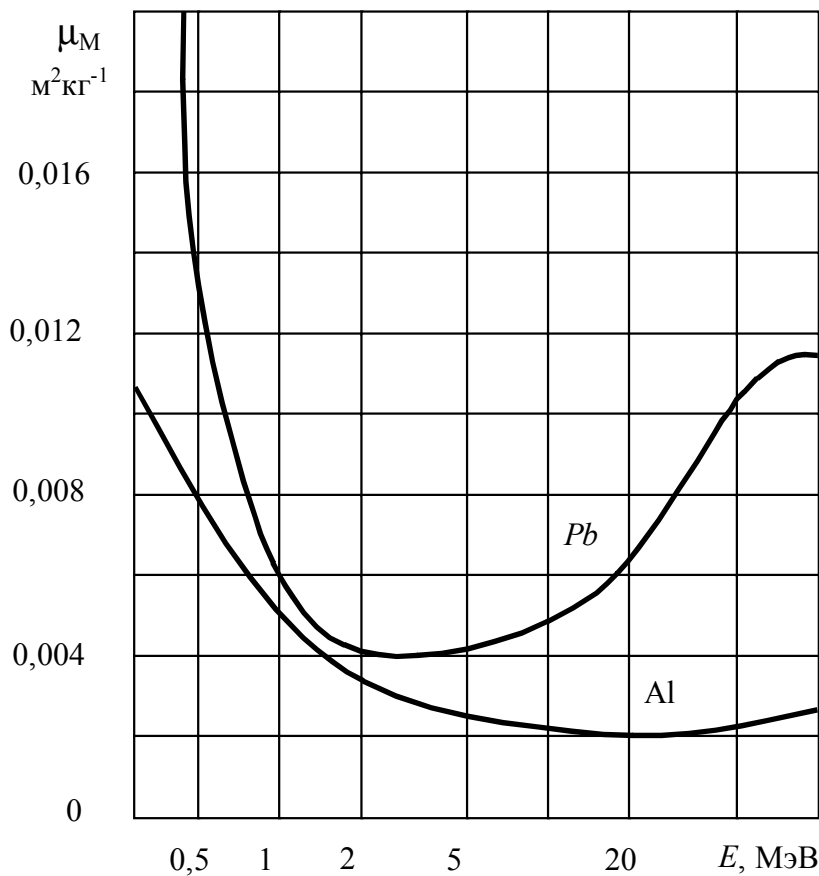


Рис.4

и  $Pb$ ) располагаются между приведенными кривыми.

На рис. 4 видна интересная особенность, которую можно проверить в данной работе. Для  $E \approx 1...4$  МэВ  $\mu_m$  почти не зависит от  $Z$ . Объяснение состоит в том, что в этом энергетическом интервале преобладает комптоновское рассеяние, вероятность которого пропорциональна числу атомных электронов на пути кванта, а число электронов пропорционально толщине поглотителя  $\rho l$ . Поэтому поглотители из различных веществ, но с одинаковым значением  $\rho l$  имеют примерно одинаковое ослабление.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ.

### Методика измерений.

Схема опыта представлена на рис. 2б. Гамма-излучение с энергией примерно 1,2 МэВ испускается при распаде изотопа  $^{60}\text{Co}$ . Сцинтилляционный счетчик регистрирует отдельные  $\gamma$ -кванты, вырабатывая электрический импульс. Импульсы считаются пересчетным устройством (ПУ). Пусть за время  $t$  появилось  $N'$  импульсов. Средней скоростью счета называется отношение  $n' = N'/t$ . Если радиоактивный препарат убрать, то скорость счета уменьшается до величины  $n_\phi$  называемой фоном счетчика. Фон обусловлен частицами космического излучения, естественной радиоактивностью и процессами в самом счетчике. Разность  $n = n' - n_\phi$  есть скорость счета излучения исследуемого препарата. Она пропорциональна потоку  $\gamma$ -квантов:

$$n = aI \quad (6)$$

Подставляя (6) в (3), получим

$$n = n_0 \exp(-\mu l), \quad (7)$$

где  $n_0$  и  $n$  - скорость счета без поглотителя и с поглотителем толщиной  $l$ . После логарифмирования (7) имеем

$$\ln(n/n_0) = -\mu l \quad (8)$$

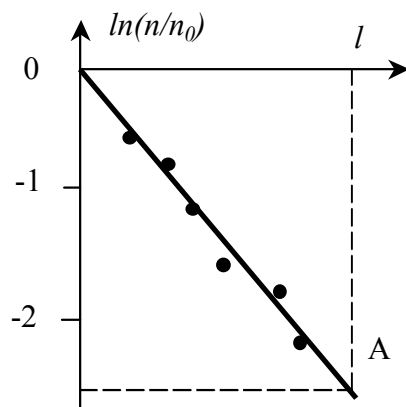


Рис. 5

Если, измерив скорость счета без поглотителя и для различных толщин  $l$ , построить графическую зависимость  $\ln(n/n_0)$  как функцию  $l$ , то можно проверить экспоненциальный закон ослабления (3) и определить численное значение  $\mu$  для данного вещества. В соответствии с (8) экспериментальные точки должны ложиться на прямую (рис. 5). Из наклона прямой можно получить численное значение  $\mu$ :

$$\mu = -\ln(n/n_0)/l \quad (9)$$

подставив в (9) значения  $l$  и  $\ln(n/n_0)$  для любой точки А, лежащей на прямой (рис. 5).

Результат измерения  $\mu$  в некоторой степени зависит от геометрических условий опыта. Если  $\gamma$ -квант рассеялся на малый угол и попал в счетчик, то он будет восприниматься как непрореагировавший. Этот эффект приведет к занижению экспериментальных значений  $\mu$  по сравнению с теоретическими (рис. 4).

### Сцинтилляционный счетчик

В некоторых веществах, называемых сцинтилляторами, под действием ионизирующих быстрых частиц возникают световые вспышки - сцинтилляции (разновидность люминесценции). Для регистрации  $\gamma$ -излучения используют кристаллы  $\text{NaI}$  ( $\text{Tl}$ ) размером несколько сантиметров.

$\gamma$ -квант в результате взаимодействия с веществом сцинтиллятора (эффект Комптона, фотоэффект, рождение  $e^-e^+$  пары) передает энергию электрону (и позитрону); сцинтилляция производится заряженной частицей. Устройство счетчика показано на рис. 6.

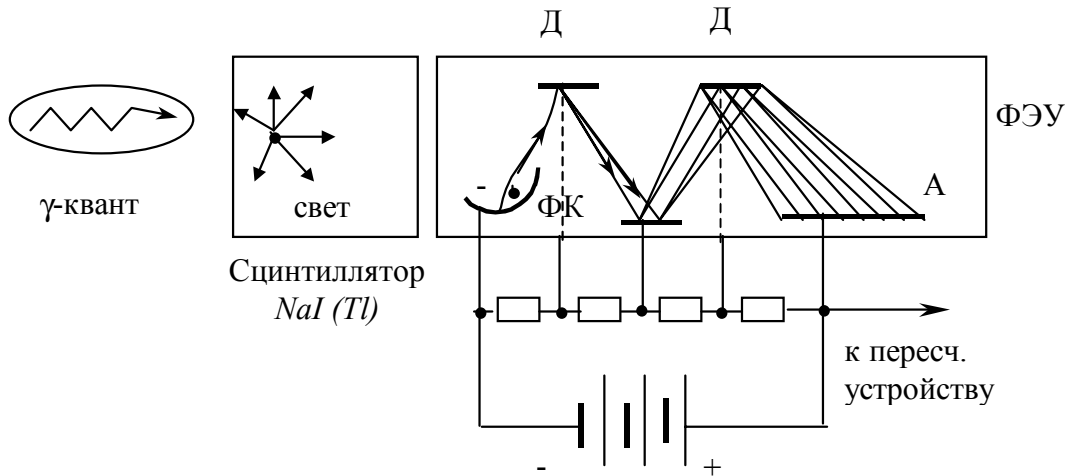


Рис.6

Вспышка света регистрируется с помощью фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), сочетающего в одном электровакуумном приборе фотоэлемент и усилитель тока. ФЭУ состоит из фотокатода (ФК), анода (А) и нескольких промежуточных электродов - динодов (Д). С помощью высоковольтного источника и делителя напряжения на диноды и анод подается положительный потенциал. По мере удаления от ФК потенциал каждого последующего электрода возрастает примерно на 100 В. Электроны, испускаемые фотокатодом под действием света, ускоряются электрическим полем и выбивают из первого динода вторичные электроны, число которых в  $\delta$  раз больше числа первичных электронов. Этот процесс повторяется на каждом диноде и приводит к значительному усилению тока (например, в  $\delta^k = 2 < 10^6$  раз для  $\delta = 5$  и  $k = 9$  динодов). Лавина электронов достигает анода в создает в его цепи значительный электрический импульс. Импульсы считаются пересчетным устройством.

#### Описание лабораторной установки.

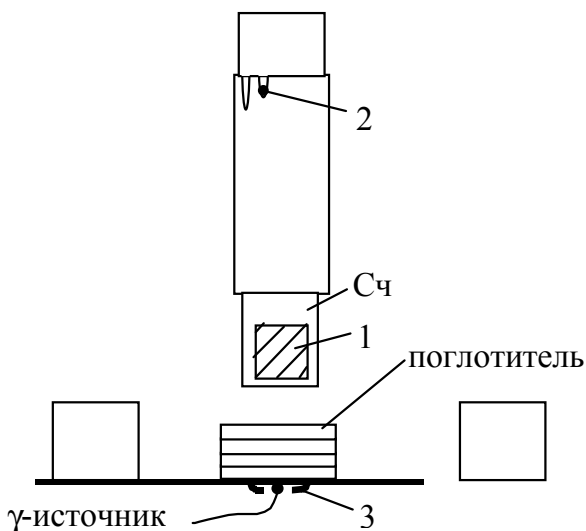


Рис. 7

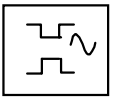
Установка (рис. 7) включает в себя счетчик  $\gamma$ -излучения (Сч), пересчетное устройство (ПУ), источник питания счетчика (ИП). Сцинтиллятор 1 находится в нижней части светонепроницаемого кожуха. Счетчик можно перемещать по вертикали; рабочим является верхнее положение, когда выступ 2 входит в короткую прорезь.

Источник  $\gamma$ -излучения представляет собой герметичную стальную ампулу, внутри которой находится радиоактивный препарат незначительной активности. Направляющие 3 служат для установки источника в рабочее положение.

К установке прилагаются наборы пластин алюминия, меди (латуни) и свинца.

#### Выполнение эксперимента.

1. Ознакомиться с установкой (рис. 7). Включить СЕТЬ источника питания и пересчетного устройства. В рабочем положении ПУ должны быть утоплены клавиши:



N

НЕПРЕРЫВНО-ОДНОКРАТНО и одна из клавиш экспозиции.

2. Установить счетчик в верхнем положении (выступ 2 входит в короткую прорезь).

**ВНИМАНИЕ! За кабель счетчика не тянуть!**

3. Пока установка прогревается (3 мин), выполнить несколько пробных измерений фона с экспозицией 10 с (нажать клавишу 10) Управление ПУ производится последовательным нажатием клавиш СБРОС и ПУСК. По окончании заданного времени, когда лампочка СЧЕТ погаснет, считать с индикатора число зарегистрированных импульсов ( $N_{\phi} \approx 20 \dots 50$ )

4. Утопить клавишу 100, измерить три раза фон с экспозицией 100 с, результаты записать в табл. 1.

5. Получить у лаборанта  $\gamma$ -источник. Установить его в рабочее положение (по направляющим 3 до упора),

6. Без поглотителя измерить три раза число импульсов и записать результаты в табл. 1.

Таблица 1

Измерения	Число импульсов за 100с	Суммарное число импульсов в трех измерениях	Скорость счета, имп/с	
Фона	1.	} $N_{\phi} =$	$n_{\phi} =$	----
	2.			
	3.			
Без поглотителя	1.	} $N_0 =$	$n'_0 =$	$n_0 = n'_0 - n_{\phi}$
	2.			
	3.			

Таблица 2

Поглотитель	Толщина пластины	$l$	$N'$	Обработка			
				$n'$	$n = n' - n_{\phi}$	$n/n_0$	$\ln(n/n_0)$

7. Для алюминия измерить число импульсов  $N'$  (по одному измерению за 100 с) для различной толщины поглотителя  $l$  (изменять  $l$  с шагом 15...20 мм до 80...90 мм). Толщину отдельных пластин измерить штангенциркулем. Результаты измерений записать в таблицу 2.

8. Повторить измерения п. 7 для одного материала с большим  $Z$ : меди (латуни) с шагом 10...12 мм до 60...70 мм или свинца с шагом 4...6 мм до ~40 мм,

9. Выключить СЕТЬ приборов, сдать  $\gamma$ -источник, убрать поглотитель в коробку.

#### Обработка и анализ результатов измерений.

1. Построить графическую зависимость  $\ln(n/n_0)$  от  $l$  (на одном графике для двух поглотителей). Через отчетливо изображенные экспериментальные точки и начало координат провести для каждого материала прямую так, чтобы отклонения точек от нее были наименьшими (рис. 5).

2. Сделать вывод, согласуются ли результаты опыта с экспоненциальной зависимостью (3).

3. Найти значения  $\mu$ , используя построенный график и формулу (9). Выразить  $\mu$  в единицах  $m^{-1}$ , результат записать в табл. 3.

4. По формуле (4) вычислить  $\mu_m$  и записать результаты в табл. 3 ( $\rho$  в единицах  $10^3 \text{ кг/м}^3$  принять равным 2.8 для алюминия; 8.5 для латуни; 8.9 для  $Cu$  и 11,3 для  $Pb$ ).

Таблица 3

Поглотитель	Эксперимент		Теория $\mu_m, \text{ м}^2/\text{кг}$
	$\mu, \text{ м}^{-1}$	$\mu_m \pm \Delta\mu_m, \text{ м}^2/\text{кг}$	

5. Оценить погрешность измерения значений  $\mu_m$ . Из (4), (9) получаем

$$\mu_m = -\ln(n/n_0)/(\rho l).$$

По правилам вычисления относительной средней квадратичной погрешности косвенных измерений имеем

$$\left(\frac{\Delta\mu_m}{\mu_m}\right)^2 = \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\ln(n/n_0)}{\ln(n/n_0)}\right)^2 \quad (10)$$

где  $\Delta l$  - средняя квадратичная погрешность измерения толщины поглотителя. Последнее слагаемое в (10), обусловленное статистической природой радиоактивного распада, в данной работе невелико и им можно пренебречь. Тогда из (10) получим

$$\Delta\mu_m = \mu_m \sqrt{(\Delta l / l)^2 + (\Delta\rho / \rho)^2} \quad (11)$$

Вычислить погрешность по формуле (11), приняв  $\Delta\rho/\rho=0,01$  (разброс плотности различных марок металла). Погрешность  $\Delta l$  оценить самостоятельно.

6. Пользуясь рис. 4, определить теоретические значения  $\mu_m$  для материалов данной работы; записать результаты в табл. 3. Объяснить возможное расхождение эксперимента с теорией.

#### Контрольные вопросы

1. Опишите процессы взаимодействия  $\gamma$ -излучения с веществом.
2. Как изменяется поток  $\gamma$ -квантов с толщиной поглотителя?
3. Какой физический смысл имеют величины  $\mu$  и  $\mu_m$ , как они зависят от  $Z$  и  $E$  ?
4. Почему при  $E \approx 1 \dots 4$  МэВ различные поглотители имеют близкие значения  $\mu_m$  ?
5. Объяснить причину расхождения теоретических и экспериментальных значений  $\mu_m$ .

#### Содержание отчета

Отчет должен содержать краткий конспект теоретической части, схему опыта и экспериментальные данные (таблицы 1...3 и график).

#### Литература

Детлаф А. А., Яворский Б.М. Курс физики. – М.: Высшая школа. - 1979. - Т. 3. - 511 с.