

Федеральное агентство по образованию
Уральский государственный технический университет - УПИ
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
Кафедра физики

ИЗУЧЕНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ВЕЩЕСТВОМ

Методические указания к лабораторной работе № 45 по физике
для студентов всех форм обучения всех специальностей

*Печатается по решению редакционно-издательского совета
УГТУ-УПИ от 26.05.2009 г.*

Екатеринбург
УГТУ-УПИ
2009

УДК 539.16

Составители А.А. Сабирзянов, А.А. Клименков

Научный редактор доц., канд. физ.- мат. наук Ю.Г. Карпов

Изучение ослабления гамма-излучения веществом: методические указания к лабораторной работе № 45 по физике/ А.А. Сабирзянов, А.А. Клименков. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. 13 с.

Методические указания содержат сведения о свойствах гамма-излучения и механизмах его взаимодействия с веществом поглотителя. В работе приведены рекомендации по измерению коэффициента поглощения гамма-излучения различными материалами. Методические указания предназначены для студентов всех форм обучения всех специальностей.

Подготовлено кафедрой физики.

©УГТУ-УПИ, 2009

1. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

1.1. Гамма-излучение и его взаимодействие с веществом

Гамма-излучение представляет собой электромагнитное излучение с очень малой длиной волны ($\lambda < 10^{-10}$ м). Вследствие этого при взаимодействии с веществом гамма-излучение проявляет четко выраженные корпускулярные свойства и его можно рассматривать как поток фотонов (гамма-квантов).

Гамма-излучение образуется при радиоактивном распаде некоторых атомных ядер, а также при ядерных реакциях. Его возникновение объясняется тем, что ядра, образующиеся при радиоактивном распаде или ядерных реакциях, могут находиться в возбужденном состоянии. Переходя в состояние с меньшей энергией, ядра испускают гамма-кванты, энергия которых равна разности энергий ядра до и после перехода. Спектр гамма-квантов (их распределение по энергиям) является линейчатым, что обусловлено дискретностью энергетических состояний атомных ядер. Например, используемый в данной работе в качестве источника гамма-излучения изотоп ^{60}Co испускает гамма-кванты с близкими энергиями 1,17 и 1,33 МэВ. В дальнейшем будем приближенно считать, что все гамма-кванты этого источника имеют одинаковую энергию 1,25 МэВ.

При прохождении через вещество поток гамма-излучения ослабляется вследствие рассеяния (изменения направления движения фотонов) и поглощения части фотонов веществом. Рассмотрим ослабление гамма-излучения веществом с количественной точки зрения.

Электромагнитное излучение характеризуется интенсивностью I , представляющей собой среднюю по времени энергию, переносимую фотонами в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения излучения.

Уменьшение интенсивности гамма-излучения при прохождении бесконечно тонкого слоя вещества пропорционально толщине этого слоя dx и интенсивности падающего излучения I

$$- dI = \mu I dx, \quad (1)$$

где μ - линейный коэффициент ослабления, зависящий от природы поглощающего вещества и энергии фотонов падающего излучения.

Интегрируя уравнение (1), получаем закон ослабления излучения слоем вещества толщиной x :

$$I = I_0 e^{-\mu x}, \quad (2)$$

где I и I_0 - интенсивность излучения до и после прохождения слоя вещества соответственно.

Из выражения (2) следует, что интенсивность гамма-излучения по мере прохождения через вещество убывает по экспоненциальному закону, причем

быстрота ее убывания определяется коэффициентом ослабления (измеряемым обычно в см^{-1}). Экспоненциальный закон (2) выполняется для узкого пучка фотонов одинаковой энергии.

Для характеристики ослабляющей способности вещества используется также понятие толщины слоя половинного ослабления $\Delta_{1/2}$, при прохождении которого интенсивность излучения уменьшается в два раза. Используя (2), можно показать, что

$$\Delta_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} . \quad (3)$$

Например, для ослабления вдвое интенсивности излучения ^{60}Co требуется слой бетона толщиной $\Delta_{1/2} = 5$ см.

Отметим, что гамма-излучение имеет значительно большую проникающую способность, чем α - и β -излучения (α -излучение - поток ядер гелия, β -излучение - поток быстро движущихся электронов или позитронов).

При взаимодействии гамма-излучения с веществом наиболее существенны следующие процессы: фотоэффект, комптоновское рассеяние и образование электронно-позитронных пар. Каждый из этих процессов происходит независимо от других, поэтому полный коэффициент ослабления μ состоит из трех слагаемых

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa , \quad (4)$$

где τ, σ, κ - коэффициенты ослабления, обусловленные соответственно фотоэффектом, комптоновским рассеянием и образованием электронно-позитронных пар.

Фотоэффект - процесс неупругого взаимодействия гамма-излучения с веществом, при котором падающий фотон поглощается атомом и передает свою энергию одному из электронов, выбивая его из атома. Фотоэффект происходит только на связанных электронах (когда энергия связи электрона в атоме сравнима с энергией фотона), поэтому по мере увеличения энергии падающих фотонов вероятность фотоэффекта уменьшается.

Коэффициент ослабления при фотоэффекте определяется выражением

$$\tau = f_1(E_\gamma) \frac{Z^{4,5} \rho}{A} , \quad (5)$$

где f_1 - функция, зависящая от энергии фотона, Z - атомный номер вещества, A - его атомная масса, ρ - плотность вещества. Расчеты показывают, что если принять $E_\gamma = 1,25$ МэВ, а ρ выразить в $\text{кг}/\text{м}^3$ и τ - в см^{-1} , функция f_1 численно равна $7 \cdot 10^{-12}$.

Из формулы (5) видно, что коэффициент ослабления фотонов одинаковой энергии при фотоэффекте существенно возрастает с увеличением атомного номера вещества.

Эффект Комптона (комптоновское рассеяние) - процесс упругого взаимодействия фотона со свободным электроном (электрон можно считать свободным, когда энергия фотона существенно превышает энергию связи электрона в атоме). В результате взаимодействия падающий фотон передает часть энергии электрону и изменяет направление своего движения (рассеивается). Длина волны рассеянного фотона больше, чем падающего.

Строгая теория эффекта Комптона показывает, что вероятность комптоновского рассеяния уменьшается с увеличением энергии падающего фотона. Коэффициент ослабления при комптоновском рассеянии можно представить в виде

$$\sigma = f_2(E_\gamma) \frac{Z\rho}{A}, \quad (6)$$

где f_2 - функция, зависящая от энергии фотона. При $E_\gamma = 1,25$ МэВ f_2 численно равна $1,1 \cdot 10^{-4}$, если $[\rho] = \text{кг/м}^3$, $[\sigma] = \text{см}^{-1}$. Согласно (6) зависимость σ от природы вещества в основном определяется его плотностью, так как отношение Z/A мало отличается для разных элементов.

Образование электронно-позитронных пар ($\gamma \rightarrow e^- + e^+$) может происходить при прохождении фотона с энергией $E_\gamma > 1,02$ МэВ (удвоенная энергия покоя электрона) вблизи атомного ядра. При этом фотон исчезает, а вся его энергия распределяется между образовавшимися электроном и позитроном. Коэффициент ослабления при этом процессе определяется формулой

$$\kappa = f_3(E_\gamma) \frac{Z^2\rho}{A}. \quad (7)$$

Вероятность образования пар растет с увеличением энергии фотона выше значения 1,02 МэВ. При $E_\gamma < 1,02$ МэВ вероятность образования пар равна нулю.

Всю область энергий фотонов можно разбить на три интервала, в каждом из которых наиболее вероятен один из трех рассмотренных процессов. В области малых энергий ($E_\gamma < E_1$) основным механизмом взаимодействия гамма-излучения с веществом является фотоэффект, в промежуточной области ($E_1 < E_\gamma < E_2$) - эффект Комптона, в области больших энергий ($E_\gamma > E_2$) - образование пар. Граничные значения E_1 и E_2 , отделяющие области преобладания каждого из механизмов взаимодействия, неодинаковы для различных веществ. Так, для алюминия $E_1 = 0,05$ МэВ и $E_2 = 15$ МэВ, для железа $E_1 = 0,1$ МэВ и $E_2 = 10$ МэВ, для свинца (рис. 1) $E_1 = 0,5$ МэВ и $E_2 = 5$ МэВ.

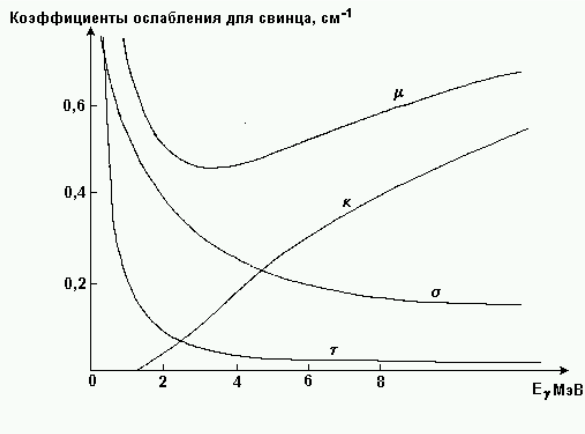


Рис. 1. Коэффициенты ослабления для свинца

1.2. Регистрация гамма-излучения

Свойства радиоактивных излучений, их количественные характеристики, методы измерения этих характеристик изучает дозиметрия - раздел ядерной физики. В дозиметрии используется ряд специальных понятий. Ионизирующая способность гамма-излучения характеризуется экспозиционной дозой.

Экспозиционная доза X - отношение суммарного заряда всех ионов одного знака, созданных в объеме воздуха, к массе воздуха в этом объеме. Единица измерения экспозиционной дозы в СИ - Кл/кг. Широко распространена внесистемная единица - рентген ($1 \text{ P} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$).

Скорость увеличения экспозиционной дозы характеризуется мощностью экспозиционной дозы P . Она равна отношению приращения экспозиционной дозы dX за интервал времени dt к этому интервалу: $P = dX/dt$. Единицей измерения P является рентген в секунду. 1 P/с - большая мощность дозы, поэтому шкалы дозиметрических приборов обычно градуируются в мкP/с, мP/ч и т.д.

Одним из наиболее распространенных устройств для измерения интенсивности гамма-излучения является счетчик Гейгера-Мюллера (рис.2), действие которого основано на ионизации газовой среды. Он представляет собой тонкостенный металлический цилиндр, заполненный газом при пониженном давлении. По оси цилиндра натянута тонкая металлическая нить. Между цилиндром (катодом) и нитью (анодом) приложено напряжение около 400 В,

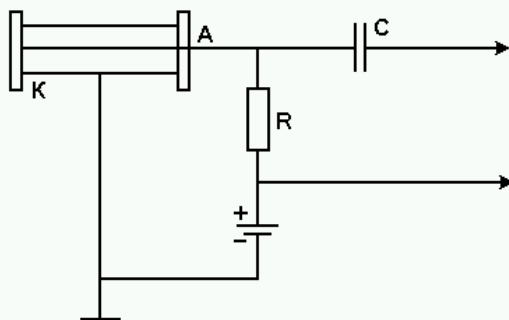


Рис.2. Счетчик Гейгера-Мюллера

причем анод соединен с положительным полюсом источника ЭДС через сопротивление $R \sim 10^9 \text{ Ом}$.

Механизм регистрации гамма-квантов заключается в следующем. Проходящие через счетчик кванты выбивают из катода быстрые электроны, которые, в свою очередь, ионизируют атомы газа. Образующиеся

при этом положительные ионы и электроны устремляются к электродам счетчика. В счетчике возникает ток, а на сопротивлении R - скачок напряжения. Это вызывает резкое уменьшение напряжения между электродами счетчика, и возникший в нем газовый разряд гасится до попадания в счетчик следующего кванта.

Счетчик через конденсатор C подключен к пересчетному устройству, которое считает число возникших импульсов напряжения за единицу времени.

Между интенсивностью излучения и мощностью экспозиционной дозы существует прямо пропорциональная зависимость: $P \sim I$. Тогда из формулы (2) можно получить

$$P = P_0 e^{-\mu x}, \quad (8)$$

где P_0 и P - мощности экспозиционной дозы до и после прохождения слоя вещества толщиной x . Логарифмируя (8), получаем

$$\ln P = \ln P_0 - \mu x. \quad (9)$$

Эта зависимость представляет собой уравнение прямой в координатах $\ln P$ и x , тангенс угла наклона которой (с обратным знаком) равен m . Измерив на опыте зависимость $P(x)$ для различных материалов и построив графики $\ln P = f(x)$, можно определить коэффициенты ослабления гамма-излучения m для этих материалов. Наблюдаемая нелинейность зависимости $\ln P = f(x)$ обусловлена тем, что используемый пучок фотонов не является узким, а также однородным по энергии.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Цель настоящей работы - измерение характеристик материалов, определяющих их способность ослаблять гамма-излучение, а также теоретическая оценка коэффициента ослабления для свинца.

2.1. Описание установки

Схема лабораторной установки изображена на рис.3. Она состоит из трех основных узлов, закрепленных на общей подставке.

1. Дозиметр АНРИ-01-02, включающий счетчик Гейгера, пересчетную схему, системы управления и индикации. Он предназначен для измерения мощности экспозиционной дозы в мР/ч.

2. Набор пластин различной толщины, закрепленных в окнах трех дисков (для каждого диска - свой материал). Смена пластин происходит при повороте дисков, номер установленного окна находится напротив риски на корпусе прибора. Окно №1 на всех дисках свободно.

3. Блок перемещения источника излучения. Источник расположен на подвижной планке. Ее передвижение осуществляется вращением зубчатого колеса. Под планкой закреплена линейка, по которой отсчитывается расстоя-

ние между источником и счетчиком Гейгера. На указателе, с помощью которого снимается отсчет расстояния, обозначен номер источника (в положении 1 - гамма-источник, в положении 2 - бета-источник). Смена источника производится в среднем положении планки поворотом указателя вокруг вертикальной оси на 180° до фиксации.

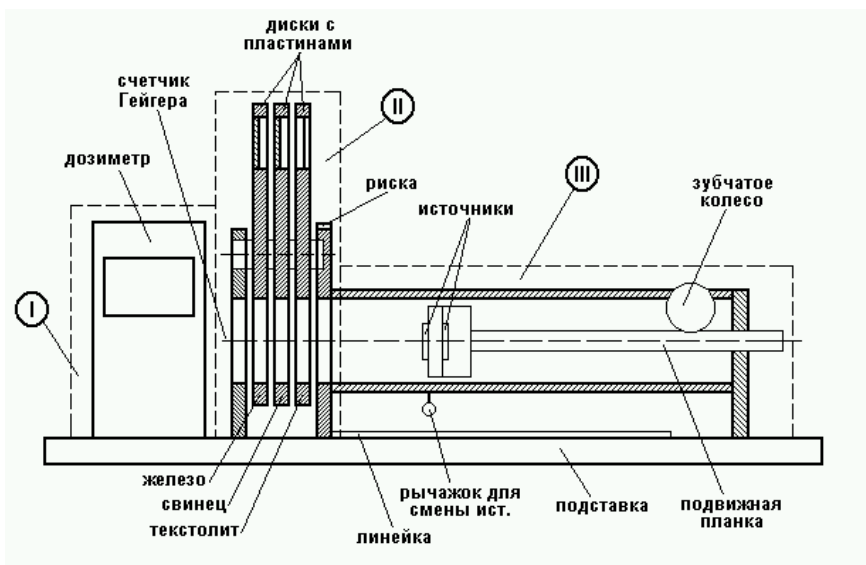


Рис.3. Схема установки

2.2. Порядок выполнения работы

Опишите технические характеристики дозиметра АНРИ-01-02 (находятся на рабочем месте).

Выполните измерения величины радиационного фона. Для этого необходимо:

1. Установить переключатель режима работы дозиметра в положение <МД> (влево). Включить дозиметр.
2. Полностью выдвинуть вправо подвижную планку, чтобы максимально удалить источник излучения от счетчика Гейгера.
3. Установить все три диска в положение, соответствующее наибольшей толщине материала. При этом цифра 6 находится вверху, напротив риски.
4. Нажать кнопку <пуск-стоп> дозиметра. При этом на цифровом табло появятся точки после каждого разряда <0.0.0.0> и начнется счет импульсов.
5. Через 20 с измерение закончится, прозвучит сигнал, и на табло фиксируется значение мощности экспозиционной дозы в мР/ч.
6. Повторить измерения еще 4 раза. Для этого достаточно, не выключая прибор, нажать кнопку <пуск-стоп>. Величину радиационного фона P_{ϕ} принять равной среднему арифметическому полученных значений и записать ее в соответствующую колонку табл. П.1.

Снимите кривые ослабления гамма-излучения. Для этого необходимо:

1. Проверить, что переключатель источников находится в положении 1. Поставить подвижную планку в крайнее левое положение, максимально приблизив источник излучения к счетчику Гейгера.
2. Диск со свинцовыми пластинами устанавливать поочередно в положения от 2 до 6, для каждого положения измерять мощность дозы 5 раз. Два других диска при этом должны находиться в положении 1 (пустые окна). Заполнить табл. П.1. Рекомендуется все значения мощности дозы умножать на 1000, переводя их в мкР/ч (это позволит получить в столбце $\ln P$ табл. П.1 положительные значения).

3. Выполнить аналогичные измерения для другого материала (по указанию преподавателя) и заполнить табл. П.2.

4. Выключить дозиметр.

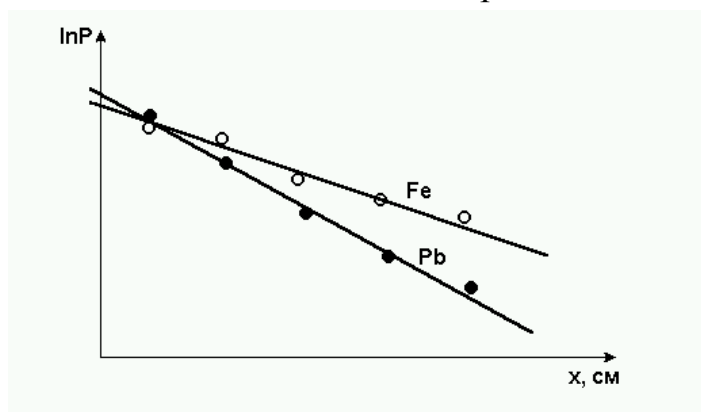


Рис. 4. Зависимость $\ln P$ от расстояния

Определите коэффициенты ослабления. Для этого необходимо:

1. По данным табл. П.1 построить график зависимости $\ln P = f(x)$ (рис.4). Экспериментальные точки аппроксимировать прямой линией и определить коэффициент ослабления для свинца по формуле

$$\mu = \frac{\ln P_1 - \ln P_2}{x_2 - x_1}, \quad (10)$$

где $x_1, x_2, \ln P_1, \ln P_2$ - координаты двух точек, произвольно выбранных на прямой. (По указанию преподавателя расчет коэффициента поглощения может быть выполнен на ЭВМ. В этом случае необходимо также рассчитать погрешность определения μ по формуле $\Delta\mu = t_{p,n} S_\mu$, где $t_{p,n}$ - коэффициент Стьюдента, S_μ - среднеквадратичное отклонение (рассчитывается на ЭВМ)). Для повышения точности определения μ эти точки не следует выбирать слишком близко друг к другу.

2. На том же графике построить зависимость $\ln P = f(x)$ для второго материала и определить его коэффициент ослабления.

3. Рассчитать по формуле (3) толщину слоя половинного ослабления для свинца и второго материала.

4. Рассчитать по формулам (5) и (6) коэффициенты ослабления τ и σ , связанные с фотоэффектом и комптоновским рассеянием для свинца. Эффектом образования электронно-позитронных пар в данных условиях можно пренебречь. Найти теоретическое значение полного коэффициента ослабления μ для свинца по формуле (4).

5. Сравнить экспериментальное и теоретическое значения μ для свинца

$$\eta = \frac{|\mu_{\text{теор}} - \mu_{\text{эксп}}|}{\mu_{\text{теор}}} \cdot 100\%.$$

Контрольные вопросы

1. Каковы гамма-излучения с веществом? Как коэффициенты ослабления для соответствующих процессов зависят от энергии фотонов, атомного номера и плотности вещества?
2. Какой вид имеет закон ослабления гамма-излучения при прохождении слоя вещества?
3. Что такое слой половинного ослабления?
4. Какова конструкция и принцип действия счетчика Гейгера-Мюллера?
5. Что такое экспозиционная доза и мощность экспозиционной дозы? В чем они измеряются?
6. В чем состоит методика экспериментального определения коэффициента ослабления гамма-излучения?

ФОРМА ОТЧЕТА

Титульный лист:

УГТУ - УПИ
Кафедра физики

ОТЧЕТ

по лабораторной работе № 45

Измерение коэффициента ослабления гамма-излучения

Студент-(ка) _____

Группа _____

Преподаватель _____

Дата _____

На внутренних страницах:

1. Расчетные формулы:

$$\mu = \frac{\ln P_1 - \ln P_2}{x_2 - x_1},$$

где μ - коэффициент ослабления; P - мощность дозы; x - толщина слоя вещества.

$$\mu = \tau + \sigma, \quad \tau = 7 \cdot 10^{-12} \frac{Z^{4,5} \rho}{A}, \quad \sigma = 1,1 \cdot 10^{-4} \frac{Z \rho}{A},$$

где τ и σ - коэффициенты ослабления при фотоэффекте и комптоновском рассеянии; Z - атомный номер; A - атомная масса; ρ - плотность вещества.

2. Характеристики установки.

3. Результаты измерений.

3.1. Измерение зависимости мощности дозы от толщины слоя свинца.

Таблица П.1

Поло- жение окна	x , см	P' , мкР/ч					P'_{cp} , мкР/ч	P_{ϕ} , мкР/ч	$P = P_{cp} - P_{\phi}$, мкР/ч	$\ln P$
		1	2	3	4	5				
2	0,1									
3	0,3									
4	0,5									
5	0,7									
6	0,9									

Здесь x - толщина материала, P' , P'_{cp} - мощности дозы без поправки на фон, P_{ϕ} - величина фона, P - мощность дозы с поправкой на фон.

3.2. Измерение зависимости мощности дозы от толщины слоя...

Таблица П.2

Поло- жение окна	$x, \text{см}$	$P', \text{мкР/ч}$					$P'_{cp}, \text{мкР/ч}$	$P_{\phi}, \text{мкР/ч}$	$P = P_{cp} - P_{\phi}, \text{мкР/ч}$	$\ln P$
		1	2	3	4	5				
2	0,1									
3	0,3									
4	0,5									
5	0,7									
6	0,9									

4. Построение графиков $\ln P = f(x)$ для свинца и другого материала. Определение коэффициентов ослабления m (в см^{-1}).

5. Расчет $\Delta_{1/2}$ для обоих материалов и τ , σ , $\mu_{\text{теор}}$ для свинца. Справочные данные для свинца: $Z = 82$, $A = 207$, $\rho = 11300 \text{ кг/м}^3$.

Выводы. В выводе по лабораторной работе приведите полученные результаты, сравните теоретическое и экспериментальное значения полного коэффициента μ для свинца. Укажите, какой механизм взаимодействия вносит основной вклад в ослабление пучка гамма-квантов с энергией $E_{\gamma} = 1,25 \text{ МэВ}$ для свинца. Используя найденные значения μ и $\Delta_{1/2}$, сделайте вывод о том, какой из материалов лучше подходит для защиты от гамма-излучения.

Учебное издание

ИЗУЧЕНИЕ ОСЛАБЛЕНИЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ВЕЩЕСТВОМ

Составители: *Сабирзянов Александр Аделевич*

Клименков Александр Александрович

Редактор *Н.П. Кубыщенко*

Компьютерная верстка *Н.Н. Анохиной*

Подписано в печать	09.10.2009	Формат 60× 84 1/16
Бумага типографская	Плоская печать	Усл. печ. л. 0,76
Уч.-изд. л. 0,8	Тираж 100 экз.	Заказ

Редакционно-издательский отдел УГТУ – УПИ

620002, Екатеринбург, Мира, 19

rio@mail.ustu.ru

Ризография НИЧ УГТУ – УПИ

620002, Екатеринбург, Мира, 19