

Кафедра прикладной физики

Физический практикум

Часть 4

*Методические указания
к лабораторным работам по квантовой оптике,
атомной и ядерной физике*

Тверь 2013

УДК 531 (075.8)
ББК 22.3я7

Алексеев, В.М. Физический практикум. Часть 4: метод. указания к лабораторным работам по квантовой оптике, атомной и ядерной физике / под ред. В.М. Алексеева. Тверь: ТвГТУ, 2013. 52 с.

Составители: В.М. Алексеев, А.Н. Болотов, В.В. Измайлов, М.В. Новоселова, А.Ф. Гусев, В.В. Новиков, О.О. Новикова, А.В. Мишина, Ю.И. Морозова.

Предназначен для студентов инженерно-строительного и машиностроительного факультетов, выполняющих лабораторные работы по разделам «Квантовая оптика», «Атомная и ядерная физика» курса общей физики.

Основную часть указаний составляет описание методов, экспериментальных установок и порядка проведения лабораторных работ. В конце каждого описания работы приведены рекомендуемая литература и контрольные вопросы для подготовки к выполнению лабораторной работы и ее защиты.

Методика обработки результатов экспериментов, основные физические постоянные, некоторые справочные величины, а также множители и приставки для образования десятичных, кратных и дольных единиц и их наименования вынесены в приложения.

Рекомендован к печати кафедрой прикладной физики (протокол № 7 от 27 июня 2013 г.).

Рецензент зав. кафедрой высшей математики ТвГТУ, д. т. н., профессор Горячев В.Д.

Лабораторная работа № 5-6 ИЗМЕРЕНИЕ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР С ПОМОЩЬЮ ПИРОМЕТРА

Цель работы: изучение законов теплового излучения, проверка закона Стефана-Больцмана.

Приборы и принадлежности: кинопроекционная лампа, вольтметр, амперметр, оптический пирометр, миллиамперметр.

Введение

Тепловым излучением называется излучение нагретых тел. Количество энергии Φ , излучаемой телом в единицу времени со всей поверхности S по всем направлениям, называется **лучистым потоком**, или **мощностью излучения**.

Энергия, излучаемая телом в единицу времени с единицы поверхности во всем диапазоне длин волн, называется **излучательностью**, или **энергетической светимостью** R_e .

Излучение состоит из волн с различными длинами λ . Если обозначить излучательность тела в узком интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$ через dR_e , то величина

$$r_{\lambda, T} = \frac{dR_e}{d\lambda} \quad (1)$$

называется **испускательной способностью**, или **спектральной плотностью энергетической светимости** тела. Это энергетическая светимость, приходящаяся на единицу интервала длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$.

Испускательная способность тела зависит от длины волны, температуры T и свойств тела.

Яркость тела B_λ определяет величину энергетической светимости, приходящейся на единицу телесного угла, или величину потока, излучаемого с единицы площади в данном направлении. Между яркостью тела и излучательностью существует связь

$$B_\lambda = \pi \cdot R_e. \quad (2)$$

Любое тело не только излучает, но и поглощает падающую на его поверхность энергию. Способность тела поглощать энергию характеризуется **поглощательной способностью**, или **коэффициентом поглощения**

$$\alpha_\lambda = \frac{d\Phi'_\lambda}{d\Phi_\lambda}, \quad (3)$$

где $d\Phi_\lambda$ – лучистый поток в интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$, падающий на поверхность тела; $d\Phi'_\lambda$ – поток в интервале длин волн от λ до $\lambda + d\lambda$, поглощенный этим телом.

По величине поглощательной способности различают **абсолютно черное тело** ($\alpha_\lambda \equiv \alpha_c = 1$ для всех длин волн); **серое тело** ($\alpha_\lambda \equiv \alpha_c < 1$ для всех длин волн).

Согласно **закону Кирхгофа** отношение испускательной способности любого тела к его поглотительной способности зависит только от температуры и длины волны излучения и равно испускательной способности абсолютно черного тела $r^*_{\lambda,T}$, т. е.

$$\frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_\lambda} = r^*_{\lambda,T}. \quad (4)$$

Откуда следует, что испускательная способность любого тела

$$r_{\lambda,T} = \alpha_\lambda \cdot r^*_{\lambda,T} \quad (5)$$

при прочих равных условиях всегда меньше испускательной способности абсолютно черного тела $r^*_{\lambda,T}$, которая определяется формулой Планка:

$$r^*_{\lambda,T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}, \quad (6)$$

где h – постоянная Планка, c – скорость света, k – постоянная Больцмана.

Вид функции $r^*_{\lambda,T}$ для двух температур изображен на рис. 1. Как следует из рисунка, функция $r^*_{\lambda,T}$ имеет максимум при некоторой длине волны λ_m . Длина волны λ_m , на которую приходится максимум испускательной способности, по **закону смещения Вина** обратно пропорциональна температуре:

$$\lambda_m = \frac{b}{T}, \quad (7)$$

где b – постоянная Вина ($b = 2,89 \cdot 10^{-3}$ м·К).

Из определений энергетической светимости, испускательной способности и выражения (4) мощность излучения серого тела (к серым телам относятся все металлы) во всем диапазоне длин волн

$$\Phi = S \alpha_c \int_0^\infty r^*_{\lambda,T} d\lambda, \quad (8)$$

где $\int_0^\infty r^*_{\lambda,T} d\lambda = R_e^*$ – излучательность абсолютно черного тела.

Согласно **закону Стефана-Больцмана**

$$R_e^* = \sigma T^4, \quad (9)$$

где σ – постоянная Стефана-Больцмана ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$).

Тогда для расчета мощности излучения нагретого серого тела имеем:

$$\Phi = S \alpha_c \sigma T^4. \quad (10)$$

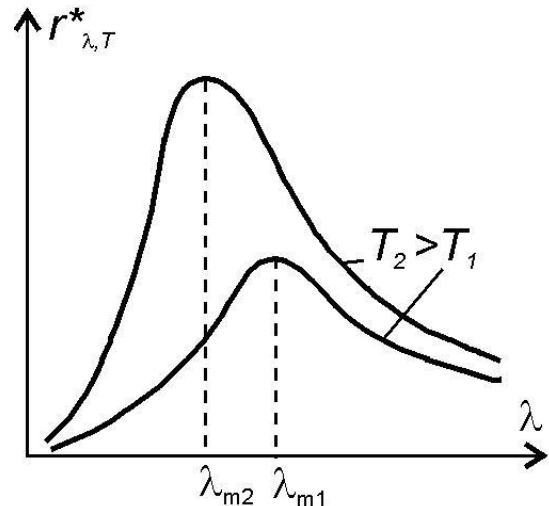


Рис. 1

Из формул (6)–(8) следует, что законы теплового излучения можно использовать для измерения температуры нагретых тел. Предназначенные для этого приборы называются **оптическими пирометрами**.

В **радиационном пирометре** энергетическая светимость нагретого тела по всем длинам волн сравнивается с энергетической светимостью абсолютно черного тела, поэтому пирометр дает не истинную температуру, а температуру абсолютно черного тела T_p^* , излучательность которого равна излучательности исследуемого тела. Эту температуру называют **радиационной температурой**. Из формул (2), (5) и (9) следует, что при одинаковой энергетической светимости радиационная температура всегда меньше истинной температуры тела.

В **яркостном пирометре** яркость исследуемого тела сравнивается с яркостью абсолютно черного тела на одном и том же участке спектра излучения $d\lambda$. Температуру абсолютно черного тела T^* , яркость которого равна яркости данного тела, называют **яркостной температурой**. Если яркость исследуемого источника при некоторой длине волны λ равна яркости абсолютно черного тела, то из формул (5) и (6) следует, что яркостная температура также ниже истинной температуры.

Для определения истинной температуры в обоих случаях используются специальные графики или таблицы.

Описание экспериментальной установки и методики измерений

Экспериментальная установка (рис. 2) состоит из источника теплового излучения, которым является нить накала кинопроекторной лампы и оптического пирометра. Лампа питается от источника переменного напряжения с регулируемым выходом. Выходное напряжение измеряется вольтметром V . Ток, идущий через лампу, измеряется амперметром A .

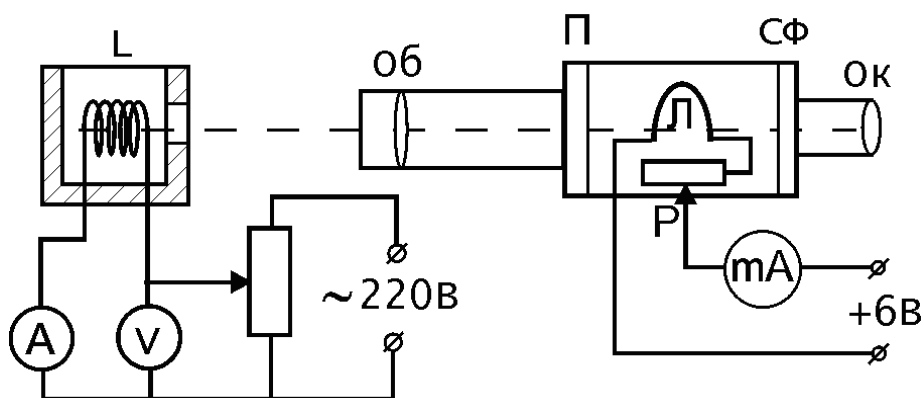


Рис. 2

Мощность электрического тока N , подводимого к лампе, расходуется на нагревание окружающих тел путем теплопроводности и конвекции, а также выделяется в виде излучения, т. е.

$$N = N_1 + \Phi,$$

где N_1 – мощность, идущая на нагревание окружающих тел путем теплопроводности и конвекции; Φ – поток лучистой энергии.

При высоких температурах мощность, расходуемая на излучение, много больше мощности, теряемой вследствие теплопроводности и конвекции. В результате $N \cong \Phi$ и согласно формуле (10) подводимая к лампе мощность пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры.

Оптический пирометр ЛОП-72 – это телескоп, состоящий из объектива Об, окуляра Ок, оправки которых закреплены в корпусе пирометра. Основной частью пирометра является пирометрическая лампа Л с дугообразной нитью, накал которой можно изменять реостатом Р с секциями грубой и тонкой регулировки.

Питание пирометрической лампы осуществляется от источника стабилизированного тока напряжением 6 В. Ток, идущий через лампу, измеряется миллиамперметром мА.

Излучение от исследуемого источника L попадает в объектив прибора и проектируется на плоскость нити лампы Л пирометра. Чтобы при измерениях нить пирометрической лампы не перекаливать, свет пропускают через поглощающие стекла П, изменяющие интенсивность потока в известное число раз. В окулярную оправку пирометра помещен также красный светофильтр СФ, пропускающий узкий интервал волн ($\lambda = 0,65$ мкм), поэтому через окуляр нити лампы пирометра и исследуемого источника видны в красном свете, что упрощает сравнение яркостей.

Изменяя накал пирометрической лампы реостатом Р, можно добиться равенства яркостей обеих нитей и измерить ток, проходящий при этом через лампу пирометра.

Температуру источника определяют, пользуясь градуировочным графиком пирометра в виде зависимости температуры нити пирометрической лампы от силы тока через нее $t^{\circ}\text{C} = f(I)$ (рис. 3).

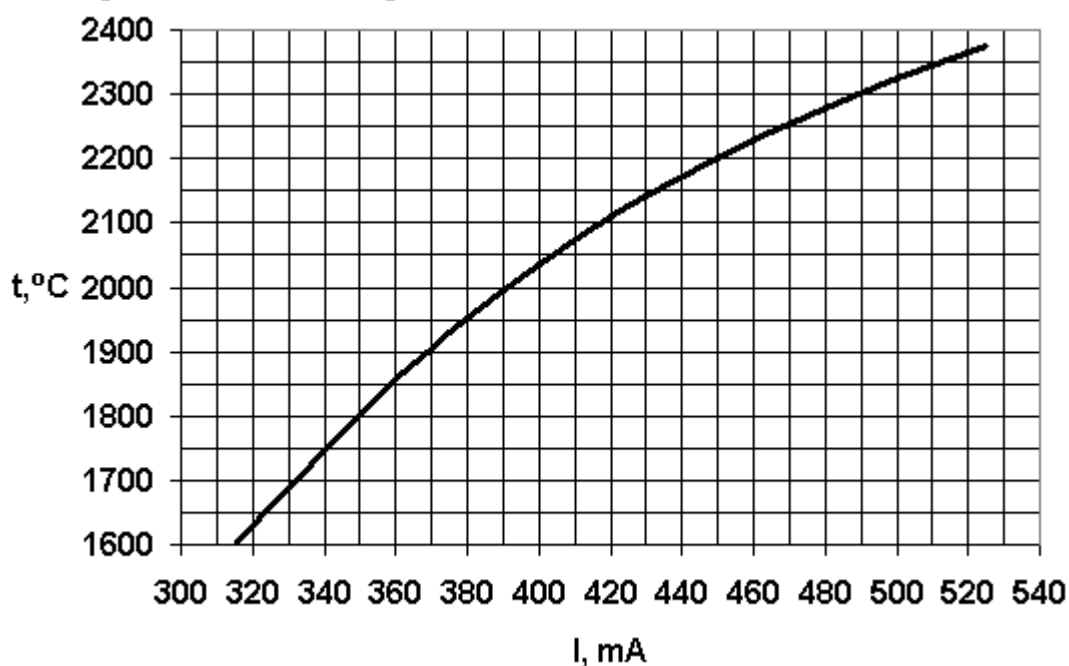


Рис. 3

Порядок выполнения работы

1. Снять защитные чехлы с объектива и окуляра пирометра.
2. Включить источник питания пирометрической лампы.
3. Увеличивая накал нити реостатом P , обеспечить видимое свечение нити.
4. Перемещая окуляр пирометра $Ок$, добиться четкого изображения нити.
5. Включить в сеть цепь питания кинопроекционной лампы L , установить рекомендуемое начальное напряжение ($80 В$).
6. Измерить по амперметру ток, протекающий через лампу. Значения тока и напряжения записать в таблицу.
7. Навести пирометр на исследуемый объект (спираль кинопроекционной лампы) так, чтобы его изображение перекрывало отверстие диафрагмы и располагалось в центре. Поставить ручки сектора поглотителя в положение П-3, сектора светофильтра – в положение С-3.
8. Вращением объектива $Об$ добиться четкого изображения исследуемого объекта L на фоне пирометрической лампы $Л$.
9. Регулируя накал нити пирометрической лампы с помощью реостата P , добиться одинаковой яркости ее с изображением исследуемого объекта.
10. Измерить силу тока $I_{пир}$, протекающего по нити пирометрической лампы, и записать в таблицу в mA .
11. Сбить настройку яркости нити пирометрической лампы с помощью реостата P и выполнить п. 9 и 10 еще 4 раза.
12. Изменить напряжение на кинопроекционной лампе в соответствии с рекомендациями (U от 80 до $140 В$, $\Delta U = 10 В$) и для каждого напряжения выполнить п. 6, п. 9–11. Результаты занести в таблицу.

Таблица результатов эксперимента

№ п/п	Сила тока I , А	Напря- жение U , В	Мощность $N = IU$, Вт	Пирометри- ческий ток $I_{пир}$, mA	Темпе- ратура t , °C	Абсолютная температура T , K	T^4 , K ⁴
1				$I_1 =$ $I_2 =$ $I_3 =$ $I_4 =$ $I_5 =$ $\langle I_{пир} \rangle =$			
2 и т.д.							
7				$I_1 =$ $I_2 =$ $I_3 =$ $I_4 =$ $I_5 =$ $\langle I_{пир} \rangle =$			

Обработка результатов эксперимента

1. Для каждого напряжения накала кинопроекторной лампы рассчитать среднее значение силы тока в пирометрической лампе $\langle I_{\text{пир}} \rangle$.
2. Пользуясь градуированным графиком, по среднему значению силы тока $\langle I_{\text{пир}} \rangle$ определить температуру t °C нити накала лампы (см. рис. 3).
3. Рассчитать абсолютную температуру T нити лампы и возвести полученное значение в четвертую степень. Результаты записать в таблицу.
4. Рассчитать мощность электрического тока в проекционной лампе N .
5. Построить график зависимости $N(T^4)$.

Результат работы

Сделать вывод о выполнении закона Стефана-Больцмана.

Контрольные вопросы

1. Какова цель данной работы?
2. Дать определение понятий: световой поток, энергетическая светимость, испускательная и поглощательная способность, яркость.
3. Сформулировать закон Стефана-Больцмана. В чем заключается проверка закона Стефана-Больцмана?
4. Сформулировать закон Вина.
5. Как изменяется спектральный состав излучения нити накала лампы при увеличении ее температуры?
6. Почему в пирометре установлен светофильтр красного цвета? Можно ли его заменить синим?
7. Сформулировать закон Кирхгофа.
8. Какая температура называется яркостной?
9. Абсолютно черное и серое тела имеют одинаковую яркость. Температура какого тела выше?
10. С помощью кривой распределения энергии в спектре абсолютно черного тела (см. рис. 1) объяснить, почему КПД ламп накаливания очень мал.

Библиографический список

1. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. М.: Высш. шк., 2003. § 197–201.
2. Савельев, И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. М.: Наука, 1992. Т. 3. § 49–54.

Лабораторная работа № 6-1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АКТИВНОСТИ РАДИОАКТИВНОГО ПРЕПАРАТА И МАКСИМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ β -ЧАСТИЦ

Цель работы: определение активности радиоактивного препарата и максимальной энергии β -излучения данного изотопа.

Приборы и принадлежности: источник β -излучения $^{90}_{38}\text{Sr}$ на подложке, блок детектирования БДБ 2, измеритель скорости счета УИМ 2-2, набор поглощающих фильтров на алюминиевой или медной фольге.

Активность радиоактивного препарата и особенности β -распада

Активностью радиоактивного препарата называется величина, численно равная числу распадов в единицу времени:

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N, \quad (1)$$

где dN – число распадов за время dt ; λ – постоянная радиоактивного распада; N – число нераспавшихся ядер препарата к данному моменту времени.

Так как по **закону радиоактивного распада**

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

то выражение (1) можно переписать в виде

$$A = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t}, \quad (3)$$

где A – активность в данный момент времени t , A_0 – активность препарата в начальный момент времени.

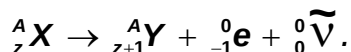
Активность измеряется в беккерелях ($1 \text{ Бк} = 1 \text{ расп/с}$) или в специальных единицах – кюри ($1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$).

Продолжительность жизни радиоактивного изотопа характеризуется **периодом полураспада** $T_{1/2}$, равным времени, в течение которого распадается половина первоначального количества ядер. Из формулы (2) при $t = T_{1/2}$ и $N = \frac{1}{2} N_0$ следует выражение $\frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}}$, откуда

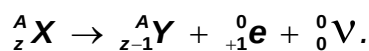
$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}.$$

Понятие β -распада объединяет три вида ядерных превращений: **электронный β^- -распад, позитронный β^+ -распад и электронный захват**.

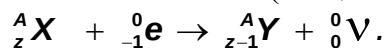
Электронный β -распад протекает по схеме



Позитронный β -распад, протекающий при искусственной радиоактивности, описывается реакцией

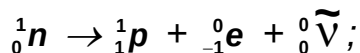


Третий вид β -распада – электронный захват – заключается в том, что ядро поглощает один из электронов своего атома (чаще всего с К-оболочки):



При β -распаде в ядрах радиоактивного препарата происходят взаимные превращения нейтронов и протонов по следующим схемам:

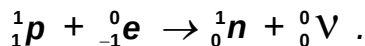
при электронном β -распаде:



при позитронном β -распаде:



при электронном захвате:



Особенностью β -распада является то, что энергетический спектр β -частиц является непрерывным, т. е. кинетическая энергия вылетающих электронов или позитронов меняется в пределах от 0 до некоторого максимального значения E_{max} (рис. 1). Среднее значение энергии β -частиц равно примерно $\frac{1}{3}E_{max}$.

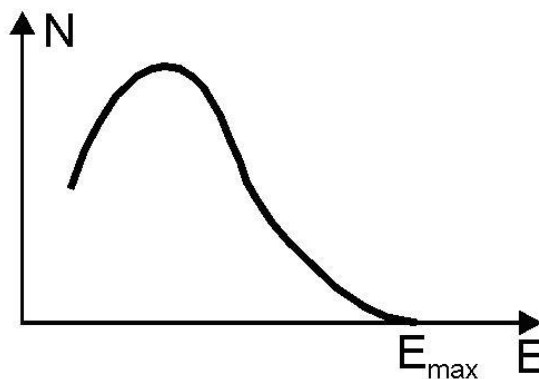


Рис. 1

Величина максимальной энергии E_{max} , называемая верхней границей β -спектра, представляет собой константу, характерную для каждого радиоактивного изотопа. С помощью этой характеристики можно идентифицировать неизвестные изотопы.

При прохождении через вещество β -частицы теряют свою энергию постепенно в результате многих последовательных столкновений, часть из которых приводит к ионизации атомов. Так как пробеги β -частиц в веществе сильно флуктуируют, то по пробегу одного электрона невозможно судить о его энергии. Но в случае измерения пробега большого числа электронов определение энергии оказывается возможным. Для этого определяют зависимость числа частиц, прошедших через вещество-поглотитель, от толщины поглощающего слоя и строят кривую поглощения, откладывая по оси абсцисс толщину поглощающего слоя, а по оси ординат — соответствующее число частиц (интенсивность излучения). Прямолинейный участок спада кривой поглощения продолжают до пересечения с осью абсцисс, который определяет так называемый экстраполированный пробег. При расчете величины максимальной энергии электронов по значению экстраполированного пробега электронов в веществе используют различные эмпирические зависимости. В частности, диапазон энергий, реализуемых в данной лабораторной работе, позволяет использовать формулу Фламмерсфильда:

$$E_{max} = \sqrt{3,69\Delta^2 + 0,81\Delta}, \quad (4)$$

где энергия β -частиц E_{max} выражена в МэВ, а их пробег Δ — в $\text{г}/\text{см}^2$, причем

$$\Delta = d_{экс}\rho, \quad (5)$$

где $d_{экс}$ — экстраполированный пробег в см, ρ — плотность материала в $\text{г}/\text{см}^3$.

Описание экспериментальной установки и методики измерений

Экспериментальная установка (рис. 2) состоит из основания 1 со стойкой 2, по которой может перемещаться подвижный столик 3, измерительной штанги 4 с сантиметровыми делениями и блока детектирования 5, присоединенного высоковольтным кабелем к измерителю скорости счета 6. На заданной высоте столик фиксируется с помощью винта 7. Точечный источник β -частиц с защищающим экраном 8 на подложке 9 помещается в пазы 10 столика излучающей поверхностью вниз (в направлении блока детектирования 5).

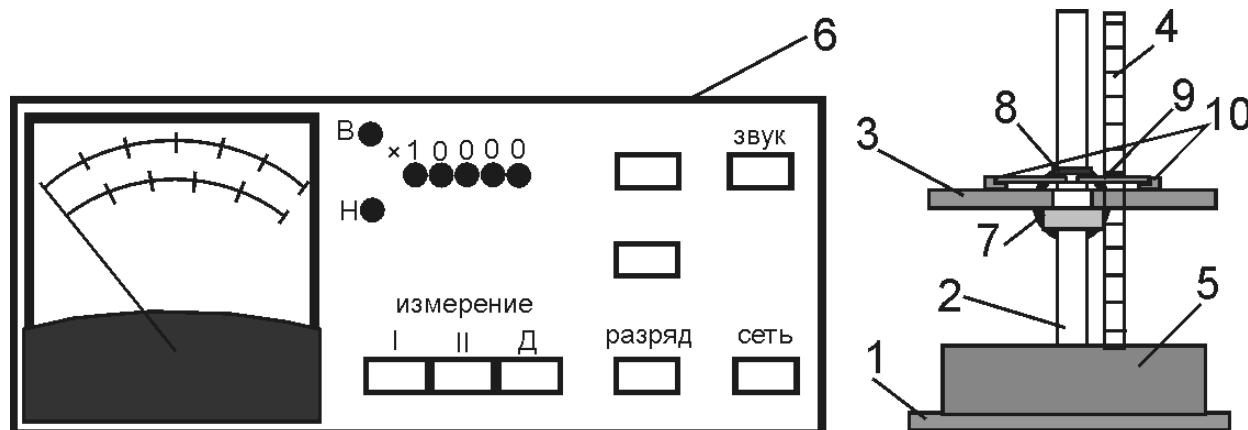


Рис. 2

В данной лабораторной установке β -частицы регистрируются блоком детектирования, который укомплектован пятью счетчиками Гейгера, каждый из которых представляет собой цилиндрический конденсатор, помещенный в стеклянную или металлическую оболочку (рис. 3). Оболочка заполнена газом под давлением порядка 100 мм рт. ст. При таком давлении длина свободного пробега β -частиц достаточно велика, что облегчает ударную ионизацию газа. Между электродами счетчика приложено значительное напряжение, близкое к пробивному. Попадая в пространство между электродами счетчика заряженная частица вызывает ионизацию газа. Возникающие при ионизации электроны ускоряются электрическим полем и производят дальнейшую ионизацию, в результате происходит кратковременный разряд. При прохождении тока через счетчик часть напряжения падает на сопротивлении, при этом напряжение между электродами уменьшается и разряд гасится.

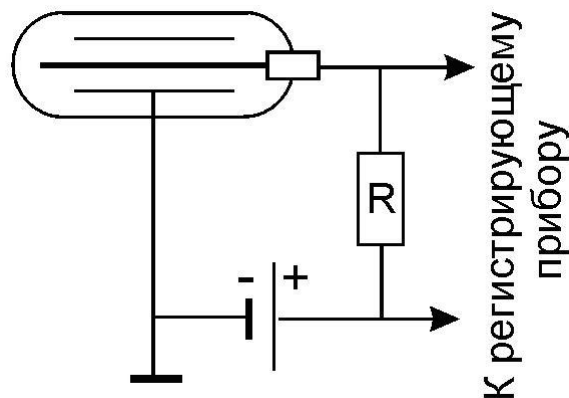


Рис. 3

Импульс тока, возникающий при прохождении частицы через счетчик, усиливается и поступает в измеритель скорости счета, который определяет число частиц, зарегистрированных блоком детектирования в одну секунду. Ско-

рость счета регистрируется стрелочным прибором на передней панели измерителя по одной из двух шкал – верхней или нижней. Переключение шкал происходит автоматически, при этом высвечивается индикатор «В» или «Н». Справа от стрелочного прибора расположены светодиодные индикаторы измерений: $\times 1$, $\times 10$, $\times 100$, $\times 1\,000$, $\times 10\,000$. Таким образом, показания стрелочного прибора, снятые с рабочей шкалы («В» или «Н»), нужно умножить на соответствующий множитель (от 1 до 10 000).

Очевидно, что не все β -частицы, испускаемые радиоактивным препаратом во всех направлениях, могут быть зарегистрированы блоком детектирования, а только те из них, которые вылетают из препарата по направлению к окошку блока детектирования. Но даже из этих β -частиц часть поглощается воздухом, защитными покрытиями препарата и счетчиков. Поэтому число β -частиц N , зарегистрированное измерителем скорости счета в единицу времени, составляет лишь часть от общего числа частиц N_0 , испускаемых препаратом:

$$N = C \cdot N_0, \quad (6)$$

Таблица 1

<i>h, дел.</i>	<i>$C \cdot 10^{-3}$</i>	<i>$\frac{1}{C}$</i>
6	9,28	107,7
7	10,7	93,7
8	12,4	84,9
9	14,4	69,4
10	16,9	59,1
11	20,0	49,9
12	24,0	41,7

где C – коэффициент, зависящий для данной установки от высоты расположения β -препарата h над блоком детектирования. Значения коэффициента C приведены в табл. 1.

Кроме того, в процессе измерений необходимо учитывать естественный фон – постороннее излучение, регистрируемое счетчиком. Источником фона могут быть соседние работающие установки, космические лучи, радиоактивные превращения в земной коре и

т.д. Очевидно, что фон должен быть исключен из числа зарегистрированных счетчиком частиц.

В результате активность препарата следует рассчитывать по формуле

$$A = \frac{1}{C} (N - N_{\phi}), \quad (7)$$

где N – показания измерителя скорости счета с^{-1} ; N_{ϕ} – естественный фон.

Порядок выполнения работы

Внимание! Все управляющие операции в компьютерной модели лабораторной работы осуществляются *однократным щелчком* левой кнопки мыши.

Упражнение 1. Измерение естественного фона

1.1. Подключить блок детектирования к измерителю скорости счета, щелкнув на нем клавишу I (рис. 4).

1.2. Включить измеритель скорости счета, нажав клавишу СЕТЬ (рис. 4).

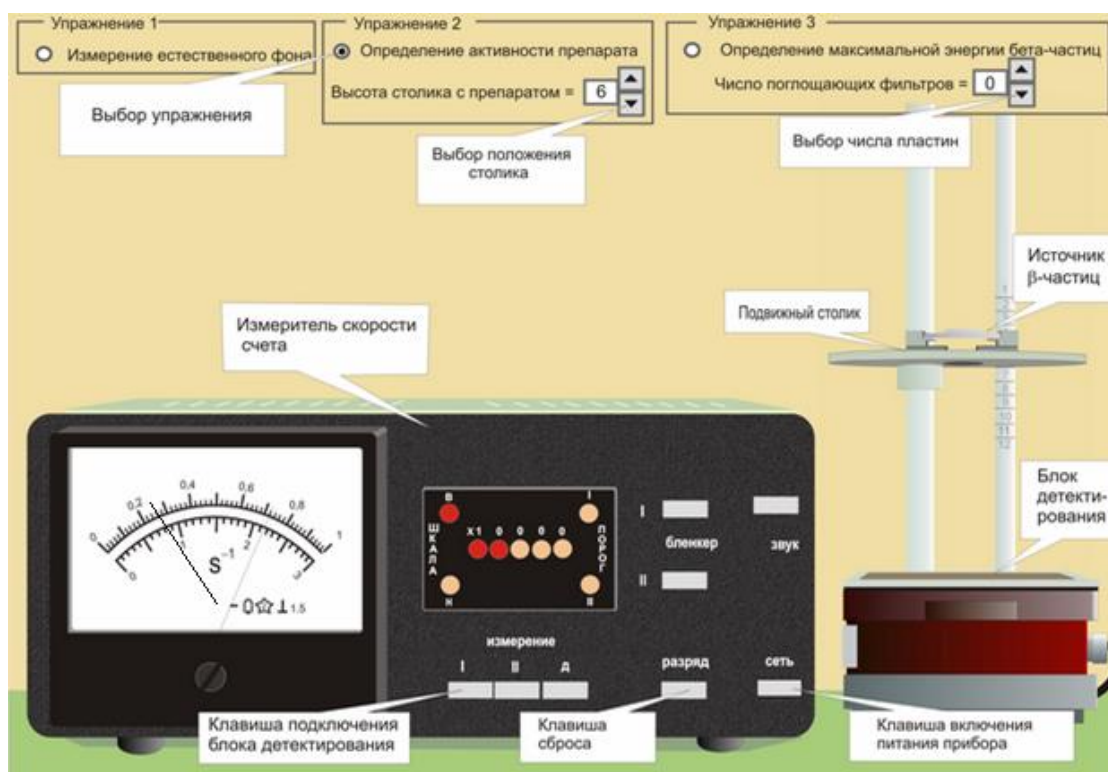


Рис. 4

1.3. Щелкнуть по переключателю упражнений «Измерение естественного фона» левой кнопкой мыши (рис. 4 и 5).

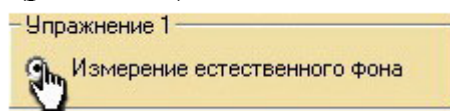


Рис. 5

1.4. Нажать клавишу РАЗРЯД. Установившееся в течение 30 с показание скорости счета по стрелочному прибору с учетом индикаторов шкал «В» или «Н» и множителей (см. рис. 4) должно соответствовать естественному фону.

1.5. Измерение по п. 1.4 повторить еще два раза. Результаты измерений $N_{\phi 1}$, $N_{\phi 2}$, $N_{\phi 3}$ занести в табл. 2.

Таблица 2

$N_{\phi 1}$	$N_{\phi 2}$	$N_{\phi 3}$	N_{ϕ}

Упражнение 2. Измерение активности препарата

2.1. Щелкнуть по переключателю упражнений «Определение активности препарата» левой кнопкой мыши (см. рис. 4). При этом радиоактивный препарат установится в пазах на круглом столике установки излучающей поверхностью вниз.

2.2. С помощью полосы прокрутки установить столик на высоте, соответствующей 6-му делению шкалы (см. рис. 4).

2.3. Нажать клавишу **РАЗРЯД**. Установившееся в течение 30 с показание скорости счета N_i по стрелочному прибору с учетом индикаторов шкал «В» или «Н» и множителей записать в табл. 3.

2.4. Произвести еще не менее четырех измерений скорости счета на других высотах в интервале от 7-го до 12-го делений шкалы аналогично п. 2.2–2.3.

Таблица 3

№ п/п	h_i , дел.	N_i , с ⁻¹	$1/C_i$	A , с ⁻¹	ΔA_i	ΔA_i^2
1						
2						
3						
4						
5						

$A_{cp} =$

$\Sigma \Delta A_i^2 =$

Упражнение 3. Определение максимальной энергии β -частиц

3.1. Установить столик с радиоактивным препаратом на высоту, соответствующую 12-му делению шкалы.

3.2. Щелкнуть по переключателю упражнений «Определение максимальной энергии бета-частиц» левой кнопкой мыши (рис. 4).

3.3. Измерить скорость счета N_1 в отсутствие поглощающих фильтров (аналогично п. 2.3). Записать результат в табл. 3.

3.4. С помощью полосы прокрутки поместить на столик под источник β -частиц одну пластинку-фильтр (см. рис. 4). Записать толщину пластинки в табл. 4. *Материал и толщина пластинки задаются преподавателем (медь, $d = 0,08$ мм).*

3.4. Измерить скорость счета N_2 . Записать результат в табл. 4.

3.5. Повторить измерения скорости счета N_i , добавляя по одной пластинке-фильтру и записывая суммарную толщину фильтров d_i и соответствующую скорость счета N_i в табл. 4.

Таблица 4

№ п/п	Число пластинок-фильтров i	Суммарная толщина фильтров d_i , мм	Скорость счета N_i , с ⁻¹	$N_i^* = N_i - N_{\phi}$
1	0	0		
2	1			
и т.д.				
6	5			

Обработка результатов эксперимента

1. По данным табл. 2 рассчитать среднее значение естественного фона N_{ϕ} .

2. Для каждой строки табл. 3 по формуле (7) вычислить значение активности препарата A_i .

3. Рассчитать среднее значение активности препарата $\langle A \rangle$, доверительный интервал ΔA и относительную погрешность результата E (см. приложение 1).

4. На основании данных табл. 4 построить график зависимости скорости счета N_i^* от суммарной толщины поглощающих фильтров d_i .

5. Продолжить начальный прямолинейный участок графика $N(d)$ до пересечения с осью абсцисс и определить экстраполированный пробег $d_{экс}$. Записать результат в табл. 5.

6. По формуле (5) рассчитать экстраполированный пробег Δ в г/см², где $d_{экс}$ выражен в см, ρ – в г/см³.

7. По формулам (4) рассчитать максимальную энергию E_{max} частиц в МэВ и записать результат в табл. 5.

Таблица 5

Толщина одной пластинки, мм	Материал пластинок - фильтров	Плотность материала фильтров ρ , г/см ³	Экстраполированный пробег		Максимальная энергия β -частиц E_{max} , МэВ
			$d_{экс}$, см	Δ , г/см ²	

Результат работы

1. Записать полученное значение активности препарата в виде

$$A = \langle A \rangle \pm \Delta A ; \quad E = \dots \%$$

2. Сделать выводы по работе, сравнив экспериментальное значение энергии β -излучения радиоактивного препарата, используемого в данной работе, с табличным (см. приложение 3).

Контрольные вопросы

1. Что называется активностью радиоактивного препарата, от чего она зависит, в каких единицах измеряется?
2. Каков физический смысл постоянной радиоактивного распада?
3. Какой физический смысл периода полураспада?
4. Выведите закон радиоактивного распада.
5. Какие существуют типы β -распада?
6. Объясните принцип действия счетчика Гейгера при регистрации β -частиц.
7. Объясните метод определения активности препарата, применяемый в данной работе.
8. Каковы механизмы поглощения β -частиц при прохождении через вещество?
9. Почему энергетический спектр β -частиц сплошной, т. е. энергия меняется от 0 до E_{max} .
10. Как зависит поглощение β -частиц от плотности поглощающего вещества?

Библиографический список

1. Савельев, И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. М.: Наука, 1992. Т. 3. § 51.
2. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. М.: Высш. шк., 2003. § 255–263.

Лабораторная работа № 6-2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ γ-ИЗЛУЧЕНИЯ В ВЕЩЕСТВЕ

Цель работы: изучение закономерностей поглощения γ-лучей веществом, определение линейного коэффициента поглощения γ-лучей для свинца, алюминия и железа, определение энергии γ-излучения данного изотопа.

Приборы и принадлежности: источник γ-излучения в свинцовом контейнере, дозиметр ДБГ-01Н, набор свинцовых, алюминиевых и железных пластин.

Описание методики эксперимента

Гамма-излучение – это электромагнитное излучение с длиной волны менее 10^{-10} м, испускаемое возбужденными ядрами, например, при радиоактивном распаде или при ядерных реакциях.

Прохождение γ-лучей через вещество сопровождается их поглощением. Интенсивность γ-излучения убывает в поглощающей среде по **закону Бугера**:

$$J = J_0 e^{-\mu x}, \quad (1)$$

где J_0 – интенсивность излучения на входе в среду; J – интенсивность излучения, прошедшего поглощающий слой толщиной x ; μ – линейный коэффициент поглощения.

Часто вместо коэффициента поглощения для характеристики поглощательной способности вещества используется так называемая **толщина слоя половинного ослабления** $d_{0,5}$. Это толщина слоя, ослабляющего интенсивность γ-лучей в два раза. Из формулы (1) при $x = d_{0,5}$ и $J = 0,5 \cdot J_0$ следует выражение $0,5 = e^{-\mu d_{0,5}}$, откуда

$$d_{0,5} = \frac{\ln 2}{\mu}. \quad (2)$$

Линейный коэффициент поглощения μ и толщина слоя половинного ослабления $d_{0,5}$ не являются постоянными даже для одного и того же поглощающего вещества, а зависят от энергии γ-фотонов (рис. 1).

Причина этой зависимости в том, что поглощение γ-лучей веществом происходит в результате трех различных явлений: **фотоэффекта, комптоновского эффекта и образования электронно-позитронных пар**. С большой точностью можно считать, что полный коэффициент поглощения состоит из трех слагаемых:

$$\mu = \mu_{\phi} + \mu_{\kappa} + \mu_{\pi}, \quad (3)$$

где μ_{ϕ} , μ_{κ} , μ_{π} соответствуют перечисленным выше механизмам поглощения.

Фотоэффект имеет место при сравнительно малой энергии γ-фотона ($h\nu < 0,5$ МэВ). В области энергий от 0,5 до 2 МэВ вероятность фотоэффекта становится очень малой. Здесь преобладающую роль в поглощении играет

эффект Комптона. При $h\nu \geq 1,022$ МэВ в поле атомного ядра становится возможным процесс образования электронно-позитронных пар. Таким образом, этот процесс играет главную роль при больших энергиях γ -фотонов.

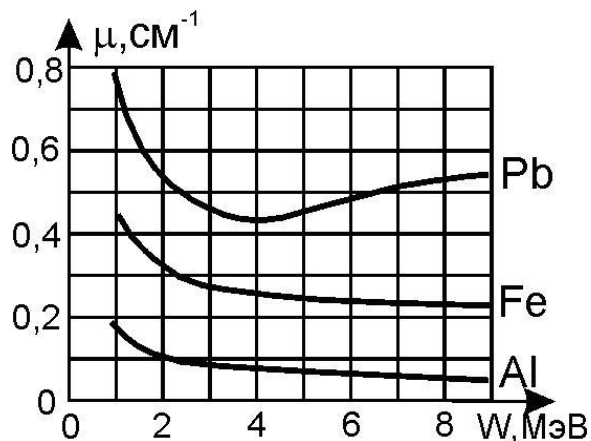


Рис. 1

Описание установки и принципа ее действия

Источником излучения служит препарат изотопа $^{60}_{27}\text{Co}$.

Экспериментальная установка (рис. 2, 3) состоит из источника γ -лучей 1 в свинцовом контейнере 9, набора поглощающих пластин 2 и дозиметра 3 марки ДБГ-01Н, регистрирующего излучение и помещенного в подставку 4, расположенных на переносной платформе 5.

Принцип работы дозиметра основан на преобразовании счетчиком Гейгера – Мюллера фотонного излучения в электрические импульсы, частота следования которых пропорциональна мощности излучения. Электрические импульсы преобразуются в цифровую информацию о значении мощности дозы, а также в звуковую сигнализацию.

Измерение и вывод значения мощности излучения осуществляются дозиметром автоматически двумя равными по времени циклами около 40 с. Цикл измерения мощности излучения характеризуется наличием точек после каждого разряда и набором информации на цифровом табло.

Цикл вывода значения мощности излучения, о начале которого сигнализирует исчезновение точек после 1, 2, 4 разрядов на цифровом табло (поддиапазон – 99,9), характеризуется неизменным значением информации цифрового табло.

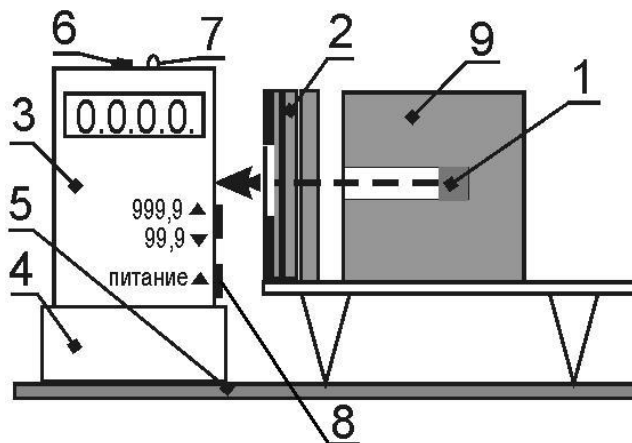


Рис. 2

Показания прибора в поддиапазоне 99,9, умноженные на 100, дают значение мощности излучения в микрорентген в час. В любой момент времени цикл измерения можно начать путем кратковременного нажатия кнопки 6 – КОНТРОЛЬ ПИТАНИЯ.

Порядок выполнения работы

Внимание! Все управляющие операции в компьютерной модели лабораторной работы осуществляются *однократным щелчком* левой кнопки мыши.

Упражнение 1. Измерение естественного (натурального) фона.

1.1. Включить дозиметр, щелкнув левой кнопкой мыши по движку переключателя 8 – ПИТАНИЕ (см. рис. 2, 3).

1.2. Переключатель поддиапазонов установлен в положение 99,9 по умолчанию.

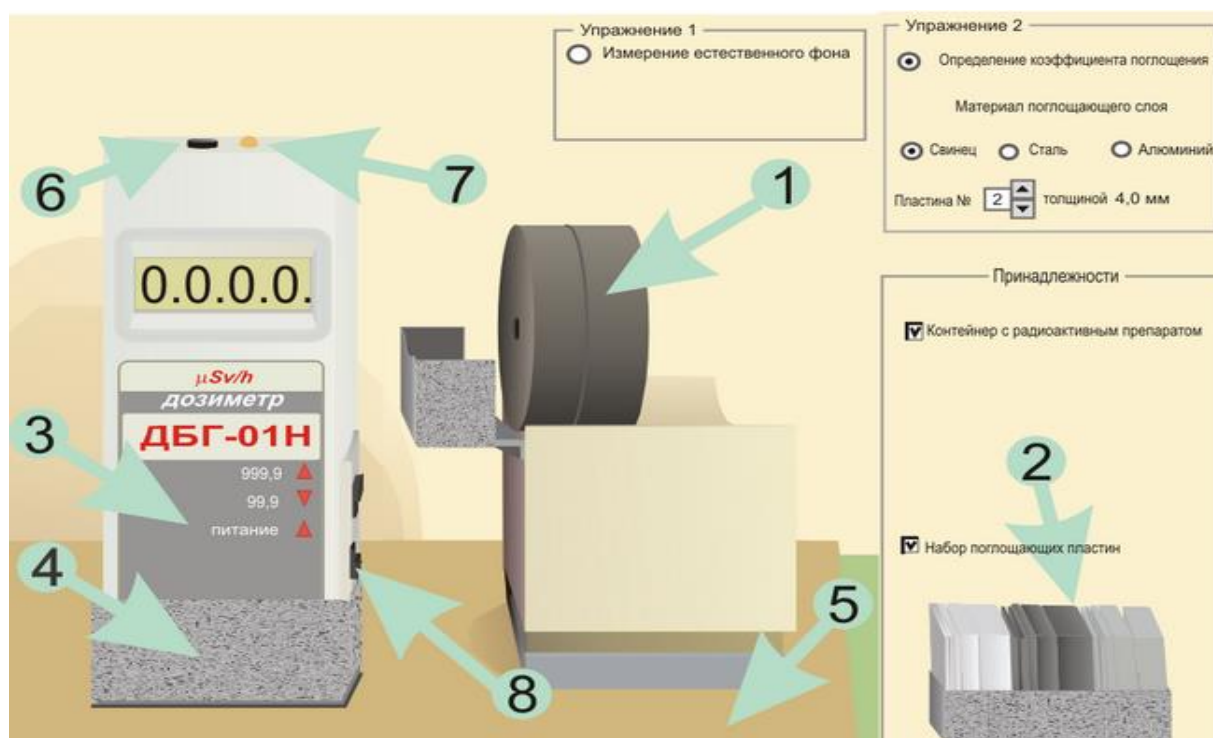


Рис. 3

1.3. Щелкнуть по переключателю упражнений «Измерение естественного фона» левой кнопкой мыши (рис. 3 и 4).

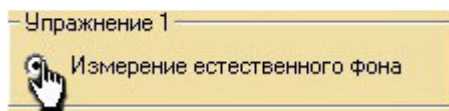


Рис. 4

1.4. Щелкнуть по кнопке 6 – КОНТРОЛЬ ПИТАНИЯ левой кнопкой мыши. При этом должен загореться световой индикатор 7 (см. рис. 2, 3).

1.5. Дождитесь исчезновения точек после 1, 2, 4 разрядов на цифровом табло. В отсутствие препарата радиоактивного излучения показания прибора

соответствуют уровню натурального фона. Значение записать в табл. 1.

1.6. Измерение по п. 1.4, 1.5 выполнить еще два раза. Результаты измерений занести в табл. 1.

Таблица 1

$N_{\phi 1}$	$N_{\phi 2}$	$N_{\phi 3}$	N_{ϕ}

Упражнение 2. Определение коэффициента поглощения γ -лучей веществом

2.1. Получите принадлежности 2 (см. рис. 3). Для этого в рамке «Принадлежности» установите флажки в окнах «Контейнер с радиоактивным препаратом» и «Набор поглощающих пластин», щелкнув по ним левой кнопкой мыши.

2.2. Щелкнуть по переключателю упражнений «Определение коэффициента поглощения гамма-лучей веществом» левой кнопкой мыши (см. рис. 3). При этом контейнер с радиоактивным препаратом установится на подставку выходным отверстием к дозиметру.

2.3. Выбрать материал поглощающих пластин (*задается преподавателем*), щелкнув по соответствующему переключателю левой кнопкой мыши (см. рис. 3).

2.4. С помощью полосы прокрутки (рис. 5 и 3) поместить между контейнером и дозиметром первую пластинку из выбранного материала. Толщину поглощающего слоя записать в сантиметрах в табл. 2.

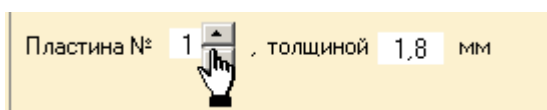


Рис. 5

2.5. Трижды измерить мощность γ -излучения, прошедшего через поглощающий слой (*аналогично п. 1.4, 1.5*). Результат занести в табл. 2.

Таблица 2

Материал	Число пластин	Толщина поглощающего слоя x , см	Показания дозиметра				Мощность излучения $N = N_{cp} - N_{\phi}$	$\ln N$
			N_1	N_2	N_3	N_{cp}		
	1							
	2							
	3							
	4							
	5							
	1							
	2							
	3							
	4							
	5							

2.6. Увеличить с помощью полосы прокрутки число пластин, т.е. толщину поглощающего слоя. Суммарную толщину поглощающего слоя записать в табл. 2.

2.7. Трижды измерить мощность γ -излучения, прошедшего через поглощающий слой. Результат занести в табл. 2.

2.8. Произвести измерения по п. 2.6, 2.7 для всего набора пластин.

2.9. Произвести измерения по п. 2.3–2.8 с пластинами из другого поглощающего материала (*задается преподавателем*).

Обработка результатов измерений

1. По данным табл. 1 рассчитать среднее значение естественного фона N_{ϕ} .

2. По данным табл. 2 рассчитать средние значения показаний дозиметра $N_{ср}$, мощность излучения N и ее натуральный логарифм $\ln N$.

3. Построить графики, откладывая по оси абсцисс толщину поглощающего слоя x в см, а по оси ординат – $\ln N$. Так как мощность излучения, регистрируемого установкой, пропорциональна его интенсивности, логарифмируя выражение (1) и заменяя J на N и J_0 на N_0 , получим уравнение

$$\ln N = \ln N_0 - \mu x, \quad (4)$$

где N – мощность излучения, прошедшего поглощающий слой толщиной x ; N_0 – мощность излучения радиоактивного препарата при отсутствии поглощающего вещества.

В координатах $\ln N$, x уравнению (4) соответствует прямая линия, тангенс угла наклона которой по абсолютной величине равен коэффициенту поглощения μ , т.е.

$$\mu = \left| \frac{\Delta(\ln N)}{\Delta x} \right|.$$

Построение графиков – см. приложение 4.

4. Определить по построенным графикам коэффициент поглощения μ для каждого материала. Результаты занести в табл. 3.

5. Рассчитать по формуле (2) толщину слоя половинного ослабления $d_{0,5}$ в метрах для исследованных материалов. Результаты занести в табл. 3.

6. По графику зависимости μ от энергии γ -квантов (рис. 1) для исследованных материалов найти энергию γ -лучей. Результаты занести в табл. 3.

7. Рассчитать и записать в табл. 3 среднее значение энергии γ -лучей данного радиоактивного источника.

Таблица 3

Материал	Линейный коэффициент поглощения μ , см ⁻¹	Толщина слоя половинного ослабления $d_{0,5}$, м	Энергия γ -лучей W , МэВ	$\langle W \rangle$, МэВ

Результат работы

Сделать выводы по работе, сравнив экспериментальное значение энергии γ -излучения радиоактивного препарата, используемого в данной работе, с табличным (см. приложение 3).

Контрольные вопросы

1. Объясните природу γ -излучения.
2. Какие процессы взаимодействия γ -фотонов с веществом приводят к поглощению γ -лучей? Охарактеризуйте каждый из них.
3. Запишите и объясните закон ослабления энергии γ -излучения при прохождении через вещество.
4. Что называется линейным коэффициентом поглощения? От чего он зависит?
5. При какой толщине слоя свинца интенсивность γ -излучения ослабляется в 4 и 8 раз?
6. При какой толщине слоя алюминия интенсивность γ -излучения ослабляется в 3 и в 6 раз?
7. По полученной в работе энергии γ -кванта W рассчитайте длину волны λ γ -излучения препарата ${}^{60}_{27}\text{Co}$.

Библиографический список

1. Савельев, И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. М.: Наука, 1992. Т. 3. § 8, 10, 51.
2. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. М.: Высш. шк., 2003. § 255–261.

Лабораторная работа № 6-3

Дозиметрия ионизирующих излучений

Цель работы: ознакомление с методами определения экспозиционной, поглощенной и эквивалентных доз излучения, приобретение навыков работы с дозиметрическими приборами.

Приборы и принадлежности: дозиметр.

Введение

Под ионизирующим излучением понимается любое излучение, взаимодействие которого со средой приводит к образованию электрических зарядов разных знаков. Действие ионизирующего излучения на живой организм интересовало мировую науку с момента открытия и первых применений радиоактивности. Вскоре после открытия рентгеновских лучей (1895 г.) было обнаружено их вредное действие на человека (радиационные ожоги) и возникла необходимость в количественной оценке степени радиационной опасности. Для измерения ин-

тенсивности рентгеновского излучения начали использовать фотографический эффект, тепловой эффект и химические методы. В 1928 г. в качестве основной единицы дозы на Втором Международном конгрессе радиологов рекомендована единица, получившая название «**рентген**». Появилась прикладная наука – дозиметрия. К радиационным установкам добавились атомные реакторы, ускорители, искусственные радиоактивные изотопы. Вопросы радиационной безопасности стали затрагивать не только работников атомной промышленности, но и широкие слои населения. В результате испытаний ядерного оружия в атмосфере радиоактивные материалы стали распространяться по всему земному шару. Испытания эти запрещены, но другие источники радиации остались. Ниже приведен перечень естественных и искусственных источников излучений, указан их относительный «вклад» в облучение человека.

Взаимодействие излучений с веществом

Ионизирующие излучения можно разделить на два больших класса: фотонное, представляющее собой электромагнитное излучение, и корпускулярное, состоящее из частиц. В зависимости от механизма образования электромагнитное излучение может быть тормозным, характеристическим, аннигиляционным или гамма-излучением. Примерами корпускулярного излучения могут служить α -, β - и нейтронное излучения. Заряженные α -, β -частицы теряют энергию и передают её веществу в основном в столкновениях с атомными электронами. Потери энергии на единице пути $\frac{dE}{dx}$ зависят от заряда частицы Ze и её скорости v , атомного номера Z и массового числа A материала поглотителя, плотности ρ и средней энергии на возбуждение и ионизацию атомов среды поглотителя:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi Ze^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 mv^2} N_A \frac{Z}{A} \rho \ln \frac{2mv^2}{I \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} \quad (1)$$

Заметим, что в формулу входит масса электрона m , а от массы частицы потери не зависят. При одной и той же энергии лёгкие частицы – электроны – обладают значительно большей скоростью, чем тяжёлые – протоны, альфа-частицы. Формула (1) показывает, что потери энергии электронов будут много меньше в этом случае, т. е. число возбуждённых атомов и образованных ионов в следе электрона относительно не велико. Так, в воздухе электрон с энергией 1 МэВ образует несколько десятков пар ионов на 1 см пути, а альфа-частица – несколько десятков тысяч пар. Интенсивные потери тяжёлых частиц приводят к малым пробегам в веществе. Под пробегом понимаем максимальную глубину в веществе, на которую может проникнуть частица.

Как показывают вычисления, учёт столкновений с ядрами атомов даёт поправку к формуле (1) около 1 %, т. е. потери энергии происходят в основном за счёт передачи её атомным электронам.

При столкновении с атомами заряженные частицы рассеиваются – изменя-

ют направление движения. При этом наблюдается обратная ситуация: взаимодействие с ядром атома существенно, и лёгкие частицы – электроны – рассеиваются значительно сильнее. Представление о зависимости интенсивности рассеяния от параметров частицы и вещества даёт формула Резерфорда, определяющая сечение рассеяния $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ заряженной частицы на ядрах с зарядом Ze .

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{4} \left(\frac{zZe^2}{4\pi\epsilon_0 m v^2} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}} (Nt), \quad (2)$$

где m – масса летящей частицы,
 θ – угол рассеяния,
 N – число ядер в единице объёма,
 t – толщина рассеивателя.

Формула справедлива для тонких мишеней, в которых в среднем происходит не более одного столкновения. Видно, что лёгкие частицы с малой скоростью значительно искривляют свой путь. Тяжёлые «снаряды» – альфа-частицы – движутся в основном в первоначальном направлении. Существенно ещё и то, что тяжёлые частицы – протоны, альфа-частицы – при столкновении с ядром могут передать ему значительный импульс и вызвать смещение атома в веществе, так как передача импульса определяется отношением масс частицы и ядра (m/M).

Высокоэнергетическое электромагнитное излучение – рентгеновское и гамма-излучение – непосредственно ионизации почти не производит, сначала происходит преобразование его энергии в энергию электронов. В области энергий до 10 МэВ наиболее существенное значение имеют такие процессы преобразования как фотоэффект, комптоновское рассеяние и эффект образования пар.

При фотоэффекте квант поглощается атомом и освобождается один из электронов атома. Энергия кванта $h\nu$ расходуется на вырывание электрона ϵ и сообщение ему кинетической энергии T_e :

$$h\nu = \epsilon + T_e.$$

Вероятность процесса пропорциональна ν^5 и обратно пропорциональна энергии кванта.

Комптон-эффект – это упругое столкновение фотона с одним из атомных электронов, имеет место, когда энергией связи электрона в атоме можно пренебречь ($h\nu_1 \gg \epsilon$). При этом часть энергии фотона передаётся электрону, рассеянный квант имеет меньшую частоту ν_2^1 :

$$h\nu_1 = h\nu_2^1 + T_e.$$

Вероятность комптоновского рассеяния пропорциональна числу электронов в атоме Z и имеет максимум в области энергий порядка 1 МэВ.

Эффект образования пар имеет место, если энергия первичного кванта больше удвоенной энергии покоя электрона:

$$h\nu > 2m_e c^2.$$

При столкновении с атомом образуется пара электрон-позитрон. Позитрон, замедлившись, аннигилирует с одним из атомных электронов. Таким образом, при этом эффекте энергия кванта преобразуется в энергию движения заряженных частиц и энергию аннигиляционного излучения.

Вероятность процесса пропорциональна z^2 и растёт с увеличением $h\nu$. В общем (при $h\nu > 2mc^2$) могут иметь место все три эффекта, но следует заметить, что при малых энергиях, особенно в тяжёлых материалах, преобладает фотоэффект, при больших - эффект образования пар. В лёгких веществах в диапазоне энергий 0,1–10 МэВ в большинстве случаев взаимодействия происходит комптоновское рассеяние.

Нейтронное излучение передаёт энергию в основном при упругих столкновениях с ядрами атомов. Как уже упоминалось, передача энергии пропорциональна отношению масс сталкивающихся частиц $m_{\text{п}}/M_{\text{я}}$, и поэтому наиболее эффективно нейтроны замедляются в лёгких веществах, особенно содержащих водород. Так же, как и тяжёлые заряжённые частицы, нейтроны могут вызывать смещение значительного числа атомов в веществе.

Основные дозиметрические величины и единицы их измерения

Повреждения, вызванные в живом организме излучением, изменения в материалах, облучаемых с целью получения новых свойств, будут тем больше, чем больше энергии оно передаёт тканям, материалам. Количество такой переданной облучаемому объекту энергии называют *дозой*: количество энергии излучения, поглощённое единицей массы облучаемого тела, называют *поглощённой дозой D*. Единицей измерения поглощённой дозы в системе СИ является Грей (Гр):

$$1 \text{ Гр} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Но эта величина не учитывает того, что при одинаковой поглощённой дозе альфа-излучение, как уже говорилось, гораздо опаснее для живого организма и производит большие радиационные нарушения чем бета- или гамма- излучение.

Если принять во внимание этот факт, то дозу следует умножить на коэффициент, отражающий способность излучения данного вида производить радиационные нарушения. Такой коэффициент K называют *коэффициентом качества излучения*. Пересчитанную таким образом дозу называют *эквивалентной дозой H*:

$$H = KD.$$

Единицей эквивалентной дозы в СИ является зиверт (Зв). Коэффициенты качества для некоторых типов излучений приведены в табл. 1. Из неё видно, что для слабоионизирующих бета- и гамма-излучений принято $K = 1$.

Таблица 1

Тип излучения	К
Фотонное излучение, электроны, позитроны	1
Протоны с энергией 5 МэВ	7
Тепловые нейтроны	3
Нейтроны с энергией 0,5 МэВ	10
Альфа-частицы	20

Довольно распространено использование внесистемных единиц поглощённой и эквивалентных доз. Приведём связь их с единицами СИ:

единица поглощённой дозы 1 рад = 0.01 Гр;

единица эквивалентной дозы 1 бэр = 0.01 Зв.

В литературе встречается ещё и такая единица дозы как рентген. Это единица так называемой *экспозиционной* дозы. Исторически она появилась первой, когда считали, что достаточно указать количество излучения, упавшего на объект, чтобы определить последствия облучения (экспозиция – то же, что выдержка под облучением). Количество прошедшего излучения определяли по ионизации, произведённой им в воздухе. Рентген – экспозиционная доза излучения, которое в 1 см³ воздуха образует $\sim 2 \cdot 10^9$ пар ионов. Позднее стала ясной необходимость введения поглощённой и эквивалентной доз. Приблизительно 1 рентген соответствует $0.88 \cdot 10^{-2}$ Гр.

Длительные исследования действия излучений на организм человека позволили установить «безопасное» значение эквивалентной дозы. Международной комиссией оно установлено равным 0.02 Зв в год для профессионалов, работающих с излучениями и проходящих регулярные медицинские обследования, и 0.005 Зв в год – для остального населения. Эти значения безопасны в том смысле, что современная медицина не может обнаружить ни немедленных, ни отдалённых последствий такого облучения.

В дозиметрии определено ещё и понятие *мощность дозы* – доза облучения (поглощённая или эквивалентная) за единицу времени. Если подсчитать количество часов в году, то легко определить, что безопасной для населения является мощность эквивалентной дозы 0.57 мкЗв/час.

Естественные и искусственные источники излучений

Основную часть облучения население земного шара получает от естественных источников радиации (рис. 1). Большинство из них таково, что избежать облучения от них совершенно невозможно. Разные виды излучений падают на поверхность Земли из космоса и поступают от радиоактивных веществ, находящихся в земной коре. Человек подвергается облучению двумя способами. Радиоактивные излучения могут находиться вне организма и облучать его снаружи (внешнее облучение) или же могут оказаться в воздухе, которым мы дышим, в пище или воде и попасть внутрь организма (внутреннее облучение).

Источники радиации

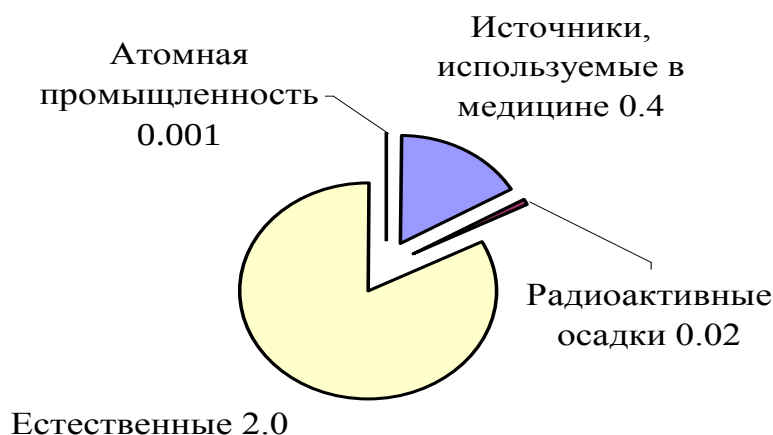


Рис. 1

Примерно 15 % годовой эквивалентной дозы создаётся космическим излучением, остальные 5/6 дозы обусловлены земными источниками. Основные естественные источники облучения указаны в табл. 2.

Таблица 2

Источник	Годовая доза мкЗв/год
Космическое излучение	~300
Наземное гамма-излучение породы	~320
Родон	~800
Внутреннее излучение ^{40}K	~300
Внутреннее излучение ^{14}C	~10
Прочие	~100
Суммарная доза	~1 800

Цифры в таблице требуют пояснений. Во-первых, указаны усреднённые значения. Уровни земной радиации для разных мест земного шара могут очень сильно отличаться друг от друга. В Бразилии, например, есть место, где уровень радиации в 800 раз превышает средний.

Родон – не имеющий вкуса и запаха тяжёлый газ (в 7.5 раз тяжелее воздуха). В организм человека он попадает с вдыхаемым воздухом, особенно в непроветриваемых помещениях. Родон образуется в земной коре в результате радиоактивного распада тяжёлых элементов и выходит на поверхность. Просачиваясь через фундамент и пол, родон накапливается в помещении. Концентрация его в закрытых помещениях в среднем в 8 раз выше, чем в наружном воздухе. Это лишний довод в пользу хорошего проветривания жилого помещения.

За последние несколько десятилетий человек создал несколько сот искусственных радионуклеидов и научился использовать энергию атома в самых разных целях: в медицине, для производства энергии и при обнаружении пожаров, для поиска полезных ископаемых и т.д. Всё это приводит к увеличению дозы облучения как отдельных людей, так и населения Земли в целом.

Индивидуальные дозы, получаемые людьми от искусственных источников, сильно отличаются. Разброс значений здесь больше, чем для естественных источников, что отражено в табл. 3.

Таблица 3

Источник	Годовая доза мкЗв/год
Медицинские процедуры (флюорография, обследования, лечение,...)	500–1 000
Радиоактивные осадки от ядерных взрывов	20
Атомная энергетика	1–2

Для искусственных источников легче установить контроль за получаемыми дозами. Все профессионалы, работающие с излучениями, имеют индивидуальные дозиметры.

Изменения в тканях при облучении

Воздействие ионизирующего излучения на ткани организма показано на рис. 2.

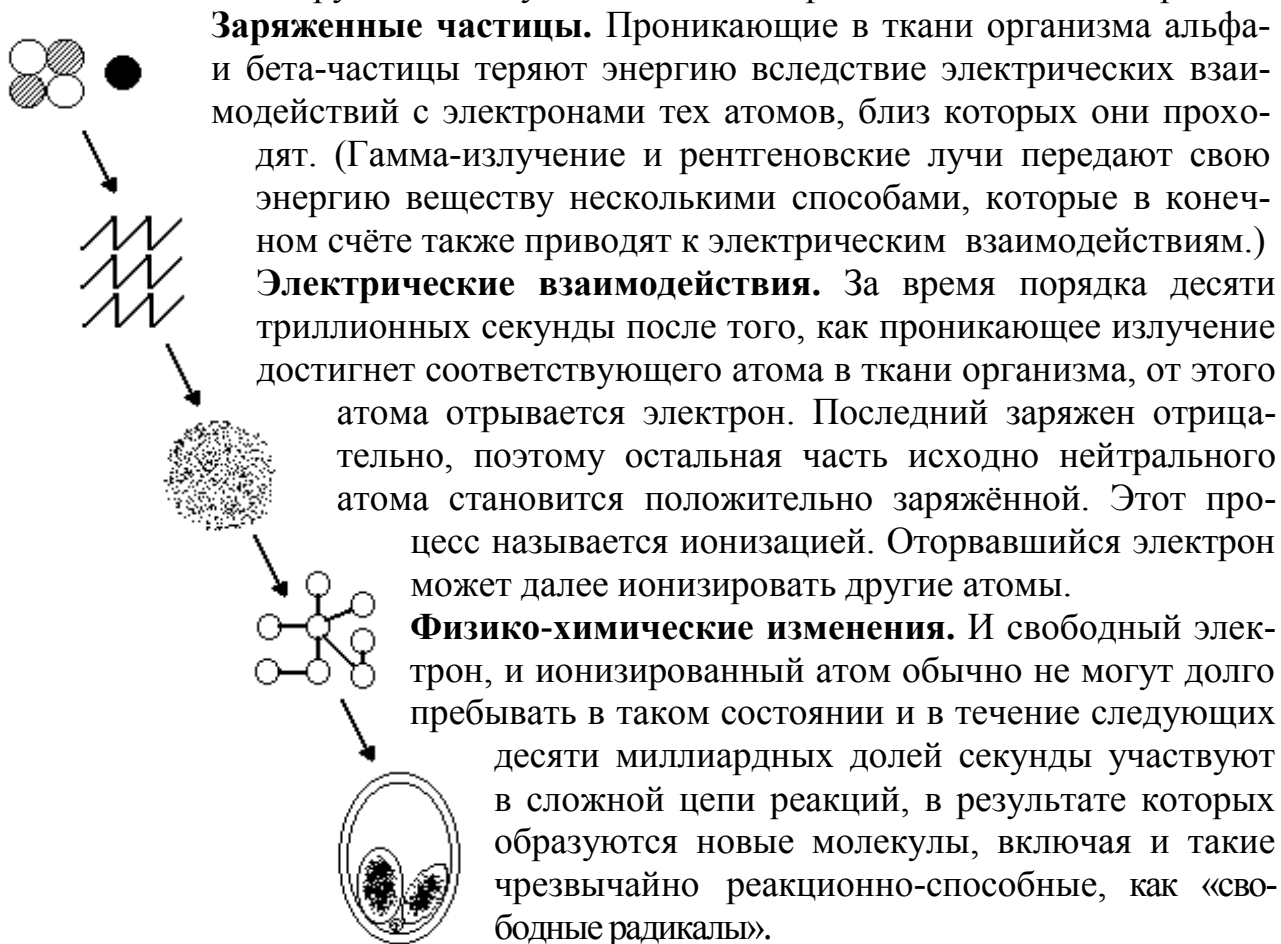


Рис. 2

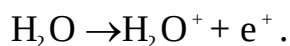
друг с другом, так и с другими молекулами и через цепочку реакций, ещё не изученных до конца, могут вызвать химическую модификацию важных в био-

логическом отношении молекул, необходимых для нормального функционирования клетки.

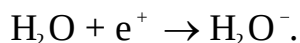
Биологические эффекты. Биохимические изменения могут произойти как через несколько секунд, так и через десятилетия после облучения и явиться причиной немедленной гибели клеток или таких изменений в них, которые могут привести к раку.

Любое излучение производит ионизацию и возбуждение атомов облучаемого материала. Заряженные частицы делают это непосредственно, а кванты электромагнитного излучения и нейтроны – через заряженные частицы, которые образуются в результате взаимодействий. Например, $C \rightarrow C^*$ – возбуждённый атом, или $C \rightarrow e^- + e^+$ – ион. Происходит это чрезвычайно быстро: за время, меньшее 10^{-12} с.

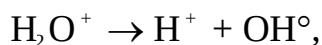
Но живая ткань состоит не из отдельных атомов, как кристаллы алмаза, а из молекул разной величины. Возьмём в качестве примера молекулы воды (70–90 % живой материи).



Электрон может быть захвачен другой молекулой:

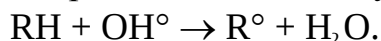


Ионизированные молекулы H_2O^+ , H_2O^- неустойчивы и диссоциируют:



Нейтральные OH° и H° имеют неспаренный электрон и называются *свободными радикалами* (в стабильных атомах и молекулах электроны объединены взаимодействием в пары с противоположно направленными спинами).

Свободные радикалы очень активны и вступают далее в реакции. Например, вырывают атом водорода из органических молекул:



Здесь R – остальная часть молекулы. Таким образом, представленная цепочка реакций демонстрирует процесс опосредованного повреждения органической молекулы, т. е. когда изначально энергия ионизирующей частицы была передана воде. Деструкция органической молекулы при прямом воздействии излучения также возможна, но статически это явление менее вероятно. Различные уровни разрушений живого организма, вызванные радиационным облучением, указаны в табл. 4.

Установлено, что наибольшей чувствительностью к излучению обладают ткани, клетки которых активно делятся: костный мозг, эпителий кишечника и кожи, наименьшей – неделящиеся: печень, мышцы, мозг, кости ...

Чтобы вызвать острое (быстрое) поражение организма, дозы облучения должны превышать определённый уровень (~1Гр). Однако низкая доза облучения не приводит к одинаковым последствиям во всех случаях.

Защитные свойства организма у людей сильно отличаются. При дозе

в 3–5 Гр 50 % облучённых умирает в течение одного-двух месяцев вследствие поражения клеток костного мозга. Известны случаи, когда интенсивное лечение предотвращало смерть у части облучённых (в радиационной аварии), получивших дозы более 6 Гр.

Сложны в оценке генетические последствия облучения. Установлено, например, что доза 1 Гр, полученная в течение 30 лет сокращает продолжительность жизни на 50 000 лет на каждый миллион живых новорожденных.

Таблица 4. Радиационные повреждения

Уровень	Радиационные эффекты
Молекулярный	Повреждение макромолекул - ферментов, РНК, ДНК
Внутриклеточный	Повреждение мембран, ядер, хромосом и т.д.
Клеточный	Подавление деления клеток, гибель клеток, злокачественные изменения (появление свойства неконтролируемого деления)
Ткани, органы	Нарушения в центральной нервной системе, костном мозгу, кишечном тракте, ...
Целый организм	Радиационное сокращение жизни, смерть

Схема лабораторной установки

Устройство дозиметра

Измерение поглощенной дозы основано, как правило, либо на ионизационном эффекте, производимом излучением, либо на химическом действии. Принцип ионизационного метода заключается в том, что в ионизационной камере или газоразрядном счётчике первичное ионизирующее излучение или вторичные электроны производят ионизацию газа, величину которой можно измерить. Фотохимическое действие излучений приводит к потемнению фотоэмульсии или окрашиванию специальных плёнок. Простейшими в применении являются дозиметры с газоразрядным счётчиком (принципиальная схема дозиметра представлена на рис. 3).

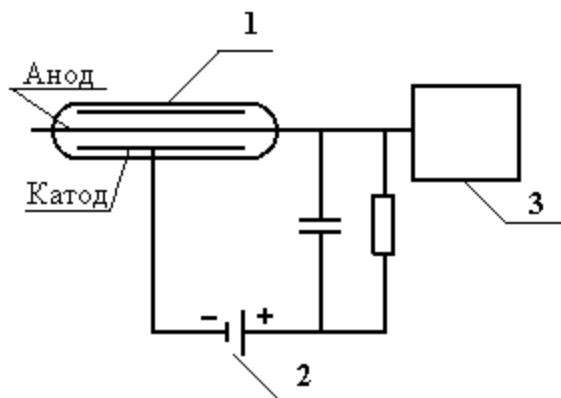


Рис. 3

Собственно счётчик представляет собой запаянную с торцов стеклянную или металлическую трубку, по оси которой натянута тонкая металлическая нить. Нить является анодом, а металлическая трубка или напылённый на внутреннюю сторону стекла электрод – катодом. Трубка наполнена инертным га-

зом. При образовании за счёт излучения пары ион – электрон электрон устремляется к аноду. В нарастающем к аноду электрическом поле электрон набирает энергию, достаточную для ионизации атомов газа. Теперь уже два электрона ионизируют атомы и т.д. Коэффициент усиления превышает миллион. Электроны за время порядка 10^{-6} с собираются на аноде, потенциал его понижается, разряд прекращается. Ионы дрейфуют к катоду, потенциал анода восстанавливается, и счётчик вновь готов зарегистрировать очередную частицу. Счётное устройство состоит из газоразрядного счётчика (1), блока питания (2) и счётного устройства (3), которое регистрирует электрические импульсы, т.е. резкие изменения потенциала анода, происходящие при регистрации частицы. Цифровой или стрелочный индикатор счётного устройства проградуирован в единицах мощности поглощённой дозы, так как скорость счёта пропорциональна ей.

Порядок работы

1. Ознакомьтесь с техническим описанием дозиметра ДБГ-01Н (см. приложение к лабораторной работе № 6-2).
2. Включите питание прибора.
3. Произведите замеры в местах определённых преподавателем, согласно табл. 5.
4. Сделайте заключение о радиационной обстановке в лаборатории ядерной физики и смежных помещениях.
5. Используя результаты фоновых измерений, рассчитайте среднюю дозу облучения, которую студент получает за сутки.

Таблица 5. Результаты измерений

Место замера	1	2	3	4	5	Среднее значение
Учебный класс						
Экран дисплея						
Подвал						
Холл 1-го этажа						
Холл 2-го этажа						
Чердак (верхний этаж)						
Пристройка						
Крыльцо						
Улица (у реки под мостом)						
Улица (оживленный перекресток)						

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте понятие активности.

2. Объясните, что такое поглощённая доза.
3. В чём разница между поглощённой дозой и эквивалентной дозой? Каковы их единицы измерения?
4. Разъясните физический смысл коэффициента качества.
5. В чём разница между рентгеном и радом?
6. Что такое мощность эквивалентной дозы?
7. Каковы основные естественные и искусственные источники излучений?
8. Каковы основные изменения, происходящие в тканях при внутреннем облучении человека?
9. Какие органы человека наиболее чувствительны к радиационному облучению?
10. Перечислите основные дозовые пределы в зависимости от категории облучаемых лиц.
11. Каковы средние значения внешнего фонового облучения человека?
12. В какой мере полученные в работе данные фонового облучения соответствуют нормам?
13. Отличаются ли значения фонового излучения в различных местах замера (по результатам выполнения данной работы)? Если да, объясните, чем могут быть обусловлены эти различия.
14. Какой смысл вкладывается в понятие «безопасное значение эквивалентной дозы»?
15. Каково предельное значение мощности дозы для населения (рассчитать)?

Библиографический список

1. Иванов, В.И. Курс дозиметрии / В.И. Иванов. М., Атомиздат.
2. Сборник «Радиация, дозы, эффекты, риск». М., Мир, 1988.

Лабораторная работа № 6-4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРВОГО ПОТЕНЦИАЛА ВОЗБУЖДЕНИЯ АТОМОВ МЕТОДОМ ЗАДЕРЖИВАЮЩЕГО ПОТЕНЦИАЛА В ОПЫТЕ ФРАНКА И ГЕРЦА

Цель работы: изучить метод определения потенциала возбуждения атомов с помощью задерживающего потенциала, определить первый потенциал возбуждения атома заданного химического элемента.

Теоретическое введение

Являясь микроскопической системой, атом подчиняется законам квантовой механики. Энергия атома квантуется, т.е. принимает дискретный ряд значений, соответствующих стационарным состояниям атома. Прямые и непосредственные доказательства реальности квантовых стационарных состояний атома

были получены из опытов Франка и Герца по возбуждению атомов электронным ударом.

Самый нижний (основной) уровень энергии атома соответствует состоянию атома с наименьшей энергией – его основному состоянию; в основном состоянии свободный атом, не подверженный внешним воздействиям, может находиться неограниченное время. Все остальные состояния атома обладают большей энергией и представляют возбужденные состояния. Из такого возбужденного состояния атом может перейти в менее возбужденное или основное состояние, испустив фотон. **Энергия испускаемого при переходе фотона** равна разности энергий соответствующих стационарных состояний:

$$h\nu = E_N - E_M,$$

где E_N и E_M – соответственно энергии стационарных состояний атома до и после излучения (поглощения); ν – частота фотона; h – постоянная Планка. Для перехода атома на более высокий уровень ему должна быть сообщена энергия, равная $(E_N - E_M)$, в результате чего атом возбуждается. Это может произойти либо в результате поглощения фотона, либо вследствие столкновения с другой частицей. Схему уровней энергии атома можно определить, изучая возбуждения атома электронным ударом, по значению энергии возбуждающих электронов. Минимальную разность потенциалов, которую должен пройти электрон, для того чтобы перевести атом из основного состояния в возбужденное, называют **потенциалом возбуждения** данного состояния.

Описание установки и методики эксперимента

Схема установки опыта Франка и Герца изображена на рис. 1. Трехэлектродная лампа (триод) наполнена разреженным газом (давление порядка 1 мм рт. ст.) Источником электронов является нагреваемый катод K . Ускоряющее напряжение на сетку подается от источника постоянного напряжения $B1$. Величина этого напряжения регулируется потенциометром R и измеряется вольтметром V . Между сеткой C и коллектором $Kл$ приложен задерживающий потенциал 0,5 В. Ток коллектора $I_{Kл}$ регистрируется микроамперметром mkA .

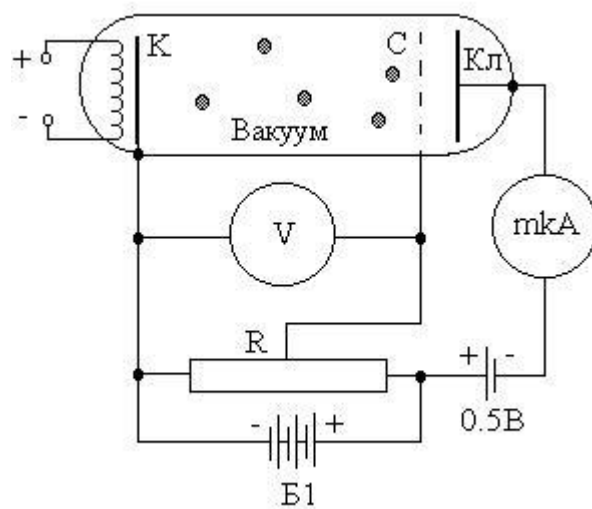


Рис. 1

Электроны, испускаемые разогретым катодом, ускоряются постоянным электрическим полем, созданным между катодом и сеткой лампы. Передвигаясь от катода к сетке, электроны сталкиваются с атомами. Если энергия электрона, налетающего на атом, недостаточна для того, чтобы перевести его в возбужден-

ное состояние, то возможны только упругие соударения, при которых электроны почти не теряют энергии, так как их масса в тысячи раз меньше массы атомов.

По мере увеличения разности потенциалов между катодом и сеткой энергия электронов увеличивается и оказывается достаточной для возбуждения атомов. При таких неупругих столкновениях кинетическая энергия налетающего электрона передается одному из электронов атома, вызывая его переход на верхний свободный энергетический уровень (возбуждение) или совсем отрывая его от атома (ионизация). Атом не находится долго в возбужденном состоянии и самопроизвольно возвращается в основное состояние. При этом переходе он отдает ранее полученную энергию в виде энергии светового кванта.

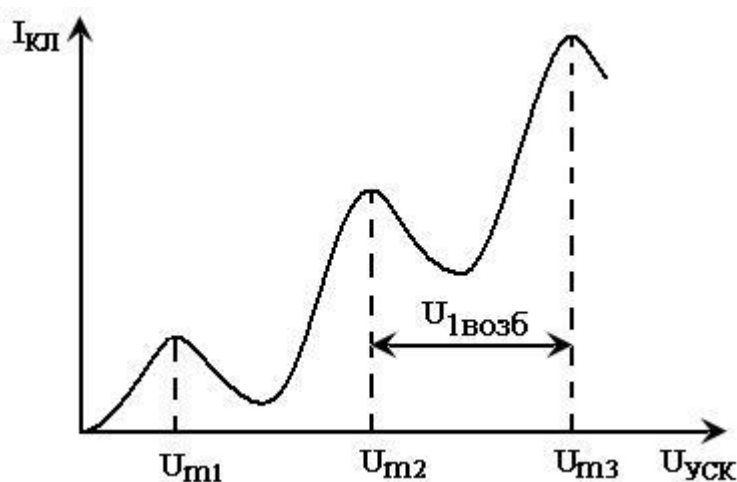


Рис. 2

Третьим электродом является коллектор. Между ним и сеткой поддерживается небольшое задерживающее напряжение $U_{зad}$. Ток $I_{кл}$, пропорциональный числу попадающих на коллектор за секунду электронов, измеряется микроамперметром. При увеличении потенциала между катодом и сеткой ток в лампе вначале растет (рис. 2). Однако, когда энергия электронов становится достаточной для возбуждения атомов,

ток коллектора $I_{кл}$ резко уменьшается. Это происходит потому, что при неупругих соударениях с атомами электроны почти полностью теряют свою энергию и не могут преодолеть $U_{зad}$. При дальнейшем увеличении потенциала сетки ток коллектора вновь возрастает: электроны, испытавшие неупругие соударения, успевают набрать энергию, достаточную для преодоления задерживающего потенциала.

Следующий спад тока $I_{кл}$ происходит в момент, когда часть электронов неупруго сталкивается с атомами два раза: первый — на середине пути, второй — у сетки. При достаточно высоком потенциале электрон может ускориться до энергии, достаточной для троекратного неупругого столкновения с атомом. В результате таких многократных столкновений на кривой $I_{кл} = f(U_{уск})$ (рис. 2) появляются максимумы. Наличие контактной разности потенциалов между катодом и сеткой искажает показания вольтметра, смещая кривую $I_{кл} = f(U_{уск})$ вправо или влево. Однако контактная разность потенциалов исключается, если энергию, соответствующую первому возбужденному состоянию, определять по интервалу между соседними максимумами $I_{кл}$.

Порядок выполнения работы

1. Нажать функциональную клавишу **F2** (на экране появится меню).

2. Поставить курсор на пункт **Лабораторные работы** клавишей ↓ и нажать клавишу Enter (на экране появится список лабораторных работ).

3. Поставить курсор на пункт **Лаб. работа 6-4** клавишей ↓ и нажать клавишу Enter (на экране появится меню).

4. Поставить курсор на пункт **Эксперимент** клавишей ↓ и нажать Enter.

На экране появится модель опыта Франка и Герца, в нижней части экрана – набор элементов: водород Н, ртуть Hg, калий К, натрий Na, гелий He, магний Mg, неон Ne.

5. Выбрать элемент (*задается преподавателем*), парами которого будет наполнен триод. Поставить курсор на нужный элемент клавишей ← и нажать Enter.

6. Снять зависимость тока коллектора $I_{кл}$ от $U_{уск}$. Экспериментальные данные занести в таблицу.

Внимание! Ускоряющее напряжение изменять до максимально возможного значения, меняя положение движка потенциометра от крайне левого до крайне правого положения.

Примечание. Показания вольтметра 01.8 соответствуют $U_{уск} = 1,8$ В; показания микроамперметра 075 соответствуют $I_{кл} = 75$ мкА.

Таблица результатов эксперимента

Элемент	№ п/п	1	2	3	4	5	и т.д.
	$U_{уск}, В$						
	$I_{кл}, мкА$						

Обработка результатов эксперимента

1. Построить график зависимости $I_{кл} = f(U_{уск})$.

2. Из графика определить U_{m3} и U_{m1} , соответствующие третьему и первому максимальным значениям тока $I_{кл}$ (см. рис. 2), и рассчитать первый потенциал возбуждения

$$U_1 = (U_{m3} - U_{m1}) / 2.$$

3. Сравнить полученное значение с табличным $U_{1таб}$ (см. приложение 2) и рассчитать относительную погрешность полученного результата:

$$E = \frac{|U_1 - U_{1табл}|}{U_{1табл}} 100 \ %.$$

Результат работы

1. Записать экспериментально определенное значение первого потенциала возбуждения U_1 для исследованного химического элемента.

2. Привести значение относительной погрешности эксперимента E в %.

Контрольные вопросы

1. Какое столкновение электрона с атомом называется упругим, неупругим?
2. Что называется потенциалом возбуждения атома?
3. Какой характер имеют столкновения электронов с атомами на разных участках кривой $I_{кл} = f(U_{уск})$?

4. С какой целью между коллектором и сеткой приложено задерживающее напряжение?

5. Какие основные выводы можно сделать на основании результатов опыта Франка и Герца?

Библиографический список

1. Савельев, И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. М.: Наука, 1992. Т. 3.
2. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. М.: Высш. шк., 2003. § 211.

Лабораторная работа № 6-5

ИЗУЧЕНИЕ ВОЛНОВЫХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОНОВ В ОПЫТЕ ДЭВИССОНА И ДЖЕРМЕРА

Цель работы: исследование корпускулярно-волновых свойств частиц на компьютерной модели опыта Дэвиссона и Джермера.

Введение

Гипотеза де Бройля. Наличие волновых свойств у частиц было предсказано Л. де Бройлем, который высказал мысль о том, что если электромагнитной волне с длиной λ можно поставить в соответствие частицу (фотон) с импульсом

$$p_{\Phi} = \frac{h}{\lambda},$$

где h – постоянная Планка, то и каждой частице, обладающей импульсом p , может быть сопоставлена некоторая волна с длиной

$$\lambda = \frac{h}{p}, \quad (1)$$

где p – импульс частицы.

Если волновые свойства присущи частицам, то электрон, ускоренный электрическим полем, приобретает кинетическую энергию

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{p^2}{2m} = eU \quad (2)$$

и импульс

$$p = \sqrt{2meU}, \quad (3)$$

где e и m – заряд и масса электрона; U – ускоряющее напряжение.

Тогда, согласно гипотезе де Бройля, электрон будет обладать свойствами волны с длиной

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meU}}. \quad (4)$$

Ускоряющие поля в обычных электронных приборах лежат в интервале $1 \div 10^4$ В. Соответствующие длины волн летящих электронов составляют $1 \div 0,01$ нм, т.е. находятся в диапазоне длин волн рентгеновских лучей.

Волновые свойства частиц (дифракция электронов) могут наблюдаться на дифракционной решетке с постоянной d порядка длины волны λ . Так же, как и для рентгеновских лучей, дифракцию электронов можно обнаружить с помощью кристаллической решетки (постоянная решетки d равна межплоскостному расстоянию кристалла). В опыте Дэвиссона и Джермера (рис. 1) при энергии электронов 54 эВ получался острый максимум для угла рассеяния (скольжения) $\Theta = 40^\circ$.

Из формулы Вульфа – Брэгга

$$2d \sin \Theta = n\lambda \quad (5)$$



Рис. 1

следует, что этому максимуму соответствует длина волны

$$\lambda = \frac{2d \sin \Theta}{n} = 0,16 \text{ нм.}$$

С другой стороны, подставив массу m , заряд электрона e и постоянную Планка h в уравнение (4), получаем:

$$\lambda = \frac{1,227}{\sqrt{U}} = 0,16 \text{ нм,}$$

что является хорошим доказательством правильности идеи де Бройля.

Световые волны и волны де Бройля. Рассмотрим движение фотонов (распространение света) через перегородку, содержащую две длинные узкие щели (опыт Юнга). Результаты опыта наблюдаем на экране (рис. 2). Построив

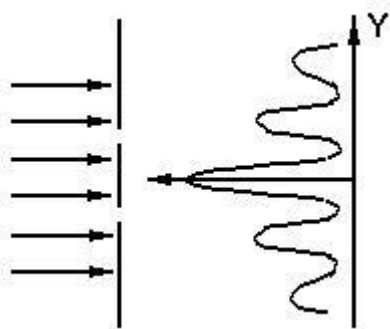


Рис. 2

зависимость интенсивности света от координаты Y , получим обычную дифракционную картину. Аналогичный опыт с дифракцией на двух щелях можно провести, «освещая» экран не светом, а потоком частиц (электронов). Детектор регистрирует дифракционные $\max$ и $\min$, положение которых может быть рассчитано по оптическим формулам, если каждому электрону сопоставить волну де Бройля.

Поместим детектор в точку, соответствующей главному максимуму. Закроем одну из щелей, тогда скорость счета электронов будет равна I . Откроем щель, закроем другую, скорость счета останется прежней I . Если откроем обе щели, то скорость счета возрастет в 4 раза. Если бы электроны летели через щели, как обычные частицы, то интенсивность возросла бы не в 4, а в 2 раза.

Полученный в опыте результат означает, что в прохождении электрона участвуют обе щели сразу.

Этот вывод становится более очевидным, если установить детектор в точку минимума дифракционной картины. В этом случае детектор не регистрирует ни одного электрона. Если же мы закроем одну из щелей, то минимума на прежнем месте не окажется. Электроны начнут попадать в детектор. Получается, что электроны «знают», открыты обе щели сразу или одна из щелей закрыта. Значит, электроны движутся так, как если бы их движение описывалось распространением соответствующей волны де Бройля.

Таким образом, между любыми частицами и фотонами нет принципиального различия: *частицы и фотоны являются микрообъектами, обладающими как свойствами частиц, так и волновыми свойствами.*

Описание установки и методики эксперимента

Схема установки Дэвиссона и Джермера изображена на рис. 3. Электронная пушка, мишень (монокристалл никеля Ni с постоянной решетки $d = 0,203$ нм) и детектор D заключены в откачанную трубку. Источником электронов является нагреваемый катод K . Ускоряющее напряжение на анод подается от источника постоянного напряжения $B1$. Величина напряжения регулируется потенциометром R и измеряется вольтметром V . Между анодом A и детектором D приложен задерживающий потенциал $0,5$ В. Детектор может перемещаться, так что угол Θ принимает различные значения. Ток рассеянных электронов регистрируется микроамперметром mkA .

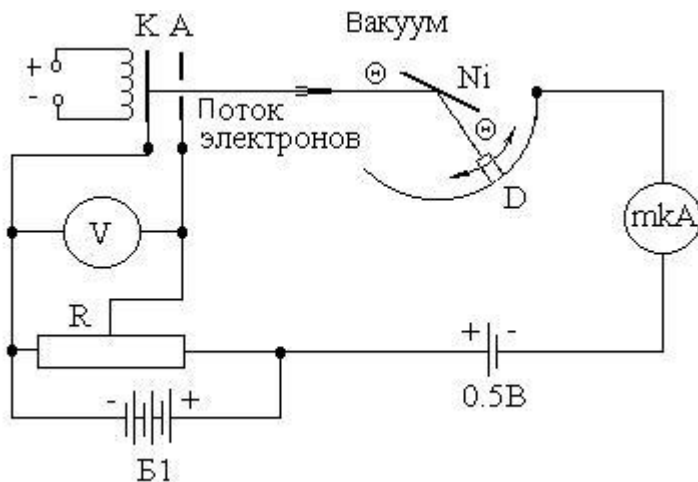


Рис. 3

Электроны, испускаемые раскаленным катодом, ускоряются разностью потенциалов, приложенной между анодом и катодом. Прошедшие через отверстие в аноде ускоренные электроны попадают на кристалл никеля и рассеиваются. При помощи детектора измеряется скорость счета рассеянных электронов. Электроны внутри детектора задерживаются полем, так что в измеряемый ток дают вклад только те электроны, которые были рассеяны с пренебрежимо малой потерей энергии.

В эксперименте, проведенном Дэвиссоном и Джермером, изучался ток электронов, отраженных от мишени, как функция ускоряющей разности потенциалов $U_{\text{УСК}}$ (энергии) (рис. 4), угла вылета Θ (рис. 5).

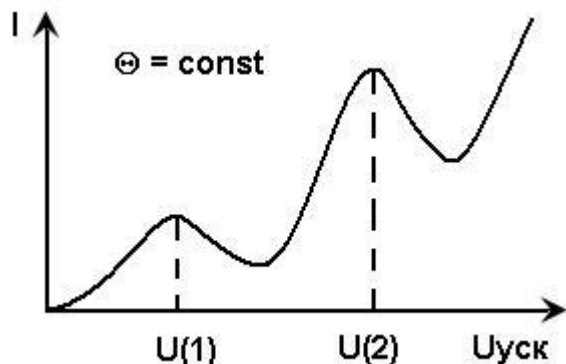


Рис. 4

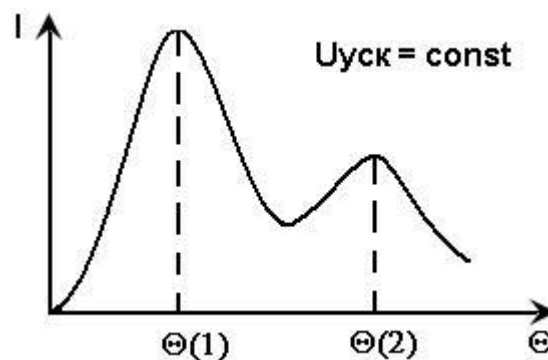


Рис. 5

Порядок выполнения работы

1. Нажать функциональную клавишу F2 (на экране появится меню).
2. Поставить курсор на пункт **Лабораторные работы** клавишей ↓ и нажать клавишу Enter (на экране появится список лабораторных работ).
3. Поставить курсор на пункт **Лаб. работа 6-5** клавишей ↓ и нажать Enter (на экране появится меню).

Упражнение 1. Исследование зависимости силы тока I от ускоряющей разности потенциалов $U_{\text{УСК}}$ при постоянном угле рассеяния Θ

- 1.1. Поставить курсор на пункт меню **Эксперимент 1** клавишей ↓, нажать Enter. На экране появится модель опыта Дэвиссона и Джермера.
- 1.2. Установить угол рассеяния Θ из диапазона $30 \div 70^\circ$ (задается преподавателем) клавишей ↑ и нажать Enter. Величину угла записать в табл. 1.
- 1.3. Снять зависимость силы тока I от $U_{\text{УСК}}$. Экспериментальные данные занести в табл. 1.

Внимание! Ускоряющую разность потенциалов изменять до максимально возможного значения (от 0 до 99 В), меняя положение движка потенциометра от крайне левого до крайне правого положения.

Таблица 1

$\Theta, ^\circ$	№ п/п	1	2	3	4	5	и т.д.
	$U_{\text{УСК}}, \text{В}$						
	$I, \text{мкА}$						

- 1.4. Нажать клавишу ESC для выхода в меню программы.

Упражнение 2. Исследование зависимости силы тока I от угла рассеяния Θ при постоянной ускоряющей разности потенциалов $U_{\text{УСК}}$

- 2.1. Поставить курсор на пункт меню **Эксперимент 2** клавишей ↓, нажать Enter. На экране появится модель опыта Дэвиссона и Джермера.
- 2.2. Установить ускоряющую разность потенциалов $U_{\text{УСК}}$ из диапазона $40 \div 99 \text{ В}$ (задается преподавателем) клавишей → и нажать Enter. Величину $U_{\text{УСК}}$ записать в табл. 2.

2.3. Снять зависимость силы тока I от угла рассеяния Θ . Экспериментальные данные занести в табл. 2.

Внимание! Угол Θ изменять от минимального до максимально возможного значения (от 10 до 70°).

Таблица 2

$U_{\text{УСК}}, В$	№ п/п	1	2	3	4	5	и т.д.
	$\Theta, ^\circ$						
	$I, \text{мкА}$						

2.4. Нажать клавишу **ESC** для выхода в меню программы.

Обработка результатов эксперимента

1. По данным табл. 1 построить график зависимости $I = f(U_{\text{УСК}})$.
2. Из графика определить и записать в табл. 3 число максимумов n и напряжения $U(n)$, соответствующие максимальным значениям тока I .
3. Заполнить табл. 3, сделав соответствующие расчеты:
длина волны $\lambda_1(n)$ по Брэггу по формуле (5) при $d = 0,203 \text{ нм}$;
длина волны $\lambda_2(n)$ по де Бройлю по формуле (4);
относительной погрешности E .
4. По данным табл. 2 построить график зависимости $I = f(\Theta)$.
5. Из графика определить и записать в табл. 4 число максимумов n и углы рассеяния $\Theta(n)$, соответствующие максимальным значениям тока I .
6. Заполнить табл. 4, сделав соответствующие расчеты:
длина волны $\lambda_1(n)$ по Брэггу по формуле (5) при $d = 0,203 \text{ нм}$;
средней длины волны по Брэггу $\langle \lambda_1(n) \rangle$;
длина волны $\lambda_2(n)$ по де Бройлю по формуле (4);
относительной погрешности E .

Таблица 3

Число пиков	$n = \dots$		
Номер пика	1	2	3
$U(n)$			
по Брэггу $\lambda_1(n)$, нм			
по де Бройлю $\lambda_2(n)$, нм			
$E = \frac{ \lambda_1(n) - \lambda_2(n) }{\lambda_1(n)} \cdot 100\%$			

Таблица 4

Число пиков	$n = \dots$		
Номер пика	1	2	3
$\Theta(n)$			
по Брэггу $\lambda_1(n)$, нм			
$\langle \lambda_1(n) \rangle$, нм			
по де Бройлю $\lambda_2(n)$, нм			
$E = \frac{ \lambda_1(n) - \lambda_2(n) }{\langle \lambda_1(n) \rangle} \cdot 100\%$			

Результат работы

Сделать выводы по результатам, представленным в табл. 3 и 4.

Контрольные вопросы

1. Нарисуйте и объясните дифракционную картину, наблюдаемую при рассеянии электронов на кристалле.

2. Нарисуйте и сравните дифракционные картины, наблюдаемые при дифракции фотонов и электронов на двух щелях.
3. Как рассчитать длину волны частицы по формуле де Бройля, по формуле Вульфа-Брэггов?
4. Всегда ли проявляются волновые свойства частиц?
5. Где применяется дифракция электронов?
6. Какие основные выводы можно сделать из результатов опыта Дэвиссона и Джермера?

Библиографический список

1. Савельев, И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. М.: Наука, 1992. Т. 1.
2. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. М.: Высш. шк., 2003. § 213–215.

Лабораторная работа № 6-6 ИЗУЧЕНИЕ КОРПУСКУЛЯРНЫХ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ (ФОТОЭФФЕКТ)

Цель работы: изучение закономерностей фотоэффекта: 1) исследование зависимости силы фототока от анодного напряжения при различных значениях интенсивности света; 2) исследование зависимости силы фототока от анодного напряжения при различных значениях частоты света; 3) проверка уравнения Эйнштейна для фотоэффекта.

Введение

Внешним фотоэффектом называется испускание электронов веществом под действием света. Объяснение фотоэффекта было дано А. Эйнштейном (1905 г.) на основании квантовой гипотезы М. Планка. Эйнштейн предложил рассматривать свет, взаимодействующий с электронами при фотоэффекте, не как волну, а как поток частиц (**квантов**). **Энергия кванта** определяется соотношением

$$E = h\nu,$$

где h – постоянная Планка; ν – частота света.

При освещении катода светом происходит взаимодействие квантов света с электронами вещества катода, при котором энергия кванта передается электрону. **Максимальная кинетическая энергия T** электрона определяется формулой

$$T = h\nu - A, \quad (1)$$

где A – работа выхода электронов с поверхности освещаемого вещества в вакуум. Уравнение (1) носит название **уравнения Эйнштейна** и представляет собой **закон сохранения энергии** при фотоэлектрическом поглощении света.

Описание установки и методики эксперимента

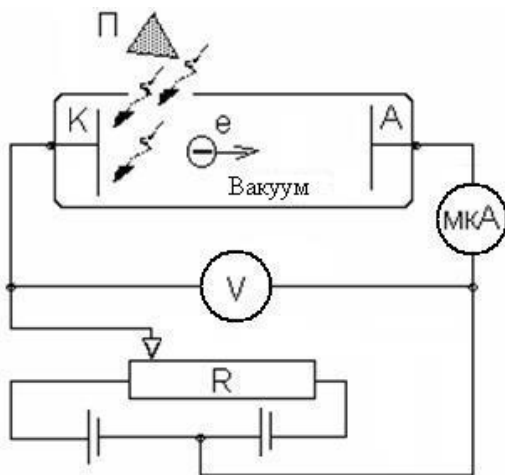


Рис. 1

Схема экспериментальной установки, предназначенной для изучения фотоэффекта, изображена на рис. 1. На катод K падает монохроматический свет. Интенсивность падающего света (число падающих квантов на единицу площади поверхности катода в единицу времени) можно изменять с помощью поглотителя Π . Электроны, испущенные вследствие фотоэффекта, перемещаются под действием электрического поля к аноду A . В результате в цепи прибора течет фототок I , измеряемый микроамперметром $мкА$. Напряжение U между анодом и катодом, измеряемое вольтметром V , можно изменять с помощью потенциометра R . Испускаемые электроны можно подвергнуть действию либо задерживающего ($U < 0$), либо ускоряющего ($U > 0$) электрического поля. Типичные результаты эксперимента представлены на рис. 2.

При некотором напряжении фототок достигает насыщения I_H – все электроны, испущенные катодом, попадают на анод. При $U = 0$ ток не исчезает. Это свидетельствует о том, что электроны покидают катод со скоростью, отличной от нуля. При $U < 0$ электроны с большими энергиями преодолевают задерживающий потенциал и все же попадают на анод, тогда как электроны с малыми кинетическими энергиями тормозятся электрическим полем и затем возвращаются на катод. Разность потенциалов, при которой электрический ток прекращается, называется **запирающим потенциалом**. Кинетическая энергия, при которой электрон, покидающий поверхность катода, способен преодолеть задерживающий потенциал и попасть на анод, равна произведению электрического заряда e электрона на разность потенциалов, которую электрон в состоянии преодолеть. Следовательно, запирающий потенциал связан с максимальной кинетической энергией электронов соотношением

$$eU_3 = T. \quad (2)$$

С помощью установки, изображенной на рис. 1, можно исследовать зависимость силы фототока от анодного напряжения для различных интенсивностей J и частот ν (длин волн $\lambda = c/\nu$) света, падающего на катод.

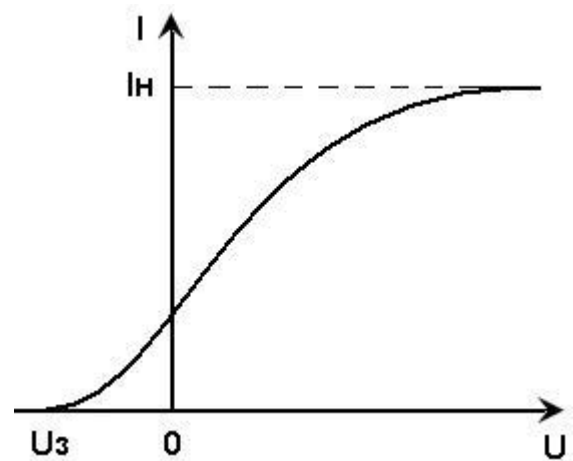


Рис. 2

Интенсивность света определяется числом квантов, падающих на единицу площади поверхности в единицу времени. Число выбитых электронов с поверхности прямо пропорционально числу падающих квантов. Сила тока насыщения определяется количеством электронов, достигнувших анода. Следовательно, при неизменном спектральном составе ($\nu = \text{const}$) падающего на катод света сила тока насыщения пропорциональна интенсивности света J . Кривые фототока для двух значений интенсивности света показаны на рис. 3. При изменении интенсивности запирающий потенциал не изменяется. Из соотношения (2) следует, что максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов не зависит от интенсивности.

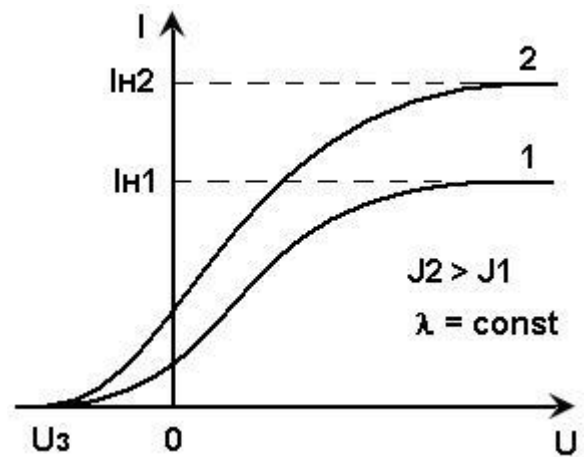


Рис. 3

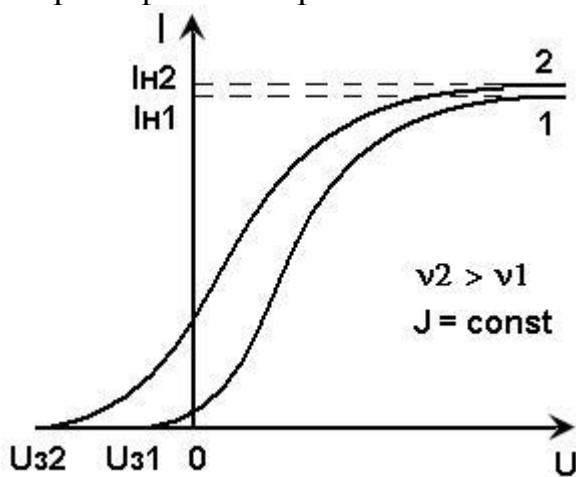


Рис. 4

Энергия электронов, покинувших поверхность катода, зависит от частоты падающего света, следовательно, задерживающая разность потенциалов, которую электроны в состоянии преодолеть, также зависит от частоты падающего света (рис. 4). Результаты опытов показывают, что величина запирающего потенциала линейно зависит от частоты света. Наименьшая частота света ν_0 , при которой возникает фотоэффект, называется *красной границей фотоэффекта* и зависит от вещества, из которого сделан катод.

Из уравнения (1) для красной границы ν_0 можно записать соотношение

$$\nu_0 = A/h. \quad (3)$$

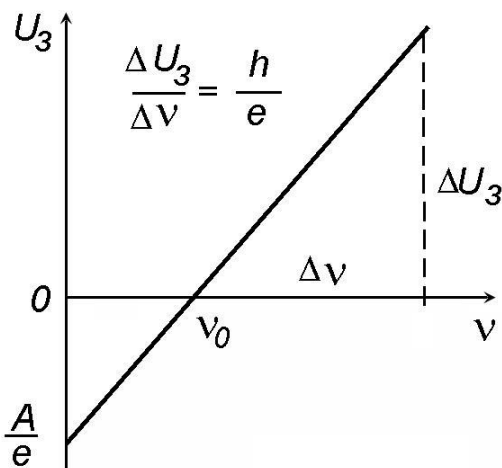


Рис. 5

Для экспериментальной проверки уравнения Эйнштейна определяются запирающие потенциалы при разных частотах света и строится зависимость $U_3(\nu)$. Эта зависимость, изображенная на рис. 5, соответствует уравнению Эйнштейна, записанному с учетом (2) в виде

$$U_3 = (h\nu - A)/e, \quad (4)$$

и имеет вид прямой, не проходящей через начало координат. По наклону прямой можно определить постоянную Планка (рис. 5). Точка пересечения прямой с осью частот опреде-

ляет красную границу – минимальную частоту, при которой исследуемый материал еще может испускать фотоэлектроны. Точка пересечения прямой с осью напряжений (при $\nu = 0$) определяет работу выхода электрона A в электрон-вольтах (эВ) (см. уравнение 4).

Порядок выполнения работы

1. Нажать функциональную клавишу F2 (на экране появится меню).
2. Поставить курсор на пункт **Лабораторные работы** клавишей $\downarrow$ и нажать клавишу Enter (на экране появится список лабораторных работ).
3. Поставить курсор на пункт **Лаб. работа 6-6** клавишей $\downarrow$ и нажать Enter (на экране появится меню).
4. Поставить курсор на пункт **Эксперимент** клавишей $\downarrow$ и нажать Enter.
5. Выбрать материал катода (задается преподавателем из табл. 1) функциональными клавишами. Материал катода записать в табл. 2–4.

Таблица 1

Материал катода	Вольфрам, покрытый цезием W(Cs)	Никель, покрытый цезием Ni(Cs)	Цезий Cs	Калий K	Натрий Na
Клавиша	F1	F2	F3	F4	F5

Упражнение 1. Исследование зависимости $I = f(U)$ при различных значениях интенсивности J света длиной волны λ

1.1. Установить длину волны λ падающего света из интервала $400 \div 800$ нм (задается преподавателем) клавишей Page Up или Page Down.

1.2. Установить интенсивность J падающего света из интервала $0 \div 1.0$ (задается преподавателем) клавишей $\uparrow$ или $\downarrow$.

1.3. Снять зависимость силы фототока I от напряжения U . Экспериментальные данные занести в табл. 2.

Внимание! Анодное напряжение U изменять клавишей $\rightarrow$ до значения соответствующего току насыщения I_H (см. рис. 3).

Таблица 2

Материал катода: _____ $\lambda =$ _____ нм, $\nu = c/\lambda =$ _____ Гц

J	№ п/п	1	2	3	4	5	и т.д.
	$U, В$						
	$I, \text{мкА}$						
	$U, В$						
	$I, \text{мкА}$						

1.4. Повторить п. 1.2, 1.3 для другой интенсивности света.

Упражнение 2. Исследование зависимости $I = f(U)$ при различных значениях частоты ν света одинаковой интенсивности

2.1. Установить интенсивность J падающего света (клавишей $\uparrow$ или $\downarrow$) из интервала $0 \div 1.0$ (задается преподавателем).

2.2. Установить длину волны λ падающего света из интервала $400 \div 800$ нм (задается преподавателем) клавишей Page Up или Page Down.

2.3. Снять зависимость силы фототока I от напряжения U . Экспериментальные данные занести в табл. 3.

Внимание! Анодное напряжение U изменять клавишей $\rightarrow$ до значения, соответствующего току насыщения I_H (см. рис. 4).

Таблица 3

Материал катода: _____ Интенсивность света $J =$ _____

λ , нм	$\nu = c/\lambda$, Гц	№ п/п	1	2	3	4	5	и т.д.
		U , В						
		I , мкА						
		U , В						
		I , мкА						

2.4. Повторить п. 2.2, 2.3 для другой длины волны.

Упражнение 3. Проверка уравнения Эйнштейна для фотоэффекта

3.1. Установить интенсивность падающего света $J = 1$ (клавишей $\uparrow$ или $\downarrow$).

3.2. Установить длину волны $\lambda = 400$ нм клавишей Page Up или Page Down.

3.3. Определить запирающее напряжение U_3 .

Для этого изменять напряжение U (клавишей $\rightarrow$ или $\leftarrow$) до тех пор, пока ток I впервые не станет отличным от нуля. Записать это напряжение U_N и предыдущее значение напряжения U_{N-1} (при котором ток $I = 0$) в табл. 4.

3.4. Увеличить длину волны на 50–70 нм клавишей Page Up или Page Down. Повторить пункт 3.3.

Материал катода: _____, $J = 1$

Таблица 4

№ п/п	λ , нм	U_N , В	U_{N-1} , В	ν , Гц	$U_3 = \frac{U_{N-1} + U_N}{2}$, В
1					
и т.д.					
5					

Обработка результатов эксперимента

1. По данным табл. 2 построить графики зависимости $I = f(U)$ для двух значений интенсивности света J_1 и J_2 на одних координатных осях.

2. По данным табл. 3 построить графики зависимости $I = f(U)$ для двух значений частоты света на одних координатных осях.

3. По данным табл. 4 построить график зависимости $U_3 = f(\nu)$.

4. Определить:

а) красную границу ν_0 (Гц) фотоэффекта как точку пересечения прямой с осью частот ν (при $U_3 = 0$);

б) работу выхода A (эВ) электрона как точку пересечения прямой с осью напряжений U_3 (при $\nu = 0$);

в) постоянную Планка h по углу наклона прямой к оси абсцисс (см. рис. 5).

Результат работы

1. Результат работы представить в виде табл. 5.

Материал катода: _____

Таблица 5

	$\lambda_0 = c/\nu_0$, нм	A , эВ	$h = (\Delta U_3/\Delta \nu) \cdot e$, Дж·с
Эксперимент			
Табличное значение			
$E = h_{\text{эк}} - h_{\text{табл}} / h_{\text{табл}} \cdot 100\%$			

2. Сделать вывод о том, как интенсивность света влияет на вид зависимости $I = f(U)$.
3. Сделать вывод о том, как частота света влияет на вид зависимости $I = f(U)$.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит явление внешнего фотоэффекта?
2. Запишите и объясните уравнение Эйнштейна для фотоэффекта.
3. Что называется красной границей фотоэффекта? Действительно ли она приходится на красный участок спектра?
4. Что называется работой выхода электрона, запирающим потенциалом?
5. Как влияют интенсивность и частота падающего света на вид зависимости фототока от напряжения?
6. Какие основные выводы можно сделать на основании изучения закономерностей фотоэффекта?

Библиографический список

1. Савельев, И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. М.: Наука, 1992. Т. 1.
2. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. М.: Высш. шк., 2003. § 202–205.

ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ

Атомная единица массы $1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 931 \text{ МэВ}$.

Газовая постоянная $R = 8,31 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}$.

Постоянная Авогадро $N_A = 6,03 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$.

Постоянная Больцмана $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$.

Постоянная Вина $b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$.

Постоянная Стефана-Больцмана $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

Скорость света в вакууме $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.

Ускорение свободного падения $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Электрическая постоянная $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$.

Магнитная постоянная $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$.

Элементарный заряд $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.
 Электрон-вольт $1\text{эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж.
 Энергия ионизации водорода $E = 13,6$ эВ.
 Постоянная Планка $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.
 Масса покоя электрона $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг.
 Масса покоя протона $m_p = 1,672 \cdot 10^{-27}$ кг.
 Масса покоя нейтрона $m_n = 1,675 \cdot 10^{-27}$ кг.
 Постоянная Планка $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.
 Энергия покоя электрона $E_e = 0,511$ МэВ.
 Энергия покоя протона $E_p = 938$ МэВ.
 Энергия покоя нейтрона $E_n = 939$ МэВ.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

РАСЧЕТ ОШИБКИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Пусть в результате эксперимента получено n значений измеряемой величины u :

$$u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_n.$$

Определение ошибки эксперимента включает в себя расчет:

1) среднего значения измеряемой величины

$$\langle u \rangle = \frac{\sum u_i}{n} = \frac{u_1 + u_2 + \dots + u_i + \dots + u_n}{n};$$

2) абсолютной погрешности каждого результата

$$\Delta u_i = |u_i - \langle u \rangle|;$$

3) квадратов абсолютных погрешностей Δu_i^2 и их суммы

$$\sum (\Delta u_i)^2 = \sum (u_i - \langle u \rangle)^2;$$

4) доверительного интервала

$$\Delta_u = t_{\alpha, n} \sqrt{\frac{\sum (\Delta u_i)^2}{n(n-1)}},$$

где $t_{\alpha, n}$ – коэффициент Стьюдента, значение которого определяется по таблице приложения в зависимости от числа значений n и доверительной вероятности α . Чем выше вероятность α , тем больше будет ошибка. Рекомендуется брать $\alpha = 0,95$;

5) относительной погрешности результата

$$E = \frac{\Delta_u}{\langle u \rangle} \cdot 100 \%.$$

Результат работы представляется в виде

$$u = \langle u \rangle \pm \Delta_u; \quad E = \dots \%.$$

КОЭФФИЦИЕНТ СТЬЮДЕНТА

$\alpha \backslash n$	3	4	5	10	15
0,70	1,3	1,3	1,2	1,1	1,1
0,95	4,3	3,2	2,8	2,3	2,1
0,99	9,9	5,8	4,6	3,3	3,0

Приложение 2

Порядок работы ДБГ-01Н



1. Включите дозиметр, для чего движок переключателя ПИТАНИЕ дозиметра переведите в верхнее положение.

Убедитесь в том, что напряжение питания находится не ниже минимально допустимого значения, для чего нажмите на кнопку КОНТР. ПИТАНИЯ. При этом должен загореться световой индикатор на верхней панели.

ВНИМАНИЕ! Отсутствие свечения светодиода при нажатии на кнопку информирует, что батарея разряжена и требуется её замена.

2. Работа в режиме обнаружения радиоактивного загрязнения и оценки с помощью звуковой сигнализации уровня мощности дозы (режим «ПОИСК»).

2.1. Переключатель поддиапазонов установите в положение $\div 99,9$.

2.2. При приближении к месту радиоактивного загрязнения или источнику фотонного излучения увеличивается интенсивность излучения и пропорционально возрастает частота следования звуковых сигналов.

2.3. В положении переключателя поддиапазонов $\div 999,9$ звуковая сигнализация отключается.

3. Измерение мощности эквивалентной дозы.

3.1. Подготовьте дозиметр к работе согласно пункту 1.

3.2. Измерение мощности эквивалентной дозы может осуществляться на двух диапазонах: чувствительном $0 \div 99,9$ и грубом $0 \div 999,9$.

3.3. Измерение и вывод значения мощности эквивалентной дозы (МЭД) осуществляется дозиметром автоматически двумя равными по времени циклами:

на диапазоне $0 \div 99,9$ – около 35 с;

на диапазоне $0 \div 999,9$ – около 3,5 с.

Цикл измерения МЭД характеризуется наличием точек после каждого разряда и набором информации на цифровом табло.

Цикл вывода значения МЭД, о начале которого сигнализирует исчезновение точек после 1, 2, 4 разрядов на диапазоне $0 \div 99,9$ и после 1, 3, 4 разрядов на диапазоне $0 \div 999,9$ характеризуется отсутствием набора информации на цифровом табло.

Снятие показаний значений МЭД с табло дозиметра должно производиться только во время цикла вывода значения МЭД.

3.4. Циклы измерения и вывода значения мощности дозы автоматически сменяют друг друга, но в любой момент времени можно начать цикл измерения сначала путём кратковременного нажатия на кнопку КОНТР. ПИТАНИЯ.

Приложение 3

КРАСНАЯ ГРАНИЦА ФОТОЭФФЕКТА И РАБОТА ВЫХОДА МЕТАЛЛОВ

Материал катода	λ_0 , нм	A, эВ
Вольфрам, покрытый цезием W(Cs)	890	1,30
Никель, покрытый цезием Ni(Cs)	876	1,37
Цезий Cs	632	1,90
Калий К	545	2,20
Натрий Na	522	2,30

ПЕРВЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ВОЗБУЖДЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ВЕЩЕСТВ

Вещество	U, В
Гелий	21,2
Неон	15,3
Водород	10,2
Ртуть	4,8
Магний	2,6
Натрий	2,1
Калий	1,6

ХАРАКТЕРИСТИКИ НАИБОЛЕЕ РАСПРОСТРАНЕННЫХ ИЗОТОПОВ

Изотоп	^{131}J	^{32}P	^{198}Au	^{14}C	^{45}Ca	^{90}Sr	^{89}Sr	^{35}S	^{60}Co
Период полураспада	8,14 дня	14,2 дня	2,7 дня	5 568 лет	164 дня	27,7 года	50,5 дня	87,1 дня	5,3 года
Тип излучения	β	β	γ	β	β	β	β	β	γ
Энергия излучения, МэВ	0,16	1,7	0,4	0,155	0,25	0,61	1,46	0,167	1,43

Приложение 4

ПРАВИЛА ПОСТРОЕНИЯ И ОФОРМЛЕНИЯ ГРАФИКОВ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ФИЗИКЕ

Графическое представление результатов работы используют для наглядного изображения функциональной зависимости одной физической величины y от другой x : $y = f(x)$. График позволяет получить максимум наглядной

информации об изучаемой зависимости: области возрастания и убывания; точки максимумов и минимумов; области наибольшей и наименьшей скорости изменения, периодичности и т.д. По графику можно определить значения функции y для промежуточных значений аргумента x , которые в опыте непосредственно не наблюдались.

График удобно использовать для совместной обработки результатов многих измерений, определения вида функции $y = f(x)$ и ее параметров.

1. График следует вычерчивать аккуратно, простым карандашом на листе миллиметровой бумаги, который затем подклеивается в тетрадь с отчетом о лабораторной работе. Размер стороны листа – не менее **100–150 мм**.

2. В прямоугольной системе координат по оси абсцисс откладывают переменную, принятую за независимую величину, – аргумент, а по оси ординат – функцию. В конце координатных осей указывают буквенные обозначения откладываемых величин и их размерность.

3. Масштабы по координатным осям выбирают независимо друг от друга, так, чтобы оси абсцисс и ординат имели примерно одинаковую длину. При этом полученные в эксперименте минимальные значения должны соответствовать началу координатной оси, а максимальные – располагаться вблизи ее конца. Точку начала координат (точку $0,0$) не обязательно помещать на графике, если это специально не требуется в данной работе. При правильно выбранном масштабе график занимает все поле чертежа, большая часть экспериментальной кривой имеет одинаковый наклон как к оси абсцисс, так и к оси ординат.

4. На осях координат размечают равномерные шкалы, пользуясь которыми можно легко нанести на график экспериментальные точки или, наоборот, определить численное значение аргумента и функции, соответствующее любой точке на графике. Расстояние между соседними делениями шкалы (единицу масштаба) обычно берут равным **10, 20 или 25 мм**. Это расстояние должно соответствовать «круглому» числу единиц измеряемой величины (**1, 2, 3,...** или те же цифры, умноженные на **$10n$** , где **$n = +1, +2, +3$** и т.д.). Шкалы оцифровывают, указывая на оси значения величин, кратные единице масштаба. Если недостаточно места, то оцифровывают не все деления, а, например, каждое второе или четвертое деление.

Значения величин, полученные в эксперименте, на координатных осях не отмечают.

5. Если значения величин много больше или много меньше единицы, то обычно множитель 10^n , определяющий порядок величины, записывают в конце оси, включая его в единицы измерения. Например: **$V, 10^2 \text{ м/с}$** или **$I, 10^{-6} \text{ А}$** .

6. Точки на график нужно наносить точно и аккуратно. Чтобы точка была хорошо видна, ее обводят кружком или другим знаком (треугольником, ромбом и т.д.) или помечают крестиком.

7. Экспериментальную линию проводят возможно ближе к экспериментальным точкам так, чтобы точки располагались равномерно по обеим ее сто-

ронам. Обычно физические зависимости соответствуют линейным или плавно меняющимся функциям, поэтому линии не должны иметь резких изломов и перегибов. Не следует соединять точки ломаной линией.

8. Наиболее легко обнаруживается на графике и удобна для анализа линейная зависимость между измеряемыми величинами вида

$$y = kx + b.$$

График этой зависимости – прямая линия. Коэффициент k определяет наклон прямой к оси x ; величина b определяет отрезок, отсекаемый прямой на оси y (при $x = 0$). Для определения углового коэффициента k на прямой, проведенной «на глаз» согласно п. 7, выбирают произвольно две точки, по возможности дальше отстоящие друг от друга. По шкалам на осях графика находят координаты этих точек (x_1, y_1) и (x_2, y_2) и вычисляют:

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}.$$

Размерность коэффициента определяется размерностями величин x и y :

$$[k] = \frac{[y]}{[x]},$$

а погрешность для k находим как $\Delta k = \frac{\Delta y_{\max}}{x_{\max} - x_{\min}}$,

где $\Delta y_{\max}$ – наибольшее отклонение ординаты экспериментальной точки от проведенной прямой; $x_{\max}$, $x_{\min}$ – координаты крайних точек, использованных при проведении прямой.

9. В физике часто встречается степенная зависимость вида

$$y = a \cdot x^k,$$

которую можно преобразовать в линейную в логарифмических координатах:

$$\ln y = \ln a + k \ln x.$$

В этом случае по оси абсцисс откладывают $\ln x$, а по оси ординат – $\ln y$. Показатель степени k определяют по графику (см. п.8):

$$k = \frac{\ln(y_2) - \ln(y_1)}{\ln(x_2) - \ln(x_1)}.$$

10. Иногда требуется проверить соответствие эксперимента какому-либо физическому закону, где показатель степени k заранее известен. В этом случае на графике должна получиться прямая линия, если по оси ординат откладывать величину y , а по оси абсцисс – величину x^k .

11. График показательной зависимости

$$y = a \cdot e^{kx}$$

будет линейным в полулогарифмических координатах $(\ln y, x)$, где эта функция имеет вид

$$\ln y = \ln a + kx.$$

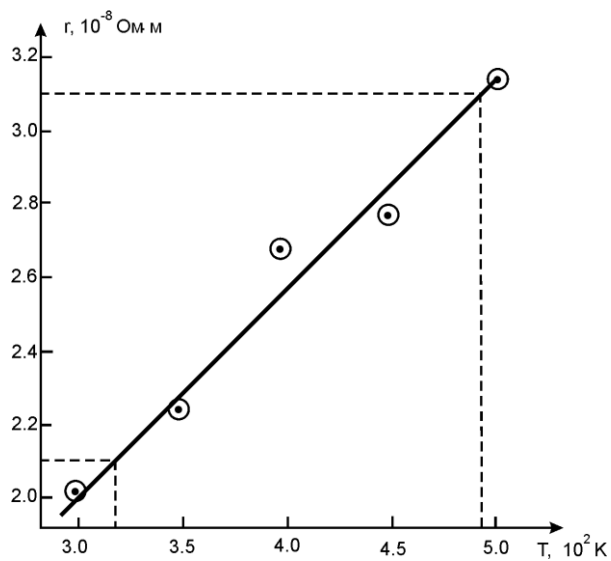
В этом случае по оси абсцисс откладывается сама измеряемая величина x , а по оси ординат – $\ln y$. Коэффициент k определяется по графику (см. п. 8):

$$k = \frac{\ln(y_2) - \ln(y_1)}{x_2 - x_1}.$$

Пример построения графика

Результаты эксперимента по определению температурной зависимости удельного электросопротивления металла приведены в табличной и соответствующей ей графической зависимости.

Температура T, K	300	350	400	450	500
Удельное Электросопротивление ρ , $\text{Ом}\cdot\text{м}\times 10^{-8}$	2,05	2,24	2,68	2,77	3,14



По графику :

$$k = \frac{3,1 - 2,1}{4,9 - 3,2} = 0,59 .$$

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 5-6. Измерение высоких температур с помощью пирометра	3
Лабораторная работа № 6-1. Определение активности радиоактивного препарата и максимальной энергии β -частиц	9
Лабораторная работа № 6-2. Определение коэффициента поглощения γ -излучения в веществе	16
Лабораторная работа № 6-3. Дозиметрия ионизирующих излучений	21
Лабораторная работа № 6-4. Определение первого потенциала возбуждения атомов методом задерживающего потенциала в опыте Франка и Герца	31
Лабораторная работа № 6-5 . Изучение волновых свойств электронов в опыте Дэвиссона и Джермера.....	35
Лабораторная работа № 6-6. Изучение корпускулярных свойств электромагнитного излучения (фотоэффект)	40
Основные физические постоянные.....	45
Приложения.....	46

Физический практикум

Часть 4

Методические указания
к лабораторным работам по квантовой оптике,
атомной и ядерной физике

Составители: В.М. Алексеев, А.Н. Болотов, В.В. Измайлов, М.В. Новоселова, А.Ф. Гусев, В.В. Новиков, О.О. Новикова, А.В. Мишина, Ю.И. Морозова

Под редакцией В.М. Алексеева

Корректор Т.С. Самборская
Технический редактор М.Б. Юдина

Подписано в печать

Формат 60x84 1/16

Физ. печ. л. 3,25

Тираж 100 экз.

Усл. печ. л. 3,02

Заказ № 56

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 2,83

С – 52

Редакционно-издательский центр
Тверского государственного технического университета
170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина