

Г.В.Балабина, И.Н.Фетисов

РАДИОАКТИВНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И ДОЗИМЕТРИЯ

Методические указания к лабораторной работе Я-7 по курсу общей физики

Под редакцией А. И. Савельевой
Издательство МГТУ им Н. Э. Баумана, 1997

Описаны процессы взаимодействия заряженных частиц и фотонов высокой энергии с веществом, основные характеристики излучений, устройство дозиметра и методика измерения пробега и энергии β -частиц, мощности дозы γ -излучения. Для студентов 2-го курса всех специальностей.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение вопросов взаимодействия излучений с веществом и дозиметрии является важным для инженеров в связи с широким распространением ядерных технологий и источников ионизирующих излучений, загрязнением окружающей среды радионуклидами.

Работа знакомит с радиоактивным распадом, поглощением в веществе заряженных частиц и фотонов высокой энергии. Рассмотрены дозовые характеристики ионизирующих излучений и соотношение между различными единицами дозы. Приведен вывод формулы для расчета мощности дозы точечного γ -источника известной активности. Рассмотрено устройство сцинтилляционного дозиметра.

Цель работы - изучить поглощение β -излучения в веществе, определить пробег β -частиц в алюминии и их энергию, измерить мощность дозы γ -источника.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Радиоактивность

Радиоактивные вещества испускают быстрые заряженные частицы - электроны и позитроны (β -частицы), ядра гелия (α -частицы), а также фотоны высокой энергии (γ -излучение). Для различных радионуклидов энергия распада изменяется от ~ 10 кэВ до нескольких МэВ. Энергия распада делится между вторичными частицами так, чтобы выполнялся закон сохранения импульса. В результате α -распада образуются две частицы, поэтому α -частицы моноэнергетичны и уносят, вследствие меньшей массы, почти всю энергию распада (некоторые радионуклиды испускают α -частицы нескольких значений энергии). При β -распаде, поскольку вылетает и третья частица - нейтрино, спектр электронов получается сплошным - от нуля до некоторой граничной энергии E_{max} .

Радиоактивный препарат характеризуют средним числом распадов за единицу времени, эта характеристика называется активностью и обозначается буквой A . Единица активности - один распад за секунду - называется б е к к е р е л ь и обозначается Бк. Специальная единица активности - к ю р и равна $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10}$ Бк. Активность, пропорциональная числу не распавшихся атомов, уменьшается со временем по закону радиоактивного распада:

$$A = A_0 \exp(-\lambda t) = A_0 \exp(-0,69t/T), \quad (I)$$

где A_0 - начальная активность, λ - постоянная распада; T - период полураспада, т.е. время, за которое активность уменьшается вдвое.

Часто радиоактивный распад сопровождается испусканием одного или нескольких γ -квантов, если дочернее ядро образуется в возбужденном энергетическом состоянии. Энергия гамма-квантов равна разности энергий соответствующих энергетических уровней ядра.

Поглощение заряженных частиц

Быстрые заряженные частицы испытывают в веществе кулоновское взаимодействие с атомными электронами и ядрами. Особенно часто происходят неупругие взаимодействия с внешними электронами, при которых энергия частицы затрачивается на ионизацию и возбуждение атомов. Такой процесс называется ионизационным торможением. В каждом акте взаимодействия с атомом

заряженная частица теряет малую часть энергии, составляющую в среднем несколько десятков электрон-вольт. В результате, например, α -частица с энергией 5 МэВ ионизирует в общей сложности примерно 10^5 атомов. Пройденное частицей расстояние до остановки является функцией заряда, массы и энергии частицы, а также атомного номера, средней энергии ионизации атомов и их концентрации.

Если параллельный пучок α -частиц одинаковой энергии летит в веществе вдоль оси X , то зависимость между потоком F (числом частиц, проходящих через данную поверхность в единицу времени) и величиной пройденного пути X изображается кривой 1 на рис. 1.

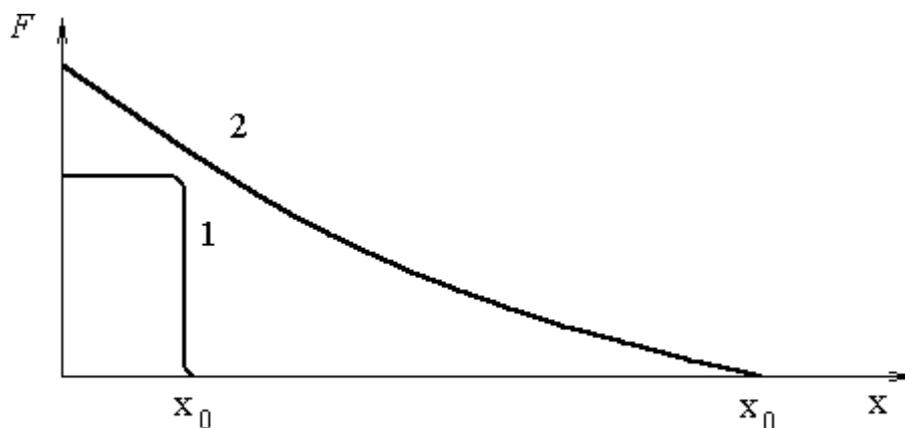


Рис. 1

На протяжении значительной части пути интенсивность потока не меняется. Затем, когда скорость α -частицы приближается к нулю, интенсивность резко падает. α -частицы одинаковой энергии теряют свою энергию приблизительно на одинаковом пути x_0 , длина которого зависит от энергии частицы. Для энергии 5 МэВ в воздухе $x_0 \approx 5$ см, а в плотных телах - в тысячи раз меньше. Например, лист бумаги полностью задержит α -частицы.

Для β -частиц аналогичная зависимость изображена кривой 2 на рис. 1. Кривая для β -частиц иная, потому что электроны имеют различные начальные скорости и к тому же электроны, пролетая мимо атомов, не только отдают им часть своей энергии, но часто испытывают значительное рассеяние. Уже при небольших x часть электронов выбывает из пучка; это в основном те электроны, которые имели малую начальную скорость. Поэтому вблизи $x=0$ поведение кривой похоже на поведение показательной функции. Однако дальше кривая достигает оси абсцисс, интенсивность становится равной нулю при определенной величине x_0 , зависящей от граничной энергии E_{\max} β -спектра. Пробег β -частиц до остановки значительно больше, чем α -частиц; он может составлять примерно 10 м в воздухе или несколько миллиметров в алюминии. Пробег растет с ростом энергии; зная эту зависимость, можно по измеренному пробегу найти энергию частиц. В различных веществах с близким атомным номером величина пробега X_0 различна при одинаковой энергии лишь вследствие различия плотности. Поэтому предпочитают пробег выражать величиной $d_0 = \rho x_0$ (массой поглотителя на единицу площади), где d_0 - пробег в г/см^2 , x_0 - пробег в см, ρ - плотность вещества в г/см^3 . Эмпирически установлена зависимость между максимальной энергией β -частиц в МэВ и пробегом d_0 в г/см^2 :

$$E_{\max} = 1,85(d_0 + 0,133) \quad (2)$$

Формула справедлива для алюминия и других веществ с близким атомным номером для энергий больше 0,8 МэВ ($d_0 > 0,3 \text{ г/см}^2$).

При одинаковой энергии пробег α -частиц примерно в тысячу раз меньше, чем β -частиц. Главная причина этого различия заключена в том, что тяжелые α -частицы имеют меньшую скорость, поэтому, пролетая мимо атомов, дольше взаимодействуют с его электронами и могут сообщить им необходимый для ионизации импульс с большего пролетного расстояния. Поэтому α -частицы создают больше ионов на единицу пути и быстрее тормозятся.

Электроны, пролетая вблизи атомного ядра, движутся ускоренно и поэтому могут испускать коротковолновое электромагнитное излучение, называемое тормозным, или рентгеновским,

излучением. Потери на излучение возрастают с увеличением энергии электрона и атомного номера вещества поглотителя.

Поглощение γ -излучения

Электромагнитное излучение очень высокой частоты, испускаемое атомными ядрами, называется γ -излучением. Для различных радионуклидов энергия γ -кванта (фотона) составляет примерно от 10 кэВ до нескольких МэВ, что существенно больше, чем для света (~ 2 эВ). У γ -квантов ярко выражены корпускулярные свойства, которые проявляются при взаимодействии с веществом. Основными взаимодействиями являются следующие.

а) Атомный фотоэффект - фотон высокой энергии поглощается, передавая энергию одному из атомных электронов, обычно расположенному близко к ядру, и выбивает его из атома. Энергия вылетевшего электрона равна разности энергий фотона и энергии связи электрона в атоме.

б) Эффект Комптона - упругое рассеяние фотона высокой энергии на свободном или слабо связанном атомном электроны, сопровождающееся уменьшением энергии фотона, так как часть энергии получает электрон. Применяя законы сохранения энергии и импульса в релятивистской форме, можно показать, что фотон с энергией E после рассеяния на угол θ имеет энергию

$$E' = E / \left[1 + \frac{E}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta) \right]$$

где $m_0 c^2 = 0,51$ МэВ - энергия покоя электрона. Угол θ с разной вероятностью может быть любым. Средняя доля энергии, передаваемой электрону, изменяется от $\eta = 0,05$ при $E = 50$ кэВ до $\eta = 0,45$ при 1,2 МэВ.

в) Рождение электронно-позитронной пары - в электрическом поле атомного ядра фотон, исчезая, может превратиться в частицу и античастицу - электрон и позитрон: $\gamma \rightarrow e^- + e^+$. При этом энергия фотона должна превышать суммарную энергию покоя рождаемых частиц, равную примерно 1 МэВ.

В отличие от ионизационного торможения заряженных частиц, которые теряют энергию мелкими порциями, γ -квант теряет ее либо полностью в одном взаимодействии, либо крупными порциями (при комптоновском эффекте), γ -квант может пролететь значительное расстояние, не испытав ни одного взаимодействия (например, сотни метров в воздухе). Энергия, переданная квантом электрону, быстро тратится на ионизацию.

В веществе интенсивность I узкого пучка γ -квантов одинаковой энергии уменьшается с увеличением толщины поглотителя x по экспоненциальному закону :

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

где I_0 - интенсивность перед поглотителем, μ - линейный коэффициент ослабления γ -лучей (он измеряется в m^{-1} или cm^{-1}). В слое толщиной $1/\mu$ пучок ослабляется в $e = 2,72$ раза. Слой половинного ослабления равен $\ln 2/\mu$. Для фотонов с энергией 1 МэВ излучение ослабляется в два раза слоем воды толщиной примерно 10 см или свинца - 1 см.

Коэффициент ослабления можно представить как сумму соответствующих коэффициентов для фотоэффекта τ , рассеяния σ и рождения пар π :

$$\mu = \tau + \sigma + \pi.$$

На рис. 2 представлены зависимости от энергии γ -квантов коэффициента ослабления для свинца и алюминия (сплошные кривые) и их парциальные составляющие. В свинце рассеяние преобладает в области средних энергий, фотоэффект - для малых энергий, а образование пар - для высоких энергий. Для алюминия и других веществ из легких атомов роль фотоэффекта и образования пар незначительна.

Дозы излучения

Энергия излучения, поглощенная веществом в расчете на единицу массы, называется поглощенной дозой: $D = E/m$. Единица поглощенной дозы - г р е й : 1 Гр = 1 Дж/кг. Сотая доля грея называется рад: 1 рад = 0,01 Гр.

Однако биологические эффекты зависят не только от поглощенной дозы, но и от вида излучения, точнее, от числа ионов на единицу длины трека частицы. Например, α -излучение наносит такой же вред, как в 20 раз большая доза β -излучения. Этот факт можно учесть, если поглощенную дозу умножить на некоторый коэффициент K , называемый коэффициентом качества излучения: $H = KD$. Величина H называется эквивалентной дозой. Для β - и γ -излучений $K = 1$, а для α -излучения $K = 20$. Единица эквивалентной дозы называется з и в е р т, Зв. Для рентгеновского, γ - и β -излучений эквивалентная доза равна 1 Зв при поглощенной дозе 1 Гр, а для α -излучения - 20 Зв при той же поглощенной дозе. Специальная единица эквивалентной дозы называется б э р: 1 бэр = 0,01 Зв.

Экспозиционная доза определяется как отношение суммарного заряда всех ионов одного знака ΣQ , созданных в воздухе при полном торможении вторичных электронов и позитронов, образующихся в некотором объеме под действием фотонного излучения, к массе m этого объема: $D_{\Sigma} = \Sigma Q / m$. Единица экспозиционной дозы - 1 Кл/кг. Специальная единица экспозиционной дозы называется р е н т г е н : $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$. Исходя из того, что на образование одной пары ионов в воздухе затрачивается в среднем энергия 34 эВ, легко получить, что один рентген соответствует поглощенной дозе 0,0088 Дж/кг (на практике приближенно принимают 0,01 Дж/кг). Итак, для фотонного излучения имеем соотношения:

$$1 \text{ Зв} = 1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад} = 100 \text{ бар} \approx 100 \text{ Р} \quad (4)$$

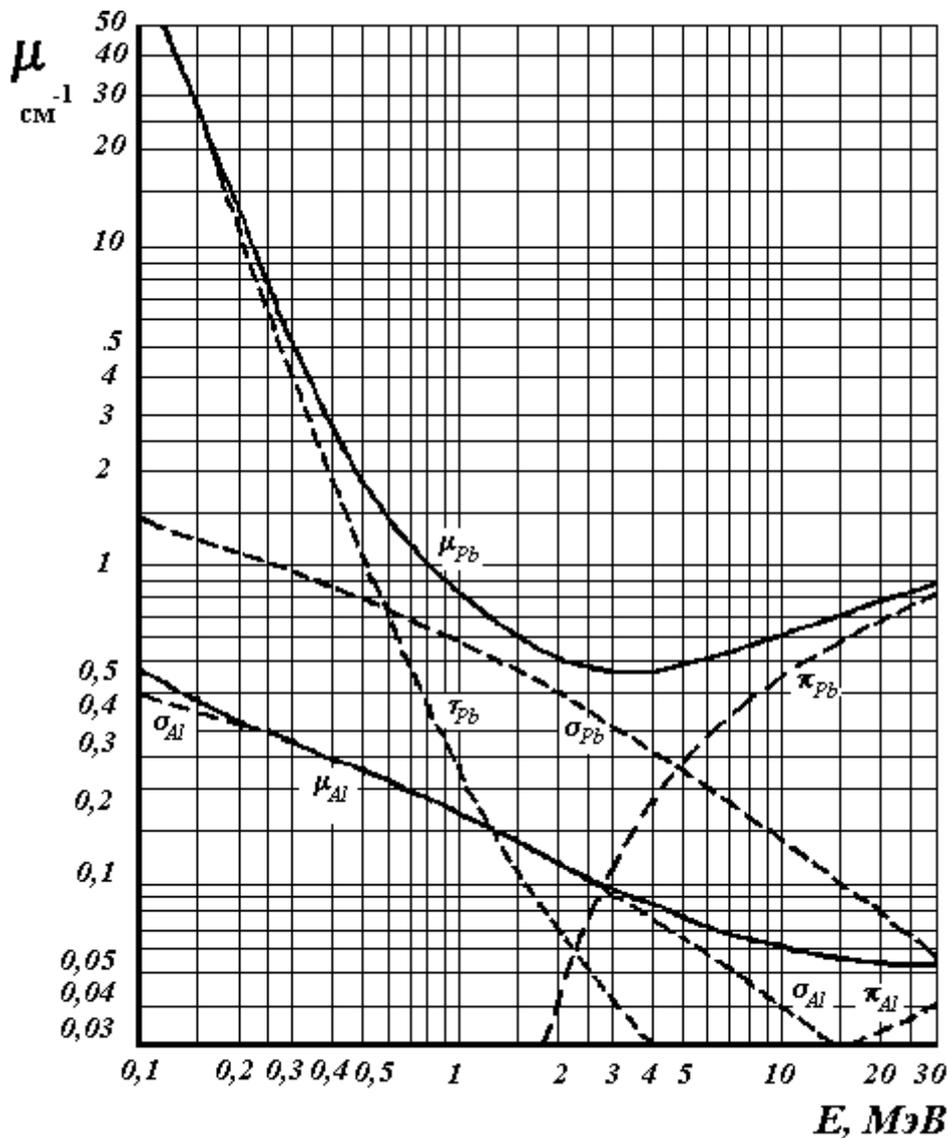


Рис. 2

Доза, отнесенная к единице времени, называется мощностью дозы:

$$P = \Delta D / \Delta t$$

Допустимые дозы облучения в специальных нормах. (Нормы радиационной безопасности НРБ-76 и Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений ОСП-72/80. - М.: Энергоиздат, 1981. - 96 с.)

Наибольшее значение дозы облучения за год, не вызывающее при равномерном воздействии в течение 50 лет неблагоприятных изменений в состоянии здоровья человека, называется предельно допустимой дозой за год (ПДД). Для лиц, работающих непосредственно с источниками излучений, ПДД = 5 бэр за год (или 250 бэр за 50 лет). Для лиц, которые не работают непосредственно с источниками излучений, но по условиям проживания или размещения рабочих мест могут подвергаться облучению, ПДД в 10 раз меньше. За счет естественных источников излучения -

радиоактивности, содержащейся в теле человека (это - главный фактор), почве, воде, воздухе, а также космических лучей доза в различных местах проживания равна 0,04...0,2 бэр за год (в отдельных местах может быть значительно больше).

Доза, полученная за короткое время, значительно опаснее, чем за многие годы. Кратковременное облучение всего тела дозой в 500 бэр может привести к летальному исходу.

Вредное воздействие внешнего облучения можно уменьшить, сокращая время облучения, увеличивая расстояние до источника излучения и применяя поглощающие экраны.

Мощность дозы для γ -источника

Для точечного, γ -источника активности A мощность дозы на расстоянии r может быть рассчитана по формуле

$$P = \Gamma A / r^2 \quad (5)$$

Коэффициент пропорциональности Γ , называемый гамма-постоянной, приводится в справочниках по дозиметрии; для кобальта-60, например, $\Gamma = 1,15 \cdot 10^{-4}$ мкР см² с⁻¹ · Бк⁻¹. Из размерности Γ видно, что мощность дозы получим в мкР/с, если возьмем расстояние в см, а активность - в беккерелях. Ниже приведен вывод формулы (5) и расчет значения Γ которые полезны как упражнение по дозиметрии.

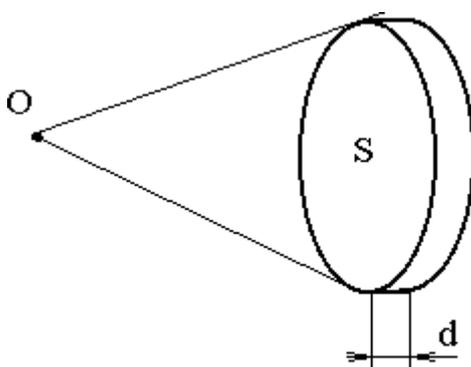


Рис. 3

Точечный γ -источник активности A , испускающей на один распад в среднем n γ -квантов со средней энергией E_γ , находится в точке O (рис. 3). Вычислим энергию E_1 , поглощенную за 1 с элементом поглотителя площадью S , толщиной d и массой $m = Sd\rho$, расположенным на расстоянии r от источника. За 1 с источник испускает в среднем nA квантов, из них падает на поглотитель I_0 квантов, где

$$I_0 = nAS / (4\pi r^2)$$

Пройдет через поглотитель без взаимодействия $I_0 \exp(-\mu d)$ квантов (см.(3)), а испытает взаимодействие $\Delta I = I_0 (1 - \exp(-\mu d))$ квантов. Для случая $\mu d \ll 1$, разлагая экспоненту в ряд, получим

$$\Delta I = I_0 \mu d$$

В результате взаимодействия γ -квантов с веществом вторичным электронам будет передана и поглощена веществом энергия

$$E_1 = \Delta I \eta E_\gamma$$

где η - средняя доля энергии, переданная квантом электрону в одном взаимодействии. Мощность поглощенной дозы равна

$$P = E_1 / m$$

Подставляя сюда полученные выше выражения, имеем

$$P = \Gamma A / r^2, \text{ где } \Gamma = (n \eta E_\gamma \mu) / (4\pi \rho) \quad (6)$$

Вычислим значение Γ для ⁶⁰Со, который в каждом распаде испускает два γ -кванта ($n=2$) со средней энергией $E_\gamma = 1,25$ МэВ = $2 \cdot 10^{-13}$ Дж. Найдем постоянную Γ для веществ из легких атомов, таких как воздух, вода, биологическая ткань, для которых отношение μ/ρ одинаково и равно 0,07 см²/г при $E_\gamma = 1,25$ МэВ. В легких веществах при такой энергии основным процессом является комптоновское рассеяние, в котором электрону передается в среднем $\eta = 0,45$ энергии фотона. Подставляя в (6) числовые значения, получим

$$P = 1,01 \cdot 10^{-15} A / r^2,$$

где P - мощность поглощенной дозы в Дж/г.с. Учитывая, что поглощенной дозе 0,0088 Дж/кг соответствует экспозиционная доза $1 P$, получим

$$P = 1,15 \cdot 10^{-4} \text{ А/г}^2$$

где P - в мкР/с, A - в Бк, g - в см.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Лабораторная установка

В работе используются два закрытых радиоактивных источника небольшой активности. Источником γ -излучения служит кобальт-60, распадающийся с периодом полураспада 5,27 лет с испусканием электрона и двух γ -квантов с энергиями 1,17 и 1,33 МэВ. Схема распада ^{60}Co дана на рис. 4.

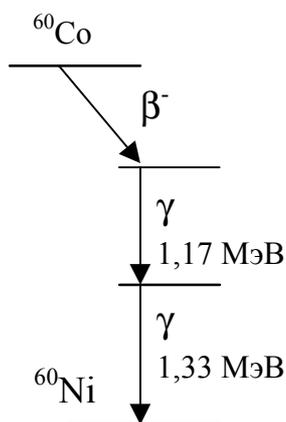


Рис. 4

Активность источника не превышает $2 \cdot 10^4$ Бк. Радиоизотоп заключен в стальную герметичную капсулу, стенки которой задерживают β -излучение, но прозрачны для γ -излучения.

Источником β -излучения служит смесь двух радионуклидов - стронция-90 и иттрия-90, которые испытывают β -распад по схемам:



Этот случай является примером сложного распада, состоящего из двух последовательных распадов, так как иттрий образуется в результате распада стронция. Периоды полураспада равны 28 лет для стронция и примерно 3 дня для иттрия. В препарате иттрий находится в таком количестве, что на каждый распад стронция приходится один распад иттрия. Максимальная энергия β -частиц иттрия примерно в 4 раза больше, чем для стронция, и равна $E_{max} = 2,27$ МэВ. Испускаемые электроны имеют скорость, близкую к скорости света. Радиоактивное вещество заключено в алюминиевую капсулу, снабженную окошком из тонкой фольги для выхода электронов.

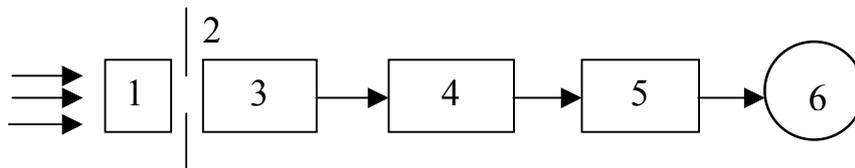


Рис. 5

Дозиметр типа ДРГЗ-01 предназначен для измерения мощности дозы в диапазоне 0...100 мкР/с фотонного излучения (непрерывного или импульсного) с энергией квантов от 15 до 1250 кэВ.

Принцип действия дозиметра поясняет рис. 5.

Детектором частиц служит сцинтиллятор 1 из специальной пластмассы, в которой быстрые заряженные частицы вызывают вспышки света - сцинтилляции (аналогичное явление используется в

телевизионном экране). γ -излучение регистрируется по вторичным электронам, которые они выбивают из атомов сцинтиллятора. Вспышки света улавливаются чувствительным приемником света - фотоэлектронным умножителем 3 (ФЭУ) и преобразуются им в импульсы тока на выходе ФЭУ. Пульсирующий ток усредняется интегратором 4, состоящим из конденсатора и резистора, усиливается радиолампой 5 и регистрируется микроамперметром 6.

Среднее значение тока пропорционально поглощенной сцинтиллятором энергии в единицу времени, т.е. мощности дозы. Прибор прокалиброван в единицах мкР/с. Небольшой ток может протекать и в отсутствие излучения, поэтому перед измерениями необходимо установить нуль прибора с помощью регулятора "Уст. нуля". При этой операции свечение сцинтиллятора отсекается от ФЭУ с помощью светового затвора 2, расположенного перед ФЭУ.

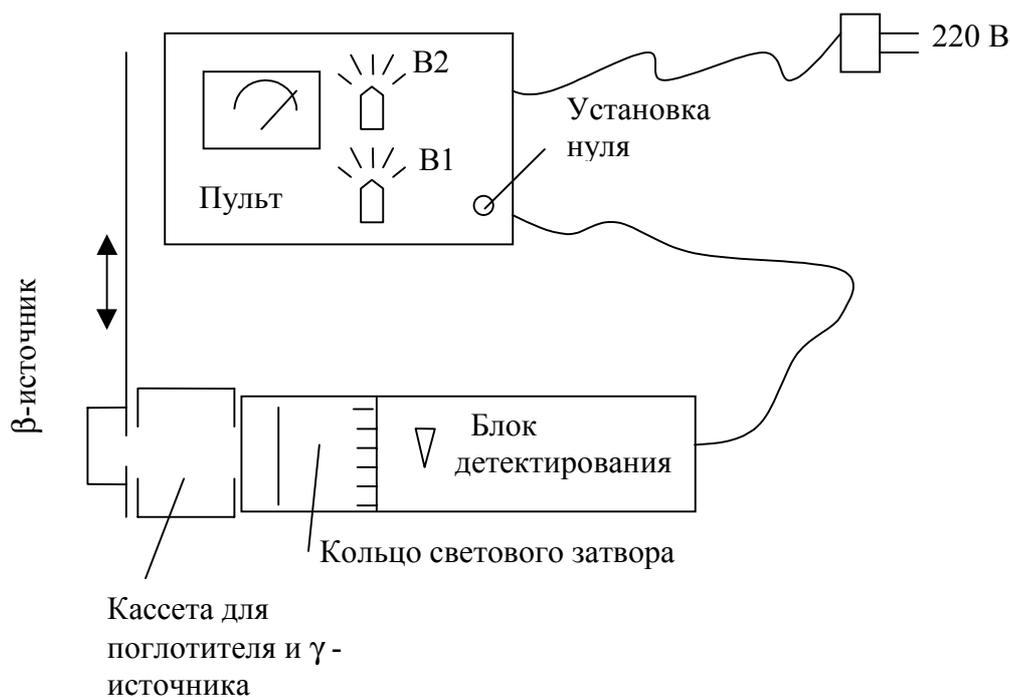


Рис. 6

Дозиметр имеет блок детектирования со сцинтиллятором, ФЭУ и затвором, а также пульт (рис.6). Торцы блока детектирования (слева на рис. 6), закрытый тонкой фольгой, может пропустить β -частицы, поэтому дозиметр пригоден и для опытов с β -излучением.

Встроенный в установку β -источник можно установить или перед окошком детектора, или в стороне, когда его излучение не регистрируется. Помогающие алюминиевые пластинки можно вставлять в кассету, расположенную между β -источником и детектором. В опыте с γ -источником он помечается в ту же кассету вместо пластинок (обычно γ -источник хранится в свинцовом контейнере).

Порядок выполнения лабораторных заданий

Подготовка дозиметра к работе

1. Переключатель В2 на пульте (см. рис. 6) установить в положение "Выкл", а переключатель В1 - в положение "Ток стаб". Вставить вилку сетевого шнура в розетку, установить переключатель В2 в положение "Непр. выше 30". Дозиметр включен, при этом стрелка прибора должна отклониться.
2. Ознакомиться с пультом. Дозиметр имеет 5 пределов измерения мощности экспозиционной дозы от 1 до 100- мкР/с, которые устанавливаются переключателем В1. Показывающий прибор снабжен двумя шкалами, шкала 0...10 используется на пределах 1, 10 и 100, а шкала 0...3 - на пределах 3 и 30.
3. Установить предел измерения 3 мкР/с,
4. После прогрева прибора в течение ≥ 3 мин закрыть световой затвор, повернув кольцо на блоке детектора по направлению острия клина. Ручкой "Уст. нуля" установить стрелку прибора на нулевое деление.

Примечание. Если пределов регулировки не хватит, установить стрелку на какое-либо деление рабочей шкалы и принять это деление за нуль. Открыть затвор, прибор готов к измерениям.

Задание 1. Изучить ослабление β -излучения в веществе, определить пробег и энергию β -частиц.

1. Придвинуть β -источник к детектору, при этом стрелка должна отклониться почти на всю шкалу на пределе "3" при отсутствии поглощающих пластинок.
2. Записать показания прибора в мкР/с при различном числе поглощающих пластинок от нуля до примерно 20 с шагом в одну пластинку. Когда показание прибора станет несколько меньше 1 мкР/с, установить предел "1", повторить установку нуля и продолжить измерения, пока интенсивность не уменьшится примерно в 100 раз по сравнению с начальной.
3. По результатам измерений построить зависимость интенсивности излучения от числа установленных пластинок.
4. Определить пробег β -частиц в единицах $г/см^2$:

$$d_0 = nd_1 + 0,2$$

где n - число пластинок, ослабляющих излучение -практически полностью (~ 100 раз), d_1 - толщина (поверхностная плотность) одной пластинки в $г/см^2$ (приведена на коробке с пластинами), 0,2 - поправка на толщину окошка дозиметра.

5. Используя полученное значение d_0 . вычислить по формуле (2) граничную энергию β -спектра E_{max} . Вычислить относительную погрешность измерения энергии, взяв табличное значение энергии 2,27 МэВ:

$$\epsilon = 100\% (E_{max} - 2,27) / 2,27$$

Задание 2. Для γ -источника измерить мощность дозы и сравнить с расчетом (примечание: так как r мало, согласие опыта с расчетом приблизительное).

1. Вставить γ -источник в кассету, снять показание дозиметра $P_{эксп}$ на пределе "1". Измерить расстояние r между источником и центром сцинтиллятора (его положение отмечено на блоке детектирования). Записать в отчет активность A_0 источника и дату поверки, приведенные на ручке источника.
2. По формуле (1) найти активность источника на данное время, затем рассчитать мощность дозы P по формуле (5). Вычислить относительное расхождение результатов опыта и расчета

$$\epsilon = 100\% (P_{эксп} - P) / P_{эксп}$$

Задание 3. Оценить фоновое излучение.

Фоновое излучение, составляющее примерно 0,006 мкР/с, должно отклонить стрелку примерно на 1/7 деления. Попытайтесь это заметить, открывая и закрывая затвор с интервалом несколько секунд. Если смещение стрелки заметить не удалось, из этого опыта можно дать верхнюю оценку фонового излучения. Для этого решите, сколь малое смещение Вы могли бы заметить. Это и есть верхний предел: излучение не превышает данного значения. Привести этот результат в отчете. Выключить дозиметр, установив переключатели В1 в положение "Ток стаб", а В2 - в положение "Выкл".

Контрольные вопросы

1. Какие процессы происходят в веществе при прохождении заряженных частиц и фотонов высокой энергии?
2. Что такое активность препарата и как она уменьшается со временем?
3. Как распадаются и что испускают используемые в работе радионуклиды ?
4. Чем отличается эквивалентная доза от поглощенной дозы?
5. Какие соотношения существуют между различными единицами дозы?
6. Как устроен и работает сцинтилляционный дозиметр?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И. В. Курс общей физики. В 3 т. М.: Наука, 1988. Т.3. 496 с.
2. Сивухин Д.В. Атомная и ядерная физика: Уч. пособие для вузов. В 2-х ч. 4.2. Ядерная физика. М.: Наука, 1989. 416 с.