

РАБОТА № 3

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД ДОЗИМЕТРИИ ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: оценить возможности измерения мощности эквивалентной дозы сцинтилляционными детекторами в широком диапазоне энергий фотонного излучения; изучить энергетическую зависимость чувствительности различных типов сцинтилляторов, а также различных типов промышленных дозиметров.

ВВЕДЕНИЕ

Сцинтилляционный метод дозиметрии рентгеновского и γ -излучения основан на регистрации вспышек света (люминесценции), возникающих в сцинтилляторе под действием излучения. Регистрация вспышек обычно производится фотоэлектронным умножителем - ФЭУ. Измеренный анодный ток i_f ФЭУ (токовый режим работы) или скорость счета $n_{сч}$ импульсов (счетный режим) пропорциональны мощности эквивалентной дозы излучения.

Схема сцинтилляционного блока детектирования показана на рис.5.1.

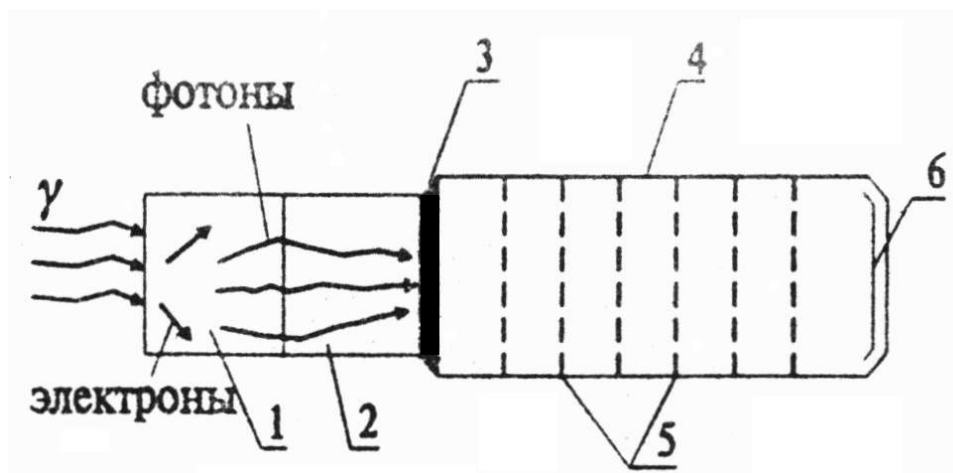


Рис.5.1. Схема сцинтилляционного блока детектирования

Фотонное излучение, взаимодействуя с веществом сцинтилляционного детектора (сцинтиллятора) (1), образует в нем вторичные заряженные частицы (фотоэлектроны, комптон-электроны и электрон-позитронные пары), которые, поглощаясь в сцинтилляторе, в результате преобразования энергии создают вспышки света определенной длины волны и длительности, зависящие от материала сцинтиллятора. То есть в сцинтилляторе энергия поглощенного излучения преобразуется в энергию световых квантов. Свет через световод (2) направляется на фотокатод (3) фотоумножителя (4) (в некоторых сцинтилляционных блоках световод может отсутствовать). С фотокатода в результате фотоэффекта выбиваются фотоэлектроны и усиленный на диодах (5) электронный поток попадает на анод (6). То есть каждой вспышке света в сцинтилляторе соответствует импульс тока в анодной цепи ФЭУ, следовательно, измерению может подлежать как среднее значение анодного тока, так и число импульсов тока в единицу времени. В соответствии с этим различают токовый и счетный режимы сцинтилляционного блока. Значение тока ФЭУ соответствует поглощенной энергии (аналог ионизационной камеры), а скорость счета - плотности потока фотонов (аналог газоразрядного счетчика).

В зависимости от вещества сцинтиллятора их подразделяют на органические (стильбен, антрацен и др.) и неорганические (NaI-Tl, CsI-Tl, $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$, PbWO_4 и др.) сцинтилляторы.

Различный механизм преобразования энергии в органических и неорганических сцинтилляторах определяет различие их основных характеристик: конверсионной эффективности, спектрального состава и длительности сцинтилляций. Эффективный атомный номер вещества сцинтиллятора также играет важную роль, т.к. он определяет вероятность взаимодействия фотонов с веществом сцинтиллятора и определяет одну из важнейших характеристик детекторов излучений - энергетическую зависимость чувствительности (ЭЗЧ), которая в дозиметрии получила название “ход с жесткостью”.

КОНВЕРСИОННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ η определяет ту часть потерянной в сцинтилляторе заряженной частицей энергии ΔE_e , которая преобразуется в энергию световых фотонов E_Φ :

$$\eta = \frac{E_\Phi}{\Delta E_e}. \quad (5.1)$$

Конверсионная эффективность выше у неорганических сцинтилляторов.

СРЕДНЕЕ ЧИСЛО ФОТОНОВ, возникающих в единицу времени при поглощении в сцинтилляторе энергии ΔE_e :

$$n_\Phi = E_\Phi / (h\nu)_\Phi = \eta \cdot \Delta E_e / (h\nu)_\Phi, \quad (5.2)$$

где $h\nu_\Phi$ – средняя энергия одного светового фотона, определяется спектром люминесценции материала сцинтиллятора. Необходимо, чтобы спектр люминесценции соответствовал спектральной чувствительности используемого ФЭУ.

СРЕДНЯЯ ЭНЕРГИЯ, затрачиваемая заряженной частицей на создание одного светового фотона:

$$W = \frac{\Delta E_e}{n_\Phi} = \frac{h\nu_\Phi}{\eta}. \quad (5.3)$$

ВРЕМЯ ВЫСВЕЧИВАНИЯ τ характеризует время уменьшения интенсивности сцинтилляции в e раз, зависит от материала сцинтиллятора. В первом приближении можно считать, что интенсивность люминесценции $J(t)$ изменяется по экспоненциальному закону

$$J(t) = J_0 \exp(-t/\tau), \quad (5.4)$$

где J_0 – интенсивность люминесценции в начальный момент времени, соответствующий моменту поглощения падающего фотонного или корпускулярного излучений веществом сцинтиллятора. Время высвечивания определяет загрузочную способность сцинтилляционного детектора и составляет 10^{-9} - 10^{-8} с для органических и 10^{-6} - 10^{-3} с для неорганических сцинтилляторов.

Качество сцинтилляционного детектора характеризуется оптической прозрачностью к собственному излучению

$$T(x) = T_0 \exp(-\mu x), \quad (5.5)$$

где μ - коэффициент оптического поглощения материала сцинтиллятора на длине волны, соответствующей максимуму спектра люминесценции, x – длина пути светового фотона в сцинтилляторе,

а также эффективностью собирания света σ . Для увеличения σ внутренние торцевая и боковая поверхности сцинтиллятора покрываются слоем порошка MgO. Для промышленных сцинтилляторов $\sigma=0,6-1$.

На практике пользуются понятием ТЕХНИЧЕСКИЙ СВЕТОВОЙ ВЫХОД – число фотонов, вышедших из сцинтиллятора на единицу поглощенной энергии

$$n_{\phi}^* = T \sigma n_{\phi} \quad (5.6)$$

КВАНТОВЫЙ ВЫХОД g фотоэлектронов с катода фотоумножителя на один испускаемый фотон для сцинтилляционных детекторов колеблется от 0,025 - 0,05, а КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ фотоэлектронного умножителя M составляет $10^5 - 10^{10}$.

Промышленные сцинтилляционные дозиметры фотонного излучения работают, как правило, в токовом режиме и измеряют мощность эквивалентной дозы в мкЗв/ч или (дозиметры старого образца) мощность экспозиционной дозы в мкР/ч.

Измеренная дозиметром величина мощности эквивалентной дозы излучения или мощности воздушной кермы отличается от реальной (рассчитанной) особенно в области низких энергий фотонов как в сторону больших значений (неорганические сцинтилляторы), так и в сторону меньших значений (органические сцинтилляторы). Другими словами, имеет место энергетическая зависимость чувствительности по мощности дозы – ЭЗЧ – ход с жесткостью. Известно теоретическое выражение для мощности воздушной кермы:

$$K = m_{km} I_{\gamma} = m_{kmb} E_{\gamma} \varphi_{\gamma}, \quad (5.7)$$

где I_{γ} -интенсивность излучения; m_{kmb} - массовый коэффициент передачи энергии фотонного излучения для воздуха; E_{γ} - энергия гамма-квантов;

ϕ_γ - плотность потока гамма - квантов.

Для сцинтилляционного дозиметра необходимо установить связь между анодным током i , который будет определяться вышеприведенными характеристиками сцинтиллятора, и мощностью экспозиционной дозы:

$$i = n_\phi \cdot g \cdot M \cdot e = (\eta \cdot \Delta E_e \cdot g \cdot M \cdot e) / (h\nu)_\phi, \quad (5.8)$$

где e - заряд электрона.

В этом выражении необходимо определить поглощенную в единицу времени энергию электронов, образовавшихся при взаимодействии гамма-квантов с сцинтиллятором высотой h и площадью торца S :

$$\Delta E_e = S \int_0^h \mu_{kz} \cdot I_\gamma e^{-\mu_z X} \cdot dx = \frac{S \cdot I_0 \mu_{kz}}{\mu_z} (1 - e^{-\mu_z h}), \quad (5.9)$$

где μ_{kz} , μ_z - линейные коэффициенты передачи энергии и ослабления гамма-излучения в веществе сцинтиллятора соответственно; I_γ - интенсивность падающего излучения.

Из выражения (5.7) получаем

$$I_\gamma = \frac{K}{\mu_{kmb}}. \quad (5.10)$$

Подставив (5.9) в (5.8) с учетом соотношения (5.10), получим для чувствительности дозиметра по мощности воздушной кермы:

$$i / K = \frac{eg \cdot M \cdot V \cdot \eta \cdot \rho_z}{\frac{|(h\nu)\phi|}{1}} \cdot \frac{1 - e^{-\mu_z h}}{\frac{|\mu_z h|}{2}} \cdot \frac{\mu_{kmz}}{\frac{|\mu_{kmb}|}{3}}, \quad (5.11)$$

где ρ_z - плотность сцинтиллятора, введенная при переводе μ_{kz} в μ_{kmz} : ($\mu_{kmz} = \rho_z m_{kz}$).

Ход с жесткостью (ЭЗЧ) имеет место потому, что коэффициенты передачи и ослабления энергии зависят от энергии γ -излучения, и эта зависимость в общем случае нелинейная: при малых энергиях (фотоэффект) $\mu \cong f(Z^4)$, при больших (эффект образования пар) $\mu \cong f'(Z^2)$; при средних энергиях (комpton - эффект) $\mu \cong f(Z^1)$. Чем больше порядковый номер вещества сцинтиллятора отличается от порядкового номера воздуха, тем

сильнее отличие измеренной мощности экспозиционной дозы от расчетной, т.е. сильнее ЭЗЧ. Эффективный порядковый номер ($Z_{эфф}$) промышленных неорганических сцинтилляторов лежит в пределах от 27 (ZnS-Ag) до 54 (CsJ-TL), а для органических $Z_{эфф} = 5,7-5,8$; $Z_{эфф \text{ воздуха}} = 7,64$ (для фотоэффекта). Поэтому, с одной стороны, неорганические сцинтилляторы имеют большую вероятность взаимодействия с гамма-излучением, но, с другой стороны, это же обуславливает и высокую ЭЗЧ. Для органических сцинтилляторов - наоборот. И на практике необходимо находить компромисс между этими параметрами при выборе сцинтилляционного дозиметра при измерении малых (фон), средних и больших доз.

Если рассмотреть выражение (5.11) как функцию энергии, то можно считать отношение 1 практически не зависящим от энергии гамма - квантов (η слабо зависит от энергии в низкоэнергетической области). Отношение 2 и 3, характеризующие ослабление и поглощение соответственно, зависят от энергии, но для воздуха μ_{kmB} слабо зависит от энергии. Определяющим в создании ЭЗЧ является отношение 3.

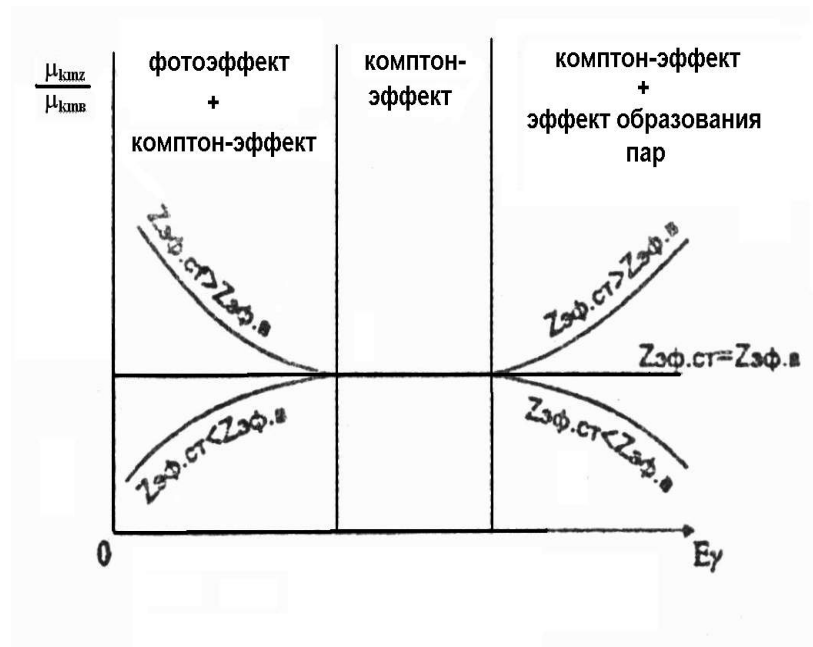


Рис.5.2. Зависимость $\frac{\mu_{km}}{\mu_{kmB}} = f(E)$ для сцинтилляторов с разным эффективным атомным номером

На рис.5.2 приведена феноменологическая зависимость $\frac{\mu_{km}}{\mu_{kmB}} = f(E)$ для различных материалов сцинтилляторов, используемых в дозиметрах гамма-излучения.

В тонком ($\mu_{kz} \ll I$) и воздушно-эквивалентном ($\mu_{kmz} = \mu_{kmB}$, так как $Z_{эф.сц} = Z_{эф.воз}$) сцинтилляторе ЭЗЧ нет, то есть $\frac{i}{K} = 1$.

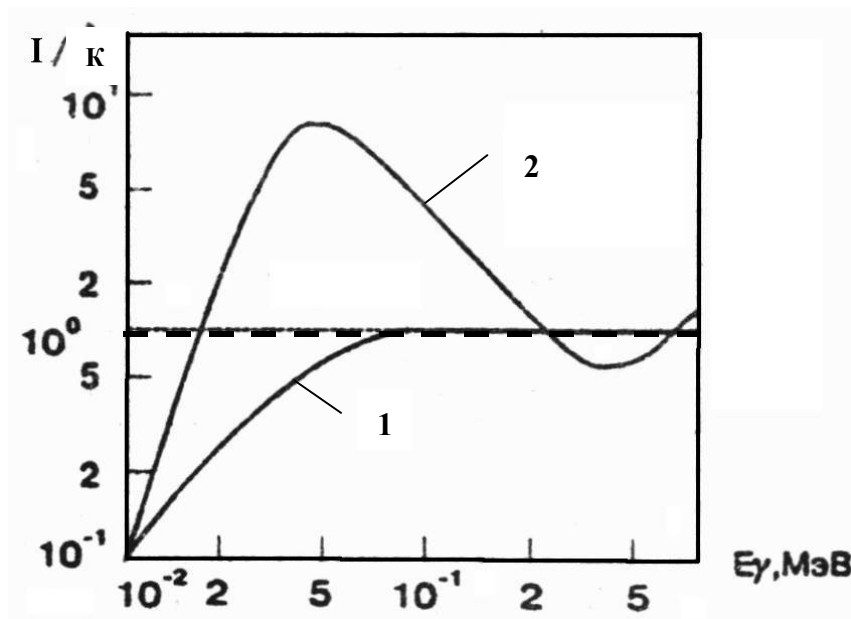


Рис.5.3

На рис.5.3 даны зависимости $i/K = f(E_\gamma)$ для NaJ-Tl; ($Z_{эф\phi} = 50$) - кривая 2 и антрацена ($Z_{эф\phi} = 5,8$) - кривая 1. Максимум кривой 2 объясняется влиянием фотопоглощения; в области малых энергий кривая 2 проходит ниже значения $i/K=1$ (влияет толщина сцинтиллятора). У антрацена кривая 1 во всей области малых энергий проходит ниже $i/K = 1$, так как фотопоглощение оказывается значительно слабее.

Для сглаживания ЭЗЧ в токовом режиме необходимо использовать комбинацию двух веществ так, чтобы компенсировать их взаимное влияние в области фотопоглощения. Например, используют “сэндвич” из тонкого

неорганического и толстого органического сцинтилляторов или делают смесь из органического и неорганического сцинтиллирующих веществ. В этом случае удастся продлить прямолинейный участок в область низких энергий (рис.5.3, штриховая линия).

Для дозиметров, работающих в счетном режиме, выражение ЭЗЧ определяется выражением

$$\frac{n_c}{K} = \frac{S(1 - e^{-\mu_z h})}{E_\gamma \cdot \mu_{kmb}}, \quad (5.12)$$

где $n_{сч}$ – скорость счета импульсов, регистрируемых ФЭУ. Зависимость ЭЗЧ, определяемая уравнением (5.12), не имеет горизонтального участка, и ЭЗЧ будет значительной во всем диапазоне энергий, т.к. наряду с тем, что $\mu_z \cong f(E_\gamma)$, в знаменатель входит энергия гамма-излучения; с изменением энергии числитель и знаменатель изменяются в противоположных направлениях. При работе ФЭУ в счетном режиме ЭЗЧ может быть уменьшена путем изменения вероятности регистрации импульса электронной схемой.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка включает в себя набор дозиметров СРП-88, СРП-68 (неорганические сцинтилляторы); дозиметры типа ДРГЗ (органические сцинтилляторы), промышленные малогабаритные дозиметры на основе газоразрядных счетчиков и набор из 4 точечных гамма - источников, характеристики которых приведены в табл.5.1. Активности источников указаны на рабочем месте.

Таблица 5.1. Характеристики используемых источников гамма-излучения

Радионуклид	E_γ , МэВ	Полная гамма-постоянная по мощности эквивалентной дозы Γ , аЗв·м ² /(с·Бк)	Полная гамма - постоянная Γ_x , см ² Р/(ч·мКи)	Период полураспада
²⁴¹ Am	0,060	0,885	0,118	432 года
¹⁴⁴ Ce	0,134	1,99	0,265	284 суток
¹³⁷ Cs	0,661	24,3	3,242	30,17 лет
⁶⁰ Co	1,25	96,3	12,85	5,27 лет

ЗАДАНИЕ

1. После сдачи коллоквиума ознакомиться с экспериментальной установкой и дозиметрами, используемыми в работе (перечень дозиметров указывает ведущий преподаватель). Изучить паспорт и инструкцию работы с дозиметрами. Подготовить дозиметры к работе.

2. Провести измерение фонового значения мощности эквивалентной дозы H_f всеми дозиметрами в центре экспериментального стола при закрытых источниках гамма-излучения.

3. Провести измерения мощности дозы от каждого источника каждым дозиметром на определенном оптимальном расстоянии R_i . Зафиксировать значение R_i в рабочем протоколе. Оптимальное расстояние выбирается так, чтобы, с одной стороны, прибор «не зашкаливал» (в этом случае возможен эффект «насыщения»), с другой его показания были значительно выше фона и точка измерения не выбиралась вблизи стены (в этом случае вклад в измеряемую мощность дозы дает рассеянное излучение).

Примечание: значение расстояния R_i может быть различно для каждого дозиметра и источника.

4. Рассчитать мощности эквивалентных доз, создаваемых каждым источником на расстоянии R_i , формула (5.13). Если показания дозиметров даны во внесистемных единицах [мкР/ч], рассчитать мощности экспозиционных доз, создаваемых каждым источником на расстоянии R_i по формуле (5.14). Данные расчетов и измерений рекомендуется записывать в форме таблиц 5.2 и 5.3. Таблица 5.3 делается для каждого детектора.

Таблица 5.2

Источник излучения	Активность, мКи	
	Паспортная	На момент измерения
^{241}Am ^{144}Ce ^{137}Cs ^{60}Co		

Таблица 5.3

Источник излучения	R, м	$H_{расч},$ мкЗв/ч	$H_{эксп},$ мкЗв/ ч	$H_{фон},$ мкЗв/ ч	$H_{эксп} -$ $H_{фон},$ мкЗв/ч	$S_i,$ отн.ед.	$S_{эксп},$ %	$S_{пасп},$ %
^{241}Am ^{144}Ce ^{137}Cs ^{60}Co								

5. Построить графически энергетическую зависимость чувствительности (ЭЗЧ) для каждого из детекторов, используемых в работе. Определить значение ЭЗЧ ($S_{эксп}, \%$) в рабочем энергетическом диапазоне и сравнить со значением ЭЗЧ, приведенном в паспорте на дозиметр ($S_{пасп}, \%$).

ПРАКТИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

1. Мощность эквивалентной дозы падающего гамма-излучения H на расстоянии R рассчитывается по формуле

$$H_{расч} = \frac{\Gamma x \cdot A}{R^2} \text{ [Зв/с]}, \quad (5.13)$$

где Γx - полная гамма - постоянная радионуклида по мощности эквивалентной дозы, [аЗв·м² / (с·Бк)];

A - активность радионуклида на время измерения, [Бк];

R - расстояние от источника до точки измерения, [м].

Мощность экспозиционной дозы падающего гамма-излучения $\dot{X}$ на расстоянии R рассчитывается по формуле

$$\dot{X}_{расч} = \frac{\Gamma x \cdot A}{R^2} \text{ [Р/ч]}, \quad (5.14)$$

Γx - полная гамма – постоянная радионуклида [см² Р/(ч· мКи)];

A - активность радионуклида на время измерения, [мКи];

R - расстояние от источника до точки измерения, [см].

Активность источника на момент измерения определяется по формуле

$$A = A_0 \exp(-0,693t / T_{1/2}) \text{ [Бк]}, \quad (5.15)$$

где A_0 – паспортная активность источника на момент его изготовления, Бк;

$T_{1/2}$ - период полураспада, лет;

t - время, прошедшее с момента изготовления источника до момента измерения, лет.

2. Найти значение $S_i = H_{\text{эксн}} / H_{\text{расч}}$ для каждой точки по энергии и для каждого детектора. В значении $H_{\text{эксн}}$ учесть значение фона $H_{\text{ф}}$.

3. По 4 значениям S_i для каждого дозиметра графически построить энергетическую зависимость чувствительности: $S = f(E_{\gamma})$. Определить значение $S_{\text{эксн}} (\%)$ и сравнить с паспортными значениями $S_{\text{пасп}} (\%)$ для каждого дозиметра.

4. Сравнить полученные значения $S = f(E_{\gamma})$ для всех используемых дозиметров между собой и сделать вывод о возможности их использования на практике с точки зрения минимального значения ЭЗЧ, рабочего диапазона энергий при регистрации гамма-излучения, погрешности измерений.

5. Сравнить полученные результаты с паспортными значениями ЭЗЧ. Объяснить наблюдаемую погрешность.

6. Отчет должен содержать:

- краткие теоретические предпосылки, характеризующие появление ЭЗЧ детекторов;
- схему экспериментальной установки;
- экспериментальные результаты в виде таблиц и графиков;
- паспортные данные используемых дозиметров, расчет погрешности измерений;
- аргументированные выводы по работе с анализом экспериментальных данных.

Отчет должен быть оформлен в соответствии с общими установленными правилами, сдается один на бригаду, защищается каждым членом бригады.