

### 3. ИЗМЕРЕНИЕ РАДИОАКТИВНОСТИ ПРЕПАРАТОВ

#### 3.1 Выбор детектора

Выбор метода и условий измерения зависит от типа распада, интенсивности и энергии излучения, агрегатного состояния вещества, геометрии препарата и т.п. При этом выбирается тип детектора (ионизационный, сцинтилляционный, полупроводниковый и т.п.), материал, из которого изготовлен детектор (например, для регистрации  $\alpha$ -частиц идеальными являются сцинтилляционный детектор на основе ZnS, для  $\gamma$ -квантов – CsI, а для мягкого  $\beta$ -излучения – пластмассовые сцинтилляторы). Подбирается также агрегатное состояние детектора: монокристаллы сцинтиллятора или жидкие сцинтилляторы, и его геометрические размеры: чем больше площадь детектора, тем больше его чувствительность, чем толще сцинтилляционный детектор, тем выше его чувствительность и хуже разрешающая способность (для регистрации мягкого  $\beta$ -излучения применяются тонкие детекторы, а для регистрации жёсткого  $\gamma$ -излучения – толстые детекторы). При применении газонаполненных ионизационных счётчиков важное значение имеет толщина стенки счётчика и материал, из которого она изготовлена: для регистрации  $\alpha$ -излучения применяют торцовые гейгеровские счётчики с тонким слюдяным окном, а для  $\gamma$ -излучения – цилиндрические счётчики со сравнительно толстыми стальными стенками. Твёрдые препараты измеряют внешними счётчиками, тогда как радиоактивные газы запускают непосредственно в объём детектора. С точки зрения достоверной регистрации потоков флюидов (жидкостей или газов, протекающих через детектор) переменного состава важным параметром является инерционность системы регистрации.

Как уже упоминалось, радиометрические приборы характеризуются такими рабочими параметрами, как чувствительность прибора, его эффективность, разрешающее время, разрешающая способность по энергии, уровень шумов и др.

Важная характеристика детектора - его эффективность, т.е. вероятность регистрации частиц или квантов, попадающих в чувствительный объём детектора. При регистрации  $\gamma$ -квантов она может составлять от долей процента (для счётчиков Гейгера - Мюллера или полупроводниковых детекторов сравнительно небольшого объема) до почти 100% для сцинтилляционных детекторов с неорганическими сцинтилляторами достаточно больших размеров. Для  $\alpha$ -частиц и высокоэнергетических  $\beta$ -частиц эффективность большинства современных детекторов близка к 100%. Эффективность жидкостно-сцинтилляционных детекторов при регистрации  $\beta$ -частиц трития с максимальной энергией всего 18 кэВ достигает 56-60%.

Выбор детектора для регистрации радиоактивных излучений производят на основе критерия качества (КК) (коэффициент качества, критерия надёжности). Значение КК обратно пропорционально времени  $t$ , необходимому для получения результата с заданной погрешностью:  $КК = 1/t \sim \varepsilon^2/I_\phi$ , где  $\varepsilon$  - эффективность регистрации излучения, а  $I_\phi$  - фон прибора. Так как в большинстве современных приборов эффективность регистрации корпускулярного излучения ( $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц) близка к теоретически достижимому пределу, повышение КК определяется возможностью подавления фона детектора, который обусловлен регистрацией космического излучения, внешнего излучения от радионуклидов, содержащихся в окружающей среде (воздух, строит. материалы, грунт), и радиоактивных загрязнений в конструкционных материалах, из которых изготовлен детектор; фон связан также с некоторыми процессами в самом детекторе («ложные» импульсы в счётчиках Гейгера-Мюллера, шумы фотоэлектронных умножителей в сцинтилляционных детекторах и т. п.). Для снижения фона детектор помещают в «пассивную» защиту из тяжелых материалов (свинец, чугун и т. п.), экранирующую детектор от внешнего  $\gamma$ -излучения и ослабляющую мягкую компоненту космического излучения. Для подавления главной на уровне моря составляющей космического излучения - мюонной - применяется так называемая активная защита - дополнительный детектор, окружающий основной и включенный с ним в специальную схему антисовпадений. При этом исключается регистрация импульсов основного детектора, совпадающих по времени с импульсами, регистрируемыми детектором активной защиты (такие совпадающие импульсы как раз и обусловлены в основном прохождением мюонов одновременно через оба детектора).

При регистрации  $\gamma$ -квантов часто приходится выбирать между эффективностью регистрации и разрешающей способностью детектора по энергии. Так, эффективность регистрации сцинтилляционными детекторами больших размеров с неорганическими сцинтилляторами может приближаться к 100%, но разрешающая способность их сравнительно низка (7-10%). В то же время современные полупроводниковые детекторы на основе германия обладают гораздо лучшей разрешающей способностью, но эффективность их составляет обычно доли процента. Ведутся интенсивные поиски полупроводниковых материалов для более эффективной регистрации  $\gamma$ -излучения.

Измерение излучений, обладающих сравнительно малыми пробегами, с помощью внешних детекторов (расположенных вне исследуемого препарата) предъявляет жёсткие требования к детектору, который должен обеспечивать минимальные потери, связанные с геометрическими условиями измерения и с ослаблением излучения на пути между препаратом и детектором. Важно также, чтобы при приготовлении препаратов

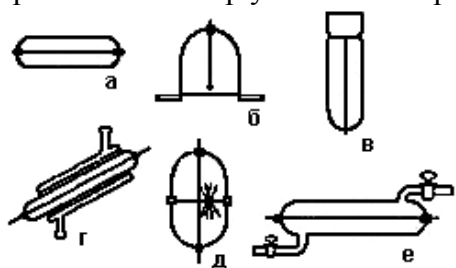
обеспечивалось снижение потерь, связанных с самоослаблением излучения в слое самого препарата, равномерность нанесения препарата на подложку и т.п.

При измерении препаратов весьма низкой активности следует использовать чувствительную малошумящую аппаратуру, счётчик 4π-геометрии и принимать меры по возможно полному подавлению внешнего излучения (материалы счётчика не должны содержать каких-либо радионуклидов; счётчик должен быть надёжно экранирован от космического излучения как пассивными, так и активными средствами защиты; в атмосфере, окружающей счётчик, не должно быть радона и продуктов его распада и т.п.) и избавлен от наводок в сети (питание аппаратуры – от электрической батареи или аккумулятора).

При измерении препаратов высокой активности следует использовать аппаратуру с хорошим разрешающим (малым мёртвым) временем, работающую на коротких импульсах. Например, при измерении относительно высоких активностей счётчиком Гейгера-Мюллера приходится вводить поправку на мёртвое время счётчика. В этом отношении пропорциональный счётчик, обеспечивающий скорости счёта до  $10^5$  имп/сек, обладает значительным преимуществом по сравнению со счётчиком Гейгера-Мюллера. При больших активностях вносятся поправки на разрешающее время счётчика. При очень высоких активностях следует переходить на калориметрические и им подобные методы регистрации.

### 3.2 Оптимальные условия регистрации излучения

При измерении активности препаратов важен подбор оптимального режима работы аппаратуры и грамотный выбор условий измерения препарата. Проиллюстрируем это на примере разных типов детекторов.



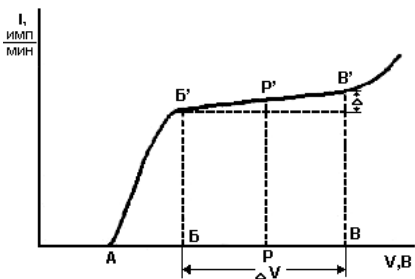
**Рис. 6.** Счетчик Гейгера-Мюллера: а - цилиндрический β- или γ-счетчик; б - торцовый счетчик; в - счетчик погружения; г - цилиндрический счетчик с рубашкой для измерения активности жидкостей; д - 4π-счетчик; е - проточный счетчик (счетчик внутреннего наполнения) для измерения активности газов

#### 3.2.1 Счётчик Гейгера-Мюллера

Для регистрации α-излучения используются торцовые счётчики Гейгера-Мюллера с очень тонким слюдяным окном.

Счётчики Гейгера-Мюллера при регистрации β-частиц имеют эффективность практически равную единице. Стенки счётчика, однако, заметно поглощают β-частицы. Поэтому β-счётчики обычно имеют тонкие стенки. На **Рис.6** изображены важнейшие типы β-счётчиков. Для регистрации жёсткого β-излучения обычно используются цилиндрические β-счётчики, а для регистрации мягкого β-излучения – торцовые счётчики. Торцовые счётчики имеют очень тонкое слюдяное окошко, которое слабо поглощает мягкое β-излучение. Слюдяное окошко имеет толщину 1-5 мг/см<sup>2</sup>. Для измерения жёсткого β-излучения в жидкостях используются счётчики погружения или цилиндрические счётчики со стеклянной рубашкой. Для измерения абсолютной активности β-препаратов используются 4π-счётчики. В этих счётчиках радиоактивный препарат помещается внутрь счётчика. В счётчике отсутствует поглощение излучения, и, следовательно, все испускаемые препаратом β-частицы регистрируются счётчиком. Радиоактивность газов (<sup>14</sup>CO<sub>2</sub>, НТ, <sup>133</sup>Xe и др.) измеряется при помощи проточных счётчиков. Радиоактивный газ вместе с газом, наполняющим счётчик (инертный и гасящий газы), вводятся внутрь счётчика. При желании можно измерять радиоактивность газа при непрерывном потоке газовой смеси. Все β-счётчики регистрируют и γ-кванты, правда, эффективность β-счётчиков к γ-лучам меньше, чем γ-счётчиков.

Для регистрации γ-квантов используются цилиндрические счётчики. Удельная ионизация излучением очень мала, поэтому мала и вероятность ионизации газа внутри счётчика. Гораздо больше вероятность ионизации материала катода. При прохождении γ-лучей через корпус счётчика происходит ионизация материала катода, причём образуются в основном фото- и комптоновские электроны. Если γ-кванты имеют энергию больше 0,511 МэВ, то в материале катода образуются ещё электрон-позитронные пары. Эти вторичные электроны, попадая в объём счётчика, вызывают ионизацию счётного газа и образование ионной лавины. Очевидно, что нецелесообразно делать счётчик с толщиной стенок больше пробега фото- и комптоновских электронов. Чаще всего корпус γ-счётчиков изготавливается из стекла, покрытого внутри слоем металлической меди или графита. Для таких счётчиков эффективность регистрации γ-квантов средних энергий составляет 0,5-1%, т.е. не более одного кванта из ста попавших в чувствительный объём счётчика будут зарегистрированы счётчиком. Все γ-счётчики регистрируют жёсткое β-излучение.



**Рис.7.** Счётная характеристика счётчика Гейгера-Мюллера.  $U_1$  – напряжение начала счёта,  $U_2+U_3$  – рабочий участок характеристики;  $U_p$  – рабочее напряжение счётчика.

Для оптимального режима работы счётчика Гейгера-Мюллера важное значение имеет правильный выбор рабочего напряжения, подаваемого на детектор. С этой целью, перед началом серийных измерений, снимают рабочую характеристику счётчика, т.е. зависимость скорости счёта эталонного препарата от подаваемого на детектор излучения. На **Рис.7** изображена счётная характеристика счётчика Гейгера-Мюллера. В точке *А* начинается регистрация ядерного излучения, отрезок *АВ* может быть настолько мал, что его не удастся экспериментально определить. Область, отвечающая отрезку *ВВ'*, называется плато счётной характеристики.

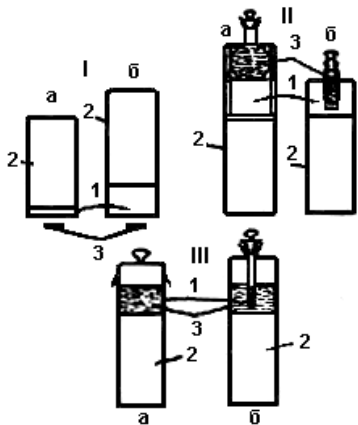
В области плато счётная характеристика имеет небольшой наклон, т.е. регистрируемая скорость счёта несколько увеличивается с ростом напряжения счётчика. Это явление вызвано появлением ложных импульсов. Наклон плато счётной характеристики определяется по формуле:

$$\Delta I = \frac{\Delta I_{\text{имп/мин}}}{\Delta V \cdot I_p} \cdot 100\% \quad (1)$$

где  $\Delta I$  в имп/мин – увеличение скорости счёта при изменении напряжения на счётчике на  $\Delta V$  В. Счётная характеристика считается удовлетворительной, если наклон плато составляет не более 0,15% на 1 В. Рабочее напряжение *Р* выбирают в области плато несколько ближе к началу плато *Б*.

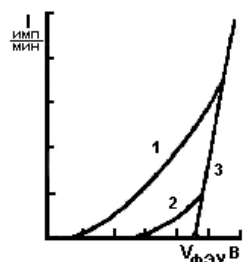
### 3.2.2 Сцинтилляционный счётчик

Для регистрации  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучений используются различные конструкции сцинтилляционных счётчиков (**Рис.8**).



**Рис. 8.** Конструкции сцинтилляционных датчиков. 1) - сцинтиллятор; 2) -ФЭУ; 3) – радиоактивный препарат. I - Измерение твердых радиоактивных препаратов: а – по  $\beta$ -излучению; б -по  $\gamma$ -излучению. II - Измерение жидких радиоактивных препаратов по жесткому  $\beta$ -излучению и  $\gamma$ -излучению: а - в мерной колбе; б - в ампуле (фосфор с колодцем). III - измерение  $\beta$ - и  $\gamma$ - излучения при помощи жидких сцинтилляторов: а - радиоактивное вещество растворено в жидком фосфоре; б - твердый или жидкий препарат опущен в жидкий фосфор

Для регистрации  $\gamma$ -квантов применяются большие неорганические монокристаллы, поскольку эффективность регистрации  $\gamma$ -излучения сцинтилляционными счётчиками увеличивается с геометрическими размерами и плотностью фосфоров. Для обычных монокристаллов NaI(Tl) эффективность регистрации  $\gamma$ -излучения средних энергий составляет около 30%. При регистрации  $\beta$ -излучения обычно используют органические или пластмассовые сцинтилляторы, но можно воспользоваться и неорганическими монокристаллами. Сцинтиллятор имеет малую толщину, равную максимальному пробегу  $\beta$ -частиц данного радиоактивного изотопа (порядка нескольким миллиметрам) при этих толщинах эффективность регистрации  $\gamma$ -лучей достаточно мала. Для регистрации мягкого  $\beta$ -излучения удобны жидкие сцинтилляторы. Вещество, содержащее мягкий  $\beta$ -излучатель ( $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{35}\text{S}$  и т.д.), растворяется непосредственно в жидком сцинтилляторе. В этих условиях эффективность регистрации мягкого излучения близка к единице (100%). Для регистрации нестационарных концентраций жидкостей и газов, испускающих  $\alpha$ - или мягкое  $\beta$ -излучение, успешно применяется полый капилляр из сцинтиллирующей пластмассы, уложенный в виде плоской спирали на входное окно ФЭУ. Для регистрации  $\alpha$ -излучения обычно используется тонкий слой ZnS(Ag), отложенный на поверхности стекла.

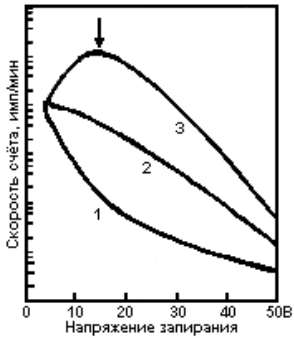


**Рис. 9.** Зависимость скорости счёта (1), величины фона (2) и значений теплового шума (3) от напряжения на ФЭУ (счётная характеристика сцинтилляционного счетчика).

Установка для регистрации ядерного излучения в лабораторных условиях обычно состоит из сцинтилляционного датчика со сменными фосфорами, расположенного в

свинцовом контейнере, усилителя, дискриминатора, высоковольтного блока питания ФЭУ, пересчётного устройства и системы записи информации (компьютера).

Скорость счёта радиоактивного препарата и фона, регистрируемого сцинтилляционным счётчиком, зависят от трёх параметров: а) напряжения на ФЭУ; б) усиления линейного усилителя; в) порога дискриминации. Важно, что как увеличение напряжения на ФЭУ, так и увеличение усиления усилителя, дают одинаковый эффект при регистрации излучения. Поэтому не совсем оптимальные параметры усилителя можно компенсировать соответствующим напряжением на ФЭУ и наоборот. Напротив, величина порога дискриминации влияет на значение скорости счёта и фона.



**Рис. 10.** Зависимость скорости счёта и величины фона от значений порога дискриминации: 1 -  $I_\phi$ , 2 -  $I_c$ , 3 -  $\frac{I_c}{I_\phi} I_c$ .

На Рис.9 приведена зависимость регистрируемой скорости счёта препарата с фоном, фона и значений теплового шума от напряжения на ФЭУ. Видно, что, начиная с определённого напряжения на ФЭУ, величина теплового шума резко увеличивается и становится больше регистрируемой скорости счёта.

Следовательно, напряжение на ФЭУ должно быть не больше напряжения, при котором замечен тепловой шум (уровень дискриминации равен нулю). Обычно выбирают небольшое или среднее значение усиления (около 100). Очень часто достаточно экспериментально определить счётную характеристику и изобразить её графически (Рис.10). По графику определяется рабочее напряжение. Далее проводят отыскание оптимального значения порога дискриминации, которое связано с определением максимального значения функции  $I_{np}^2/I_\phi$ . Для этого проводится измерение значений скорости счёта радиоактивного препарата без фона  $I_{np}$  и фона  $I_\phi$ . В этих измерениях устанавливается выбранное усиление и рабочее напряжение на ФЭУ.

Таким образом, при выборе оптимального режима работы сцинтилляционного счётчика, прежде всего следует отстроиться от собственных шумов ФЭУ. Действительно, в ряде случаев на выходе усилителя наблюдается большое число импульсов (обычно малых по амплитуде) не связанных с регистрацией ядерных частиц, а именно, импульсов собственных шумов ФЭУ и усилителя. Для устранения шумов между усилителем и счётчиком импульсов включается интегральный амплитудный дискриминатор, пропускающий лишь те импульсы, амплитуды которых больше некоторого значения порогового напряжения.

Важной задачей является и правильный выбор рабочего напряжения на ФЭУ. С этой целью сначала выбирают постоянную времени цепи выхода ФЭУ  $RC_n$  ( $RC_n$  – суммарная постоянная времени выхода ФЭУ и входа усилителя) в соответствии с временем высвечивания сцинтиллятора  $\tau_{выс}$ . Для кристалла NaI(Tl)  $\tau_{выс}=0,25 \cdot 10^{-6}$  сек. Тогда, принимая  $RC_n = \tau_{выс}$  и  $C_n=25$  пф, можно определить сопротивление нагрузки в цепи анода ФЭУ:

$$R = \frac{\tau_{выс}}{C_n} = \frac{0,25 \cdot 10^{-6}}{25 \cdot 10^{-12}} = 10 \text{ кОм} \quad (2)$$

После этого устанавливают значение времени нарастания  $0,5RC_n$  и длительность импульса  $(3-5)RC_n$ , подносят к сцинтиллятору препарат  $^{137}\text{Cs}$  активностью  $2 \cdot 10^4$  расп/сек и устанавливают на ФЭУ напряжение соответствующее (согласно паспорту) интегральной чувствительности 1 а/лм. Подбирают коэффициент усиления усилителя так, чтобы при пороге интегрального дискриминатора 100 В наблюдался слабый счёт, например для препарата 1000 имп/сек счёт подбирается равным 20 имп/сек. Ставят порог дискриминатора 50 В и, варьируя значения времени нарастания и длительности импульса усилителя, добиваются максимальной скорости счёта. Затем определяют значения скорости счёта в зависимости от порога дискриминатора через 5 В в интервале от 5 до 100 В. То же самое проводят для фона, а затем – с удалённым сцинтиллятором.

Оптимальные значения напряжения на ФЭУ, интегральной чувствительности и порога дискриминатора определяют по максимальному значению величины  $(\sqrt{I_n} - \sqrt{I_\phi})^2$  для всех серий измерений.

Если имеется усилитель с нерегулируемыми параметрами и отсутствует интегральный дискриминатор, то режим работы счётчика выбирают таким, чтобы относительная ошибка  $\rho$  счёта препарата была минимальной. При этом время  $t$ , затраченное на измерение активности препарата при разных режимах, должно быть одинаковым. Поскольку для определения активности препарата нужно измерять препарат с фоном и фон, то

$$I = I_c - I_\phi \quad (3)$$

$$t = t_c + t_\phi \quad (4)$$

Квадрат относительной квадратичной ошибки скорости счёта препарата без фона выражается формулой:

$$\delta^2 = \frac{\frac{I_c}{t_c} + \frac{I_\phi}{t_\phi}}{(I_c - I_\phi)^2} \quad (5)$$

Эта ошибка получается минимальной, если

$$\frac{t_c}{t_\phi} = \sqrt{\frac{I_c}{I_\phi}} \quad (6)$$

Формула, связывающая между собой относительную ошибку, суммарное время измерения и активности препарата (без вычета фона) и фона:

$$\delta^2 t = \frac{1}{(\sqrt{I_c} - \sqrt{I_\phi})^2} \quad (7)$$

Критерием выбора оптимального режима работы счётчика будет величина

$$K = (\sqrt{I_c} - \sqrt{I_\phi})^2 \quad (8)$$

Рассчитав величину  $K$  для разных режимов, следует за рабочий режим выбирать тот, при котором  $K$  имеет максимум. Счёт препарата в таком режиме обеспечивает при заданном суммарном времени измерения минимальную ошибку, и наоборот – при заданной погрешности – минимальное общее время измерения. При этом суммарное время  $t$  должно разделяться на время счёта препарат и фона.

На **Рис.10** изображён метод отыскания оптимального значения порога дискриминации (запирания). Оптимальные параметры сцинтилляционного счётчика меняются от типа и энергии ядерного излучения. Счётная характеристика сцинтилляционного счётчика обычно не имеет плато (**Рис.9**) и поэтому требуется очень хорошая стабилизация высокого напряжения, подающегося на ФЭУ, и напряжения питания линейного усилителя.