

## УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ ГАЗОРАЗРЯДНОГО СЧЕТЧИКА ГЕЙГЕРА

**Цель работы:** изучение устройства и принципа работы счетчика Гейгера, определение его основных параметров и пригодности к работе.

Счетчики Гейгера-Мюллера – это газоразрядные детекторы частиц, предназначенные для регистрации различных видов ионизирующего излучения. Их действие основано на возникновении в счетчике самостоятельного газового разряда при попадании заряженной частицы в его рабочий объем. Самостоятельным газовым разрядом называют электрический разряд в газе, сохраняющийся после прекращения действия внешнего ионизатора, несамостоятельным – существующий только под действием внешнего источника ионизации. Промышленностью выпускается два вида счетчиков Гейгера – цилиндрические и торцовые.

Цилиндрический счетчик Гейгера (Гейгера-Мюллера) представляет собой герметично запаянную тонкостенную металлическую или стеклянную металлизированную трубку (катод), вдоль оси которой натянута тонкая металлическая нить (анод), конструкция которых показана на рисунках 27 и 28.

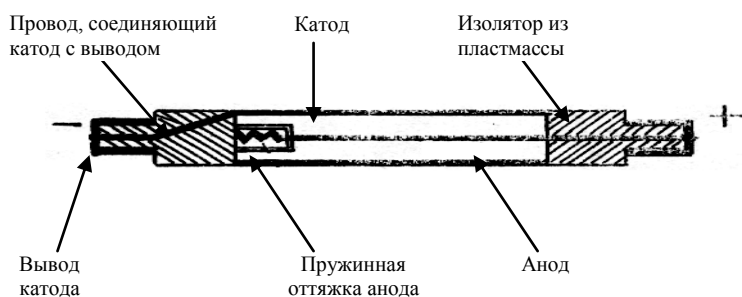


Рис.27. Цилиндрический счетчик Гейгера-Мюллера.

У торцовых счетчиков Гейгера-Мюллера (рис.28) в металлическом или стеклянном металлизированном корпусе (катоде) в торцевой части имеется тонкое слюдяное окно.

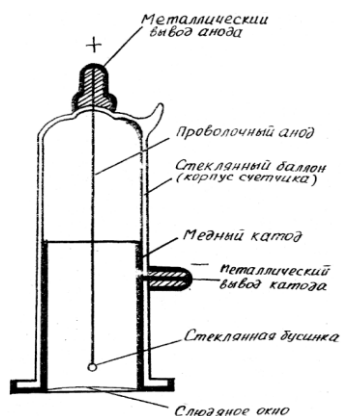


Рис.28. Торцовый счетчик Гейгера-Мюллера.

Конец металлической нити (анода) закрыт стеклянной бусинкой для предотвращения коронного разряда.

Торцовые счетчики служат для регистрации альфа-излучения и мягкого бета-излучения, а цилиндрические для регистрации жесткого бета-излучения и гамма-излучения.

Счетчик Гейгера заполняется нейтральным газом, чаще всего инертным (аргоном или неоном), под давлением 100–200 мм рт.ст. Электроды счетчика находятся под напряжением порядка 250–2000 В. Величина рабочего напряжения зависит от конструкции счетчика и состава заполняющей его газовой смеси. Электрическая схема включения счетчика Гейгера-Мюллера показана на рис. 29.

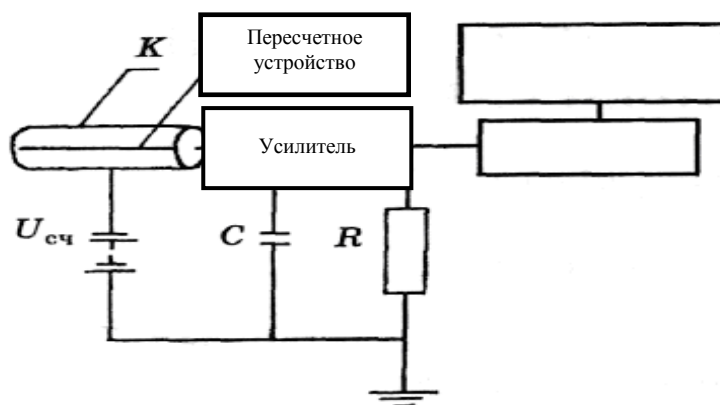


Рис.29. Электрическая схема включения счетчика Гейгера-Мюллера. К-катод; А-анод; R-резистор нагрузки счетчика; C-входная емкость усилителя;  $U_{сч}$ -источник питания счетчика.

Ионизирующее излучение проникает в цилиндрический счетчик через его боковую поверхность, в торцовый – через слюдяное окошко.

Первичные электроны, входящие в состав регистрируемого излучения, а также вторичные электроны, выбитые излучением из боковой стенки или атомов газа, ускоряются электрическим полем и устремляются к аноду. Проходя через газ, они вызывают ионизацию и возбуждение встречающихся на их пути атомов. Освобождающиеся при этом дополнительные электроны также ускоряются электрическим полем и, двигаясь к аноду, производят ионизацию новых атомов. Образующиеся положительные ионы движутся к катоду.

Таким образом, попадание в счетчик ионизирующей частицы (электрона, позитрона, альфа-частицы, гамма-кванта, нейтрона и т.д.) с энергией, достаточной для образования хотя бы одной электронно-ионной пары, способно вызвать появление целой лавины электронов и положительных ионов.

Возникающий в счетчике газовый разряд является самостоятельным. Механизм его развития можно объяснить следующим образом. Электроны, образующие первичную лавину, движутся в счетчике к аноду, положительные ионы – к катоду. Положительные ионы, достигая катода, вырывают из него электроны, присоединяют их к себе и нейтрализуются. При этом существует вероятность, что положительные ионы вырывают из катода больше электронов, чем необходимо для их нейтрализации. Эти дополнительные свободные электроны, ускоренные электрическим полем, порождают новые электронно-ионные лавины. Если энергия электронов недостаточна для ионизации газа, то при столкновении с ними нейтральные атомы переходят в возбужденное состояние. Возвращение атомов в основное состояние сопровождается испусканием фотонов.

Наряду с ионизацией в газе протекает и противоположный процесс – рекомбинация положительных ионов и электронов. При воссоединении положительных ионов и электронов возникает электромагнитное излучение, так называемое рекомбинационное свечение. Свечение нейтральных атомов при снятии возбуждения и рекомбинационное свечение (в основном ультрафиолетовое) вызывают фотоэффект – вырывание электронов из внутренней поверхности катода. Фотоэлектроны, как и дополнительные электроны, вырванные из катода при нейтрализации на нем положительных ионов, ускоряются электрическим полем и движутся к аноду, порождая новые электронно-ионные лавины и возбуждая нейтральные атомы.

В результате многократного повторения описанных процессов в счетчике возникает самоподдерживающийся (самостоятельный) газовый разряд, являющийся откликом на попадание в его рабочий объем ионизирующей частицы. Для того чтобы счетчик смог отреагировать на появление в нем следующей частицы, входящей в состав регистрируемого излучения, самостоятельный разряд в счетчике необходимо погасить.

По способу гашения самостоятельного газового разряда счетчики Гейгера делятся на несамогасящиеся и самогасящиеся.

В несамогасящихся счетчиках применяется радиотехнический метод прерывания газового разряда. Для реализации этого метода в цепь счетчика вводится высокоомное сопротивление  $R \sim 10^8 - 10^9$  Ом (рис.29). При отсутствии газового разряда напряжение между электродами счетчика  $U_{сч}$  равно напряжению на клеммах источника  $U_{ист}$ .

Самостоятельный разряд в счетчике замыкает цепь, и через сопротивление R начинает течь ток I. По закону Ома для замкнутой цепи это приводит к уменьшению напряжения между катодом и анодом счетчика:  $U_{сч} = U_{ист} - IR$ .

При большом сопротивлении R напряжение на счетчике становится меньше напряжения зажигания  $U_0$ , т.е. снижается настолько, что электрическое поле счетчика не может сообщить электронам энергию, достаточную для образования электронно-ионной лавины. При  $U_{сч} < U_0$  электроны и положительные ионы рекомбинируют, не успевая достигнуть электродов. Газовый разряд прерывается.

Импульс тока, возникающий в цепи счетчика, усиливается и подается на пересчетную схему.

Длительность самостоятельного газового разряда в несамогасящемся счетчике  $\sim 10^{-6}$  с. После его гашения положительные ионы дрейфуют к катоду и нейтрализуются на нем. В течение  $\tau \approx 10^{-2}$  с ( $\tau$  – время

разрядки емкости  $C$  счетчика через сопротивление  $R$ ) напряжение на счетчике восстанавливается. Время восстановления напряжения называют "мертвым временем" счетчика. Все это время счетчик оказывается практически неработоспособным, нечувствительным к проходящим через его объем ионизирующим частицам. Счетчик с «мертвым временем»  $\tau \approx 10^{-2}$  с способен за секунду среагировать примерно на 100 частиц.

Большое время восстановления чувствительности ограничивает применение несамогасящихся счетчиков Гейгера для регистрации ионизирующих излучений большой интенсивности.

Гашение газового разряда в самогасящихся счетчиках Гейгера достигается за счет подбора состава газовой смеси, заполняющей счетчик. Обычно счетчики этого типа заполняют смесью из инертного (неона, аргона) и многоатомного (паров спирта, этилена) газов или инертным газом с добавкой 0,1% галогенов (хлора, брома, йода).

Ионизирующая частица, попадая в рабочий объем самогасящегося счетчика, вызывает появление электронно-ионной лавины. Механизм ее возникновения такой же, как и у несамогасящихся счетчиков. Однако в самогасящихся счетчиках возникающий газовый разряд является кратковременным. Его гашение является результатом эффективного поглощения молекулами многоатомной добавки ультрафиолетовых фотонов, высвечиваемых возбужденными атомами и рекомбинирующими ионами. Исчезновение фотонов предотвращает появление фотоэлектронов и таким образом устраняет условия для образования новых электронно-ионных лавин.

Из-за диссоциации многоатомных молекул срок работы содержащих их газоразрядных счетчиков ограничен регистрацией  $10^8$ – $10^9$  ионизирующих частиц.

В галогенных счетчиках Гейгера–Мюллера гашение газового разряда происходит в результате присоединения электроотрицательными одновалентными атомами хлора, брома или йода электронов, в том числе и фотоэлектронов и экранирования поля анода облаком медленных положительных ионов. Срок службы галогенных счетчиков практически не ограничен.

«Мертвое время» самогасящихся газоразрядных счетчиков меньше, чем у несамогасящихся, но все же достаточно велико – порядка  $10^{-3}$ – $10^{-5}$  с. Самогасящиеся счетчики способны регистрировать  $10^4$ – $10^5$  ионизирующих частиц в секунду.

Импульс тока, возникающий в газоразрядных счетчиках обоих типов, зависит от напряжения между его электродами и не всегда совпадает с числом пронизывающих его частиц. Типичная зависимость числа импульсов  $n$ , регистрируемых счетчиком в единицу времени, от напряжения  $U_{сч}$ , приложенного между его электродами (счетная характеристика), приведена на рис.30.

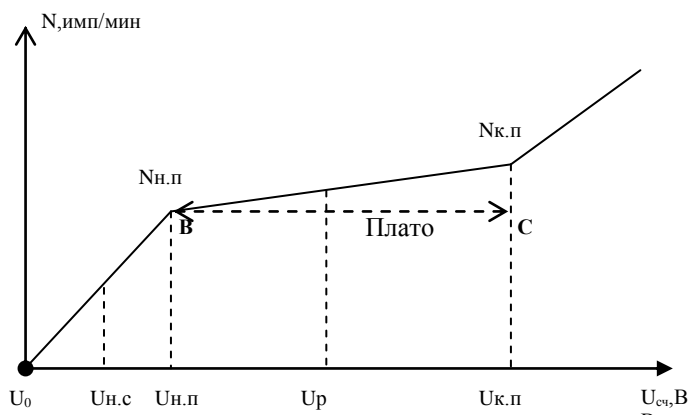


Рис.30. Счетная характеристика счетчика Гейгера–Мюллера.  $U_{н.с}$ -напряжение начала счета;  $U_{н.п}$ -напряжение начала плато;  $U_{р}$ -напряжение конца плато;  $U_{к.п}$ -рабочее напряжение счетчика.

При напряжении  $U_{сч} < U_0$  ( $U_0$  – напряжение зажигания) электрические импульсы в цепи анода не возникают. Счетчик «не чувствует» пронизывающего его ионизирующего излучения. Это связано с тем, что при  $U_{сч} < U_0$  электронно-ионные пары, образующиеся в рабочем объеме счетчика под воздействием ионизирующего излучения, рекомбинируют, не успевая достигнуть электродов.

С ростом напряжения процессы рекомбинации становятся менее вероятными, чем ионизация атомов, что и приводит к росту числа частиц, регистрируемых счетчиком в интервале значений напряжения от  $U_0$  до  $U_{н.п}$ . При дальнейшем повышении напряжения от  $U_{н.п}$  до  $U_{к.п}$  число импульсов  $n$ , регистрируемых счетчиком в единицу времени, становится практически постоянным. При напряжении  $U_{н.п} \leq U_{сч} \leq U_{к.п}$  появление в объеме счетчика ионизирующей частицы, создающей хотя бы одну электронно-позитронную пару, приводит к возникновению в цепи счетчика одного электрического импульса. Счетчик работает в гейгеровской области.

Участок **BC** (рис.30) счетной характеристики, соответствующий этой области, называется плато и представляет собой ее рабочую часть. Протяженность плато у счетчиков не менее 100 В. Скорость счета импульсов в его пределах изменяется не более чем на 3–5%. У некоторых счетчиков плато имеет незначи-

тельный наклон. Наклон плато  $\Delta$  принято выражать относительным приращением числа импульсов, приходящимся на каждые 100 вольт плато характеристики:

$$\Delta = \frac{(N_{к.п} - N_{н.п}) \cdot 100}{(U_{к.п} - U_{н.п}) \cdot N_{н.п}} \cdot 100\% ,$$

где,  $\Delta$  – наклон плато;  $N_{к.п}$  – скорость счета в конце плато;

$N_{н.п}$  – скорость счета в начале плато;

$U_{к.п}$  – напряжение конца плато;

$U_{н.п}$  – напряжение начала плато.

Как правило, наклон плато ( $\Delta$ ) для широко распространенных счетчиков не превышает 3–5% на 100В. Для счетчиков МСТ-17 и счетчиков СИ-3Б наклон плато не должен превышать 3% на 100В, для счетчиков типа СТС-6 – более 12,5 %.

Амплитуда импульса от счетчика Гейгера - Мюллера может достигать нескольких десятков или даже сот вольт. С такими импульсами можно работать без всякого усиления. Дело в том, что амплитуда импульса в счетчике Гейгера-Мюллера определяется только свойствами самого счетчика и параметрами электрической цепи и совершенно не зависит ни от вида, ни от энергии первичной частицы.

Импульсы от медленного электрона, создавшего всего лишь несколько пар ионов, и от  $\alpha$ -частицы, создавшей несколько тысяч ионов, оказываются одинаковыми. Поэтому счетчики Гейгера-Мюллера можно использовать только для подсчета числа пролетевших частиц в однородных полях излучений, но не для определения их типа и энергии.

При напряжении  $U_{сч} \geq U_{к.п}$  попадание в счетчик одной ионизирующей частицы вызывает не один, а несколько последовательных импульсов тока в цепи анода. Происходит многократная регистрация одной частицы. При дальнейшем повышении напряжения в счетчике возникает непрерывный самостоятельный газовый разряд (коронный) приводящий к выходу счетчика из строя.

Другим основным параметром счетной характеристики счетчика является длина плато. Длина плато определяется по формуле:

$$l = U_{к.п} - U_{н.п} .$$

Параметры счетной характеристики указываются в паспорте для каждого конкретного счетчика. Поэтому, прежде чем приступить к работе со счетчиком, необходимо экспериментально снять счетную характеристику, определить длину и наклон плато, сравнить их с паспортными данными, определить пригодность его к работе и рассчитать рабочее напряжение, при котором счетчик в дальнейшем будет работать.

Обычно в качестве рабочей точки на характеристике счетчика выбирают середину плато. Работать на второй половине плато не рекомендуется, так как в случае короткого плато можно «загнать» счетчик в непрерывный разряд и вывести его из строя.

Рабочее напряжение  $U_p$  рассчитывается по следующим формулам:

$$\text{если } l \leq 250\text{В, то } U_p = U_{н.п} + \frac{1}{2}(U_{к.п} - U_{н.п});$$

$$\text{если } l \geq 250\text{В, то } U_p = U_{н.п} + \frac{1}{3}(U_{к.п} - U_{н.п}).$$

**Изготовление счетчиков.** В качестве материала для цилиндра счетчика (катода) может быть использован любой металл. Но, как оказалось, не все металлы для этой цели одинаково пригодны. Прежде всего они различаются склонностью вызывать послеразряды, в этом отношении важна высокая работа выхода материала катода. С этой точки зрения катоды из щелочных металлов можно применять лишь в особых случаях. Наиболее часто используют катоды из меди, реже из магния, серебра или алюминия.

**Медные и латунные катоды.** Поскольку поверхности медных латунных трубок чаще всего покрыты слоем окиси, значительно повышающей работу выхода, счетчики из меди и латуни работают достаточно надежно и без особой обработки. Необходимо только обращать внимание на то, чтобы в трубках не было посторонних включений и других изъянов.

Если нужно изготовить катоды с особенно высокой работой выхода, рекомендуется обработать медный катод таким образом, чтобы на его поверхности образовался равномерный слой окиси. Этого можно добиться, если тщательно очищенную предварительно медную трубку погрузить на несколько секунд в хромовую смесь (250 г хромовой кислоты и 75 см<sup>3</sup> концентрированной серной кислоты на 1 л). Поверхность трубки покрывается матово-красным слоем Cu<sub>2</sub>O. После этого ее тщательно промывают дистиллированной водой и чистым спиртом. Медную поверхность можно также окислить до CuO, если трубку нагревать в потоке окиси азота до тех пор, пока на ней не образуется темный слой окиси.

**Алюминиевые катоды.** В ряде случаев с алюминиевыми поверхностями были получены плохие результаты. Причину этого следует искать в том, что поверхность алюминия, так же как и магния, быстро окисляется. Слой окиси алюминия и магния благоприятствуют возникновению послеразрядов. Из алюминия очень легко изготавливать трубки. Поскольку простая полировка алюминиевой поверхности не обеспечивает надежной работы счетчика, ее полезно омеднить или посеребрить электролитически или

вакуумным напылением. На хорошем токарном станке можно изготовить алюминиевые трубки с толщиной стенки 0,1 мм при диаметре от 10 до 20 мм. Для механической прочности полезно оставить ребра жесткости шириной 1–2 мм.

**Золотые, серебряные, танталовые или никелевые катоды.** В ряде случаев материал катода выбирают, исходя из особых требований, например предпочитают магний, кадмий или цинк для счетчиков фотонов, свинец или висмут для рентгеновских счетчиков. В галогенных счетчиках, например, необходимо, чтобы материал катода был химически стоек. В таких случаях можно использовать золото, никель или другие подобные металлы. Очень хорошо зарекомендовали себя катоды из танталовой или вольфрамовой фольги. Возможно применение серебряных катодов, но они также могут приводить к послеразрядным эффектам.

**Изоляторы.** Материал для боковых пробок счетчиков должен быть хорошим изолятором. При этом следует обращать внимание на то, чтобы он постепенно не выделял поглощенные газы, которые могут менять рабочие характеристики счетчика. С другой стороны, он не должен поглощать какие-либо компоненты газового наполнения, что также приводит к изменению параметров счетчика. Наиболее надежны, пробки из стекла или керамических материалов, из тролитула или подобных ему пластиков. Достаточно хорошо себя показали как склеивающие вещества аралдит и клей Котинского.

**Нити счетчиков.** При выборе нити счетчика следует обращать внимание на то, чтобы она была однородной и не имела острий и граней. Материал нити не имеет особого значения, но необходимо учитывать, что он может разъедаться газовым наполнением.

Особое внимание следует обращать на места крепления нити счетчика, так как здесь могут возникнуть неблагоприятные искажения поля. Часто используют вольфрамовую проволоку диаметром 0,1 мм.

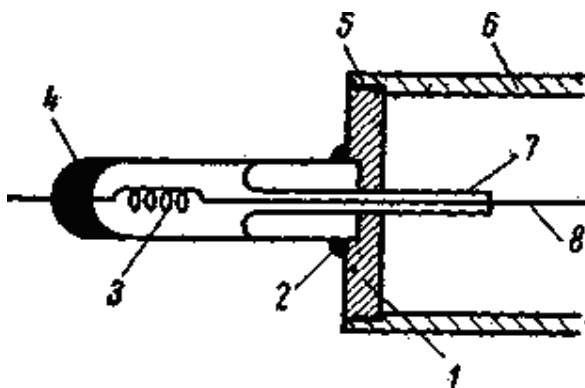


Рис. 31. Ввод счетчика: 1—металлическая шайба; 2 — уплотнение; 3 —пружина для натягивания нити; 4—спай стекла с металлом; 5—место пайки; 6— металлическая трубка (медная); 7 — тонкая стеклянная трубка; 8—нить счетчика.

В счетчиках, которые должны работать при малых напряжениях или при высоких давлениях, можно применять еще более тонкую проволоку. При использовании нитей большего диаметра, например 0,3 мм, получается неблагоприятная форма поля вблизи нити. Перед наполнением счетчика вольфрамовую нить рекомендуется прогреть до бледно-красного цвета. Вместо вольфрамовой проволоки можно применять проволоку из стали, никеля или других подобных материалов.

Часто используют конструкцию показанную на рисунке 31. Вначале нить счетчика приваривают точечной сваркой к проволоке, коэффициент расширения которой позволяет впаять ее в стеклянную трубку. Затем нить вводят в рабочий объем счетчика при помощи узких стеклянных трубок, которые создают определенную конфигурацию полей. Между нитью счетчика и проволокой-вводом иногда помещают небольшую спиральную пружину, благодаря которой нить всегда натянута.

Во многих случаях на внутреннюю поверхность стеклянной трубки достаточно нанести проводящий слой, например, из коллоидального графита или другого вещества, соединив его с наружным выводом. Нетрудно также нанести тонкий металлический слой, напылив его в вакууме на внутреннюю поверхность трубки.

**Тонкие окна.** При регистрации альфа-частиц, а также мягкого бета- или рентгеновского излучений частицы попадают в счетчик через тонкое окошко, расположенное на цилиндрической или торцевой стенке счетчика. При использовании в качестве окошка очень тонкой фольги ее укрепляют решеткой или сеткой. В виде фольги применяют слюду, алюминий, а также пластиковые пленки.

Алюминиевая фольга толщиной 10 мк (приблизительно 3 мг/см<sup>2</sup>) достаточно устойчива, чтобы выдержать при диаметре 6—8 мм перепад давлений в 1 атм. Пластины слюды толщиной 2—3 мг/см<sup>2</sup> выдерживают разность давлений, близкую к 1 атм, при поверхности 1 см<sup>2</sup> или несколько большей, если края тщательно укреплены. В качестве клея рекомендуется аралдит и некоторые другие вещества, а также селен. Слюда легко заряжается электрически, что приводит к искажениям поля. Поэтому слюдяные пластины делают проводящими, напыляя на них слой металла или покрывая их графитом. Изготавливаются также специальные еще более тонкие окна, например из коллоидных, нейлоновых или пластиковых пленок

**Подготовка счетчика к наполнению.** Перед наполнением очень важно откачать счетчик до высокого вакуума. Необходимо также обезгазить стеклянные и металлические детали прогревом в вакууме. Особенно большое значение это имеет в счетчиках с чисто газовым наполнением. В обычных случаях достаточна откачивающая установка с механическим насосом или ртутный диффузионный насос с ловушкой.

Газовая смесь, предназначенная для наполнения счетчиков, должна иметь однородный состав. Применяемые газы следует максимально очистить от кислорода; добавляемые пары должны быть обезвожены.

**Наполнение газом.** Газом без примеси гасящих разряд паров наполняются счетчики, используемые только в таких схемах, в которых разряд подавляется внешними элементами схемы. При использовании гасящих схем для наполнения счетчиков можно применять многие газы, свойства которых рассмотрены ниже.

При добавлении многоатомных паров смесь приобретает гасящие свойства. Особую роль играют трех- и четырехатомные газы, свойства которых будут рассмотрены подробно, поскольку они получили широкое распространение.

**Гелий.** Чистый гелий имеет низкое напряжение «порога» для гейгеровской области, поэтому он применяется при сравнительно высоком давлении. Это удобно еще и потому, что тормозная способность гелия для частиц сравнительно мала. Гелиевые счетчики при атмосферном давлении можно с успехом применять в пропорциональной области.

**Неон и аргон.** Эти газы, так же как и гелий, имеют низкое напряжение «зажигания». В очень чистом виде метастабильные состояния газов вызывают многочисленные послеразряды, заметно мешающие «измерениям». Эти паразитные импульсы можно в значительной степени подавить путем добавления другого газа, снимающего метастабильные состояния основного газа. Хорошие результаты дает водород. Добавка его должна составлять не менее 10%.

**Криптон и ксенон.** Тяжелые инертные газы находят применение благодаря высокой тормозной способности и малому напряжению «зажигания». Они особенно удобны для измерения мягких рентгеновых лучей, поскольку в газе поглощается – значительная часть излучения.

**Водород.** В Гейгеровских счетчиках водород применяется сравнительно редко, так как рабочее напряжение водородных счетчиков довольно высоко, а тормозная способность водорода мала. Вместе с тем при использовании водорода может быть достигнута большая область счета.

Иногда водород под высоким давлением используют в пропорциональных счетчиках. Водород особенно удобен для регистрации быстрых нейтронов, которые при упругих соударениях передают энергию его ядрам. При этом чаще всего работают с малыми коэффициентами газового усиления (от 5 до 50, в зависимости от давления газа).

**Кислород.** Кислород не годится для наполнения счетчиков из-за образования отрицательных ионов.

**Азот.** Наряду с водородом счетчики можно наполнять и азотом. Тормозная способность последнего достаточно высока. Отрицательное качество – необходимость высокого напряжения питания.

**Воздух.** Воздушные счетчики объединяют недостатки счетчиков с азотным и кислородным наполнениями. Однако вследствие простоты изготовления все время делаются попытки создать счетчик, наполненный воздухом (сухим). При этом прежде всего стремятся использовать воздух при атмосферном давлении. Подобный счетчик, работающий в пропорциональной области, был изготовлен Симпсоном. Счетчик не позволял проводить точных измерений, однако можно было различать частицы с сильно различающейся ионизирующей способностью.

**Аргон и спирт.** Наиболее известный состав наполнения предложен Тростом: смесью аргона (90 мм рт. ст.) и спирта (10 мм рт. ст.). Свойства этой смеси были подробно рассмотрены. Вместо спирта можно также применять другие пары, и в первую очередь ацетон, метилаль или этилацетат (см. табл.). Вместо аргона можно использовать также неон или другие инертные газы, а также водород и азот с примесями. В пропорциональных счетчиках в качестве примесного газа особенно часто применяют ацетон.

**Метановые счетчики.** Хорошими характеристиками обладают счетчики, наполненные чистым метаном. Их часто используют для точных измерений, главным образом в пропорциональной области.

Тщательно сконструированный пропорциональный счетчик для альфа-частиц, который работает даже при фоне приблизительно  $10^9$  бета-частиц в 1 мин. Долговечность отпаянных метановых счетчиков в гейгеровской области невелика (около  $10^8$  импульсов). В них постепенно образуются водород, некоторые углеводороды и позже – углерод.

**Аммиачные счетчики.** Они также обладают неплохими характеристиками в пропорциональной и гейгеровской областях. Счетная область этих счетчиков сравнительно невелика, так как в аммиаке легко возникают отрицательные ионы. После  $10^7$ — $10^8$  импульсов аммиачные счетчики становятся светочувствительными. Срок службы их довольно велик, так как продукты диссоциации частично вновь соединяются в исходные молекулы. Постепенно образуются также азот и водород.

**Этилен и этан.** Эти газы обладают в гейгеровской области хорошими счетными свойствами и без примесей.

**Пары.** С наполнением в виде чистых паров можно изготавливать пропорциональные счетчики с высоким газовым усилением, а в некоторых случаях и гейгеровские счетчики. Большинство гейгеровских счетчиков наполняют, например, парами метилового спирта, ксилола и метилацетата. Тетраэтилсвинец, обладающий высокой тормозной способностью, часто используют для исследования рентгеновых лучей.

**СО<sub>2</sub>-счетчики.** Трехатомные газы лишь в редких случаях обладают самогасящими свойствами. Применение углекислого газа представляет особый интерес ввиду того, что появляется возможность измерять С<sup>14</sup> непосредственно в газовом наполнении и прежде всего при давлении в несколько атмосфер. Однако при соударениях ионов углекислого газа с металлической поверхностью катода возникают отрицательные ионы. Вследствие этого выгоднее использовать графитовые катоды. Этот эффект можно подавить также добавкой примесей пара (чаще всего CS<sub>2</sub>). При небольших добавках CS<sub>2</sub> следует всегда применять гасящую схему. При 10—20% CS<sub>2</sub> счетная область может достигать 100—200 в. Подобные счетчики при атмосферном давлении можно также использовать в гейгеровской области. Напряжение счета лежит тогда в пределах 4500—5000 в.

**Инертные газы с небольшими примесями.** Если чистые инертные газы смешать с небольшим количеством других газов или паров, можно существенно понизить напряжение питания. Но при малых количествах примеси паров еще отсутствуют самогасящие свойства. Счетная область всегда тем меньше, чем меньше процентное содержание пара. Исключение представляют галогениды метилена, которые обеспечивают самогасящие свойства при содержании пара меньше 1%. Такие счетчики допускают питающее напряжение несколько сотен вольт при области счета, близкой к 100 в, и сроке службы примерно 10<sup>7</sup>—10<sup>8</sup> импульсов.

**Галогенные счетчики.** При наполнении аргоном или неоном с небольшой примесью галогенов (хлор или бром) получают самогасящиеся счетчики с низким напряжением начала счета и большим сроком службы. Кроме того, такие счетчики термостойки. Свойства этих счетчиков были уже рассмотрены выше.

При наполнении смесью ксенона, аргона, кислорода и азота с определенным соотношением компонент получают самогасящиеся счетчики, которые из-за отсутствия паров имеют очень большой срок службы. При этом необходимо точно выдерживать состав смеси, иначе могут возникнуть многочисленные послеразряды. В оптимальных условиях отдельные импульсы имеют практически одинаковую величину. При нормальном напряжении счета давление газа может быть близко к атмосферному. Хорошие результаты получаются, например, со смесью 15 мм рт. ст. Хе + 15 мм рт. ст. N<sub>2</sub> + 1 мм рт. ст. O<sub>2</sub> + 700 мм рт. ст. Аг.

Гасящие свойства газа сводятся в основном к устранению процессов, обуславливающих возникновение вторичных электронов. Этот механизм был рассмотрен выше для аргоновых счетчиков. Счетчики, наполненные ксеноном и кислородом, хотя и являются самогасящимися, но без внешней гасящей схемы их счетная область слишком мала из-за действия возникающих отрицательных ионов кислорода. Метастабильные уровни ксенона (8,3 эВ) путем обмена энергией при соударениях с молекулами кислорода вызывают в видимой области эмиссию полосатого спектра квантов, которые имеют энергию, недостаточную для возникновения фотоэлектронов.

**Временное разрешение счетчика.** Процессы регистрации ионизирующих излучений и используемые измерительные установки обладают ограниченной временной разрешающей способностью. Это говорит о том, что необходим некоторый промежуток времени, в продолжение которого установка неспособна к регистрации других частиц, чтобы используемая аппаратура вернулась в исходное состояние.

Минимальный интервал времени между двумя последовательными импульсами, при котором они сосчитываются раздельно, называется **разрешением времени**, или **временным разрешением**. Временное разрешение регистрирующей системы в целом определяется параметрами основных элементов – детектора и электронных систем.

Условимся в дальнейшем термин "временное разрешение" относить к регистрирующей системе в целом, а составляющие ее элементы характеризовать термином "мертвое время". Учет мертвого времени детекторов рассмотрим ниже. Что касается электроники, то для простых счетных устройств разработаны весьма быстродействующие электронные системы, мертвое время которых не превышает 10<sup>-8</sup>-10<sup>-9</sup> с. Однако наибольшее распространение получили устройства с мертвым временем около 10<sup>-6</sup> с. В большинстве случаев на практике этого вполне достаточно.

Хуже обстоит дело со сложными анализирующими устройствами многоканальных анализаторов, которые представляют важнейший элемент наиболее совершенных спектрометрических установок. Их мертвое время лежит в пределах 10<sup>-3</sup>-10<sup>-5</sup> с, что накладывает определенные ограничения на возможности практического применения.

Если мертвое время у одного из элементов регистрирующей системы существенно больше, чем у других, то оно и будет определять временное разрешение всей системы в целом. Например, при использовании счетчиков Гейгера-Мюллера временное разрешение всей регистрирующей аппаратуры целиком определяется мертвым временем данных детекторов. Но при использовании сцинтилляционных счетчиков, мертвое время которых равно нулю, разрешающая способность регистрирующей аппаратуры определяется мертвым временем электронной схемы.

Если известно мертвое время детектора, определяющее временное разрешение всей установки, то исходя из каждой измеренной скорости счета. N можно вычислить истинную скорость счета N<sub>0</sub>, то есть число частиц, попавших за единичный интервал времени в чувствительный объем детектора, и таким образом ввести в результаты измерений поправку на просчеты.

**Мертвое время счетчика Гейгера.** Мертвым временем детектора t<sub>м</sub> называется время полной нечувствительности после регистрации отдельной частицы, в течение которого детектор не может реагировать на появление внутри его объема новых частиц. Мертвое время отражает длительность процессов,

происходящих в детекторе при одном акте регистрации. В пределах, мертвого времени детектор не способен к нормальной реакции на появление в рабочем объеме новой частицы. Другими словами, под  $t_M$  понимается то время, в течение которого в счетчике вообще невозможна вспышка самостоятельного разряда.

Вспомним принцип действия газоразрядного счетчика. При прохождении через счетчик заряженной частицы или попадании гамма-кванта между электродами (катодом и анодом) за счет ионизации возникают электроны и положительно заряженные ионы. Под действием высокой напряженности электрического поля электроны ускоряются, приобретая большую энергию, и производят вторичную ионизацию. Возникающие при этом вторичные электроны в свою очередь ионизируют новые атомы и т.д., в результате чего число электронов и ионов увеличивается лавинообразно. Электронная лавина, состоящая из электронов, обладающих малой массой, быстро движется к анодной нити, достигая ее и разряжается за время  $10^{-6}$ - $10^{-8}$  с. За это время положительные ионы, обладающие сравнительно большой массой, не успевают заметно переместиться к катоду. К моменту, когда электроны будут уже собраны, облако положительных ионов или пространственный положительный заряд будет еще близок к центральной нити (аноду). Этот пространственный заряд образует вокруг анода "чехол", который уменьшает напряженность электрического поля вблизи анода и тормозит образование повторной лавинной ионизации. На этом заканчивается активная стадия разряда в счетчике.

Нетрудно понять, что если какая-то ионизирующая частица вызвала в самогасящемся счетчике вспышку газового разряда, то электроны от следующей ионизирующей частицы, попавшей в счетчик во время развития разряда до момента окончания активной стадии, могут образовать вблизи анодной нити в местах, еще не охваченных разрядом, электронно-ионные лавины. Однако эти лавины вольются в уже развивающийся разряд, и вторая частица зарегистрирована не будет. Попадание частицы в счетчик вскоре после окончания активной стадии разряда совсем не вызовет никаких последствий, так как за счет пространственного "чехла" напряженность электрического поля падает до минимального значения, при котором невозможно образование новой лавины электронов. По мере удаления пространственного положительного заряда от нити к катоду напряженность поля постепенно возрастает, и как только положительные ионы отойдут на достаточное расстояние от нити, в счетчике может вспыхнуть новый разряд.

Таким образом, мертвое время определяется не длительностью импульса, а динамикой движения ионов, то есть временем прохождения положительного пространственного заряда от анодной нити до некоторого "критического" расстояния  $r_{кр}$ , при котором напряженность на нити достигнет величины, необходимой для вспышки самостоятельного разряда.

Если в момент времени, соответствующий приходу ионов на критическое расстояние, в счетчик попадает новая частица, она будет сосчитана, хотя амплитуда возникающего при этом импульса напряжения будет значительно меньше полной величины импульса напряжения. В течение дальнейшего времени продвижения положительных ионов от  $r_{кр}$  до катода напряженность электрического поля возрастает. Одновременно восстанавливается потенциал анодной нити и растет амплитуда импульса, который возникает на нити, если в этот момент в счетчик попадает частица.

Время, затрачиваемое положительными ионами на перемещение от критического положения  $r_{кр}$  до катода, называют **временем восстановления**  $t_v$ . Это интервал времени между началом регистрации импульса и тем моментом, когда импульс, вызываемый последующим ионизирующим событием в счетчике, достигнет максимальной (полной) величины. Время восстановления достигает порядка  $10^{-4}$  с.

На рис. 32 показано, как изменяется величина импульса на протяжении  $\Delta U$  в зависимости от момента его появления после предыдущего импульса. Из рисунка видно, что в течение мертвого времени  $t_M$  (от  $t_0$  до  $t_1$ ) импульсы отсутствуют. В течение же времени восстановления  $t_v$  (от  $t_1$  до  $t_3$ ) импульсы возникают, но амплитуды их зависят от момента попадания частицы в счетчик. Необходимо учитывать, что импульсы, возникающие в счетчике по истечении мертвого времени  $t_M$ , настолько малы, что их величина может быть меньше порога чувствительности регистрирующей электронной схемы. Для того, чтобы импульс был зарегистрирован, амплитуда импульса  $U_{min}$  должна быть равной или превышать порог чувствительности данного регистрирующего устройства. Это минимальное значение  $U_{min}$  достигается в момент времени  $t_2$ . Промежуток времени между началом газового разряда  $t_0$  и моментом  $t_2$ , после которого возможно срабатывание счетного электронного устройства, называют **разрешающим** временем детектора  $\tau$ .

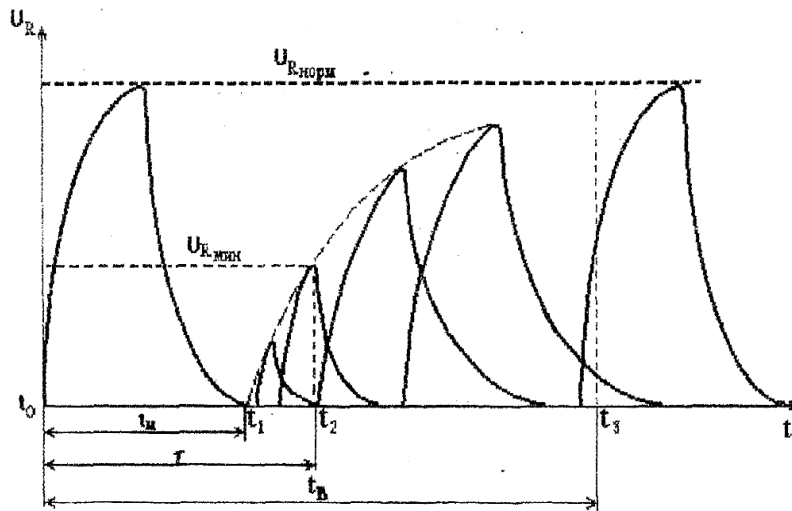


Рис.32. Оциллограмма изменения величины импульса напряжения в зависимости от момента его появления.

Время разрешения самогасящегося счетчика  $\tau$  не может быть меньше мертвого времени  $t_M$  и в общем случае зависит от величины порога срабатывания используемого электронного устройства. Так как порог чувствительности обычно не слишком велик (до 1 В), то время разрешения счетчика  $\tau \approx t_M$ .

Легко понять, что мертвое время  $t_M$  зависит от напряженности поля  $E$ , подвижности ионов и величины пространственного заряда. Так как напряженность поля определяется разностью потенциалов между анодом и катодом (напряжением на нити относительно цилиндра) и геометрией счетчика (радиусом катода и радиусом нити), то в конечном итоге для счетчика данного типа и конструкции мертвое время  $t_M$  будет зависеть от напряжения  $U_{сч}$ , подаваемого на анодную нить, а точнее – от перенапряжения  $U_{сч}-U_r$ , где  $U_r$  – порог области Гейгера. С увеличением перенапряжения мертвое время медленно убывает.

Время передвижения положительных ионов до  $r_{кр}$  зависит от подвижности этих ионов, то есть от конкретного состава и давления газа, наполняющего счетчик. Кроме этого, мертвое время счетчика является функцией скорости счета, то есть загрузки счетчика. Это связано с величиной пространственного заряда – числом положительных ионов.

Если частицы поступают в счетчик часто (большая активность), то многие из них попадают в период восстановления поля и создают относительно мало ионов (слабый импульс). Чем меньше созданный в счетчике положительный пространственный заряд, тем на меньшее расстояние  $r_{кр}$  он должен отойти от анодной нити, чтобы стала возможной новая вспышка разряда. Поэтому при больших скоростях счета мертвое время счетчика уменьшается. И, наоборот, если частицы приходят редко, то почти все они попадают в счетчик после восстановления поля, создают импульсы максимальной амплитуды и, соответственно, большее число положительных ионов, что приводит к увеличению мертвого времени.

Следует однако заметить, что даже при значительном изменении скорости счета величина мертвого времени меняется мало. Поэтому число просчетов, которое зависит от произведения  $N \cdot t_M$  (см. ниже), особенно велико при больших загрузках  $N$ , несмотря на несколько меньшее значение  $t_M$ .

**Поправка на мертвое время.** Рассмотрим, как вводится поправка на мертвое время, если оно известно. Пусть  $N_0$  – среднее число частиц, попавших в счетчик за 1 минуту, то есть «истинная» скорость счета;  $N_p$  – число частиц, зарегистрированных за минуту счетной установкой;  $t_M$  – мертвое время счетчика (в минутах), которое принимается постоянным.

Так как возникновение каждого импульса в счетчике сопровождается интервалом мертвого времени  $t_M$ , то часть времени (доля от минуты), в течение которого счетчик нечувствителен к частицам, попадающим в его объем, составит  $N_p \cdot t_M$ . Тогда число частиц, попадающих в счетчик в течение этого времени и поэтому не регистрируемых, составит  $N = N_0 \cdot N_p \cdot t_M$ . В то же время число частиц  $N_0$ , попавших в счетчик, складывается из числа зарегистрированных частиц  $N_p$  и числа не зарегистрированных частиц  $N$ , то есть:

$$N_0 = N_p + N = N_p + N_0 \cdot N_p \cdot t_M \quad \text{МКС}$$

Отсюда истинная скорость счета:

$$N_0 - N_0 \cdot N_p \cdot t_M = N_p \quad N_0 (1 - N_p \cdot t_M) = N_p$$

$$\text{тогда: } N_0 = N_p / (1 - N_p \cdot t_M)$$

Из формулы следует, что относительное число просчетов будет равно:

$$(N_0 - N_p) / N_p = N_0 \cdot t_M = N_p \cdot t_M / (1 - N_p \cdot t_M)$$

Например, при  $t_M = 3 \cdot 10^{-4}$  с и  $N_p = 100$  имп/с (6000 имп/мин) расчет, сделанный по формуле, показывает, что счетчик не успевает зарегистрировать 3% частиц, а при скорости счета  $N_p = 500$  имп/с (30000 имп/мин) просчет уже составляет около 18%. Формулы позволяют точно учесть поправку на просчеты при скоростях счета не более 30000 имп/мин. Для более высоких скоростей счета истинное число частиц  $N_0$ , попавших в счетчик в единицу времени, определяется по более точной формуле:

$$N_0 = N_p \cdot e^{N_p t_M},$$

где,  $e$  – основание натурального логарифма.

Отметим, что формулы справедливы только для образцов с постоянной активностью. Если активность образцов меняется в ходе измерения, то есть в образце содержатся короткоживущие радионуклиды, то поправка на просчет может быть рассчитана только при известном законе изменения активности во времени. Поскольку во многих случаях этот закон неизвестен и к тому же может быть достаточно сложным из-за наличия нескольких радионуклидов в смеси, поправки на просчеты не могут быть корректно рассчитаны. Тогда остается единственный путь получения правдивых результатов - подбор таких условий измерения, чтобы регистрируемая активность не превышала определенного уровня. Обычно при скоростях счета  $N < 2000$  имп/мин поправку на мертвое время не вводят, так как ее величина (1-1,5%), как правило, не превосходит статистической ошибки измерения скорости счета.

Пользуясь формулой, можно построить график зависимости поправки на просчеты  $K = N_0/N_p$  от произведения  $N_p \cdot t_m$ . Такой график приведен на рисунке 32. Зная мертвое время  $t_m$  находят для данного значения  $N_p$  величину  $N_p \cdot t_m$ . Далее откладывают найденное произведение  $N_p \cdot t_m$  по оси абсцисс, проводят прямую, параллельную оси ординат, до пересечения с графиком и из точки пересечения опускают перпендикуляр до оси ординат, определяя соответствующие значения поправки  $N_0/N_p$ . Величина  $N_0$  находится простым умножением измеренной скорости счета  $N_p$  на найденный из графика поправочный коэффициент  $N_0/N_p$ .

Если мертвое время счетчика неизвестно, то для определения истинной скорости счета можно воспользоваться следующим методом. Готовят серию (до 50) точечных радиоактивных источников, каждый из которых дает небольшую скорость счета ( $N \ll 500$  имп/мин). Предварительно измеряют скорость счета от каждого источника в отдельности. Затем измеряют общую скорость счета (суммарную), последовательно увеличивая число источников и помещая их на ту же позицию под счетчиком, как и в случае отдельных измерений.

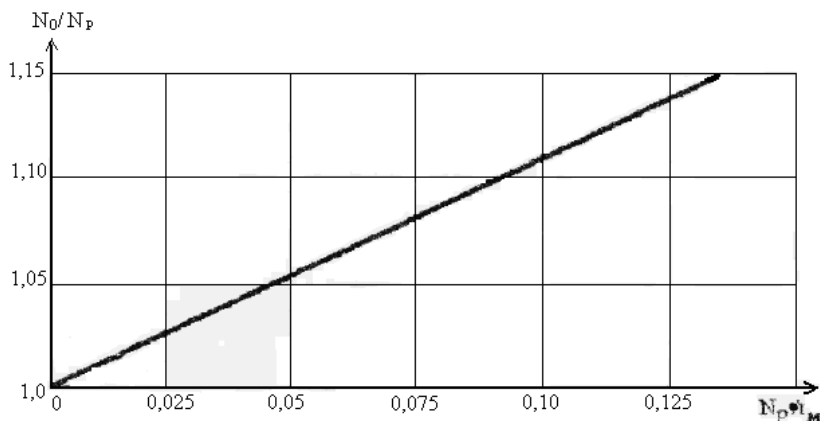


Рис. 33. Поправка на мертвое время

После измерений строят график, откладывая по оси абсцисс сумму скоростей счета отдельных источников  $N_0$ , например  $(N_1 + N_2 + N_3)$ , а по оси ординат – соответствующую скорость счета  $N$  этих же препаратов, измеренных вместе, то есть  $N_{123}$  (рис. 34).

Если на осях координат нанесен одинаковый масштаб, то при отсутствии просчетов график имел бы вид прямой, проведенной из начала координат под углом  $45^\circ$  к осям (пунктир). Реальная кривая отклоняется от этой прямой к оси абсцисс. Для того, чтобы по данной скорости счета  $N_p$  найти истинное число частиц  $N_0$ , из соответствующей точки  $N_p$  на оси ординат проводят прямую, параллельную оси абсцисс, до пересечения с опытной кривой, и опускают перпендикуляр на ось абсцисс.

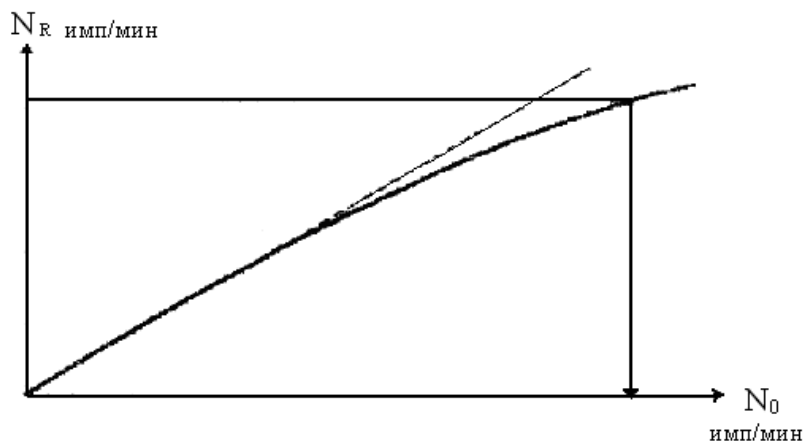


Рис. 34. Определение истинной скорости счета  $N_0$  опытным путем.

Место падения перпендикуляра соответствует истинной скорости счета  $N_0$ .

Этот метод определения истинной скорости счета хорош тем, что в нем автоматически учитывается изменение мертвого времени счетчика при увеличении загрузки. Однако на практике он довольно сложен, так как требует исключительно точной работы и специальных приспособлений для размещения большого числа образцов. Существует ряд других методов определения поправки на просчеты, которые мы не будем рассматривать. Мы просто будем предполагать постоянство мертвого времени в интервале скоростей счета от 3000 до 30000 имп/мин и вводить поправку на просчет по формуле или по графику (рис.34), предварительно определив опытным путем мертвое время при некоторой средней скорости счета.

**Эффективность регистрации.** При измерении числа частиц, попадающих в детектор, требования к функции отклика детектора очень скромные – эта функция определяет только вероятность создания и регистрации сигнала измерительным устройством при попадании частицы в детектор. Не каждая частица (особенно незаряженные – фотон, нейтрон) провзаимодействует с детектором при попадании в него.

При работе со счетчиком следует иметь в виду, что даже в гейгеровской области счетчик реагирует не на все пронизывающие его частицы. Отношение числа зарегистрированных частиц (фотонов) к числу частиц (фотонов), попавших в счетчик, называют эффективностью регистрации. Эффективность регистрации зависит от энергии частиц и вероятности их взаимодействия с материалом стенок и окошка счетчика, а также с атомами и молекулами газа, заполняющего его объем.

Более того, даже если взаимодействие и произошло, то сигнал будет зарегистрирован тогда, когда его величина будет превышать уровень чувствительности регистрирующей системы. Вероятность регистрации может зависеть от вида излучения и его энергии, размеров детектора, удаленности и геометрической формы источников излучения, уровня дискриминации регистрирующего устройства (уровня чувствительности).

Вероятность регистрации может быть нормирована по-разному:

- к активности источника;
- к числу частиц, попавших в детектор;
- к потоку частиц в том месте, где расположен детектор.

В зависимости от этого величины вероятности регистрации будут различными и функции отклика носят разные названия. Дадим определения некоторым из них, наиболее распространенным.

**Эффективность детектора  $\epsilon_d$**  – это отношение числа зарегистрированных сигналов (импульсов, треков, световых вспышек и т.д.) к числу частиц, попавших в детектор (прошедших через детектор).

**Чувствительность детектора  $S_d$**  – это отношение числа зарегистрированных сигналов в единицу времени к потоку частиц в месте, где расположен детектор излучения.

**Светосила  $L$**  – это отношение числа зарегистрированных сигналов к числу частиц, испущенных источником. Светосила, как это следует из определения, существенно зависит от взаимного расположения детектора и источника излучений, поэтому светосила скорее характеризует измерительное устройство в целом, чем сам детектор. В дальнейшем, говоря о светосиле, будем всегда иметь в виду светосилу измерительного устройства.

Эффективность, чувствительность и светосила обычно зависят от энергии регистрируемого излучения. Из приведенных определений ясно, что  $S_d$  и  $L$  меняются в пределах от 0 до 1 и являются безразмерными величинами. Чувствительность детекторов меняется в пределах от 0 до  $\infty$  и имеет размерность площади [см<sup>2</sup>]. Величина эффективности и светосила детектора связаны друг с другом, и, следовательно, для характеристики детектора достаточно определить одну из них. Вычисление эффективности и чувствительности детекторов не всегда оказывается простой задачей.

В общем случае, чтобы вычислить эффективность и чувствительность детектора для частиц определенной энергии, необходимо знать угловое распределение излучения в месте расположения детектора. Кроме того, следует предположить, что детектор не возмущает поле излучения заметным образом. И, наконец, имеет смысл считать, что поле излучения на расстояниях, сравнимых с размерами детектора, не изменяется.

Для развития разряда в счетчике достаточно образования одной пары ионов. Если частица создает в среднем  $n_0$  пар ионов, то вероятность не создать ни одной пары ионов в счетчике равна (по закону Пуассона)  $e^{-n_0}$ , и, следовательно, эффективность регистрации заряженных частиц в самогасящемся счетчике  $\epsilon_d = (1 - e^{-n_0})$ . Для регистрации заряженных частиц счетчики должны иметь или тонкие стенки, или специальные тонкостенные окна, чтобы заряженные частицы могли проникать внутрь счетчика. Так, для регистрации  $\alpha$ -частиц радиоактивного распада толщина окна счетчика не должна превышать 2-4 мг/см<sup>2</sup>. Для регистрации  $\beta$ -частиц можно использовать счетчики с более толстыми стенками. Так, в счетчик с толщиной окна 30 мг/см<sup>2</sup> проникает около 70%  $\beta$ -частиц, образующихся при распаде <sup>32</sup>P, и только 0,03%  $\beta$ -частиц, образующихся при распаде <sup>14</sup>C.

Для регистрации  $\gamma$ -квантов обычно применяют счетчики с толстыми стеклянными стенками (~1 мм). Гораздо реже используют счетчики со специальными металлическими катодами. Регистрация  $\gamma$ -кванта, попавшего в счетчик, произойдет в том случае, если в результате взаимодействия  $\gamma$ -кванта появится электрон, который достигнет чувствительного объема счетчика.

Очевидно, подавляющее число электронов рождается в стенках счетчика. В зависимости от толщины катода счетчика и энергии  $\gamma$ -кванта будет меняться число электронов, попадающих в чувствительный объем счетчика. Чем толще катод и чем ниже энергия  $\gamma$ -кванта, тем меньше электронов попадет в счетчик. Точное вычисление эффективности счетчика к  $\gamma$ -квантам представляет сложную задачу.

Эффективность счетчика с различными катодами в зависимости от энергии  $\gamma$ -квантов показана на рисунке 35. Эффективность, как видно из рисунка, возрастает с увеличением энергии. Это обусловлено тем, что с ростом энергии  $\gamma$ -кванта увеличивается средняя энергия появляющихся в результате взаимодействия электронов и, следовательно, увеличивается их пробег. А это значит, что с увеличением энергии растет эффективная толщина катода, из которой электроны могут проникнуть в чувствительный объем счетчика.

Уменьшение толщины катода до очень малых величин (много меньших пробегов электронов) не изменит характера зависимости эффективности от энергии, поскольку в счетчик будут проникать электроны, образованные гамма-излучением в среде, окружающей счетчик. В вакууме эффективность тонкостенного счетчика будет иметь другой характер: она будет пропорциональна полному сечению взаимодействия  $\gamma$ -квантов с материалом, из которого изготовлен катод счетчика. Увеличение толщины катода счетчика будет приводить к тому, что эффективность регистрации  $\gamma$ -квантов низких энергий уменьшится значительно, чем высоких, из-за поглощения  $\gamma$ -квантов в стенках счетчика.

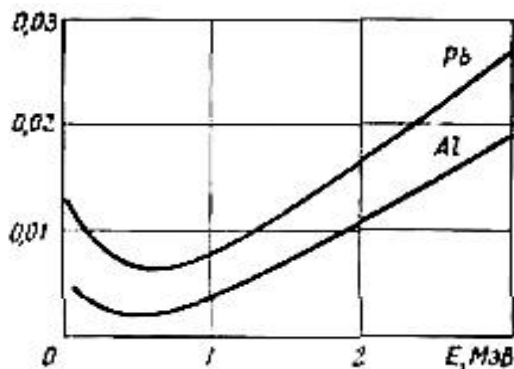


Рис.35. Зависимость эффективности регистрации  $\gamma$ -квантов от их энергии.

Газоразрядные счетчики будут регистрировать и нейтроны. Регистрация нейтронов происходит в результате или упругого рассеяния нейтронов на ядрах газа, наполняющего счетчик, или образования  $\gamma$ -квантов в реакциях неупругого рассеяния и радиационного захвата на ядрах вещества, окружающего счетчик. Нейтроны низких энергий (<100 кэВ) в счетчике со смесью спирт-аргон будут упруго рассеиваться на ядрах водорода. Эффективность регистрации таких нейтронов будет порядка сотых долей процента. Для нейтронов более высоких энергий эффективность окажется еще меньше. Если же счетчик окружить кадмием и поместить в замедлитель нейтронов (воду, парафин), то нейтроны будут регистрироваться по  $\gamma$ -квантам захвата в водороде и кадмии.

Счетчики Гейгера используются в основном для регистрации быстрых заряженных частиц и гамма-квантов. Так как для возникновения газового разряда достаточно, чтобы в рабочем объеме счетчика образовалась хотя бы одна пара ионов (точнее, один свободный электрон), любая ионизирующая частица, попавшая в счетчик, будет зарегистрирована в нем с вероятностью, очень близкой к единице. Что касается гамма-излучения, то необходимым условием регистрации гамма-кванта является, прежде всего, поглощение его (частичное или полное) в счетчике, сопровождающееся образованием вторичного электрона. Благодаря большой проникающей способности гамма-квантов, вероятность их поглощения в материале счетчика очень мала, и эффективность регистрации, соответственно, составляет малые доли от единицы (0,01–0,1%).

**Эффективность регистрации для релятивистских частиц.** Предположим, что счетчик Гейгера наполнен газом (или смесью газов), не содержащим примеси электроотрицательных молекул, способных с большой вероятностью захватывать свободные электроны. При этом условии для возникновения разряда в счетчике действительно достаточно появления в газе всего одной пары ионов, и ионизирующая частица, попавшая в счетчик, не вызывает в нем разряда только в том случае, если она не образует в рабочем объеме счетчика ни одной пары ионов. Чем меньше ионизирующая способность регистрируемых частиц, тем больше будет, очевидно, вероятность того, что, при прочих равных условиях, частица, прошедшая через счетчик, не образует в нем ни одной пары ионов. Наименьшая эффективность регистрации будет иметь место в случае однозарядных релятивистских частиц, обладающих минимальной ионизирующей способностью.

Можно оценить эффективность регистрации частиц с минимальной ионизирующей способностью, исходя из следующих соображений. Частица, проходя в газе, наполняющем счетчик, путь « $l$ », образует в среднем  $\nu_0 l$  пар ионов, где  $\nu_0$  — первичная удельная ионизация. Нетрудно рассчитать вероятность того, что при среднем числе пар ионов  $\nu_0 l$  частица не образует в счетчике ни одной пары ионов. С этой целью представим себе, что весь путь « $l$ » разбит на большое число малых интервалов  $\Delta l$ . Тогда вероятность того,

что частица образует пару ионов на малом пути  $\Delta l$ , будет равна произведению  $v_0 p \Delta l$  (интервал « $\Delta l$ » выбирается настолько малым, чтобы вероятностью образования на пути « $\Delta l$ » двух пар ионов можно было пренебречь); вероятность же того, что на пути « $\Delta l$ » не будет образовано ни одной пары ионов, будет равна разности  $(1 - v_0 p \Delta l)$ .

В таблице 9 приведены значения первичной удельной ионизации  $v_0$  для ряда газов (при нормальных условиях), используемых обычно при наполнении счетчиков Гейгера.

Таблица 9. Значения первичной удельной ионизации газов

Газ	H <sub>2</sub>	He	Ne	Воздух	Ar	Xe
$v_0, \text{см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$	6	6	12	21	29,4	44

Пользуясь этой таблицей и зная давление газа в счетчике  $p$ , можно оценить эффективность регистрации частиц, проходящих в счетчике различные пути « $l$ ». Так, в счетчике с диаметром катода 2 см, наполненном, например, аргоном до давления 0,1 атм, релятивистская частица, проходящая по диаметру, создает в среднем около 6 пар ионов (первичная ионизация). Это означает, что вероятность быть пропущенной для такой частицы ничтожно мала (~0,04%). Но если частица в этом же счетчике пройдет недалеко от края, так что ее путь в газе составит, скажем, всего 5 мм, вероятность быть пропущенной резко возрастет и составит уже около 13%. Для счетчика тех же размеров, но наполненного водородом до того же давления, даже для частиц, проходящих по его диаметру, вероятность регистрации « $\eta$ » составит всего 80 %; частицы же, проходящие по краю счетчика, будут в основном пропущены.

Поскольку эффективность регистрации зависит от длины пути, проходимого частицей в счетчике, точный расчет эффективности « $\eta$ » потребовал бы учета углового распределения регистрируемых частиц. Так как расчет этот довольно сложен, на практике обычно пользуются оценочными данными. В случае необходимости эффективность счетчика « $\eta$ » можно оценить и опытным путем. Установка для определения эффективности счетчика в параллельном потоке частиц (вернее, для частиц в некотором телесном угле  $\omega$ ), в принципе, очень проста и представляет собой «телескоп» из трех (или более) счетчиков, расположенных так, что ось «телескопа» совпадает с направлением потока частиц (рис. 36). Прохождение частицы через «телескоп» должно сопровождаться появлением импульсов во всех трех счетчиках одновременно. Эффективность среднего счетчика  $V$  можно определить как отношение числа частиц, зарегистрированных в счетчике, к числу частиц, прошедших через него за некоторый интервал времени. Число частиц, прошедших через счетчик  $B$ , сосчитывается с помощью специальной электронной схемы, выделяющей совпадения во времени импульсов в двух крайних счетчиках  $A$  и  $C$ . Вторая электронная схема сосчитывает за это же время число совпадений во времени импульсов во всех трех счетчиках. Так как некоторая доля частиц, прошедших через счетчик  $B$ , не вызывает в нем разряда, число тройных совпадений окажется несколько меньше числа двойных. Эффективность счетчика  $V$  рассчитывается как отношение числа тройных к числу двойных совпадений импульсов во времени. При использовании схемы совпадений для выделения частиц, коррелированных во времени (одновременных или следующих друг за другом в строго определенном порядке), следует учесть, что эффективность регистрации совпадений также может оказаться меньше 100%. Дело в том, что момент регистрации импульса от детектора в электронной схеме может не совпадать с моментом попадания частицы в детектор.

В счетчиках Гейгера начало импульса сдвинуто относительно момента попадания частицы в счетчик на время дрейфа электронов  $t_m$ , которое может принимать любые значения от нуля до некоторого предельного, отвечающего образованию разряда электроном, возникшим около катода (~ $10^{-7}$  с). Более того, поскольку электронное устройство, используемое для приема импульсов от счетчиков Гейгера, имеет обычно некоторый, и не очень малый, порог срабатывания, а импульсы могут отличаться друг от друга крутизной нарастания фронта, возникает дополнительное запаздывание, которое может превысить сдвиг из-за времени дрейфа электронов в несколько раз.

Отсюда следует, что схема совпадений должна иметь некоторое конечное время разрешения, которое хотя и не связано, в принципе, с временем разрешения используемых детекторов, не может быть сделано сколь угодно малым: при попытке свести время разрешения схемы совпадений к величине, меньшей времени возможного запаздывания импульсов, эффективность регистрации совпадений может стать существенно меньше 100 % и даже упасть до нуля.

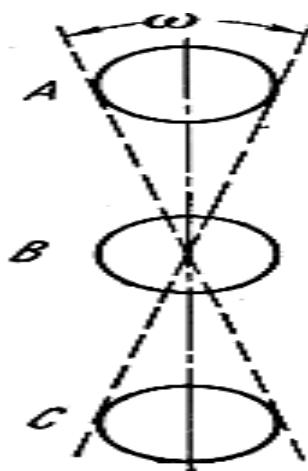


Рис.36. К понятию эффективности регистрации.

С другой стороны, поскольку при измерениях такого рода помимо частиц, связанных друг с другом генетически, в детекторы попадает большое количество посторонних частиц, схема совпадений, обладающая конечным временем разрешения, регистрирует не только импульсы, отвечающие частицам, попавшим в детекторы действительно одновременно, – истинные совпадения, но и импульсы от посторонних частиц, случайно попавших в детекторы в пределах времени разрешения схемы. Очевидно, чем меньше время разрешения схемы совпадений, тем точнее устанавливается факт истинной одновременности частиц и тем меньше относительное число случайных совпадений.

Опыт показывает, что эффективность регистрации релятивистских частиц счетчиками Гейгера средних размеров, наполненными таким газом, как аргон, до давления 100-200 мм рт.ст., действительно близка к 100%. При использовании одиночных счетчиков просчеты в несколько процентов обычно либо несущественны, либо учитываются с той или иной степенью точности. При применении счетчиков Гейгера в схемах совпадений, особенно многократных, когда эффективность регистрации  $\tau$  входит в расчеты в степени кратности совпадений, даже небольшие просчеты частиц в отдельных счетчиках могут заметно исказить результаты измерений. И наконец, совсем малые отклонения эффективности регистрации от 100% могут оказаться решающими при постановке эксперимента, в которых используется метод антисовпадений, когда с помощью специальной электронной схемы регистрируются импульсы от одного детектора (или нескольких детекторов, срабатывающих одновременно) при отсутствии в этот момент импульсов от другого детектора. В этом случае хотя и малая, но конечная вероятность, просчетов частиц в детекторе, включенном на антисовпадения, может имитировать факт отсутствия частицы в детекторе и привести тем самым к грубому искажению экспериментальных результатов.

Как уже упоминалось, при расчете эффективности регистрации релятивистских частиц счетчиками Гейгера было предположено, что в счетчике не происходит захвата свободных электронов молекулами газа. В противном случае эффективность регистрации частиц, образующих в счетчике малое число пар ионов, может оказаться много меньше расчетной. Действительно, если в газе счетчика возникает всего 1-2 электрона, то при наличии электроотрицательных молекул не исключена возможность, что в области ударной ионизации эти электроны попадут уже в связанном виде – в виде отрицательных ионов. Отрицательные ионы могут сохранить захваченные ими электроны вплоть до нейтрализации на аноде и в этом случае разряд в счетчике не возникает совсем. Если отрицательный ион потеряет электрон в области ударной ионизации, то разряд может возникнуть, и частица будет зарегистрирована, но импульс запоздает относительно момента попадания частицы в счетчик на столь длительное время (время дрейфа отрицательного иона), что возможность применения счетчика в схемах совпадений с малым временем разрешения исключается.

Из газов, используемых при наполнении счетчиков, наибольшей способностью захватывать свободные электроны обладают галоиды, применяемые в галогенных счетчиках ( $\text{Cl}_2$ ,  $\text{Br}_2$ ) в качестве гасящей примеси к основному газу (неону). Вероятность захвата электронов в галогенных счетчиках, однако, невелика ввиду малого парциального давления примеси. Возможность образования отрицательных ионов следует учесть и при наполнении счетчиков водородом или воздухом (в последнем случае из-за электроотрицательных свойств молекул  $\text{O}_2$ ). В счетчиках, наполненных инертными газами и смесью инертных газов с парами органических соединений, захват электронов молекулами газа практически не имеет места.

**Эффективность для гамма-лучей.** Как известно, если на поглотитель толщины  $x$  падает по нормали к его поверхности поток гамма-квантов интенсивности  $\mathbf{J}_0$ , то интенсивность потока, прошедшего через поглотитель ( $\mathbf{J}$ ), будет равна  $\mathbf{J}(x) = \mathbf{J}_0 e^{-\mu x}$ , где  $\mu$ , – коэффициент поглощения, зависящий как от энергии гамма-квантов, так и от природы поглотителя. Толщину поглотителя  $x$  принято выражать в г/см<sup>2</sup>, тогда коэффициент  $\mu$  имеет размерность см<sup>2</sup>/г. Если толщина  $x$  выражена в см,  $\mu$  выражают в см<sup>-1</sup>. Таким

образом, если счетчик Гейгера рассматривать как поглотитель толщины  $x$ , то эффективность регистрации гамма-квантов счетчиком не может превышать величины:

$$J_0 - J(x) / J_0.$$

В счетчике Гейгера основная масса поглотителя сосредоточена в его корпусе, играющем обычно роль катода; газ же, наполняющий счетчик, ввиду его малой массы, почти не поглощает гамма-излучения. Поэтому может оказаться, что далеко не каждый гамма-квант, поглощенный в счетчике, будет зарегистрирован, гамма-квант, поглощенный в корпусе счетчика, будет зарегистрирован лишь в том случае, если образованный им при этом электрон выйдет из катода и произведет в газе счетчика минимальный ионизационный эффект. Если толщина стенки катода мала – меньше длины пробега электронов, образуемых гамма-квантами, – то почти все электроны попадают в рабочий объем счетчика, но вероятность поглощения гамма-квантов в материале катода будет очень мала. С другой стороны, если толщина катода больше длины пробега электронов, то, хотя доля гамма-квантов, поглощаемых в счетчике, может быть и довольно велика, многие из электронов не смогут выйти из глубины катода в рабочий объем счетчика. Оптимальной является, очевидно, толщина стенки, близкая к максимальной длине пробега электронов, образуемых гамма-квантами, в материале катода.

Благодаря большому разбросу в потерях энергии и сильному рассеянию в веществе длина пробега для электронов данной энергии не является вполне определенной. На практике пользуются обычно экстраполированными пробегами, получаемыми из кривых поглощения моноэнергетических электронов.

При переводе в линейные меры пробеги электронов средних энергий (~1 Мэв) измеряются, особенно в тяжелых металлах, долями миллиметра. Поэтому и толщина стенок катода счетчика, выбираемая в соответствии с длинами пробега электронов, составляет обычно не более 0,5-1 мм. С другой стороны, коэффициент поглощения  $\mu$  в области средних энергий гамма-квантов также невелик и составляет 0,05—0,1 см<sup>2</sup>/г. Отсюда следует, что произведение  $\mu x$ , определяющее относительное количество поглощаемых  $\gamma$ -квантов, всегда мало по сравнению с единицей. Для латунного счетчика, например, с толщиной стенки 0,5 мм ( $x = 0,43$  г/см<sup>2</sup>, что отвечает пробегу электронов с энергией около 1 Мэв) при энергии гамма-квантов  $h\nu = 1$  Мэв ( $\mu = 0,06$  см<sup>2</sup>/г) произведение  $\mu x$  составляет всего 0,025. В этом случае можно считать, что при прохождении потока гамма-лучей через счетчик интенсивность потока убывает в соответствии с выражением  $J(x) = J_0(1 - \mu x)$ . Тогда доля поглощенных гамма-квантов не превышает произведения  $\mu x$ . Последняя величина и определяет собой верхний предел для эффективности регистрации гамма-квантов счетчиком Гейгера:  $\eta \leq \mu x$ .

Поскольку коэффициент поглощения  $\mu$  существенно зависит от атомного номера поглотителя  $Z$  (особенно в области малых энергий, где преобладает поглощение за счет фотоэффекта), счетчики Гейгера для регистрации гамма-квантов изготавливают обычно из таких материалов, как висмут или свинец. Иногда счетчик изготавливают из какого-либо вещества с малым атомным номером (например, из алюминия), в котором гамма-излучение поглощается слабо, а внутреннюю поверхность катода покрывают свинцом или висмутом так, чтобы толщина покрытия соответствовала пробегу вторичных электронов.

И расчет, и опытные данные показывают, что эффективность регистрации имеет минимум при энергии гамма-квантов 0,1–0,5 Мэв, составляющий 0,1–0,2% для латунного катода и около 1% для катода из свинца. При увеличении энергии  $h\nu$  эффективность регистрации гамма-квантов, в соответствии с увеличением пробега вторичных электронов, возрастает, хотя коэффициент поглощения  $\mu$  и проходит через минимум. Эффективность регистрации увеличивается и в сторону малых энергий  $h\nu$ , где коэффициент поглощения  $\mu$ , резко возрастает.

Иногда, по условиям физического эксперимента, необходимо существенно увеличить относительное количество гамма-квантов, испытывающих поглощение непосредственно в газе счетчика. В этих случаях при наполнении счетчиков используют тяжелые инертные газы с большим  $Z$  (криптон, ксенон) при сравнительно высоком давлении.

При работе с рентгеновским излучением необходимо учесть, что эффективность регистрации очень сильно зависит от свойств материала катода и от природы газа, наполняющего счетчик. Наилучшие условия регистрации имеют место в том случае, когда  $K$ -поглощение материала лежит при длине волны, несколько превышающей длину волны регистрируемого излучения. В рентгенокопии часто используется фотоэлектрическое поглощение в рабочем объеме счетчика. В этих случаях счетчики наполняют аргоном, криптоном или ксеноном при повышенном давлении. При регистрации мягкого рентгеновского излучения в счетчике должно быть предусмотрено входное окно, закрытое тонкой пленкой из материала с малым атомным номером  $Z$ . Окна в счетчиках затягивают обычно алюминиевой фольгой толщиной 20–30 мкм или закрывают тонкой пластинкой из слюды. Особенно хорош для этой цели бериллий, обладающий в этой области энергий очень малым коэффициентом поглощения. Эффективность регистрации рентгеновского излучения велика и может составить несколько десятков процентов.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

### Определение пригодности счетчика Гейгера к работе.

**Цель работы:** определить основные параметры счетчика Гейгера и его пригодность к работе.

Приборы и материалы для выполнения работы: радиометр ПП-8, стронциево-иттриевый радиоактивный источник, калькулятор, миллиметровая бумага.

#### Выполнение работы.

1. Подготовить прибор к работе.
2. Проверить исправность пересчетного прибора ПСТ-100.
3. На нижнюю позицию этажерки в свинцовом домике поместить радиоактивный источник ( $^{90}\text{Sr}$ – $^{90}\text{Y}$ ), свинцовый домик закрыть.
4. Включить прибор ПСТ-100 на измерение. Затем рукоятками «плавно» и «грубо» выпрямителя ВСВ-2 увеличивать напряжение до появления первых импульсов (свечение неоновых лампочек на черном диске). Это будет напряжение начала счета ( $U_{н.с}$ ).
6. Остановить прибор, сбросить показания. Установить интервал времени 100 с для автоматической остановки прибора.
7. Произвести измерение числа регистрируемых импульсов  $n$  за 100 с при напряжении начала счета.
8. Постепенно повышая напряжение каждый раз на 50 В, произвести 6 измерений. Результаты занести в таблицу 10, рассчитать скорость счета  $N$ .

Таблица 10. Результаты измерений.

№ п.п.	U, В	t, с	n, имп	$N = \frac{n \cdot 60}{100}$ имп/мин

9. Выключить установку.
10. По полученным результатам на миллиметровой бумаге построить счетную характеристику.
11. По счетной характеристике определить напряжение начала счета  $U_{н.с}$ , напряжение начала плато  $U_{н.п}$  и напряжение конца плато  $U_{к.п}$ .
12. По формулам, приведенным выше, рассчитать наклон и длину плато. Сделать вывод об исправности счетчика и пригодности к работе.
13. Определить рабочее напряжение  $U_p$  счетчика.

#### Контрольные вопросы

1. Какие излучения называют ионизирующими?
2. Какой газовый разряд называют самостоятельным, несамостоятельным?
3. В чем заключается механизм развития самостоятельного газового разряда в счетчиках Гейгера-Мюллера?
4. С какой целью в газовую смесь, заполняющую счетчики, вводят многоатомные газы, галогены?
5. На чем основан принцип работы несамогасящихся счетчиков Гейгера-Мюллера?
6. При каких условиях заряженные частицы и гамма-кванты не регистрируются газоразрядными счетчиками?
7. Почему эффективность регистрации бета-излучения торцовыми счетчиками Гейгера-Мюллера со слюдяным окошком гораздо выше, чем эффективность регистрации ими гамма- и рентгеновского излучений?
8. Какова зависимость числа импульсов, регистрируемых счетчиком Гейгера-Мюллера в единицу времени, от напряжения между его электродами?