

1.5.5. Счетчики Гейгера – Мюллера

В пропорциональном счетчике газовый разряд развивается только в части объема газа. В ней образуется сначала первичная ионизация, а затем и лавина электронов. Остальной объем не охватывается газовым разрядом. С повышением напряжения критическая область расширяется. В ней увеличивается концентрация возбужденных молекул, а следовательно, и количество испущенных фотонов. Под действием фотонов из катода и молекул газа вырывается все больше и больше фотоэлектронов. Последние, в свою очередь, дают начало новым лавинам электронов в объеме счетчика, не занятом газовым разрядом от первичной ионизации. Таким образом, повышение напряжения U приводит к распространению газового разряда по объему счетчика. При некотором напряжении U_n , называемом пороговым, газовый разряд охватывает весь объем счетчика. При данном напряжении начинается область Гейгера – Мюллера.

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 – Мюллера – цилиндрические и торцовые.

Цилиндрический счетчик Гейгера – Мюллера представляет собой герметично запаянную тонкостенную металлическую или стеклянную металлизированную трубку (катод), вдоль оси которой натянута тонкая металлическая нить (анод) (рис. 31).

У торцовых счетчиков Гейгера – Мюллера (рис. 32) в металлическом или стеклянном металлизированном корпусе (катоде) в торцовой части имеется тонкое слюдяное окно.

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- и гамма-излучения.

Счетчик Гейгера – Мюллера заполняется нейтральным газом, чаще всего инертным (аргоном или неоном), под давлением 7–200 мм рт. ст. Electroды счетчика находятся под напряжением порядка 250–2000 В. Величина рабочего напряжения зависит от конструкции счетчика и состава заполняющей его газовой смеси.

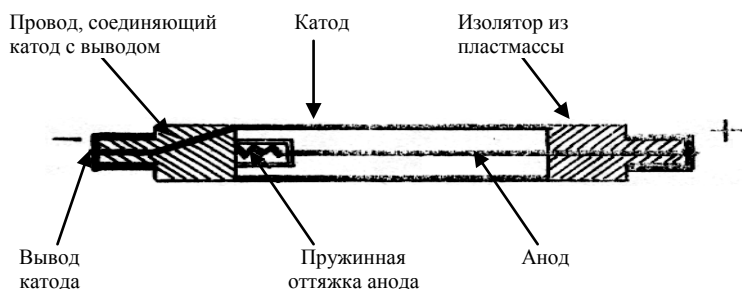


Рис. 31. Цилиндрический счетчик Гейгера – Мюллера

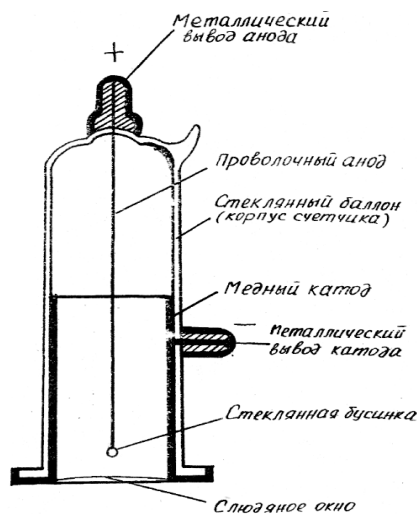


Рис. 32. Торцовый счетчик Гейгера – Мюллера

Электрическая схема включения счетчика Гейгера – Мюллера показана на рис. 33.

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.

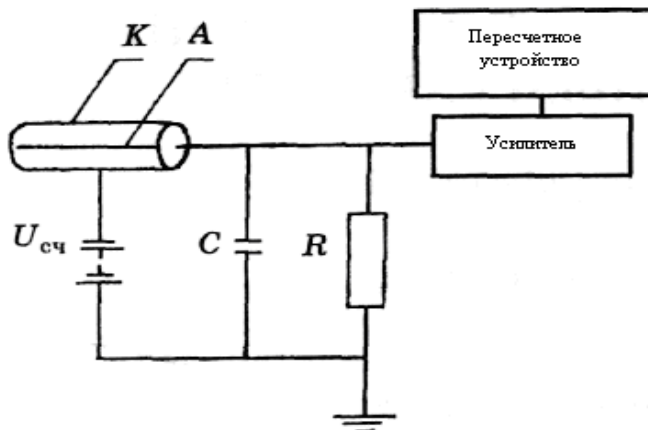


Рис. 33. Электрическая схема включения счетчика Гейгера – Мюллера:
 K – катод; A – анод; R – резистор нагрузки счетчика;
 C – входная емкость усилителя; $U_{сч}$ – источник питания счетчика

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 того, 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 – Мюллера делятся на **несамогасящиеся** и **самогасящиеся**.

В **несамогасящихся** счетчиках применяется два радиотехнических метода прерывания газового разряда:

1) использование электронных схем гашения разряда в газе. Приспособленная для этого электронная схема в нужное время выдает на счетчик «противосигнал», который прекращает самостоятельный разряд и «выдерживает» счетчик на время до полной нейтрализации возникших заряженных частиц. Характеристики такого счетчика со схемой гашения разряда близки к характеристикам самогасящихся счетчиков и иногда превосходят их;

2) гашение разряда за счет подбора величин нагрузочного сопротивления и эквивалентной емкости, а также величины напряжения на счетчике. Для реализации этого метода в цепь счетчика вводится

высокоомное сопротивление R , равное примерно 10^8 – 10^9 Ом (рис. 34). 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 составляет около 10^{-6} с. После его гашения положительные ионы дрейфуют к катоду и нейтрализуются на нем. В течение времени τ , равного 10^{-2} с (τ – 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 τ , равным 10^{-2} с, способен за секунду среагировать примерно на 100 частиц.

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

Гашение газового разряда в самогасящихся счетчиках Гейгера – Мюллера 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).

Один газ, основной, составляет в смеси около 90 %, другой, гасящий, – около 10 %. Компоненты рабочей смеси должны удовлетворять обязательному условию, заключающемуся в том, что потенциал ионизации гасящего газа должен быть ниже первого потенциала возбуждения основного газа.

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.

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

Основные характеристики счетчика Гейгера – Мюллера.

1. Счетная характеристика – зависимость скорости счета от величины рабочего напряжения.
2. Эффективность регистрации счетчика – выраженное в процентах отношение числа считаемых частиц к числу всех частиц, попадающих в рабочий объем счетчика.
3. Разрешающее время (состоит из мертвого времени и времени восстановления) – минимальный интервал времени между импульсами, при котором они регистрируются раздельно.
4. Срок службы счетчиков.

Счетная характеристика. Импульс тока, возникающий в газоразрядных счетчиках обоих типов, зависит от напряжения между его электродами и не всегда совпадает с числом пронизывающих его частиц. **Счетная характеристика** – зависимость числа импульсов n , регистрируемых счетчиком в единицу времени, от напряжения $U_{сч}$, приложенного между его электродами (рис. 34).

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.

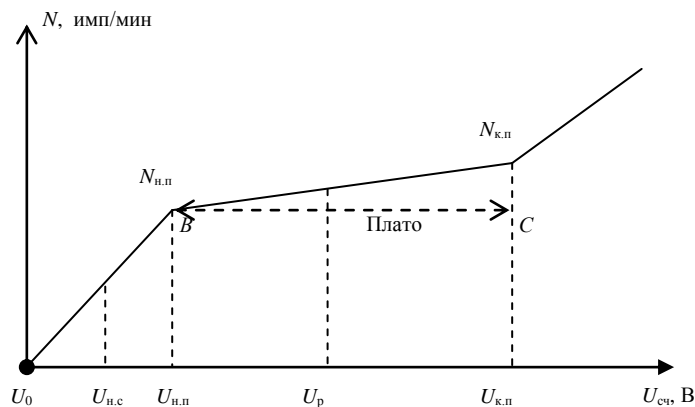


Рис. 34. Счетная характеристика счетчика Гейгера – Мюллера:
 $U_{н.с}$ – напряжение начала счета; $U_{н.п}$ – напряжение начала плато;
 $U_{к.п}$ – напряжение конца плато; U_p – рабочее напряжение счетчика

Участок *BC* (см. рис. 34) счетной характеристики, соответствующий этой области, называется плато и представляет собой ее рабочую часть. Протяженность плато у счетчиков составляет не менее 100 В. Скорость счета импульсов в его пределах изменяется не более чем на 3–5 %. У некоторых счетчиков плато имеет незначительный наклон. **Наклон плато Δ** принято выражать относительным приращением числа импульсов, приходящегося на каждые 100 В 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 Δ – 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 для широко распространенных счетчиков не превышает 3–5 % на 100 В. Для счетчиков МСТ-17 и счетчиков СИ-3Б наклон плато не должен превышать 3 % на 100 В, для счетчиков типа СТС-6 – более 12,5 %.

Амплитуда импульса от счетчика Гейгера – Мюллера может достигать нескольких десятков или даже сотен вольт. С такими импульсами можно работать без всякого усиления, поскольку 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 α -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 l** .

$$l = U_{к.п} - U_{н.п}.$$

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:

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

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

Разрешающее время – отрезок времени, необходимый для восстановления радиационной чувствительности счетчика Гейгера – Мюллера и фактически определяющий его быстродействие – мертвое время, которое является важной его паспортной характеристикой (рис. 35).

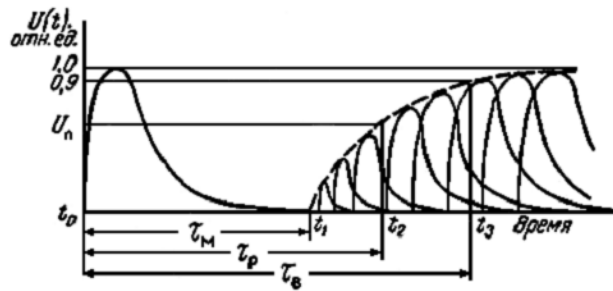


Рис. 35. Схема возникновения мертвого времени в счетчике Гейгера – Мюллера (форма импульса при разряде в счетчике Гейгера – Мюллера)

Если в счетчике Гейгера – Мюллера в момент времени t_0 начался разряд, вызванный ядерной частицей, то напряжение на счетчике резко падает. Счетчик в течение определенного времени, которое называется мертвым временем, в счетчике снова возможно возникновение самостоятельного разряда. Однако вначале амплитуда импульса еще мала. Только после того, как пространственный заряд достигнет поверхности катода, в счетчике образуются импульсы нормальной амплитуды. Отрезок времени $\tau_в$ между моментом t_0 , когда в счетчике возник самостоятельный разряд, и моментом восстановления рабочего напряжения t_3 называется **временем восстановления**. Для того чтобы регистрирующее устройство могло сосчитать импульс, необходимо, чтобы его амплитуда превышала определенную величину U_n . **Интервал времени между моментом возникновения самостоятельного разряда t_0 и моментом образования амплитуды U_n импульса t_2 называется разрешающим временем τ_p счетчика Гейгера – Мюллера.** Разрешающее время τ_p несколько больше мертвого времени.

Если каждую секунду в счетчик попадает большое число частиц (несколько тысяч и более), то разрешающее время τ_p по величине будет сравнимо со средним промежутком времени между импульсами, поэтому значительное число импульсов не сосчитывается. Пусть m – наблюдаемая скорость счета счетчика. Тогда доля времени, в течение которого счетная установка нечувствительна, равна $m \cdot \tau$. Следовательно, число импульсов, потерянных за единицу времени, равно $n - m \cdot \tau_p$, где n – скорость счета, которая наблюдалась бы в том случае, если бы разрешающее время имело пренебрежимо малую величину. Поэтому

$$n - m = n \cdot m \cdot \tau_p$$

или

$$n = m / (1 - m \cdot \tau_p)$$

Поправка в скорости счета, которая дается этим уравнением, называется поправкой на мертвое время установки.

Эффективность регистрации счетчика. 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) взаимодействует 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.

Еще одной важной характеристикой счетчика Гейгера – Мюллера является зависимость его радиационной чувствительности от энергии («жесткости») ионизирующих частиц. На профессиональном языке график этой зависимости называют «ходом с жесткостью». В какой мере эта зависимость важна, показывает график на рис. 36.

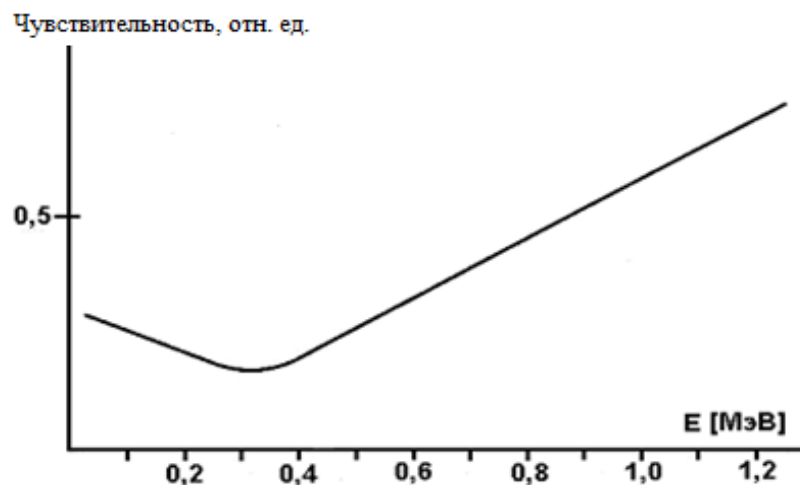


Рис. 36. Зависимость скорости счета от энергии гамма-квантов («ход с жесткостью») в счетчике Гейгера – Мюллера

«Ход с жесткостью» будет влиять, очевидно, на точность проводимых измерений.

В табл. 3 приведены сведения о самогасящихся галогеновых счетчиках Гейгера – Мюллера российского производства, наиболее подходящих для бытовых приборов радиационного контроля.

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

В галогеновых 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 галогеновых счетчиков практически не ограничен.

Галогеновые самогасящиеся счетчики отличаются самым низким напряжением питания, превосходными параметрами выходного сигнала и достаточно высоким быстродействием, они наиболее удобны для применения в качестве датчиков ионизирующего излучения в дозиметрических приборах радиационного контроля.

Таблица 3. Сведения о галогеновых счетчиках Гейгера – Мюллера

Тип счетчика	Рабочее напряжение, В	Длина плато, В	Собственный фон счетчика, имп/с	Радиационная чувствительность счетчика, имп/мкР	Амплитуда выходного импульса, В	Вид излучения
СБМ19	400	100	2	310*	50	Жесткое β- и γ-излучение
СБМ20	400	100	1	78*	50	Жесткое β- и γ-излучение
СБТ9	380	80	0,17	40*	40	Мягкое и жесткое β-, γ-излучение
СБТ10А	390	80	2,2	333*	5	Мягкое и жесткое β-, γ-излучение
СБТ11	390	80	0,7	50*	10	Мягкое и жесткое β-, γ-излучение, α-излучение
СИ8Б	390	80	2	350–500	20	Мягкое и жесткое β-, γ-излучение
СИ14Б	400	200	2	300	30	Мягкое и жесткое β-, γ-излучение
СИ22Г	390	100	1,3	540*	50	γ-излучение
СИ23БГ	400	100	2	200–400*	–	Жесткое β- и γ-излучение

* По кобальту-60.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альфа-, бета- и гамма-спектроскопия / под ред. К. Зигмана; пер. с англ. – М.: Атомиздат, 1968. – Вып. 1. – 567 с.
2. Альфа-, бета- и гамма-спектроскопия / под ред. К. Зигмана; пер. с англ. – М.: Атомиздат, 1968. – Вып. 2. – 561 с.
3. Абрамов, А. И. Основы экспериментальных методов ядерной физики: учеб. пособие для вузов / А. И. Абрамов, Ю. А. Казанский, Е. С. Матусевич. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 488 с.: ил.
4. Бударков, В. А. Радиобиологический справочник / В. А. Бударков, В. А. Киршин, А. Е. Антоненко. – Минск: Ураджай, 1992. – 336 с.: ил.
5. Баранов, В. И. Радиометрия / В. И. Баранов. – 2-е изд., испр. и доп. – М., 1956. – 328 с.
6. Калашникова, В. И. Экспериментальные методы ядерной физики / В. И. Калашникова, М. С. Козодаев; под ред. М. С. Козодаева. – М.: Наука, 1966. – 408 с.
7. Измерение активности источников бета- и гамма-излучений / В. Бочкарев [и др.]. – М., 1953. – 242 с.
8. Караваев, Ф. М. Измерение активности нуклидов / Ф. М. Караваев. – М.: Изд-во стандартов, 1972. – 228 с.
9. Лабораторный практикум по экспериментальным методам ядерной физики: учеб. пособие для вузов / В. В. Аверкиев, Н. Н. Беглядов, Т. А. Горюн [и др.]; под ред. К. Г. Финогенова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 432 с.: ил.
10. Макаров, В. И. Блоки детектирования ионизирующих излучений / В. И. Макаров; под ред. Е. А. Левандовского. – М.: Атомиздат, 1972. – 72 с.: ил.
11. Максимов, М. Т. Радиоактивные загрязнения и их измерение: учеб. пособие / М. Т. Максимов, Г. О. Оджатов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 304 с.: ил.
12. Медведев, М. Н. Сцинтилляционные детекторы / М. Н. Медведев. – М.: Атомиздат, 1977. – 136 с.
13. Низкофоночная радиометрия / А. К. Лаврухина [и др.]. – М.: Наука, 1992. – 259 с.
14. Основы сельскохозяйственной радиологии / Б. С. Пристер [и др.]. – Киев: Урожай, 1988. – 256 с.: ил.
15. Рачинский, В. В. Курс основ атомной техники в сельском хозяйстве: учеб. пособие для вузов / В. В. Рачинский. – М.: Атомиздат. – 2-е изд., перераб. и доп. – 384 с.
16. Фюнфен, Э. Счетчики излучений / Э. Фюнфен, Г. Нейерт. – М.: Гос. изд-во литературы в области атомной науки и техники, 1961. – 58 с.
17. Кмент, В. Техника измерения радиоактивных излучений / В. Кмент, А. Кун. – М.: Наука, 1964. – 700 с.
18. Чернуха, Г. А. Радиационная безопасность: учеб. пособие / Г. А. Чернуха, Н. В. Лазаревич, Т. В. Лаломова. – Минск: ИВЦ Минфина, 2006. – 176 с.