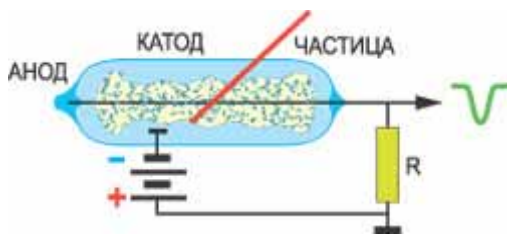


## 1.4 Счётчик Гейгера-Мюллера

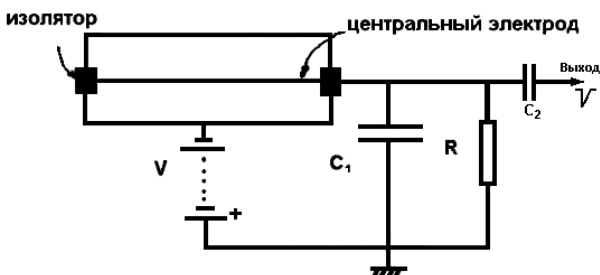


В пропорциональном счётчике газовый разряд развивается только в части объёма газа. В ней образуется сначала первичная ионизация, а затем и лавина электронов. Остальной объём не охватывается газовым разрядом. С повышением напряжения критическая область расширяется. В ней увеличивается концентрация возбуждённых молекул, а следовательно, и количество испущенных фотонов. Под действием фотонов из катода и молекул газа вырывается

всё больше и больше фотоэлектронов. Последние в свою очередь дают начала новым лавинам электронов в объёме счётчика, не занятом газовым разрядом от первичной ионизации. Таким образом, повышение напряжения  $U$  приводит к распространению газового разряда по объёму счётчика. При некотором напряжении  $U_n$ . Называемом пороговым, газовый разряд охватывает весь объём счётчика. При напряжении  $U_n$  начинается область Гейгера-Мюллера.

**Счётчик Гейгера** (или **счётчик Гейгера-Мюллера**) – газонаполненный счётчик заряженных элементарных частиц, электрический сигнал с которого усилен за счёт вторичной ионизации газового объёма счётчика и не зависит от энергии, оставленной частицей в этом объёме. Изобретён в 1908 г. Х.Гейгером и Э.Резерфордом, позднее усовершенствован Гейгером и В. Мюллером. Счетчики Гейгера-Мюллера – самые распространенные детекторы (датчики) ионизирующего излучения.

**Гейгера — Мюллера счётчик** – газоразрядный прибор для обнаружения и исследования различного рода радиоактивных и др. ионизирующих излучений:  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц,  $\gamma$ -квантов, световых и рентгеновских квантов, частиц высокой энергии в космических лучах и на ускорителях. Гамма-кванты регистрируются счётчиком Гейгера – Мюллера по вторичным ионизирующим частицам – фотоэлектронам, комптоновским электронам, электронно-позитронным парам; нейтроны регистрируются по ядрам отдачи и продуктам ядерных реакций, возникающим в газе счётчика. Работает счётчик при напряжениях, соответствующих самостоятельному коронному разряду (участок V, **Рис. 21**).



**Рис. 21.** Схема включения счетчика Гейгера

Разность потенциалов приложена ( $V$ ) между стенками и центральным электродом через сопротивление  $R$ , зашунтированное конденсатором  $C_1$ .

Этот счётчик обладает практически стопроцентной вероятностью регистрации заряженной частицы, так как для возникновения разряда достаточно одной электрон-ионной пары.

Конструктивно счётчик Гейгера устроен также как пропорциональный счётчик, т.е. представляет собой конденсатор (как правило, цилиндрический), с сильно неоднородным электрическим полем. К внутреннему электроду (тонкой металлической нити) приложен положительный потенциал (анод), к внешнему – отрицательный (катод). Электроды заключены в герметически замкнутый резервуар, наполненный каким-либо газом до давления  $13\text{—}26 \text{ кн/м}^2$  ( $100\text{—}200 \text{ мм рт. ст.}$ ). К электродам счётчика прикладывается напряжение в несколько сот в. На нить подаётся знак + через сопротивление  $R$ .

Функционально счётчик Гейгера также повторяет пропорциональный счётчик, но отличается от последнего тем, что за счёт более высокой разности потенциалов на электродах работает в таком режиме, когда достаточно появления в объёме детектора одного электрона, чтобы развился мощный лавинообразный процесс, обусловленный вторичной ионизацией (газовое усиление), который способен ионизовать всю область вблизи нити-анода. При этом импульс тока достигает предельного значения (насыщается) и не зависит от первичной ионизации. Развиваясь лавинообразно, этот процесс завершается образованием в межэлектродном пространстве электронно-ионного облака, резко увеличивающего его проводимость. По существу, при попадании в счётчик Гейгера частицы в нём вспыхивает (зажигается) самостоятельный газовый разряд, видимый (если баллон прозрачный) даже простым газом. При этом коэффициент газового усиления может достигать  $10^{10}$ , а величина импульса десятков вольт.

Возникает вспышка коронного разряда и через счётчик течёт ток.

Распределение электрического поля в счётчике таково, что разряд развивается лишь вблизи анода счётчика на расстоянии нескольких диаметров нити. Электроны быстро скапливаются на нити (не более  $10^6$  сек), вокруг которой образуется «чехол» из положительных ионов. Положительный пространственный заряд увеличивает эффективный диаметр анода и снижает тем самым напряжённость поля, поэтому разряд прерывается. По мере удаления слоя положительных ионов от нити его экранирующее действие ослабляется и напряжённость поля вблизи анода становится достаточной для образования новой вспышки разряда. Положительные ионы, приближаясь к катоду, выбивают из последнего электроны, в результате чего образуются нейтральные атомы инертного газа в возбуждённом состоянии. Возбуждённые атомы при

достаточном приближении к катоду, выбивают из его поверхности электроны, которые становятся родоначальниками новых лавин. Без внешнего воздействия такой счётчик находился бы в длительном прерывистом разряде.

Таким образом, при достаточно большом  $R$  ( $10^8$ — $10^{10}$  ом) на нити скапливается отрицательный заряд и разность потенциалов между нитью и катодом быстро падает, в результате чего разряд обрывается. После этого чувствительность счётчика восстанавливается через  $10^{-1}$ — $10^{-3}$  сек (время разрядки ёмкости  $C$  через сопротивление  $R$ ). Именно такое время требуется, чтобы медленные положительные ионы, заполнившие пространство вблизи нити-анода после пролёта частицы и прохождения электронной лавины, ушли к катоду, и восстановилась чувствительность детектора. Такое большое время нечувствительности неудобно для многих применений.

Для практического использования несамогасящего счётчика Гейгера используются различные способы прекращения разряда:

а) Использование электронных схем гашения разряда в газе. Приспособленная для этого электронная схема, в нужное время выдаёт на счётчик «противосигнал», который прекращает самостоятельный разряд и «выдерживает» счётчик на время до полной нейтрализации возникших заряженных частиц. Характеристики такого счётчика со схемой гашения разряда близки к характеристикам самогасящихся счётчиков и иногда превосходят их.

б) Гашение за счёт подбора величин нагрузочного сопротивления и эквивалентной ёмкости, а также величины напряжения на счётчике.

В зависимости от механизма гашения разряда различают две группы счётчиков: несамогасящиеся и самогасящиеся. В несамогасящихся счётчиках «мёртвое» время слишком велико ( $10^{-2}$  сек), для его уменьшения применяют электронные схемы гашения разряда, которые снижают разрешающее время до времени собирания положительных ионов на катоде ( $10^{-4}$  сек).

Сейчас несамогасящиеся счётчики, в которых гашение разрядов обеспечивается сопротивлением  $R$ , вытеснены самогасящимися счётчиками, которые к тому же более стабильны. В них благодаря специальному газовому наполнению (инертный газ с примесью сложных молекул, например паров спирта, и небольшой примесью галогенов — хлора, брома, йода) разряд сам собой обрывается даже при малых сопротивлениях  $R$ . Время нечувствительности самогасящегося счётчика  $\sim 10^{-4}$  сек.

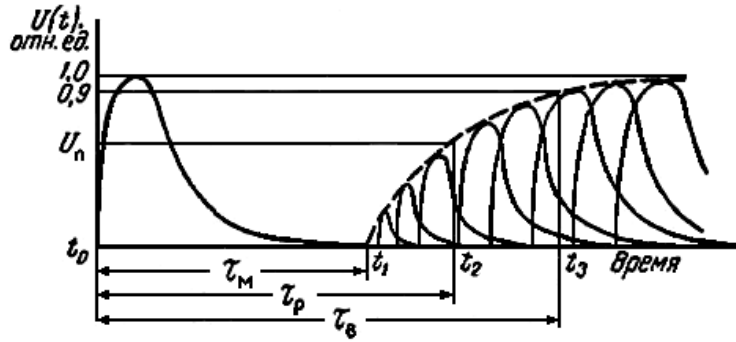
В 1937 г. Трост обратил внимание на то обстоятельство, что если в счётчик, наполненный аргоном, добавить небольшое количество (несколько процентов) паров этилового спирта ( $C_2H_5OH$ ), то разряд, вызванный в счётчике ионизирующей частицей, погаснет сам по себе. Впоследствии выяснилось, что самопроизвольное погасание разряда в счётчике имеет место и при добавлении к аргону паров других органических соединений, обладающих сложными многоатомными соединениями. Вещества эти называют обычно гасящими, а счётчики Гейгера-Мюллера, в которых используются эти вещества, называются счётчиками - самогасящегося типа. Самогасящийся счётчик наполняется смесью двух (или нескольких) газов. 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.

Замечание. Для регистрации рентгеновского излучения часто применяются проволочные ксеноновые детекторы. Примером может служить первый отечественный сканирующий цифровой медицинский флюорограф МЦРУ СИБИРЬ. Другое приложение рентгеновских счётчиков - рентгенофлуоресцентный волнодисперсионный спектрометр (например, Venus 200), предназначенный для определения различных элементов в веществах и материалах. В зависимости от определяемого элемента возможно применение следующих детекторов: - проточного пропорционального детектора с окнами толщиной 1, 2, 6 микрон, непроточного неоновый детектора с окнами толщиной 25 и 50 микрон, - непроточного криптонового детектора с окном толщиной 100 микрон, - ксенонового детектора с окном 200 микрон и сцинтилляционного детектора с окном 300 микрон.

Самогасящиеся счётчики допускают большую скорость счёта без специальных электронных схем гашения разряда, поэтому они нашли широкое применение. Самогасящиеся счётчики с органическими гасящими примесями имеют ограниченный срок работы ( $10^8$  -  $10^{10}$  импульсов). При использовании в качестве гасящей примеси одного из галогенов (чаще всего применяется менее активный  $Br_2$ ) срок службы становится практически неограниченным из-за того, что двухатомные молекулы галогена после диссоциации на атомы (в процессе разряда) образуются снова. К недостаткам галогенных счётчиков следует отнести сложность технологии их изготовления из-за химической активности галогенов и большое время нарастания переднего фронта импульсов из-за прилипания первичных электронов к молекуле галогена. «Затягивание» переднего фронта импульса в галогенных счётчиках делает их неприменимыми в схемах совпадений.

Основными характеристиками счётчика являются: счётная характеристика – зависимость скорости счёта от величины рабочего напряжения; эффективность счётчика – выраженное в процентах отношение числа считаемых частиц к числу всех частиц, попадающих в рабочий объём счётчика; разрешающее время –

минимальный интервал времени между импульсами, при котором они регистрируются отдельно и срок службы счётчиков.



**Рис. 22.** Схема возникновения мёртвого времени в счётчике Гейгера-Мюллера. (Форма импульса при разряде в счётчике Гейгера-Мюллера).

Отрезок времени, необходимый для восстановления радиационной чувствительности счетчика Гейгера и фактически определяющий его быстродействие - «мертвое» время - является важной его паспортной характеристикой.

Если в счётчике Гейгера-Мюллера в момент времени  $t_0$  начался разряд, вызванный ядерной частицей, то напряжение на счётчике резко падает. Счётчик в течение определённого времени, которое называется мёртвым временем  $\tau_m$ , не способен регистрировать другие частицы. С момента  $t_1$ , т.е. по истечении мёртвого времени, в счётчике снова возможно возникновение самостоятельного разряда. Однако вначале амплитуда импульса ещё мала. Только после того, как пространственный заряд достигнет поверхности катода, в счётчике образуются импульсы нормальной амплитуды. Отрезок времени  $\tau_c$  между моментом  $t_0$ , когда в счётчике 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 определённую величину  $U_n$ . Интервал времени между моментом возникновения самостоятельного разряда  $t_0$  и моментом образования амплитуды  $U_n$  импульса  $t_2$  называется разрешающим временем  $\tau_p$  счётчика Гейгера-Мюллера. Разрешающее время  $\tau_p$  несколько больше мёртвого времени.

Если каждую секунду в счётчик попадает большое число частиц (несколько тысяч и более), то разрешающее время  $\tau_p$  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  $m\tau$ . Следовательно, число импульсов, потерянных за единицу времени, равно  $nm\tau_p$ , где  $n$  - скорость счета, которая наблюдалась бы в том случае, если бы разрешающее время имело пренебрежимо малую величину. Поэтому

$$n - m = nm\tau_p \quad (7)$$

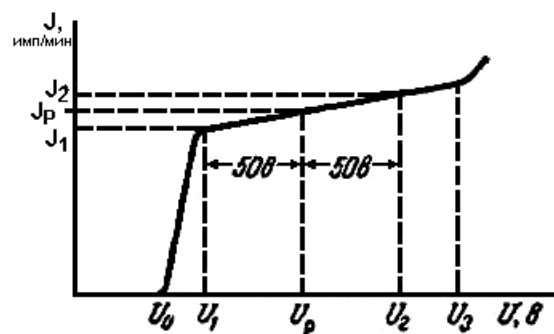
или

$$n = \frac{m}{1 - m\tau} \quad (8)$$

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

Галогеновые самогасящиеся счётчики отличаются самым низким напряжением питания, превосходными параметрами выходного сигнала и достаточно высоким быстродействием, они оказались особенно удобными для применения в качестве датчиков ионизирующего излучения в бытовых приборах радиационного контроля.

Каждая фиксируемая счетчиком частица вызывает появление в его выходной цепи короткого импульса. Число импульсов, возникающих в единицу времени, - скорость счета счетчика Гейгера - зависит от уровня ионизирующей радиации и напряжения на его электродах. Типичный график зависимости скорости счета от напряжения питания  $V$  показан на **Рис. 23**. Здесь  $V_{зак}$  - напряжение начала счета;  $V_1$  и  $V_2$  - нижняя и верхняя граница рабочего участка, так называемого плато, на котором скорость счета почти не зависит от напряжения питания счетчика. Рабочее напряжение  $V_{раб}$  обычно выбирают в середине этого участка. Ему соответствует  $N_p$  - скорость счета в этом режиме.



**Рис. 23.** Зависимость скорости счета от напряжения питания в счетчике Гейгера (Счётная характеристика)

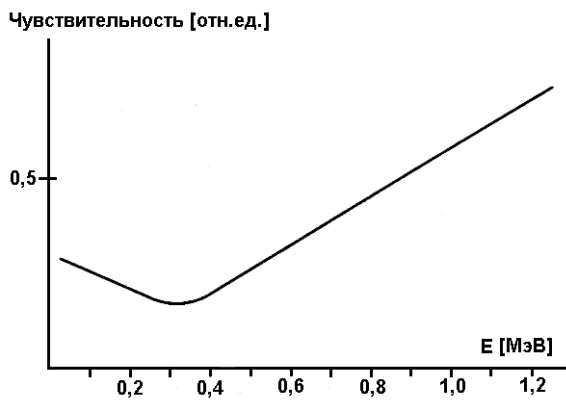
Зависимость скорости счета от уровня радиационного облучения счетчика - важнейшая его характеристика. График этой зависимости имеет почти линейный характер и поэтому нередко радиационную чувствительность счетчика выражают через имп/мкР (импульсов на микроРентген; эта размерность следует из отношения скорости счета - имп/с - к уровню радиации - мкР/с). В тех случаях, когда она не указана (нередких, к сожалению), судить о радиационной чувствительности

счетчика приходится по другому его тоже очень важному параметру - собственному фону. Так называют скорость счета, причиной которой являются две составляющие: внешняя - естественный радиационный фон, и внутренняя - излучение радионуклидов, оказавшихся в самой конструкции счетчика, а также спонтанная электронная эмиссия его катода. («фон» в дозиметрии имеет почти тот же смысл, что и «шум» в радиоэлектронике; в обоих случаях речь идет о принципиально неустранимых воздействиях на аппаратуру.)

Еще одной важной характеристикой счетчика Гейгера является зависимость его радиационной чувствительности от энергии («жесткости») ионизирующих частиц. На профессиональном жаргоне график этой зависимости называют «ходом с жесткостью». В какой мере эта зависимость важна, показывает график на рисунке. «Ход с жесткостью» будет влиять, очевидно, на точность проводимых измерений.

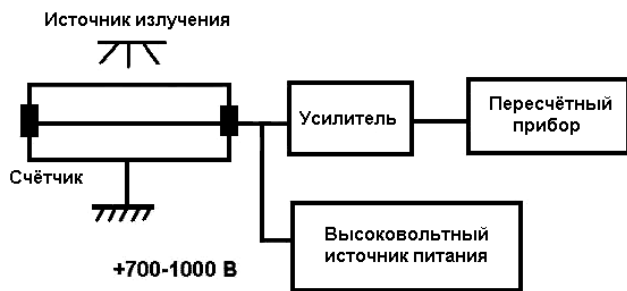
В своей основе счетчик Гейгера очень прост. В хорошо вакуумированный герметичный баллон с двумя электродами введена газовая смесь, состоящая в основном из легко ионизируемых неона и аргона. Баллон может быть стеклянным, металлическим и др. Обычно счетчики воспринимают излучение всей своей поверхностью, но существуют и такие, у которых для этого в баллоне предусмотрено специальное «окно».

Счетчики Гейгера способны реагировать на самые разные виды ионизирующего излучения -  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , ультрафиолетовое, рентгеновское, нейтронное. Но реальная спектральная чувствительность счетчика в значительной мере зависит от его конструкции. Так, входное окно счетчика, чувствительного к  $\alpha$ - и мягкому  $\beta$ -излучению, должно быть очень тонким; для этого обычно используют слюду толщиной 3...10 мкм. Баллон счетчика, реагирующего на жесткое  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучение, имеет обычно форму цилиндра с толщиной стенки 0,05...0,06 мм (он служит и катодом счетчика). Окно рентгеновского счетчика изготавливают из бериллия, а ультрафиолетового - из кварцевого стекла.



**Рис. 24.** Зависимость скорости счета от энергии гамма-квантов («ход с жесткостью») в счетчике Гейгера

В счетчик нейтронов вводят бор, при взаимодействии с которым поток нейтронов преобразуется в легко регистрируемые  $\alpha$ - частицы. Фотонное излучение - ультрафиолетовое, рентгеновское,  $\gamma$ -излучение - счетчики Гейгера воспринимают опосредованно - через фотоэффект, комптон-эффект, эффект рождения пар; в каждом случае происходит преобразование взаимодействующего с веществом катода излучения в поток электронов.



**Рис. 25.** Радиометрическая установка на базе счётчика Гейгера-Мюллера.

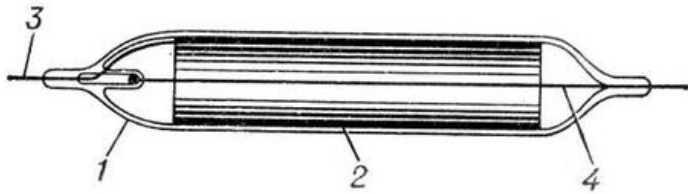
То, что счетчик Гейгера является лавинным прибором, имеет и свои минусы – по реакции такого прибора нельзя судить о первопричине его возбуждения. Выходные импульсы, генерируемые счетчиком Гейгера под действием  $\alpha$ -частиц, электронов,  $\gamma$ -квантов (в счетчике, на все эти виды излучения реагирующем), ничем не различаются. Сами частицы, их энергии совершенно исчезают в порождаемых ими лавинах-близнецах.

О качестве счетчика Гейгера-Мюллера судят обычно по виду его счетной характеристики. Для «хороших» счетчиков протяженность счетной части составляет 100-300 В при наклоне плато не более 3 - 5 % на 100 В. Рабочее напряжение счетчика  $V_{раб}$  выбирают обычно в середине его счетной области.

Поскольку скорость счета частиц на плато изменяется пропорционально интенсивности облучения ядерными частицами, счетчики Гейгера-Мюллера с успехом используются для относительных измерений активности радиоактивных источников. Абсолютные измерения затрудняются вследствие учета большого числа дополнительных поправок. При работе с источниками малой интенсивности следует учесть фон счетчика, обусловленный космическим излучением, радиоактивностью окружающей среды и радиоактивным загрязнением материала счетчика. В качестве наполняющих счетчик газов первоначально чаще всего использовались благородные газы, в частности, аргон и неон. У большинства счетчиков давление лежит в интервале от 7 до 20 см рт.ст, хотя они иногда работают и при больших давлениях, вплоть до 1 атм. В счётчиках такого типа необходимо применять специальные электронные схемы для гашения газового разряда, возникшего при попадании в счетчик ионизирующего излучения. Поэтому такие счетчики называются счетчиками Гейгера-Мюллера несамогасящегося типа. Они обладают весьма плохой разрешающей способностью. Применение схем для принудительного гашения разряда, улучшая

разрешающую способность, существенно усложняет экспериментальную установку, особенно в случае использования большого числа счетчиков одновременно.

Типичный стеклянный счётчик Гейгера-Мюллера представлен на **Рис. 25**.



**Рис. 25.** Стеклянный счётчик Гейгера-Мюллера: 1 – геометрически запаянная стеклянная трубка; 2 – катод (тонкий слой меди на трубке из нержавеющей стали); 3 – вывод катода; 4 – анод (тонкая натянутая нить).

В **Табл. 1** приведены сведения о самогасящихся галогеновых счетчиках Гейгера российского производства, наиболее подходящих для бытовых приборов радиационного контроля.

	1	2	3	4	5	6	7
СБМ19	400	100	2	310*	50	19x195	1
СБМ20	400	100	1	78*	50	11x108	1
СБТ9	380	80	0,17	40*	40	12x74	2
СБТ10А	390	80	2,2	333*	5	(83x67x37)	2
СБТ11	390	80	0,7	50*	10	(55x29x23,5)	3
СИ8Б	390	80	2	350-500	20	82x31	2
СИ14Б	400	200	2	300	30	84x26	2
СИ22Г	390	100	1,3	540*	50	19x220	4
СИ23БГ	400	100	2	200-400*	-	19x195	1

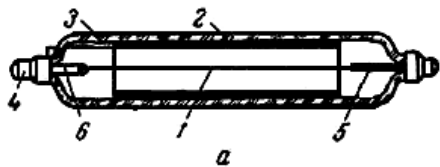
Обозначения: 1 - рабочее напряжение, В; 2 - плато - область малой зависимости скорости счета от напряжения питания, В; 3 - собственный фон счетчика, имп/с, не более; 4 - радиационная чувствительность счетчика, имп/мкР (\* - по кобальту-60); 5 - амплитуда выходного импульса, В, не менее; 6 - габариты, мм - диаметр x длина (длина x ширина x высота); 7.1 - жесткое  $\beta$  - и  $\gamma$  - излучение; 7.2 - то же и мягкое  $\beta$  - излучение; 7.3 - то же и  $\alpha$  - излучение; 7.4 -  $\gamma$  - излучение.



**Рис.26.** Часы со встроенным счётчиком Гейгера-Мюллера.

Счетчик Гейгера-Мюллера, типа СТС-6, считает  $\beta$  и  $\gamma$  частицы и относится к самогасящимся счетчикам. Он представляет собой цилиндр из нержавеющей стали с толщиной стенок 50 мг/(см<sup>2</sup>·с) ребрами жесткости для прочности. Счетчик заполнен смесью паров неона и брома. Бром гасит разряд.

Конструкции счётчиков весьма разнообразны и зависят от вида излучения и его энергии, а также от методики измерения).



Радиометрическая установка на базе счётчика Гейгера - Мюллера представлена на **Рис. 27**. Напряжение на счётчик подаётся с высоковольтного источника питания. Импульсы со счетчика подаются в блок усилителя, где они усиливаются, и затем регистрируются пересчётным устройством.

Счётчики Гейгера-Мюллера применяются для регистрации всех видов излучения. Они могут быть использованы как для абсолютных, так и для относительных измерений радиоактивных излучений.

**Рис. 27.** Конструкция счётчиков Гейгера-Мюллера: а – цилиндрический; б – внутреннего наполнения; г – проточный для жидкостей. 1 – анод (собирающий электрод); 2 – катод; 3 – стеклянный баллон; 4 – выводы электродов; 5 – внутреннее наполнение; 6 – изолятор; 7 – слюдяное окно; 8 – кран для выпуска газа.

