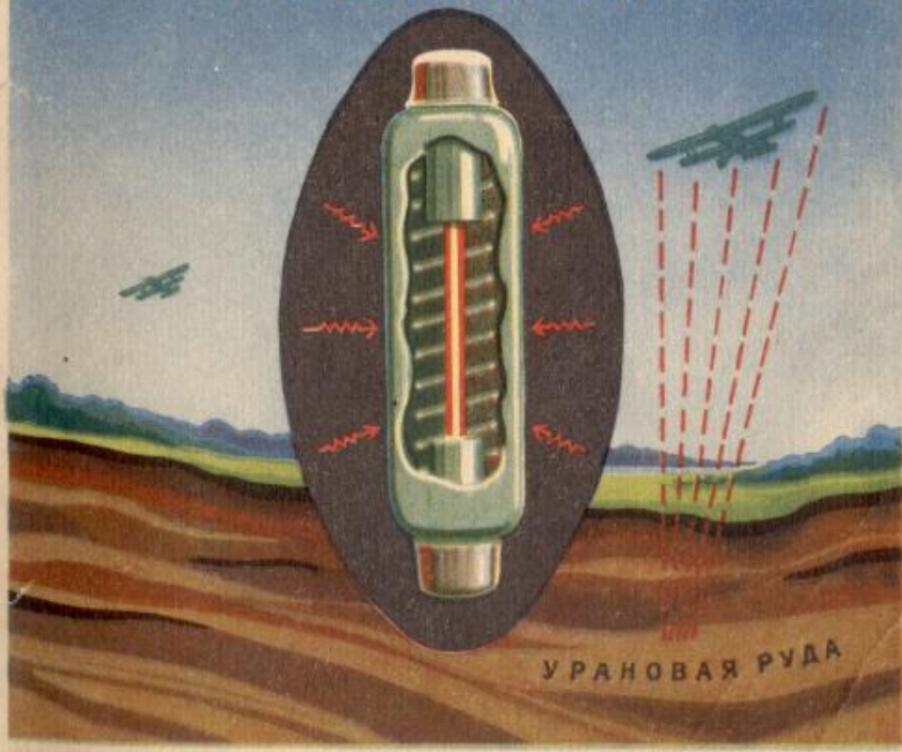


НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ  
БИБЛИОТЕКА



А. В. АЛЕКСАНДРОВ

# Счетчики невидимых частиц и излучений





НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ БИБЛИОТЕКА

А. В. АЛЕКСАНДРОВ

**СЧЕТЧИКИ  
НЕВИДИМЫХ ЧАСТИЦ  
И ИЗЛУЧЕНИЙ**

ПОД РЕДАКЦИЕЙ  
ЧЛЕНА-КОРРЕСПОНДЕНТА АКАДЕМИИ НАУК СССР  
К. В. ЧМУТОВА

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ  
МОСКВА 1958

**16-2-1**



## ВВЕДЕНИЕ

Рано утром, не открывая глаз, вы протягиваете руку к стоящему на тумбочке приемнику, поворачиваете ручку — и вашу комнату заполняют звуки музыки. Откуда они взялись? Это поток радиоволн, излучаемый передающей радиостанцией и принятый антенной вашего радиоприемника. В приемнике они превращались в звуковые волны.

Вы открываете глаза и видите, что ваша комната залита ярким светом солнечного утра. Откуда этот свет? Это мощный поток лучистой энергии — волн той же природы, что и радиоволны, но более коротких, посыпаемых нам Солнцем.

Вы раскрываете окно, смотрите на восход Солнца и любуетесь тем, как меняются цвета от голубых тонов через нежно-розовый до яркого диска Солнца, медленно поднимающегося из-за острых зубцов темно-зеленого леса. Вы наблюдаете лучи видимого света различной длины волны: от коротких — голубых, до красных — длинных.

В воскресное утро вы решили немного позагорать на берегу тихой речки. И вновь к вам приходит лучистая энергия Солнца с еще более короткими волнами — ультрафиолетовым излучением, невидимым для наших глаз.

Вечером вы включаете телевизор и на экране видите знакомое лицо диктора. Это люминофор (светящийся слой) кинескопа возбуждается ударами электронов и излучает видимый свет. Наконец, наступает ночь. И во тьме нагретые за день предметы, земля и здания излучают тепловые лучи с более длинной волной, чем у видимых лучей. Эти лучи называются инфракрасными.

И всюду, где бы ни находился человек, он окружен электромагнитными излучениями, различающимися между собой только длиной волн.

Чем меньше длина волны излучения, тем большей проникающей способностью оно обладает.

В конце прошлого столетия были открыты излучения с очень малыми длинами волн. К ним относятся рентгеновское излучение и излучения радиоактивных веществ: гамма-лучи, быстродвижущиеся альфа-бета-частицы и космические лучи, представляющие собой также быстрые частицы. Человек непрерывно облучается всепроникающим космическим излучением.

Ученые разработали много различных приемников электромагнитных излучений, работающих на принципе использования их различных свойств. Для приема тепловых (инфракрасных) лучей применяются различные термоэлементы: спаи двух разнородных металлов, в которых под действием тепла возникает электродвижущая сила; термо- и фотосопротивления, у которых под действием тепла и видимого света изменяется электрическое сопротивление; фотозлементы — электровакуумные приборы, в которых под действием света протекает электрический ток, и много других.

Излучения со сравнительно малыми длинами волн — ультрафиолетовые, рентгеновские, гамма-лучи и другие — по-разному воздействуют на встречающиеся на их пути тела. Но все они обладают одним свойством — освобождать из твердых, газообразных и жидких тел электроны. Ученые использовали это свойство для обнаружения и изучения невидимых лучей. Для них тоже были изобретены различного вида приемники. Об одном из них мы и расскажем в этой брошюре. Мы расскажем о том, как работает и где применяется газоразрядный счетчик проникающих излучений.

## I. СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА

### Как устроен атом

Чтобы понять работу газоразрядного ионизационного счетчика, необходимо познакомиться со строением вещества.

Всякое вещество, будь то газообразное, жидкое или твердое, состоит из мельчайших материальных частиц —

атомов, долгое время считавшихся неделимыми\*). Размеры и вес атомов чрезвычайно малы. Так, например, атом железа весит 0,000 000 000 000 000 000 093 128 грамма, а его радиус составляет всего лишь 0,000 000 0127 см. Но несмотря на свою ничтожную величину, атом имеет сложное устройство.

По современным представлениям в центре атома расположено атомное ядро. Размер ядра примерно в 100 000 раз меньше размера самого атома, но основной вес последнего сосредоточен именно в этом ядре. Плотность всех ядер приблизительно одинакова и выражается она огромнейшим числом порядка 100 000 000 000 000 г/см<sup>3</sup> (граммов в кубическом сантиметре), т. е. один кубический сантиметр ядерного вещества должен был бы весить около 100 миллионов тонн. Ядро в свою очередь не является элементарной, неделимой частицей, а состоит из электрически незаряженных (нейтральных) частиц — нейтронов — и положительно заряженных частиц — протонов. В целом электрический заряд ядра положителен.

Вокруг ядра на огромных по сравнению с его размерами расстояниях движутся с большими скоростями, около 2000 километров в секунду, материальные частицы — электроны. Масса электрона в 1835 раз меньше массы атома самого легкого химического элемента — водорода. Электроны заряжены отрицательным электричеством. Заряд их равен 0,000 000 000 000 000 000 16 кулона или 0,000 000 000 48 абсолютных электростатических единиц\*\*). Насколько эта величина мала, можно судить по тому, что для создания тока силой в 1 ампер по проводнику должно в каждую секунду протекать 6 250 000 000 000 000 000 электронов.

Число электронов в каждом атоме равно числу положительных зарядов в ядре, то есть числу протонов. Таким образом, атом в целом — электрически нейтральная частица.

Известно, что две частицы, заряженные разноименным электричеством, притягиваются. Тем не менее отрицательные электроны, притягиваемые положительным ядром, не падают на него. Это происходит потому, что, обладая

\* ) «Атомос» — неделимый.

\*\*) Под абсолютной электростатической единицей понимается заряд, который на расстоянии в 1 сантиметр действует на равный ему заряд с силой в 1 дину (приблизительно равной весу 1 миллиграмма).

огромными круговыми скоростями, они стремятся оторваться от ядра и тем самым уравновешивают силу притяжения.

В 1869 году русским ученым Д. И. Менделеевым был открыт один из важнейших законов природы — закон периодичности свойств химических элементов. Вы, вероятно, уже читали, что Менделеев расположил все элементы в таблице в строгом порядке, определяемом их химическими свойствами. Так вот, теперь мы знаем, что число электронов в атоме равно порядковому номеру элемента в этой таблице. Например, на первом месте таблицы расположен химический элемент водород. Это значит, что атом водорода состоит из ядра, вокруг которого движется один электрон. Химический элемент аргон занимает восемнадцатое место, у него 18 электронов; неон имеет порядковый номер 10; значит, атом неона содержит 10 электронов.

Электроны вокруг ядра располагаются слоями, которые называют оболочками. Эти оболочки обозначены буквами латинского алфавита, начиная с буквы *K*, которой обозначена ближайшая к ядру оболочка (рис. 1). За ней идет *L*-оболочка, далее *M*-оболочка и т. д. Каждая оболочка в свою очередь состоит из подоболочек. *K*-оболочка состоит из одной *s*-подоболочки, *L*-оболочка — из двух: *2s* и *2p*-подоболочек; *M*-оболочка — из трех: *3s*, *3p*- и *3d*-подоболочек; *N*-оболочка — из четырех: *4s*, *4p*, *4d*- и *4f*-подоболочек, *O*-оболочка — также из четырех: *5s*, *5p*, *5d*- и *5f*-подоболочек. На каждой оболочке может располагаться строго определенное число электронов. Так, на *K*-оболочке у атома любого элемента может быть расположено не более двух электронов, на *L*-оболочке — не более восьми, на *M*-оболочке — не более восемнадцати и т. д. Внутри оболочек на подоболочках может располагаться также строго определенное число электронов.

Электроны, движущиеся вокруг ядра по орбитам, определяемым соответствующими подоболочками, обладают определенным запасом энергии. Чем ближе к ядру располагается электрон, тем меньше запас его энергии и тем прочнее он связан с ядром; и наоборот, чем дальше от ядра находится электрон, тем больше запас его энергии и тем слабее он удерживается положительным зарядом ядра. Следовательно, каждой оболочке соответствует определенный запас энергии, соответствующий как бы определенному уровню, на котором может находиться электрон в спокой-

ном, т. е. нормальном, состоянии. Поэтому подоболочки принято называть энергетическими уровнями.

Если число электронов в атоме таково, что оно не может образовать законченную наружную оболочку, то атом такого элемента является химически активным, т. е. он может вступать в реакцию с атомами других элементов, имеющих также незаконченную (неукомплектованную) наружную оболочку. Например, водород имеет один электрон,

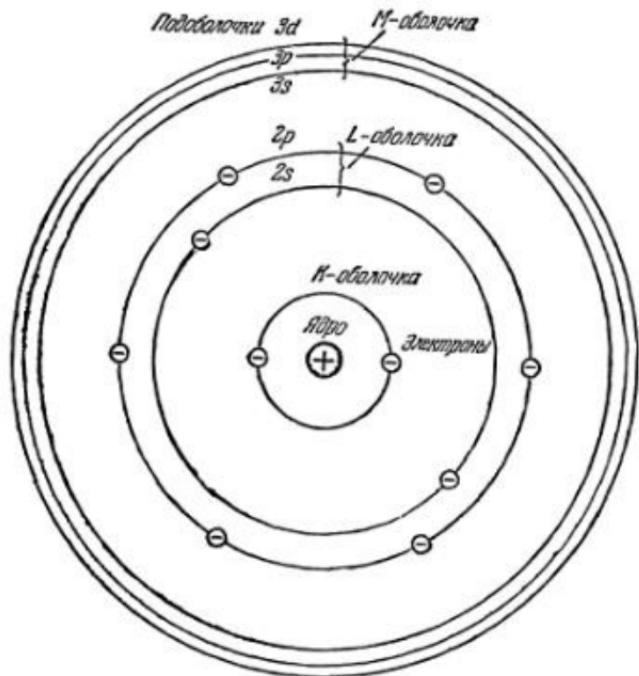


Рис. 1. Схема строения атома.

расположенный на *K*-оболочке. А законченная *K*-оболочка должна содержать два электрона. Поэтому водород может вступать во взаимодействие с другим элементом и образовать устойчивую заполненную двухэлектронную *K*-оболочку.

Атомы, имеющие внешнюю оболочку, полностью укомплектованную полагающимся числом электронов, являются химически нейтральными, или, как их называют, инертными, так как они не могут ни принять электрон, ни от-

дать его другому атому. К таким элементам относятся инертные (или, как их иногда называют, благородные) газы: гелий (порядковый номер 2) с заполненной *K*-оболочкой, неон (порядковый номер 10) с заполненными *K* и *L*-оболочками, аргон (порядковый номер 18), криптон (порядковый номер 36) и т. д. Устойчивыми оболочками являются только те, которые содержат либо два (как у гелия), либо восемь (как у неона, аргона, криптона, ксенона и радона). У всех этих элементов полностью заполнены *s*- и *p*-подоболочки.

Электроны, расположенные на внешней оболочке, принято в химии называть валентными, так как они определяют взаимодействие с другими атомами, а в физике — оптическими. Последний термин станет ясным из дальнейшего изложения.

### Молекулы

В природе химические элементы встречаются как в виде отдельных атомов (чаще всего это атомы инертных газов), так и в виде молекул. Устройство молекул, особенно содержащих большое число атомов, чрезвычайно сложно, и теория строения молекул, несмотря на большие успехи последних двух десятилетий, во многих отношениях еще не закончена. Поэтому ограничимся рассмотрением простейших, а именно двухатомных молекул.

Некоторые элементы в естественных условиях не существуют в виде атомов, а объединяются в прочные двухатомные молекулы и превратить их из молекулярного в атомарное состояние довольно трудно. Примером таких прочных и простейших молекул может служить водород. Прочность молекулы объясняется соответствующим строением электронных оболочек. Силы,держивающие атомы в молекуле, вызваны взаимодействием внешних (валентных) электронов. Электроны внутренних оболочек на молекулярные связи почти не влияют.

В случае двухатомных молекул можно различать два типа связи. Одна из них осуществляется в тех молекулах, в которых часть электронов движется около обоих ядер. Такая связь называется атомарной связью. Как правило, атомарная связь образуется парами электронов и осуществляется в молекуле водорода. Как нам уже известно, у атома водорода на внешней оболочке имеется один электрон. Если два атома водорода сближаются, то оба электрона движутся вокруг обоих же ядер и образуют прочную

молекулу, имеющую как бы общую устойчивую двухэлектронную оболочку. Поэтому разрушить молекулу водорода довольно трудно. Так, при температуре около  $2000^{\circ}$  распадается на атомы всего около 0,088 % водорода, и только при температуре около  $5000^{\circ}$  на атомы распадается примерно 95 % водорода.

Подобным образом обстоит дело и с молекулой хлора. Атом хлора имеет на внешней оболочке 7 электронов. Для образования прочной восьмизаделонной оболочки ему недостает всего одного электрона. При сближении двух атомов хлора по одному электрону от каждого атома (всего два) начинают двигаться одновременно вокруг обоих ядер, образуя общую восьмизаделонную оболочку.

Распад, разложение простой молекулы на отдельные атомы или сложной молекулы на отдельные составляющие молекулярные группы под действием каких-либо сил, носит название *диссоциации*. Энергия, которую необходимо затратить на разложение молекулы, называется энергией связи молекулы или энергией диссоциации. Энергия диссоциации выражается либо в больших калориях, либо в электрон-вольтах.

### Как устроены твердые тела

При изучении процессов, происходящих в ионизационных газоразрядных счетчиках, недостаточно знания строения газов, состоящих из отдельных, свободно движущихся и мало связанных между собой атомов и молекул.

Так как газовая среда, которая используется при работе счетчика, помещается в замкнутый сосуд, необходимо иметь представление о процессах, происходящих на границе двух сред: газ — металл или газ — изолятор (диэлектрик), и следовательно, о том, как устроены твердые тела.

Известно, что все твердые тела по своей внутренней структуре делятся на два класса: кристаллические и некристаллические (аморфные), а по электрическим свойствам — на проводники (металлы) и непроводники (диэлектрики или изоляторы). Кристаллический и аморфный характер вещества зависит как от его собственных свойств, так и от условий, при которых происходит переход тела в твердое состояние. Удавалось получить в кристаллическом состоянии такие типично аморфные вещества, как стекло, каучук, клей и др.

В противоположность свободно перемещающимся частицам газов частицы твердого тела закреплены на местах почти неподвижно и могут совершать только сравнительно незначительные колебательные движения.

Представим себе, что мы сближаем между собой два атома металла, скажем, меди. Атом меди имеет на внешней оболочке один электрон. При сближении у обоих атомов имеются совершенно равные шансы присоединить к себе наружный электрон другого атома. Поэтому при достаточном сближении их наружные электроны, наиболее слабо удерживаемые ядрами, становятся общими для обоих атомов, подобно тому как это было в случае образования молекулы водорода.

А если сблизить между собой не два, а несколько атомов меди, то мы получим гигантскую молекулу, состоящую из атомов, окутанных, как дымом, быстро движущимися электронами. Эти электроны по отдельности не принадлежат ни одному атому, а свободно, беспорядочно движутся между ними, тем самым создавая прочную связь между отдельными атомами. В этом случае каждый атом в отдельности становится положительно заряженным, так как в каждый момент у него не хватает одного отрицательного электрона. Атом, потерявший электрон, называют ионизированным атомом или положительным ионом. Весь же кусок металла является электрически нейтральным, так как число свободнодвижущихся электронов равно числу положительных ионов.

Особенностью структуры металлических элементов является сравнительно слабая связь внешних электронов с ядром. Эта связь тем слабее, чем меньше число электронов в наружном слое. Если в наружном слое имеется один электрон, как например, у меди, хрома, молибдена и др., то он притягивается зарядом иона, равным единице. Сила притяжения в этом случае мала. При наличии двух электронов в наружном слое (железо, никель, вольфрам и др.) положительные ионы имеют двойной заряд; при этом каждый из двух электронов притягивается вдвое сильнее.

Таким образом, картина строения металлов сводится к следующему. Металл состоит из положительно заряженных атомов (ионов), размещенных в строгом порядке в атмосфере отрицательного «электронного газа», который заполняет промежутки между атомами (рис. 2). Между атомами электроны движутся беспорядочно, так же, как

молекулы в газе. В своем беспорядочном движении электроны проникают за пределы наружного слоя положительных ионов, которые не дают им окончательно покинуть металл. Поэтому поверхность металла покрыта тончайшим слоем выступившего отрицательно заряженного «электронного газа». Под этим слоем находится слой положительных ионов, который уравновешивает отрицательный слой.

Оба эти слоя образуют двойной электрический слой, подобно обкладкам конденсатора, заряженным разноименным электричеством. Этот двойной слой является как бы

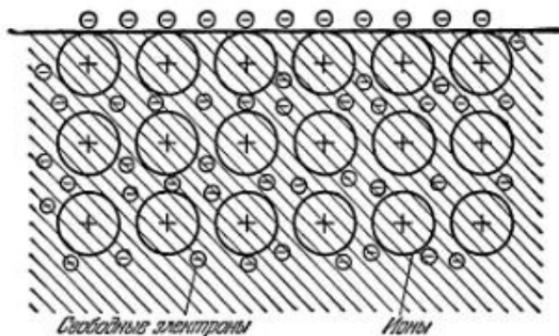


Рис. 2. Схема строения проводника.

преградой, препятствующей выходу электронов из металла, носящей название потенциального барьера. Чтобы электрон смог покинуть металл, необходимо дать ему дополнительную энергию, достаточную для преодоления этого барьера. Работа, которую при этом нужно затратить, называется работой выхода электрона из металла. Величина этой работы обычно выражается в электрон-вольтах и является различной для различных металлов.

Если отрезок металлической проволоки подключить к источнику электрической энергии, который создаст в нем электрическое поле, то свободные электроны приобретут упорядоченное движение в направлении положительного полюса источника энергии, и в проволоке потечет электрический ток. Металлы являются проводниками электричества.

В отличие от рассмотренной нами ионной структуры твердого вещества диэлектрики (изоляторы) строятся по так называемой атомной структуре. Она характерна тем,

что в узлах пространственной решетки располагаются отдельные атомы, а не ионы. В этом случае свободных электронов либо совершенно нет (рис. 3), либо имеется весьма незначительное количество. При наложении на такое

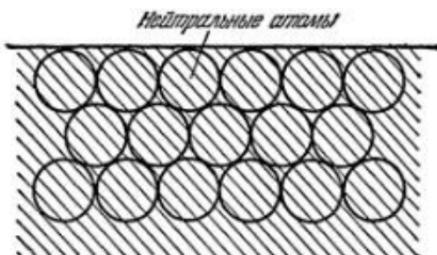


Рис. 3. Схема строения непроводника.

твердое тело электрического поля по нему не потечет электрический ток. Поэтому такие тела называются диэлектриками и применяются в качестве изолятов.

### Как поджигается воздух

Вам приходилось наблюдать ночью грозу, когда молния, с грохотом разрывая облака, ярко освещает голубоватым светом всю окрестность? Что это, воздух вспыхивает так ослепительно ярко? Как он поджигается? Ученые разгадали эту загадку.

В обычных нормальных условиях атомы газа не излучают энергии. Они начинают ее излучать в том случае, когда газ обстреливается потоком быстрых частиц — электронов, альфа-частиц и других, или облучается коротковолновыми лучами — ультрафиолетовыми, рентгеновскими, гамма-лучами, словом тогда, когда атомам газа каким-либо образом сообщается излишок энергии, которую они отдают в виде излучения.

Если атом обладает этой излишней энергией, то про него говорят, что он «воздужден», а самий акт сообщения ему этой излишней энергии называют процессом возбуждения.

На рубеже XX столетия, в 1900 году, немецкий ученый Макс Планк, изучая законы теплового излучения абсолютно черного\*) тела, пришел к выводу, что энергия рас-

\*) Абсолютно черным телом называют такое тело, которое поглощает 100% падающего на него излучения. Близким по свойствам к абсолютно черному телу является, например, сажа, которая поглощает 99% излучения.

пространяется не сплошным, непрерывным потоком, а отдельными мельчайшими порциями. Эти порции энергии он назвал *квантами* («квант» и означает «порция»). Кванты светового излучения называют *фотонами*. Между энергией фотона и длиной волны излучаемого света существует

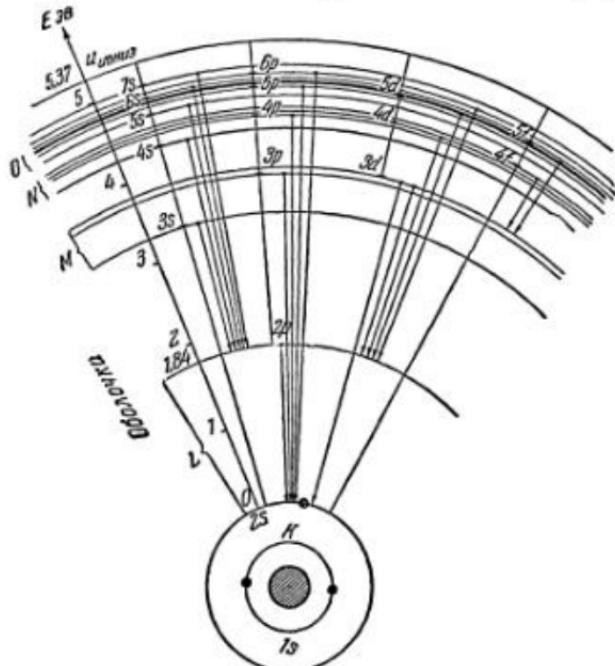


Рис. 4. Энергетические уровни лития.

простое соотношение: чем больше энергия, тем меньше длина волны этого излучения.

Электроны в атоме могут двигаться не по любым орбитам, а лишь по определенным — «дозволенным»\*). При этом если электрон движется по ближайшей к ядру орбите, то он обладает наименьшей энергией, что соответствует наиболее устойчивому состоянию атома. Этот запас энергии принимают за начало отсчета, т. е. за нуль (рис. 4). Если электрону извне сообщается дополнительная энергия,

\* ) Не правда ли, термин «дозволенные» производит странное впечатление? Кто это мог дозволить или запретить? Этот термин введен в науке — квантовой физике — на основании энергетических соображений. Ученые к нему привыкли и он уже не кажется странным. (Прим. ред.)

то он переходит на орбиту, более удаленную от ядра. В этом случае принято говорить, что электрон находится на более высоком энергетическом уровне. Характерно, что электрон может воспринять только такое количество энергии, какое необходимо для того, чтобы он смог попасть на один из «дозволенных» энергетических уровней. При этом энергию принято выражать в электрон-вольтах ( $\text{эв}$ ), то есть в единицах энергии, равных энергии, которую приобретает электрон, ускоренный электрическим полем с разностью потенциалов в один вольт.

Электрон может находиться на высоком уровне весьма короткое время, после чего он самопроизвольно переходит на более низкий энергетический уровень. При этом излишек энергии излучается в пространство в виде фотона света определенной длины волны. Величина энергии фотона, а следовательно, и длина волны света соответствуют разности энергетических уровней. Время, в течение которого электрон находится на более высоком энергетическом уровне, принято называть «временем жизни» атома в возбужденном состоянии. Это время у большинства атомов примерно равно  $0,000\,000\,01$  секунды ( $10^{-8}$  сек.).

«Дозволенных» энергетических уровней у электрона в атоме может существовать большое число.

Рассмотрим для примера процесс свечения возбужденных атомов. Пусть это будут пары лития. Известно, что атом лития имеет два электрона на энергетическом уровне  $1s$  ( $K$ -оболочка) и один электрон на энергетическом уровне  $2s$  ( $M$ -оболочка) (рис. 4). Пусть нам удалось каким-либо способом (например, повышением температуры или электрическим разрядом) сообщить электрону, расположенному на  $2s$ -уровне, энергию порядка  $3,8\text{ эв}$ . В этом случае электрон перейдет на энергетический уровень  $3d$ . Атом лития становится возбужденным с энергией возбуждения  $3,8\text{ эв}$  до уровня  $3d$ . С этого энергетического уровня электрон может вернуться в нормальное состояние (уровень  $2s$ ) двумя путями: либо непосредственно на уровень  $2s$ , либо через промежуточный уровень  $2p$ . При непосредственном переходе на уровень  $2s$  он отдает (излучает) в виде одного фотона всю полученную им энергию ( $3,8\text{ эв}$ ), что соответствует видимому фиолетовому свету с длиной волны, равной  $3195$  ангстрем\*).

\* Ангстрем ( $\text{\AA}$ ) — единица длины, равная  $0,000\,000\,01\text{ см}$  ( $10^{-8}\text{ см}$ ), обычно применяемая для измерения очень малых расстояний.

При переходе с уровня  $3d$  на уровень  $2p$  электрон излучает часть энергии в виде красного света с длиной волны 6105 Å. Так как разность между этими энергетическими уровнями меньше, чем в первом случае, то длина волны света больше. При этом атом еще остается в возбужденном состоянии. При дальнейшем переходе электрона с уровня  $2p$  на уровень  $2s$  «высвечивается» фотон с длиной волны в 6707 Å, что соответствует красному свету. Последний тип перехода (через промежуточный уровень  $2p$ ) наиболее вероятен. Поэтому возбужденные пары лития будут свечься красноватым светом.

Аналогичным образом происходит свечение возбужденных молнией атомов и молекул газов, входящих в состав воздуха, хотя картина возбуждения и свечения значительно сложнее. Поэтому-то прохождение тока при грозовых разрядах сопровождается ярким свечением воздуха.

### Как возбуждается и ионизируется газ

Если внешнему электрону лития сообщить энергию больше 5,37 эв, то он вообще покинет атом, т. е. выйдет из сферы влияния ядра лития. Процесс отрыва внешнего электрона от атома носит название ионизации атома. Энергию, необходимую для совершения отрыва электрона от атома, называют потенциалом ионизации и выражают в электрон-вольтах. Эта энергия различна для различных атомов. Атом, потерявший один электрон (один отрицательный заряд), обладает одним избыточным положительным зарядом и потому называется положительным ионом.

Атомы газа (или пары) возбуждаются или ионизируются при столкновении их с быстролетящими частицами — электронами, ядрами гелия (альфа-частицами), протонами, нейтронами, другими атомами, а также при поглощении ими лучистой энергии — квантов световых, рентгеновских и гамма-лучей.

Возбуждение и ионизация газа под ударами быстролетящих частиц носит название *ударной ионизации*. При прохождении электрона через газ он претерпевает огромное число столкновений с нейтральными атомами. Так как масса электрона значительно (примерно в 2000 раз) меньше массы атома, то при встрече быстролетящего электрона с атомом может произойти упругое столкновение, при котором электрон почти не теряет своей кинетической

энергии и не производит никаких изменений в энергетическом состоянии атома. В самом деле, представьте себе, что упругий теннисный мяч диаметром примерно 5 см, летящий с относительно большой скоростью, попадает в другой движущийся теннисный мяч, но с диаметром в 2000 раз больше первого — примерно 100 м. Очевидно, что последний не испытает заметных изменений в своем движении. Маленький же мяч только изменит направление своего движения, почти не потеряв при этом своей кинетической энергии.

Но может произойти и так, что электрон отдает атому всю или часть своей кинетической энергии. В результате этого атом возбуждается или ионизируется, если отданная электроном энергия больше потенциала ионизации атома. Такой вид соударения называют неупругим столкновением первого рода. Вернемся к тому же сравнению и представим, что на поверхности стометрового теннисного мяча приклеено несколько маленьких пятисанитметровых мячей и что летящий мяч попал в один из них. Так как их массы равны, то под ударом последнего и в зависимости от величины полученной им энергии приклейенный мяч может оторваться от поверхности большого мяча. При этом у большого мяча не хватит одного малого и он станет как бы «ионизированным».

Так как время жизни возбужденного атома хотя и весьма малое, но конечное, то может случиться, что в это время произойдет еще одно неупругое столкновение возбужденного атома с электроном. В результате этого атом получит еще часть энергии и его возбужденный электрон перейдет на более высокий энергетический уровень или совершенно покинет атом. Этот процесс носит название ступенчатого возбуждения.

Описанный механизм ударной ионизации относится к любому виду частиц, будь то электроны, альфа- или другие какие-либо быстро летящие частицы.

Другим процессом возбуждения и ионизации газа, имеющим место в газоразрядных счетчиках, является процесс поглощения атомами газа квантов лучистой энергии. Кванты световых, рентгеновских и гамма-лучей, попадая в атом, передают всю или часть своей энергии атому, возбуждая или ионизируя его\*). При этом, как и в первом случае,

\*) Это явление носит название объемной фотонионизации газа.

атом может воспринять такое количество энергии, какое необходимо электрону, чтобы он мог либо занять дозволенный энергетический уровень, либо оторваться от ядра.

Газы или пары могут поглощать лишь такие кванты энергии видимого света, которые они могут сами испускать. Если энергия кванта превышает потенциал ионизации данного атома, то квант отдает ему часть энергии и сам становится при этом более длинноволновым.

У некоторых газов, в частности у инертных, существует один или несколько таких энергетических уровней, с которых электрон не может самопроизвольно перейти на нижний уровень. Как говорят в физике, переход здесь «запрещен». Эти энергетические уровни называются метастабильными уровнями, само состояние возбужденного атома называется метастабильным состоянием, а такой атом — метастабильным атомом. Из такого состояния в нормальное атом может перейти двумя путями: либо получить дополнительную энергию, дающую возможность электрону занять более высокий энергетический уровень, с которого ему не «запрещено» самопроизвольно переходить на более низкие уровни обычным путем, либо метастабильный атом передает свою энергию путем столкновения с другими атомами и молекулами газа или с металлической стенкой сосуда.

В последнем случае, если величина энергии метастабильного атома превышает работу выхода металла, то атом вырвет из него один электрон. Время жизни метастабильных атомов определяется внешними условиями. Метастабильные атомы играют серьезную роль в работе газоразрядного счетчика.

Возбуждение и ионизация газа могут происходить также и под действием высокой температуры (термическая ионизация и термическое возбуждение). Так как при высокой температуре сильно увеличивается число быстро движущихся частиц газа, то значительная часть столкновений частиц друг с другом могут привести к переходу кинетической энергии движения частиц в энергию их возбуждения или ионизации. Это явление можно легко наблюдать. Если посолить пламя горелки газовой плиты, то оно окрашивается в желтый цвет вследствие того, что под действием высокой температуры возбуждаются пары натрия, излучающие желтую линию спектра.

Наряду с ионизацией постоянно имеет место и обратный процесс — захват электронов положительным ионом. Этот процесс носит название рекомбинации положительного иона и электрона в нейтральную частицу.

### Лучи, рожденные атомом

Мы познакомились с процессом возникновения световых лучей и знаем, что они являются результатом перехода внешнего электрона атома из возбужденного состояния в нормальное. Так как световое излучение может происходить при возбуждении только самых удаленных от ядра электронов, то их называют оптическими электронами.

Что же произойдет с атомом, если в него попадет электрон, обладающий сравнительно большой энергией? В этом случае электрон может проникнуть сквозь толщу электронных оболочек в глубь атома и выбить электрон с одной из глубоко лежащих электронных оболочек. На освободившееся место сразу же перейдет электрон с вышележащей оболочки, излучив при этом высвобождающуюся энергию в виде кванта рентгеновского излучения. Таким образом, рентгеновское излучение является результатом перехода электронов на внутренних оболочках. По мере передвижения в глубь атома длина волны рентгеновского излучения становится короче, или, как говорят, рентгеновские лучи становятся «жестче». Наиболее «жесткие» рентгеновские лучи получаются тогда, когда выбивается электрон из слоя  $K$  и его место занимает электрон из слоя  $L$ , а на место этого переходит электрон из слоя  $M$  и т. д.

Рентгеновские лучи возникают также при резком торможении быстро летящих электронов. Известно, что всякое замедление движения электрического заряда должно сопровождаться излучением электромагнитной энергии. Поэтому при резком торможении электрона он испускает энергию в виде кванта рентгеновского излучения. На этом принципе основано действие рентгеновских трубок, широко используемых в медицине и технике. В рентгеновской трубке поток электронов, испускаемый раскаленной вольфрамовой нитью, ускоряется электрическим полем и резко тормозится на твердой поверхности металлического анодата трубки.

Рентгеновские лучи обладают большой проникающей способностью и являются мощным ионизатором. Ионизация

рентгеновскими лучами происходит за счет энергии кванта рентгеновского излучения.

Этим не исчерпываются безграничные запасы атомных недр. В 1896 году французский ученый Анри Беккерель установил, что химические соединения урана испускают какие-то невидимые лучи, которые обладали интересными свойствами: под действием их воздух становился проводником электричества, закрытая от видимого света фотографическая пленка чернела и некоторые вещества свелись. Два года спустя ученые Пьер Кюри и Мария Кюри-Склодовская, изучая эти лучи, открыли новый элемент — радий, дающий более сильные излучения, чем урановые соединения.

Было установлено, что радий испускает три вида лучей, названных первыми тремя буквами греческого алфавита  $\alpha$  (альфа)-,  $\beta$  (бета)- и  $\gamma$  (гамма)-лучами. Способность вещества испускать лучи подобно радию была названа *радиоактивностью*. Установлено и многочисленными опытами доказано, что радиоактивные излучения испускаются ядрами атомов в момент их самопроизвольного превращения (распада) в ядра атомов других элементов. Изучая природу этих лучей, ученые узнали, что  $\alpha$ -лучи представляют собой ядра атомов гелия, то есть частицы, состоящей из двух нейтронов и двух протонов и несущей на себе две единицы заряда положительного электричества. Другими словами,  $\alpha$ -частица — это двукратно ионизированный атом гелия.  $\alpha$ -частицы выстреливаются ядром радиоактивного атома с огромной энергией, доходящей до 5 миллионов электрон-вольт ( $Mэв$ ) и способны ионизировать газ путем неупругих соударений первого рода.

Второй вид лучей —  $\beta$ -лучи — оказались потоком электронов, обладающих энергиями в сотни тысяч электрон-вольт. Они зарождались также в недрах ядра при превращении нейтронов в протоны. При превращениях же протона в нейtron образуется частица, подобная электрону, но имеющая положительный заряд. Эта частица называется позитроном. Ядерные превращения, происходящие с испусканием  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц, носят название соответственно  $\alpha$ - и  $\beta$ -распада. У многих радиоактивных веществ этот распад сопровождается  $\gamma$ -излучением.

Гамма-лучи имеют ту же природу, что и рентгеновские, но отличаются значительно меньшей длиной волны. Они обладают еще большей проникающей способностью по

сравнению с рентгеновскими лучами. Как и в случае превращений внутри электронной оболочки атома, в результате которых рождаются световые и рентгеновские лучи, так и  $\gamma$ -лучи рождаются при  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадах ядер, когда последние после распада остаются в возбужденных состояниях. При переходе вновь образовавшегося ядра в нормальное состояние излучается  $\gamma$ -квант. Энергии  $\gamma$ -квантов достигают нескольких миллионов электрон-вольт.

Так как все виды излучения, от радиоволн до  $\gamma$ -лучей, являются электромагнитными волнами, их часто располагают в ряд в виде шкалы электромагнитных волн. Электромагнитные волны, как и световые, в пустоте распространяются со скоростью, равной 300 000 километров в секунду.

### Взаимодействие излучений с веществом

Из всех видов излучений нас интересуют те, которые можно обнаружить с помощью газоразрядных ионизационных счетчиков, а также те, которые имеют значение при изучении механизма работы последних.

Как уже указывалось, световое излучение (от инфракрасных до ультрафиолетовых лучей включительно) не обладает способностью проникать через толщи различных тел (за исключением прозрачных). Оно способно возбуждать атомы газа и даже ионизировать пары некоторых веществ, потенциал ионизации которых не превышает энергии самых коротких из них—ультрафиолетовых лучей. При воздействии светового излучения на поверхность металла из нее вылетают электроны. Это явление получило название фотоэффекта. Для получения фотоэффекта величина энергии фотонов, падающих на поверхность металлов, должна быть равна или быть больше величины работы выхода электронов из данного металла. Явление фотоэффекта широко используется в технике при конструировании фотоэлементов и фотоэлектронных умножителей. Световое излучение оказывает химическое действие, что лежит в основе фотографии.

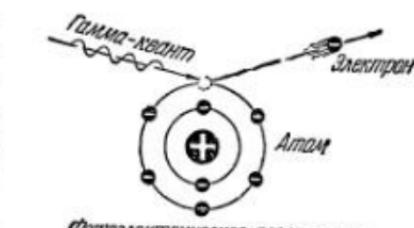
Рентгеновское излучение, как мы уже говорили, обладает значительной способностью проникать в толщу вещества. С уменьшением длины волны эта способность увеличивается. Это же относится и к  $\gamma$ -лучам. Вообще говоря, принципиальная разница между рентгеновскими и  $\gamma$ -лучами заключается только в их происхождении.

Первые рождаются во внешней части атома, в его электронной части, вторые возникают в ядре. По характеру же взаимодействия с веществом разницы между ними нет и отличаются они только длинами волн. Так, рентгеновские лучи занимают по шкале длины волн от  $10^{-6}$  до  $10^{-9}$  см (от 100 до 0,1 Å), что соответствует интервалу энергий квантов от 100 до  $10^5$  эв, а γ-лучи имеют длины волн от  $3 \cdot 10^{-9}$  (0,3 Å) и менее, что соответствует энергии квантов от  $4 \cdot 10^4$  эв и более.

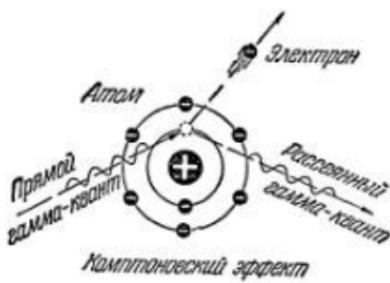
Поэтому все, что мы расскажем о γ-лучах, будет относиться и к рентгеновским лучам.

При прохождении γ-излучения через вещество различают три вида взаимодействия: фотоэлектрическое поглощение, комптоновский эффект и образование пар (рис. 5).

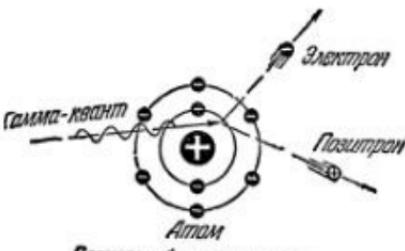
В случае фотоэлектрического поглощения γ-квант полностью поглощается атомом, и при этом выбивает из него электрон. Так как энергия, необходимая для отрыва электрона от атома, исчисляется десятками электрон-вольт, а энергия γ-квантов — миллионами электрон-вольт, то почти вся энергия передается электрону в виде кинетической энергии. За счет этой энергии быстро движущийся электрон производит путем неупругих столкновений первого рода ионизацию большого числа нейтральных частиц газа. Выбитые γ-квантами электроны летят по направлениям, преимущественно перпендикулярным к направлению движения γ-кванта.



Фотоэлектрическое поглощение



Комптоновский эффект



Процесс образования пар

Рис. 5. Виды взаимодействия гамма-квантов с веществом.

При комптоновском эффекте  $\gamma$ -квант отдает атому часть своей энергии, превращаясь таким образом в  $\gamma$ -квант с меньшей энергией, т. е. с большей длиной волны. Следовательно, в этом случае после встречи  $\gamma$ -кванта с атомом появляется электрон, обладающий некоторым запасом энергии, и рассеянный  $\gamma$ -квант. Последний после многократного рассеяния заканчивает свое существование фотоэлектрическим поглощением.

Наконец, при встрече  $\gamma$ -кванта с энергией, превышающей 1 МэВ, с ядром атома происходит образование пары частиц — позитрон — электрон, одинаковых по массе, но с разными знаками зарядов. Однако этот процесс начинает заметно преобладать над первыми двумя лишь при очень больших энергиях  $\gamma$ -квантов. Так, например, для меди при облучении ее  $\gamma$ -квантами с энергией до 150 000 эВ преобладает фотоэлектрическое поглощение; до 5 МэВ комптоновский эффект и выше 5 МэВ — процесс образования пар.

Таким образом, во всех случаях в результате прохождения  $\gamma$ -лучей через вещество появляется электрон.

Бета-частицы могут обладать энергией от 0 до 3 МэВ. В связи с этим и их скорости могут быть в пределах от нуля до скоростей, близких к скорости света. Поток  $\beta$ -частиц, проходя через вещество, ионизирует его атомы. Образовавшиеся при этом электроны могут обладать значительными скоростями и также могут ионизировать атомы вещества. При прохождении через вещество  $\beta$ -частица на своем пути оставляет десятки тысяч пар ионов (ион-электрон, называют парой ионов). По мере прохождения  $\beta$ -частицы через вещество ее скорость все больше падает и, наконец, становится тепловой. В этом случае  $\beta$ -частица может пойти либо на рекомбинацию иона, либо «примкнуть» к нейтральному атому и образовать отрицательный ион. Чем больше начальная энергия  $\beta$ -электрона, тем больший путь он пройдет в веществе. Расстояние, на котором  $\beta$ -частицы полностью поглощаются слоем вещества, называется максимальным пробегом. Величина пробега зависит от плотности вещества и возрастает с увеличением энергии  $\beta$ -частиц. Практически  $\beta$ -частицы полностью поглощаются, например, оконным стеклом, любой металлической пластинкой толщиной в несколько миллиметров. Поэтому характерной особенностью конструкции счетчиков  $\beta$ -частиц является наличие тонкого окна, через которое могли бы пройти  $\beta$ -частицы малых энергий («мягкие»  $\beta$ -лучи).

Энергия  $\alpha$ -частиц, испускаемых некоторыми радиоактивными элементами, изменяется в пределах от 2 до 8 Мэв. При этом частицы обладают значительными скоростями. Так,  $\alpha$ -частица с энергией 5 Мэв имеет начальную скорость примерно 15 000 км/сек. По мере прохождения  $\alpha$ -частицы через вещество ее скорость, так же как и в случае  $\beta$ -частиц, постепенно падает вследствие бесчисленных соударений с атомами вещества и, наконец, становится равной скорости движения атомов среды (тепловой скорости). После этого  $\alpha$ -частицы присоединяют к себе электроны, превращаясь в атомы гелия.

При встрече  $\alpha$ -частиц с атомами вещества наблюдается ионизация последних, причем число пар ионов, образованных на пути пробега  $\alpha$ -частицы, значительно больше, чем в случае  $\beta$ -частиц и составляет 100 000—200 000. Такая большая ионизационная способность  $\alpha$ -частиц приводит к тому, что длина пути их пробега даже в воздухе не превышает нескольких сантиметров. Даже тонкий лист бумаги почти полностью поглощает их. Отсюда понятны конструктивные трудности при изготовлении счетчиков  $\alpha$ -частиц. В самом деле, из чего же сделать окно, не разрушающееся от давления внешнего воздуха и в то же время пропускающее  $\alpha$ -частицы?

## II. МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ НЕВИДИМЫХ ЛУЧЕЙ

### Как можно обнаружить невидимые лучи

Мы знаем, что электромагнитные излучения в широком диапазоне длин волн (от очень длинных — радиоволн — до очень коротких —  $\gamma$ -лучей), за исключением маленького участка от 7400 до 3800 Å, невидимы. Однако мы научились их ощущать, «видеть», как в переносном, так и в прямом смысле этого слова, посредством различных приспособлений, называемых приемниками излучения.

Одним из приемников лучистой энергии, созданным самой природой, является человеческий глаз, который воспринимает маленький участок длин волн видимого света. Все же остальные приемники, сделанные человеком, выполняют роль посредников, которые прямым или косвенным способом сообщают ему о присутствии того или иного излучения.

Известные способы «видеть» невидимые излучения (радиоволны, инфракрасные, рентгеновские, радиоактивные и другие) основываются на использовании различных свойств, проявляемых ими при прохождении через вещество, или при встрече с ним.

Под действием радиоактивных излучений многие среды изменяют свои физические и химические свойства. Эти изменения можно заметить или непосредственно, или с помощью специальных приборов. Так, например, под действием радиоактивных излучений происходит конденсация пересыщенного водяного пара вдоль пути прохождения ионизирующей частицы. Это изменение среды мы можем наблюдать непосредственно глазом или фотографировать. Под действием радиоактивных излучений некоторые кристаллы и растворы веществ меняют окраску, что мы также можем наблюдать визуально. Невидимый электронный луч заставляет светиться экран телевизионной трубки и мы видим на нем изображения предметов.

Под действием радиоактивного излучения происходит «засвечивание» фотопластинки, которая после проявления чернеет. Некоторые вещества начинают светиться после облучения их невидимыми лучами. При облучении радиоактивными излучениями газ становится проводником электричества. Это свойство мы также легко можем заметить. Все эти свойства невидимых лучей дают возможность «видеть» их.

### Туман делает частицу видимой

Вам приходилось наблюдать, как вечером после знойного летнего дня, луга в поймах рек покрывались белой пеленой стелющегося тумана. Наверное, вам доводилось также видеть, когда высоко в голубом безоблачном небе еле заметной сверкающей в лучах Солнца серебряной птицей проносился самолет, оставляя за собой долго сохраняющийся белый след. Это тоже туман. Но как он возник в чистом безоблачном небе?

Известно, что воздух всегда насыщен водяным паром, причем количество его увеличивается с повышением температуры. При охлаждении водяного пара он сгущается (конденсируется) в отдельные мелкие капельки. Но конденсация пара может происходить только на поверхности твердых тел — в воздухе на поверхности твердых частиц-пылинок, которые в нем находятся всегда в достаточном

количество. В совершенно чистом воздухе при охлаждении туман не возникает, а если и возникает, то только в том случае, когда воздух пересыщен водяным паром. При полете с большой скоростью самолет, рассекая воздух, создает разреженное пространство, в котором резко понижается температура воздуха и остается много твердых частиц от сгоревшего в двигателях топлива. На этих частицах моментально конденсируется водяной пар, образуя за самолетом белый шлейф тумана.

Если в закрытом сосуде мгновенно понизить температуру воздуха, насыщенного водяным паром и пропустить через него заряженную частицу (например,  $\alpha$ -частицу), то водяной пар начнет конденсироваться на ионах, создаваемых этой частицей в результате ионизации воздуха. Образуется точно такая же белая полоса тумана, как и за летящим самолетом. Эту белую полосу тумана можно рассмотреть и сфотографировать. Физик Вильсон предложил использовать это явление для обнаружения невидимых заряженных частиц и построил прибор, получивший название камеры Вильсона. В этом приборе охлаждение воздуха достигается быстрым его расширением.

#### Фотографическая пластиинка и растворы веществ рассказывают о невидимых лучах

Как уже говорилось, под действием видимого света некоторые вещества начинают светиться — фосфоресцировать. В 1896 году французский физик Беккерель занимался изучением фосфоресцирующего вещества химического соединения урана — бисульфита урана. Однажды он подготовил соль урана и зарядил кассеты фотопластинками, для того чтобы сфотографировать фосфоресценцию, вызываемую солнечным светом. Но в этот день была пасмурная погода и Солнце показывалось только изредка. Опыты пришлось отложить, а подготовленные пластиинки в закрытых кассетах и соль урана Беккерель положил в ящик стола. В последующие два-три дня Солнце совсем не показывалось. Ученый все же проявил пластиинку, и к своему удивлению заметил почернение ее в тех местах, где поблизости находились кристаллики урановой соли. Так были открыты радиоактивные лучи.

Фотографические пластиинки и пленки нашли широкое применение при измерениях радиоактивных излучений.

Поток  $\gamma$ -лучей, воздействуя на фотоэмulsionю, производит общее почернение фотопленки. Степень почернения зависит от количества упавших на пластинку  $\gamma$ -квантов: чем больше  $\gamma$ -квантов, тем выше плотность почернения.

Эта пропорциональность особенно наглядно подтверждается интересными опытами, поставленными недавно К. В. Чмутовым. Обычный фотографический отпечаток был обработан (вирирован) известным способом раствором урановой соли, так что все металлическое серебро отпечатка было заменено урановыми соединениями. При этом отпечаток приобрел оранжево-коричневый цвет. После высушивания на отпечаток в темноте был наложен лист свежей бромосеребряной бумаги и оба листа лежали под прессом 5—8 месяцев в темноте. На проявленной затем фотографической бумаге было получено зеркально-обращенное нормальное изображение первой фотографии. Это произошло под действием  $\alpha$ -частиц, излучаемых урановыми солями.

Таким образом, с помощью фотографических пленок можно измерять не самое количество радиоактивных частиц, упавших на них, а тот эффект, который они произвели, то есть ту энергию, которую они затратили, чтобы создать ионизацию в фотографической эмульсии пленки. А энергия радиоактивных излучений, поглощенная веществом, называется дозой, которая измеряется в рентгенах. Рентген — это такая доза излучения, при которой в одном кубическом сантиметре сухого воздуха при нормальных условиях образованные ионы одного знака имеют суммарный электрический заряд, равный одной электростатической единице электричества.

Чувствительность фотографического метода измерения доз радиоактивного излучения колеблется в пределах от сотых долей рентгена до нескольких тысяч рентгенов в зависимости от чувствительности фотопленки.

Ученые было открыто и другое явление, которое также нашло применение при измерении доз излучения. Это — химическое действие излучения. В результате ионизирующего действия излучения и последующих химических процессов, некоторые растворы веществ изменяют свой цвет, причем плотность окраски пропорциональна дозе излучения.

Советские ученые Л. В. Мысовский и А. П. Жданов предложили использовать фотографическую пленку для регистрации отдельных заряженных частиц ( $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц).

Этот метод основан на использовании фотографических пластиинок, имеющих толстый светочувствительный слой. В этом случае  $\alpha$ -частица, проходя через зерна бромистого серебра, находящегося в светочувствительном слое, производит их ионизацию. После проявления на фотографической пластиинке остается след. Так как пробег  $\alpha$ -частицы в фотографическом слое незначителен, то след можно увидеть только с помощью микроскопа.

### Видимый свет также может рассказать о невидимых лучах

Вам, наверное, приходилось наблюдать, когда в непролистной тьме июльской ночи вдруг слабой звездочкой вспыхивает голубоватый огонек. Это светится «светлячок». При химической реакции веществ, вырабатываемых организмом светлячка, возникает свет.

Еще в 1612 году знаменитый итальянский ученый Галилей показывал так называемый «болонский камень», обладавший интересным свойством. Найденный в окрестностях Болоньи тяжелый шпат (минерал, содержащий сульфат кальция и бария) после прокаливания с угольным порошком и пребывания на дневном свetu сам светился в темноте.

Спустя несколько десятков лет (в 1669 году) способность светиться открыли и у химического элемента фосфора. Благодаря этому свойству этот элемент и получил свое название фосфор, что означает «светоносный». Внешнее сходство явлений свечения светлячка, «болонского камня» и фосфора дало повод все вещества, которые могли самоизвестно светиться, назвать фосфорами, а их свечение — люминесценцией.

В начале XX века было установлено, что под действием радиоактивных излучений сернистый цинк, иодистый натрий, кристаллы нафталина, антрацена и многие другие как твердые, так и жидкые вещества также начинают светиться.

При прохождении  $\alpha$ -,  $\beta$ -частиц или  $\gamma$ -квантов электроны в молекулах этих веществ возбуждаются или ионизируются и при переходе в нормальное состояние испускают квант света, то есть дают вспышку света, названную *цинтилляцией*. Чем больше ионизирующая способность частицы, тем больше ионов она создает на своем пути и тем ярче получится вспышка света. Если сосчитать число вспышек,

то будет известно число частиц, прошедших через люминесцирующее вещество.

Альфа-частица обладает большой ионизирующей способностью, и вспышки света, получаемые при ее прохождении, настолько интенсивны, что их можно наблюдать непосредственно глазом.

На этом принципе Круксом был построен прибор, получивший название спинтаскопа (рис. 6). Над пластинкой, покрытой сернистым цинком, помещается игла, на острие которой находится  $\alpha$ -активное вещество. Если посмотреть через линзу в прибор, то можно заметить, как на пластинке с сернистым цинком возникают и моментально гаснут зеленовато-желтые огоньки.

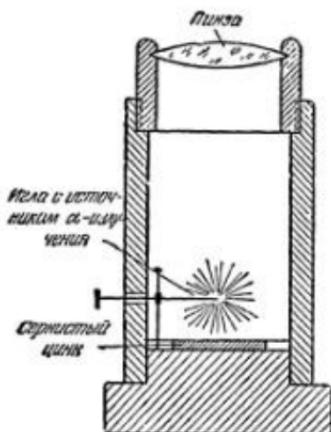


Рис. 6. Устройство спинтаскопа.

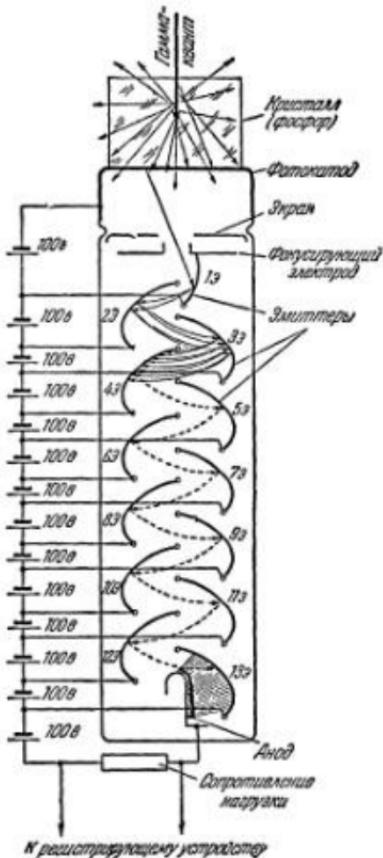


Рис. 7. Схема сцинтилляционного счетчика.

Каждая отдельная вспышка появляется при ударе  $\alpha$ -частицы о пластинку.

Подсчитывая число таких вспышек за определенный промежуток времени, можно определить число излуча-

мых  $\alpha$ -частиц, то есть узнать активность вещества. Однако с помощью спиртоскопа можно подсчитать очень небольшое число  $\alpha$ -частиц, так как при большом числе вспышек глаз перестает различать отдельные вспышки — они сливаются в сплошное свечение. Это явление можно наблюдать и без спиртоскопа, если в темноте посмотреть через сильную лупу на самосветящийся циферблат часов. Цифры циферблата покрыты люминофором с примесью радиоактивного вещества,  $\alpha$ -излучение которого непрерывно возбуждает люминофор и заставляет его светиться. Число отдельных вспышек очень велико, и поэтому в лупу видно только сплошное переливающееся мерцание.

В настоящее время сцинтилляции, возникающие в люминесцирующем веществе, подсчитываются не глазом, а высокочувствительным прибором, называемым фотоэлектронным умножителем, изобретенным советским инженером Л. А. Кубецким. С помощью фотоэлектронного умножителя можно регистрировать вспышки, вызванные не только  $\alpha$ -частицами, но и  $\gamma$ -квантами. Сочетание кристалла фосфора с фотоумножителем получило название сцинтилляционного счетчика. Схема такого счетчика изображена на рисунке 7.

Фотоэлектронный умножитель представляет собой запаянную с обоих концов стеклянную цилиндрическую колбу с плоской торцевой частью, на которую испарением в вакууме нанесена тонкая полупрозрачная пленка, состоящая из смеси двух металлов — сурьмы и цезия. Этот слой, называемый фотокатодом, обладает весьма малой работой выхода электронов, и поэтому упавший на фотокатод квант света легко выбивает из него фотоэлектрон.

С помощью фокусирующего устройства этот электрон, приобретая определенную скорость под действием электрического поля, попадает во внутреннюю часть фотоэлектронного умножителя, где в определенном порядке расположено несколько металлических электродов, также обладающих малой работой выхода. Эти электроды называются эмиттерами, так как они эмиттируют (испускают) электроны.

Таким образом, первичный фотоэлектрон, попадая на первый эмиттер  $I_a$ , выбивает из него несколько вторичных электронов. Между двумя соседними эмиттерами приложены разность потенциалов в 100 в, которая создает в пространстве между ними электрическое поле определенной конфигурации.

Под действием этого поля все электроны, вышедшие из первого эмиттера, ускоряются и направляются на эмиттер 2<sub>9</sub>, из которого каждый из них выбрасывает два или несколько вторичных электронов. Эти последние электроны также направляются на эмиттер 3<sub>9</sub>, соответственно увеличивая количество электронов. Таким образом, один фотоэлектрон, рожденный квантом света, вышедшим из кристалла фосфора, в приборе умножается в несколько миллионов раз. Образующийся поток электронов собирается на аноде и стекает во внешнюю цепь через нагрузочное сопротивление, на котором он создает кратковременный импульс напряжения. Последний может быть сравнительно просто измерен. Таким образом, на прохождение ионизирующей частицы через кристалл сцинтилляционного счетчика указывает кратковременный импульс напряжения на сопротивлении нагрузки.

Очевидно, чем большей ионизирующей способностью обладает радиоактивная частица, тем большее число квантов света она создает в кристалле. Большее число световых вспышек создает большее число первичных фотоэлектронов и соответственно большее число их будет на аноде. Поэтому величина импульса на выходе счетчика пропорциональна ионизирующей способности радиоактивных частиц.

Последнее обстоятельство позволяет применять сцинтилляционные счетчики не только для подсчета числа частиц, но и для измерения ионизирующего действия радиоактивных излучений.

### Газоразрядный промежуток — индикатор невидимых лучей

Вы, наверное, не раз любовались вечером красивым зреющим большого города, особенно в часы после дождя, когда тысячи разноцветных огней отражаются, как в реке, в асфальтовой глади улиц. В разных местах вспыхивают зеленые, голубые, розовые, желтые и ярко-красные буквы реклам, вывесок магазинов, кафе и кинотеатров... Разноцветный свет реклам, дневной свет в метро, в цехах фабрик и заводов дают газоразрядные трубки-лампы.

Что такое газовый разряд?

Известно, что одним из лучших изоляторов (непроводников) электричества является сухой воздух. Мы уже знаем, что для того чтобы вещество могло проводить электрический ток, оно должно иметь так называемые носители

тока: либо свободные электроны (как у металлических проводников), либо ионы (как в жидких проводниках). А сухой газ состоит из нейтральных атомов, в нем нет носителей тока, а потому он и не проводит электричества. Носители тока в газе могут возникнуть только в результате воздействия на газ какого-либо внешнего ионизатора. Такими ионизаторами могут быть радиоактивное, рентгеновское и ультрафиолетовое излучения. Газ становится проводящим также и под действием высокой температуры. Явления, происходящие в газе во время и после прохождения через него электрического тока, называются электрическим разрядом в газе.

Прохождение электрического тока через газы сопровождается рядом особенностей, резко отличающих токи через газ от прохождения их по твердым или жидким проводникам. К этим особенностям можно отнести разнообразные виды свечения газа в разряде — от слабого, еле заметного сияния до ослепительно яркого света электрической дуги и молнии и звуковые эффекты, сопровождающие разряд, от шипения «короны», треска искр до грандиозных раскатов грома. Наконец, при пропускании через газовый промежуток токов в миллионы ампер может возникать термоядерная реакция, при которой происходит разрушение некоторых химических элементов, сопровождаемое образованием новых элементов.

Способность газов становиться проводниками электрического тока при воздействии на них радиоактивных излучений была использована для обнаружения последних. Представим себе устройство из двух изолированных друг от друга металлических пластин — электродов, к которым приложено постоянное напряжение. При отсутствии радиоактивного излучения газ между пластинами надежно изолирует их друг от друга и стрелка гальванометра, включенного во внешнюю цепь, не отклоняется.

В результате прохождения радиоактивного излучения через газовый промежуток в нем образуются положительные ионы и отрицательные электроны, которые под действием приложенного напряжения двигаются к электродам: положительные ионы в направлении отрицательно заряженного электрода — катода, а электроны — к положительно заряженному электроду — аноду. Во внешней цепи потечет электрический ток, и стрелка гальванометра отклонится. Таким образом, по отклонению стрелки мы можем судить

о наличии радиоактивного излучения. Приборы, работающие на этом принципе, получили название ионизационных камер и газоразрядных счетчиков.

### Как работает ионизационная камера

В простейшем случае ионизационная камера представляет собой устройство из двух металлических пластин, изолированных одна от другой и разделенных газовым промежутком. Любой воздушный конденсатор может выполнять роль ионизационной камеры. Пространство между пластинами называют рабочим объемом камеры. Если на пластины подать постоянное напряжение, то в пространстве между ними образуется электрическое поле, силовые линии которого направлены от положительной пластины к отрицательной. На электрически заряженную частицу, помещенную в электрическое поле, будут действовать силы, под действием которых она будет двигаться по пути, совпадающему с направлением силовых линий. Направление движения положительно заряженных частиц совпадает с направлением силовых линий поля. Отрицательные частицы движутся в противоположном направлении, то есть навстречу силовым линиям поля.

Рассмотрим процессы, происходящие в рабочем объеме ионизационной камеры. При отсутствии напряжения на электродах камеры ионы и электроны, образованные в рабочем объеме в результате действия радиоактивного излучения, движутся беспорядочно вместе с нейтральными атомами, часть из них рекомбинируется, не достигая электродов, часть случайно попадает на электроды. Если теперь на электроды подать постоянное небольшое напряжение, то под действием электрического поля ионы и электроны приобретают направленное движение, соответствующее линиям поля (рис. 8). При этом электроны движутся к положительному заряженной пластине — аноду, а положительные ионы — к отрицательно заряженной пластине — катоду. Скорость движения тяжелых положительных ионов в тысячи и десятки тысяч раз меньше скорости движения легких электронов.

При малом напряжении на электродах поле между ними слабое и частицы движутся медленно. Поэтому большинство из них, не доходя до электродов, рекомбинирует, т. е. пре-

вращается в нейтральные частицы газа. Вследствие этого во внешней цепи ток будет очень малым.

Сила ионизационного тока равна общему суммарному электрическому заряду, принесенному заряженными частицами к поверхности электрода в течение одной секунды. Чем больше ионов собирается у электродов, тем больше сила тока. Этот ток регистрируется с помощью какого-либо электроизмерительного прибора, включенного в цепь камеры.

С увеличением приложенного к пластинам напряжения увеличивается сила электрического поля и все большее

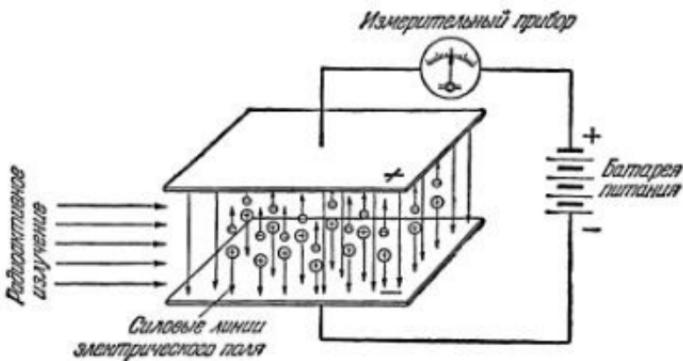


Рис. 8. Принцип действия ионизационной камеры.

число заряженных частиц, не успевая рекомбинировать, попадает на электроды. Сила тока во внешней цепи увеличивается (рис. 9, участок от  $O$  до  $A$ ).

Наконец, при некотором напряжении  $U$  сила электрического поля возрастает настолько, что все заряженные частицы, образованные внешним ионизатором в рабочем объеме камеры, будут попадать на электроды. В этом случае сила тока во внешней цепи определяется только ионизационной способностью данного радиоактивного излучения. Если ионизационная способность радиоактивного излучения не меняется, то и ток в цепи камеры течет неизменный (участок кривой  $AB$ ). Такой ток называют током насыщения камеры.

При дальнейшем увеличении напряжения за точку  $U_2$ , ток, протекающий в цепи камеры, начинает вновь возрастать сначала медленно, затем все быстрее и быстрее (участок кривой выше точки  $B$ ). Это объясняется тем, что при

Напряжении выше точки  $U_1$  сила электрического поля внутри камеры возрастает настолько, что электроны под действием его приобретают скорости, достаточные для ионизации атомов нейтрального газа при их встрече. Поэтому сила тока во внешней цепи определяется общим числом зарядов, образованных под действием внешнего ионизатора и под действием ионизации ударами электронов внутри рабочего объема камеры.

Кривая зависимости ионизационного тока камеры от величины приложенного напряжения носит название вольтамперной характеристики. На участке характеристики

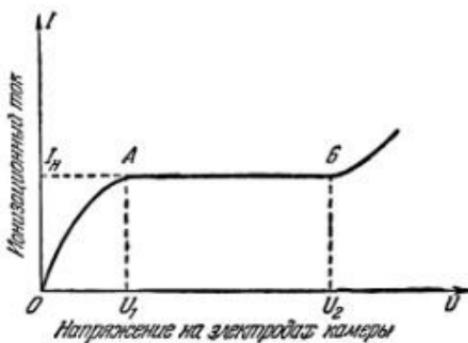


Рис. 9. Вольтамперная характеристика ионизационной камеры.

от  $O$  до  $B$  в газоразрядном промежутке происходит так называемый тихий разряд.

Ионизационные камеры работают, как правило, в области тока насыщения. Так как величина этого тока пропорциональна числу образующихся ионов, она может служить мерой ионизационной способности радиоактивного излучения.

В зависимости от применения ионизационные камеры бывают двух типов. Камеры, используемые для измерения суммарной ионизации, вызванной прохождением через ее рабочий объем значительного количества ионизирующих частиц, называют интегрирующими ионизационными камерами. В такой камере, если она работает в области насыщения, спустя очень небольшой промежуток времени после начала действия излучения, наступает равновесие между числом пар ионов, возникающих в камере за единицу времени, и числом пар ионов, уходящих на электроды за то

же время. Величина тока насыщения равна произведению числа пар ионов, возникающих за секунду в одном кубическом сантиметре камеры, на ее рабочий объем и на заряд каждого иона. Поэтому величина тока насыщения может служить мерой мощности дозы излучения. Последняя пропорциональна числу пар ионов, образующихся в одном кубическом сантиметре в единицу времени.

Вторым типом являются счетно-ионизационные камеры, которые служат для регистрации и определения ионизационной способности одной какой-либо ионизирующей частицы (например,  $\alpha$ -частицы), попавшей в рабочий объем камеры.

### От ионизационной камеры до счетчика Гейгера — Мюллера

Рассмотрим устройство, представленное на рисунке 10, состоящее из металлического цилиндра, по оси которого

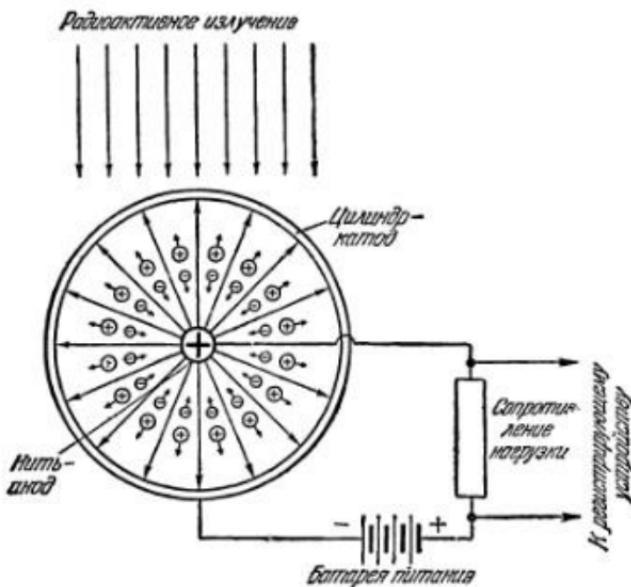


Рис. 10. Схема включения и работы ионизационного счетчика.

на изоляторах натянута проволока — нить. Такое устройство мы будем называть газоразрядным счетчиком. На рисунке показан поперечный разрез счетчика. Цилиндр соединим с отрицательным полюсом батареи и поэтому

назовем его катодом; нить через сопротивление нагрузки — с положительным полюсом и будем называть ее анодом.

Если через рабочий объем счетчика пройдет ионизирующую-щая частица, то на пути ее движения возникнут положительные ионы и электроны\*), которые под действием электрического поля перейдут на электроды: электроны на нить, ионы на цилиндр. Во внешней цепи пройдет импульс тока, который образует импульс падения напряжения на нагрузочном сопротивлении. Этот импульс напряжения можно зафиксировать с помощью регистрирующего устройства.

Рассмотрим, как будет изменяться количество электричества в импульсе тока в зависимости от величины приложенного к счетчику напряжения. Вначале, при очень малых напряжениях, так же как и в ионизационной камере, количество электричества в импульсе будет соответствовать неполному числу электронов, дошедших до нити, так как часть из них вследствие слабости электрического поля по пути успеет рекомбинировать. Поэтому с ростом напряжения на счетчике растет и количество электричества в импульсе. При некотором напряжении все электроны, образовавшиеся в процессе ионизации радиоактивной частицей, будут попадать на нить, и количество электричества в импульсе не возрастает. Наступает ток насыщения. Этому соответствует горизонтальный участок кривой I на рис. 11.

Количество электричества в импульсе на этом участке определяется только ионизационной способностью первичного ионизатора. Чем больше эта способность, тем большее количества электричества в импульсе. Так,  $\alpha$ -частице, обладающей наибольшей ионизационной способностью, соответствует верхняя кривая. Область напряжения от 0 до  $U_1$ , участок I, называют областью ионизационной камеры, так как на этом участке счетчик работает как ионизационная камера, т. е. величина собранного на электродах заряда равна суммарному заряду электронов, образованных в процессе ионизации.

Когда напряжение на счетчике превышает некоторую величину  $U_1$ , при которой напряженность (сила) электрического поля возрастает настолько, что электроны приобретают скорость, достаточную для производства ударной ионизации, количество электричества в импульсе возрастает за счет дополнительной ионизации газа соударющими-

\* ) Положительный ион и электрон называют парой ионов.

ся электронами. При медленном увеличении напряжения этот процесс ударной ионизации сначала происходит только около нити, где напряженность поля наибольшая. Нам известно, что ионизация атома электроном может произойти только в том случае, когда энергия электрона будет равна или больше потенциала ионизации газа, в котором он движется. При каждой встрече с нейтральным атомом электрон теряет большую часть своей кинетической энергии.

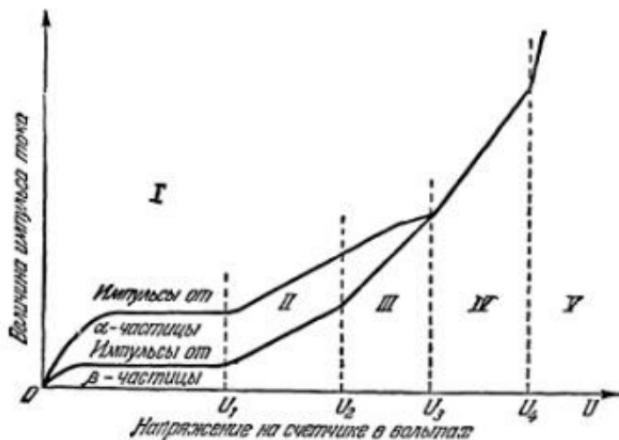


Рис. 11. Зависимость величины собранного на электроде заряда от напряжения на газоразрядном промежутке для больших и малых начальных ионизаций:

I—область ионизационной камеры; II—область пропорционального усиления; III—область ограниченной пропорциональности; IV—область самостоятельного разряда или область Гейгера; V—область непрерывного разряда.

Если напряженность электрического поля будет такой, при которой электрон до следующего столкновения успеет набрать энергию, равную потенциальному ионизации газа, то при столкновении произойдет акт ионизации, то есть из электронной оболочки атома освободится электрон. Этот «вторичный» электрон вместе с «первичным» вновь разгоняются полем и при следующих соударениях каждый из них вновь ионизирует атомы, создавая новые «вторичные» электроны.

Количество их быстро нарастает, наподобие грозных снежных лавин, скатывающихся по крутым склонам гор. Этот процесс поэтому и называют процессом образования электронных лавин. В результате этого процесса с увеличением напряжения количество электричества в импульсе быстро нарастает (участок II на рис. 11).

При своем движении к нити электрон, образованный внешним ионизатором, рождает на своем пути большое число новых ионов и электронов. Очевидно, количество электричества в импульсе на участке напряжений  $II$  будет во столько раз больше количества электричества в импульсе на участке  $I$ , во сколько раз «размножится» первичный электрон. Электрический ток в счетчике как бы умножается, усиливается, так же как в фотоэлектронном умножителе.

Усиление достигает десятков тысяч раз. Число, в которое увеличивается количество протекающего через счетчик электричества по сравнению с участком напряжений  $I$ , принято называть коэффициентом газового усиления. Величина коэффициента газового усиления может изменяться в пределах от единицы, в случае когда счетчик работает в режиме ионизационной камеры (участок кривой  $I$ ), и приблизительно до нескольких тысяч в конце участка  $II$ . На этом участке величина коэффициента газового усиления не зависит от числа первичных электронов. Независимо от того, создан ли первичный импульс от  $\gamma$ -кванта,  $\beta$ -частицы или  $\alpha$ -частицы, он усиливается в постоянное число раз.

Поэтому здесь, так же как и в камере, величина импульса будет пропорциональна ионизирующей способности радиоактивного излучения, вследствие чего эту область называют областью пропорционального усиления. А счетчик, работающий в этой области, называют пропорциональным счетчиком. Пропорциональные счетчики характеризуются не только тем, что величина коэффициента газового усиления в них не зависит от первоначального числа пар, созданных внешним ионизатором, а также и тем, что разряд в них прекращается сразу же после прекращения внешней ионизации. Такой вид разряда называется несамостоятельным разрядом. С увеличением напряжения коэффициент газового усиления возрастает.

При дальнейшем увеличении напряжения выше  $U_2$  коэффициент усиления начинает зависеть от величины начальной ионизации. Для импульсов, получающихся в результате прохождения частиц с большой ионизирующей способностью, коэффициент усиления меньше, чем для импульсов от частиц с малой ионизирующей способностью. Поэтому область напряжений от  $U_2$  до  $U_3$  называют областью ограниченной пропорциональности.

Если продолжать увеличивать напряжение на счетчике, то величина количества электричества в импульсе уже не зависит от величины начальной ионизации. В этом случае счетчик вступает в режим самостоятельного разряда, т. е. такого разряда, при котором, если не принять специальных мер, возникающий разряд не прекращается после удаления внешнего ионизатора, т. е. разряд сам себя поддерживает. Область напряжений от  $U_3$  до  $U_4$  получила название области Гейгера, а счетчики, работающие в этом режиме,— счетчиков Гейгера — Мюллера, или газоразрядных счетчиков.

У этих счетчиков величина импульса напряжения на нагруженном сопротивлении не зависит от первоначальной ионизации. Вследствие этого такие счетчики не могут служить непосредственно для измерения ионизирующего действия излучения. Но эти счетчики обладают огромной чувствительностью: достаточно в счетчике появиться хотя бы одному электрону, как в нем рождается электронная лавина и во внешней цепи пройдет импульс тока.

Если напряжение на счетчике поднять выше точки  $U_4$ , счетчик вступает в область непрерывного разряда и становится непригодным для регистрации ионизирующих частиц.

Таким образом, в зависимости от приложенного напряжения счетчик может работать как ионизационная камера, как пропорциональный счетчик и как газоразрядный счетчик Гейгера — Мюллера. Однако на практике они представляют собой три типа различных приборов с различными конструкциями и в зависимости от назначения применяют тот или иной прибор.

В дальнейшем мы остановимся на рассмотрении только счетчиков с самостоятельным разрядом — газоразрядных счетчиков.

### III. ИОНИЗАЦИОННЫЕ ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ СЧЕТЧИКИ

#### А) ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ САМОГАСЯЩИЕСЯ СЧЕТЧИКИ

От счетчика Резерфорда и Гейгера до галогенных счетчиков

Впервые газовый разряд для обнаружения отдельных радиоактивных частиц был применен в 1908 году Резерфордом и Гейгером. Их прибор состоял из металлического цилиндра, по оси которого на изолирующих пробках, за-

крышающих цилиндр с обоих концов, натягивалась тонкая проволока-нить. Между цилиндром и нитью прикладывалась разность потенциалов около 1300 в. Трубка наполнялась окисью углерода или воздухом до давления в несколько десятков миллиметров ртутного столба\*). Для счета  $\alpha$ -частиц последние впускались в трубку через очень тонкое слюдяное окно или через кран с большим отверстием, соединенный с объемом, в котором был помещен образец радиоактивного вещества.

Этот прибор был первым ионизационным газовым счетчиком, причем пропорциональным счетчиком. Величина импульса тока в таком счетчике зависела от места и угла попадания  $\alpha$ -частиц в счетчик. Для того чтобы свести на нет зависимость величины импульса тока от места попадания частицы в счетчик, Резерфорд и Гейгер изменили конструкцию счетчика, сделав его в виде полусферы, в центре которой вместо нити помещался маленький шарик. Счетчик наполнялся гелием до давления 300 мм рт. ст. С помощью этого счетчика можно было подсчитать только  $\alpha$ -частицы, так как ионизация, вызванная  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучением была очень незначительна, несмотря на газовое усиление: В то время не было таких усилительных радиотехнических схем, которые имеются сейчас, а поэтому измерить очень слабые токи не представлялось возможным.

В 1913 году Гейгер предложил увеличить прикладываемое напряжение и изменить форму электродов, сделав ее такой, при которой напряженность электрического поля увеличивалась. Счетчик наполнялся воздухом до атмосферного (нормального) давления, а напряжение было увеличено до 1800 в. В результате этого в счетчике возникал самостоятельный разряд. Таким счетчиком уже можно было обнаруживать  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения, но нельзя было отличать один вид излучения от другого, потому что величина импульса тока определялась свойствами самостоятельного разряда, а не природой ионизирующих частиц.

В 1928 году Гейгер и Мюллер вновь возвратились к цилиндрической конструкции счетчика с воздушным наполнением при давлении 50 мм рт. ст. с напряжением на счетчике, достаточным для возникновения самостоятельного разряда.

---

\* ) Нормальное атмосферное давление, как известно, равно 760 мм рт. ст.

Для того чтобы можно было подсчитать отдельные радиоактивные частицы, необходимо, чтобы после прохождения частицы через счетчик возникающий в нем самостоятельный разряд быстро угасал с тем, чтобы счетчик был вновь подготовлен к приему очередной частицы.

В разработанном Гейгером и Мюллером счетчике гашение разряда происходило за счет включения в цепь последовательно со счетчиком большого нагруженного сопротивления. Проходящий через это сопротивление импульс тока вызывал на нем падение напряжения. Это приводило к уменьшению напряжения на счетчике и разряд в нем прекращался.

В 1937 году Трост обнаружил, что если счетчик наполнить смесью инертного газа с парами спирта, то даже при малом сопротивлении нагрузки в цепи счетчика возникающий разряд быстро прекращается. Такие счетчики были названы самогасящимися в отличие от счетчиков, где гашение производилось большим сопротивлением. Счетчики, наполненные такой смесью, получили быстрое распространение ввиду простоты их изготовления.

В том же 1937 году Гейгер и Гахель сообщили, что к инертному газу в счетчике можно прибавлять не только многоатомные газы и пары (спирт, метан, бутан и др.), но и галогены — элементы седьмой группы таблицы Менделеева (хлор, бром). В этом случае счетчики также становятся самогасящимися, и притом приобретают ряд преимуществ по сравнению со спиртовыми счетчиками. Однако в виду того, что галогены являются химически активными газами, развитие и распространение галогенных счетчиков шло значительно медленнее спиртовых. И только в послевоенные годы они начали широко применяться и выделились в самостоятельный вид счетчиков под названием низковольтных галогенных счетчиков Гейгера — Мюллера.

Советские ученые и исследователи сделали серьезный вклад в дело развития теории работы ионизационных газовых счетчиков, создали оригинальные конструкции счетчиков для различных целей, а промышленность успешно освоила их выпуск. В настоящее время наша промышленность выпускает много газоразрядных счетчиков различного назначения: для измерения  $\gamma$ -излучения ( $\gamma$ -счетчики), как спиртовые, так и галогенные для измерения космических лучей, для  $\beta$ -частиц, для  $\alpha$ -излучения, счетчики фотонов и др.

## Как изготавливается спиртовый гамма-счетчик

На рисунке 12 показано устройство одного из спиртовых счетчиков типа АММ, выпускаемых советской промышленностью. Счетчик представляет собой стеклянный баллон, на внутренние стенки которого на лаке нанесен катод из медного порошка. От катода через стекло сделан вывод наружу. По центру баллона на пружине натянута вольфрамовая нить, диаметром 0,1 мм, конец которой также выведен наружу. Нить с обоих концов проходит через стеклянные охранные «соломки», о назначении которых мы расскажем позднее. Выводы от катода и нити припаиваются

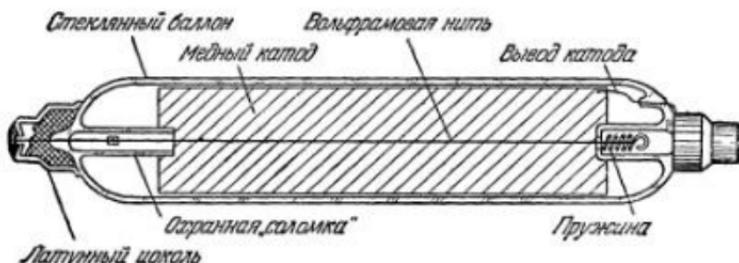


Рис. 12. Устройство спиртового счетчика.

к металлическим цоколям, приклеенным к корпусу счетчика на цокольной мастике.

Счетчики этого типа наполнялись газовой смесью, состоящей из 85% инертного газа аргона и 15% метилала (метилового спирта). Отсюда и марка счетчика АММ (аргоно-метилалевый с медным катодом).

Несмотря на кажущуюся простоту устройства счетчиков, производство их является сложным и ответственным, требующим тщательного соблюдения технологического процесса и чистоты, так как от этого зависит их качество работы, однообразие их электрических свойств, отвечающих техническим условиям. Чтобы иметь представление о производстве, посмотрим как изготавливается спиртовой счетчик.

Поступившее на завод стекло в виде трубок нужного диаметра проходит отборочную сортировку как на отсутствие внешних дефектов стекла, так и на пригодность его по внутренним свойствам. Так, в состав многих неорганических стекол входят окислы щелочных металлов. Извест-

но, что изотоп\*) химического элемента калия — калий-40 обладает радиоактивностью. Если из стекла, в котором присутствует изотоп калий-40, изготовить баллон счетчика, то такой счетчик будет обладать повышенным естественным фоном.

Естественным или натуральным фоном счетчика принято называть среднее число импульсов в единицу времени, регистрируемое счетчиком при отсутствии радиоактивных источников. Величина фона зависит в основном от наличия космического излучения, а также от наличия радиоактивных загрязнений воздуха помещения и стенок счетчика. Опытным путем установлено, что в среднем на один квадратный сантиметр поверхности счетчика приходится один-два импульса в минуту.

Заготовки стеклянных баллонов подвергаются тщательной промывке в горячей воде с последующим прополаскиванием их дистиллированной водой. Чисто вымытыми считаются такие стеклянные баллоны, поверхность которых хорошо смачивается водой, т. е. вода растекается по поверхности ровным слоем. После этого заготовки сушатся в сушильном шкафу при температуре 100° С в течение получаса. Затем с помощью лака, приготовленного путем растворения целлULOида в смеси бутилацетата с ацетоном, на внутреннюю поверхность баллона наносят тонкий слой порошка чистой меди. Далее, с помощью специального приспособления натягивают и центрируют тонкую вольфрамовую нить и запаивают баллон с одного конца. Изготовленные таким образом счетчики припаиваются к вакуумной установке, с помощью которой из счетчиков откачивается воздух до очень низкого давления (до миллионных долей миллиметра ртутного столба).

Так как поверхности стекла и металлических деталей содержат на себе много адсорбированных молекул газов, то при откачке любого электровакуумного изделия его предварительно обезгаживают. Для этого припаянные счетчики накрывают электрической печью, нагревают их до температуры 300° С в течение 45 минут; при этом выделяющиеся газы непрерывно откачивают. Затем печь снимают, счетчикам дают остыть до комнатной температуры, после чего их наполняют газовой смесью, состоящей из 85% аргона и

\*) Изотоп — элемент, имеющий одинаковый положительный заряд ядра, но другой атомный вес.

15% паров метилаля. После этих операций счетчик отпайвается от системы и проверяется на соответствие его электрических параметров техническим условиям.

### Рабочая характеристика счетчика

Спиртовые самогасящиеся счетчики используются только в так называемом импульсном или счетном режиме, т. е. их применяют только для подсчета числа отдельных частиц, проходящих через счетчик. Поэтому свойства счетчика как измерительного прибора определяются его счетной или рабочей характеристикой.

Счетной характеристикой называют кривую, показывающую зависимость числа разрядов в счетчике в единицу

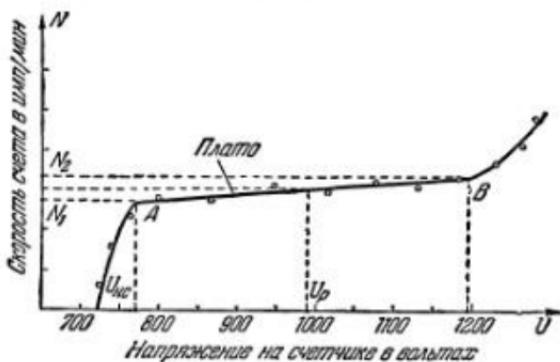


Рис. 13. Счетная характеристика счетчика.

времени от величины подаваемого на счетчик напряжения. На рисунке 13 приведена типичная счетная характеристика спиртового счетчика. Напряжение, при котором счетчик начинает считать, т. е. при котором в счетчике впервые возникают разряды, принято называть напряжением начала счета ( $U_{н.с}$ ). Если счетчик включить в электрическую цепь так, как показано на рисунке 10, и медленно повышать напряжение, то при напряжении, равном  $U_{н.с}$  (рис. 13), в счетчике возникнут разряды, импульсы.

Величина этого напряжения зависит от многих причин, главными из которых являются природа газов, входящих в состав смеси, давление основного и гасящего газа. На величину напряжения начала счета оказывают влияние и другие причины, о которых мы узнаем ниже. Это напряжение

для спиртовых счетчиков типа АММ колеблется в пределах от 650 до 800 в. При дальнейшем увеличении приложенного напряжения число считаемых импульсов сначала быстро возрастает, а затем, начиная с напряжения, соответствующего точке *A*, остается примерно постоянным до точки *B*. После точки *B* число разрядов снова возрастает с увеличением напряжения.

На начальном участке счетной характеристики быстрый рост числа импульсов объясняется тем, что счетчик работает в области ограниченной пропорциональности, где возникновение разряда в счетчике зависит от числа первоначально образованных пар ионов. Следовательно, не каждая частица, попавшая в счетчик и создавшая некоторое количество ионов, вызывает вспышку самостоятельного разряда. Поэтому при малом напряжении число разрядов в единицу времени меньше того числа разрядов, которое счетчик дает на участке от *A* до *B*. Начиная с точки *A*, счетчик регистрирует все частицы, которые, проходя через счетчик, создают в нем хотя бы одну пару ионов (электрон-ион).

Относительно горизонтальный участок счетной характеристики, где число импульсов в единицу времени (скорость счета) не зависит от приложенного напряжения, обычно называют «плато» счетчика. Протяженность плато счетчика, выраженная в вольтах, является одним из важных его параметров. Величину рабочего напряжения на счетчике  $U_p$  обычно выбирают в середине плато. Если плато счетчика достаточно длинное, то колебания рабочего напряжения на счетчике во время его работы не страшны. В этом случае мы не можем случайно оказаться либо слева от точки *A*, либо справа от точки *B*, где показания счетчика будут неверны. Разность между величиной рабочего напряжения и началом счета называют перенапряжением на счетчике.

Другим важным параметром счетчика, от которого зависит правильность его показаний, является наклон плато. У идеального счетчика плато должно быть горизонтальным. На самом деле у всех счетчиков этот участок не горизонтален, а имеет наклон к оси напряжения под некоторым углом, т. е. скорость счета с изменением напряжения не остается постоянной, а несколько возрастает. Величина этого наклона зависит от очень многих причин: от параметров схемы, в которую включен счетчик, от конструкции счетчика, от технологии изготовления, от свойств мате-

риала катода и его обработки, от природы и давления газа и т. п. Наклон плато определяется как отношение разности в скорости счета в начале и в конце плато протяженностью в 100 в к средней скорости счета. В этом случае наклон выражается числом процентов на 100 в. Наклон может также определяться отношением разности в скорости счета на полной длине плато к скорости счета в середине плато, разделенным на протяженность плато

$$K = \frac{N_2 - N_1}{\frac{N_1 + N_2}{2} \cdot l_n} \cdot 100,$$

где  $K$  — наклон плато в процентах на 1 в,  $N_1$  — скорость счета в начале плато,  $N_2$  — скорость счета в конце плато;  $l_n$  — протяженность плато в вольтах.

В этом случае наклон выражается в процентах на 1 в. Наклон плато показывает нам, на какую величину мы неправильно определили истинную скорость счета при случайном изменении рабочего напряжения на счетчике на 1 в. Наклон плато спиртовых счетчиков обычно не превышает 0,1—0,15% на один вольт.

При увеличении напряжения на счетчике выше точки  $B$  скорость счета вновь возрастает. Это происходит за счет появления так называемых самопроизвольных разрядов, о причине возникновения которых будет рассказано ниже.

### Электрон в газе

Если электрон под действием электрического поля движется в вакууме (практически в безвоздушном пространстве), то, очевидно, его путь почти совпадает с направлением силовых линий поля, так как при движении электрон на своем пути не встречает никаких препятствий.

Несколько другой характер имеет движение электрона в газе. При отсутствии электрического поля электрон движется беспорядочно, так же как и молекулы газа. В этом случае говорят, что электрон имеет тепловое движение. При наличии электрического поля на беспорядочное тепловое движение электрона накладывается направленное движение вдоль силовой линии поля. Поэтому путь электрона от одного столкновения до другого становится уже не прямолинейным, а изгибающимся в направлении

силовой линии поля, как показано на рисунке 14, где прерывистыми стрелками указан путь, который имел бы электрон после упругого столкновения с атомами. Под действием электрического поля электрон, проходя сложный зигзагообразный путь, постепенно приближается к положительному электроду.

Энергия и скорость электрона при движении его от одного электрода к другому постоянно увеличиваются. Однако при каждом упругом и неупругом столкновении электрон теряет часть своей энергии. Средняя доля энергии, теряемая частицей при каждом упругом столкновении, постоянна и пропорциональна массе электрона и обратно

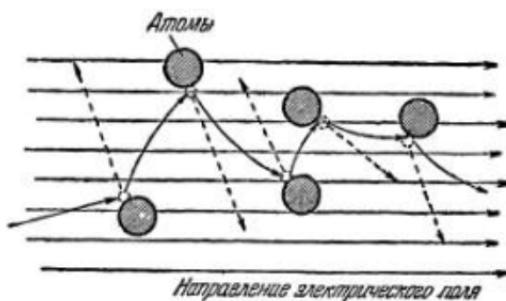


Рис. 14. Влияние электрического поля на движение электрона в газе.

пропорциональна массе атома или молекулы, с которой он столкнулся. При неупругих столкновениях электрон теряет определенное количество энергии, равное энергии ионизации или возбуждения газа, в котором он движется. Установлено, что число упругих столкновений значительно больше числа неупругих.

#### Ионы в газе и на поверхности катода

Характер движения положительных или отрицательных ионов в газе, находящемся в электрическом поле, такой же, как и электронов, однако скорости движения их значительно ниже, чем скорости движения электронов. Средняя скорость движения иона в отличие от средней скорости движения электрона определяется главным образом скоростью теплового движения. Так, например, при комнатной температуре скорость теплового движения ионов в

воздухе приблизительно равна 500 метрам в секунду, тогда как при наложении электрического поля напряженностью в 100 в/см скорость движения иона в направлении электрического поля равна всего лишь 2,2 м/сек. Это почти в 200 раз меньше, чем скорость теплового движения. Поэтому ионы по сравнению с электронами будут двигаться в направлении своего электрода чрезвычайно медленно.

При своем движении ион претерпевает очень большое число столкновений. Так, например, при движении иона в газе при атмосферном давлении он сталкивается миллиард раз в секунду с молекулами газа.

При этих столкновениях первичный ион может передать свой заряд молекуле такого же газа или молекуле какой-либо примеси, может присоединиться к молекуле, образовав сложный ион.

При подходе к поверхности металлического катода положительный ион (например, ион аргона) создает у этой поверхности электрическое поле очень большой напряженности (миллиарды вольт на один сантиметр). Но известно, что при напряженности электрического поля, равной примерно 30—50 млн. в/см, из проводника выходят электроны. Поэтому при подходе к поверхности проводника на расстояние около 10 Å положительный ион вырывается из проводника электрон. Это вырывание происходит без увеличения энергии электрона, то есть он выходит не через потенциальный барьер, а проходит сквозь него (так называемый туннельный переход). Этот электрон захватывается положительным ионом, который превращается при этом в нейтральный атом. Но в зависимости от энергии иона, атом может быть как в нормальном состоянии, так и в возбужденном.

Если энергия возбуждения атома будет выше удвоенной работы выхода металла, он может вырвать из металла еще один электрон. Последний окажется свободным и начнет свое движение к аноду. Так, например, для медного катода работа выхода равна 4—4,5 эв, а потенциал ионизации аргона около 15,7 эв. При подходе к катоду ион затратит 4,7 эв на вырывание электрона из металла.

Поэтому нейтрализовавшийся ион аргона останется в возбужденном состоянии с энергией около 11 эв. Следовательно, такой атом имеет возможность вырывать из металла еще один электрон, так как его энергия выше удвоенной работы выхода меди.

## Как возникает разряд в счетчике с чистым газом

Как мы уже видели, энергии  $\gamma$ -квантов достигают очень больших величин — от сотен тысяч до миллионов электрон-вольт. При такой энергии электрон, выбитый из атома газа внутри рабочего объема счетчика или из стенок, будет обладать также очень большой энергией. Этот электрон, ионизируя газ, создает в рабочем объеме счетчика ряд электронов с тепловыми энергиями.

Предположим, что такой тепловой электрон появился в счетчике, наполненном чистым аргоном (электрон, обозначенный цифрой 1 на рисунке 15. На этом рисунке показана

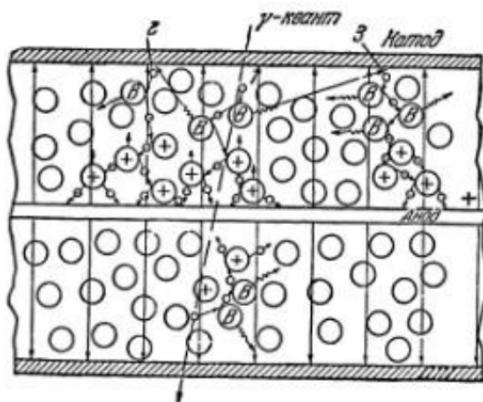


Рис. 15. Нарастание электронных лавин и распространение разряда в счетчике с инертным газом.

часть счетчика, разрезанного вдоль оси). Этот электрон под действием электрического поля (направление поля на рисунке показано вертикальными стрелками) будет двигаться к положительно заряженной нити. На своем пути он беспрестанно будет сталкиваться с нейтральными атомами газа. При каждом упругом столкновении он почти не будет отдавать своей энергии, отлетая от атомов, как упругий шарик. При неупругих же столкновениях электрон отдает полностью или часть своей энергии атому (точнее одному из оптических электронов оболочки атома). При этом атом возбуждается (рис. 15, В). А электрон, отдав свою энергию, вновь начинает двигаться к аноду, все время набирая энергию из электрического поля.

Возбужденный же атом высвечивает квант света (на рисунке кванты показаны зигзагообразными стрелками). Пока первичный электрон находился недалеко от катода, он не успевал приобрести большую энергию на пути свободного пробега. Поэтому отдаваемая им атому энергия невелика и, следовательно, кванты света от возбужденного атома обладают небольшой энергией. По мере продвижения первичного электрона вперед, где в силу цилиндрической конфигурации электродов поле нарастает, на пути свободного пробега он приобретает большую энергию. При очередном неупругом столкновении теперь он передает атому большую энергию. В силу этого и квант света, высвеченый этим атомом, будет обладать большей энергией.

Наконец, первичный электрон войдет в такую область поля, что приобретенная им из поля энергия и переданная при очередном столкновении нейтральному атому возбудит последний до высокого энергетического уровня. При переходе с этого уровня в нормальное состояние атом может высветить квант большой энергии. Кванты света от возбужденных атомов могут распространяться в любые стороны. Если такой квант света обладает энергией, большей, чем работа выхода металла, то при попадании на катод он выбьет из него электрон (на рисунке 15 такие электроны обозначены цифрами 2 и 3).

Но вернемся к первичному электрону. Попадая в область поля, где он на пути свободного пробега приобретает энергию, равную потенциалу ионизации газа (или большую ее), электрон при очередном неупругом столкновении ионизирует атом, то есть оторвет от него один внешний электрон. Следовательно, при таком столкновении образуются два электрона и положительный ион, означенный на рисунке кружком с крестиком.

Положительный ион под действием поля начнет медленно, по сравнению с движением электрона даже слишком медленно двигаться к катоду. Из этой же точки в направлении к аноду начнут свое движение два уже знакомые нам электрона. При очередных столкновениях каждый из них создаст еще по одному электрону и иону, то есть по паре ионов. После этого начнут свое движение четыре электрона, которые создадут еще четыре новых пары. Таким образом, происходит быстрый процесс размножения электронов и ионов. Как мы уже говорили, этот процесс назвали образованием электронной лавины. Такой процесс услов-

но показан на рисунке 15. Цифрой 1 означена первая лавина.

Квант света, который создал электрон 2, является родоначальником второй электронной лавины. Потом возникает третья, четвертая и т. д. Разряд, возникающий в области, где низверглась первая лавина электронов, начинает распространяться вдоль счетчика вправо и влево. Вскоре все пространство, прилегающее к нити, будет охвачено разрядом.

Возникает негаснущий самоподдерживающийся разряд. Счетчик становится нечувствительным к радиоактивному излучению.

Для того чтобы разряд самопроизвольно угасал и, после прохождения частицы, счетчик был готов к приему следующей радиоактивной частицы, к основному газу аргону добавляют небольшую (порядка 10—15%) добавку так называемой гасящей примеси, способной гасить разряд. Такими примесями в спиртовых счетчиках служат пары органических соединений, с довольно крупными молекулами. Одним из таких веществ является метиловый спирт.

### Пары спирта поглощают фотоны

Добавление к основному газу гасящей примеси меняет картину разряда, описанную в предыдущем разделе. Так же как и раньше, образовавшийся тепловой электрон движется в направлении нити. В области с не очень сильным полем электрон при неупругих столкновениях возбуждает атомы газа. Так же как и раньше, возбужденные атомы испускают фотоны. Однако теперь, при наличии примеси паров спирта, ни один фотон не попадает на поверхность катода, их поглощают молекулы спирта.

Многоатомные молекулы способны поглощать коротковолновые ультрафиолетовые излучения в широкой области. Эта область для различных веществ различна. Так, например, у метана наблюдается сплошной спектр поглощения от 850 до 1450 Å, у аммиака эта область лежит ниже 1200 Å, у этилового спирта спектр сплошного поглощения лежит ниже 2000 Å и т. д.

Гасящая примесь будет настолько сильно поглощать фотоны, что на катод они практически не попадут — они станут поглощаться в малом объеме, расположенному близко к нити. Это приводит к тому, что разряд будет распрост-

раняться от точки к точке вдоль нити. Поэтому в противоположность тому, что мы имели при наполнении счетчика чистым газом, где разряд быстро охватывал весь объем счетчика, распространение разряда в счетчиках, наполненных парами многоатомных веществ, происходит не мгновенно, а за определенный конечный промежуток времени.

Разряд распространяется в непосредственной близости от нити и постепенно охватывает все новые и новые ее участки. Что это происходит именно так, показывает опыт: если на нити укрепить небольшую (диаметром всего лишь в 0,5 мм) стеклянную бусинку, разряд перестает распространяться.

Многоатомные молекулы спирта при поглощении фотонов быстро распадаются на более мелкие молекулы или отдельные атомы.

Таким образом, в силу того, что фотоны не попадают на катод, выхода вторичных электронов с катода под действием ультрафиолетового излучения разряда не происходит. Этим устраняется одна из возможностей зажигания нового разряда, не отвечающего прохождению ионизирующей частицы.

### Пары спирта гасят разряд

Очевидно, чтобы прекратить разряд в счетчике, необходимо устраниć причины, которые поддерживают разряд после прохождения радиоактивной частицы через объем счетчика, другими словами, надо устраниć причины, по которым в объеме счетчика возникают электроны, приводящие к образованию нового разряда или поддержанию уже имеющегося.

Мы только что рассмотрели, как многоатомные молекулы поглощают ультрафиолетовое излучение, возникающее в процессе разряда, и не дают ему возможности создавать фотоэлектроны с катода. Другой причиной возникновения вторичных электронов с катода, как мы видели на стр. 48, является нейтрализация на катоде положительных ионов большой энергии. И эта причина устраняется примесью паров спирта.

Как же это происходит? Чем объясняется такое свойство паров спирта? Объясняется это соотношением между величинами потенциалов ионизации молекул спирта и аргона. Потенциал ионизации аргона 15,7 эв, спирта — около 11,3 эв. Образовавшиеся в процессе развития лавин положительные ионы аргона, медленно двигаясь к катоду, пре-

терпевают огромное число соударений как с нейтральными атомами основного газа, так и с молекулами спирта. Так, в счетчике АММ, в котором содержится 85% аргона и 15% паров спирта, на пути к катоду ионы аргона претерпевают около ста тысяч соударений с молекулами спирта.

Поскольку потенциал ионизации аргона выше, чем потенциал ионизации спирта, то ион аргона может оторвать один электрон от молекулы спирта и присоединить к себе, превратившись в нейтральный атом аргона. Так как на такой отрыв электрона ион аргона затратит 11,3 эв энергии, то оставшиеся 4,4 эв он высетит в виде кванта света, который поглотится парами спирта.

Таким образом, на катод приходят ионы спирта, обладающие значительно меньшей энергией. При подходе к поверхности катода ионы спирта нейтрализуются — вырывают из металла один электрон и присоединяют к себе. Поскольку работа выхода электронов из меди 4,7 эв, то такую энергию ион спирта потратит на вырывание электрона. Остается возбужденная молекула спирта с энергией 6,6 эв. Эту энергию молекула спирта могла бы отдать двумя способами: испустить фотон или, подойдя ближе к катоду, затратить энергию на вырывание электрона.

Однако ни того ни другого не произойдет, потому что время жизни возбужденной молекулы спирта, до того как она распадется (диссоциирует), всего лишь около  $10^{-12}$  сек. Время жизни по отношению к излучению составляет около  $10^{-7}$  сек., а время, необходимое иону для того, чтобы он подошел к катоду на расстояние, достаточное для вырываания электрона, составляет около  $10^{-12}$  сек. Из этого следует, что возбужденная молекула спирта распадается на составные части — отдельные атомы или более мелкие молекулы — значительно раньше, чем успеет испустить фотон или подойти ближе к поверхности катода. Поэтому нового свободного электрона не образуется и разряд поддержать будет нечем — он погаснет.

Однако все же вероятность высвечивания возбужденной молекулы спирта хотя и малая, но имеется. В среднем будет иметь место один случай на миллион, когда возбужденная молекула спирта перейдет в нормальное состояние путем испускания кванта света. Но если при этом учесть, что выход фотоэлектронов из катода под действием квантов света невелик — всего один электрон на 10 000 квантов, — то один вторичный электрон может быть образован

на 10 миллиардов положительных ионов. Так как в одной лавине образуется в среднем один миллиард положительных ионов, то и наблюдается один двойной импульс (второй создан за счет вторичного электрона) на 10 нормальных. По мере увеличения напряжения, приложенного к счетчику, количество ионов, образующихся в разряде, возрастает. Это приводит к увеличению двойных и тройных импульсов. Как следствие этого мы наблюдаем наклон плато счетной характеристики счетчика. Наконец, при значительном повышении напряжения на счетчике число сложных импульсов возрастает настолько, что в счетчике возникает негасящий, непрерывный разряд.

Таким образом, мы видим, что одним из условий успешного гашения разряда внутри счетчика является различие в потенциалах ионизации основного газа и паров многоатомной примеси. Второй характерной особенностью гасящей примеси, в частности спирта, является наличие широкой области поглощения в коротковолновой ультрафиолетовой части спектра.

В качестве основного газа для наполнения таких счетчиков применяют инертные газы: аргон (потенциал ионизации 15,7 эВ), гелий (24,5 эВ), криптон (13,9 эВ) и другие. В качестве гасящей примеси, кроме спирта применяются метан (14,4 эВ), ацетон (10,1 эВ), ацетилен (11 эВ) и многие другие.

### «Мертвое» время счетчика

Мы знаем, что скорость передвижения положительных ионов примерно в 1000 раз меньше скорости передвижения электронов. Поэтому за время образования электронных лавин ионы практически остаются на месте. В результате около нити образуется плотный цилиндрический чехол из положительно заряженных ионов. По мере того, как происходит разряд, слой пространственного заряда положительных ионов нарастает. В результате он уменьшает силу поля вблизи нити до величины, слишком малой для поддержания разряда. В этот момент электроны удерживаются на нити полем положительных ионов.

По мере того как положительный ионный чехол расширяется, передвигаясь к катоду, электроны начинают стекать с нити, давая начало импульсу напряжения на нагрузке. При этом очевидно, что скорость освобождения электронов на нити зависит от скорости расширения

ионного чехла. А скорость движения положительных ионов приблизительно пропорциональна силе (напряженности) электрического поля счетчика, которое в цилиндрическом счетчике меняется обратно пропорционально расстоянию от нити до катода.

Таким образом, пока напряженность поля вблизи нити не восстановится до своего первоначального значения, разряд в счетчике возникнуть не может, то есть счетчик не чувствует прохождения ионизирующей частицы — счетчик находится в нерабочем «мертвом» состоянии. Счетчик будет полностью готов к работе после того, как положительные ионы отойдут от нити на такое расстояние, при котором напряженность поля вблизи нити примет первоначальное значение. Такое положение может наступить только тогда, когда положительные ионы придут на катод. Однако счетчик «оживает», то есть становится чувствительным значительно раньше, но импульсы в этот момент будут небольшими. Это произойдет тогда, когда положительные ионы отойдут от нити на некоторое расстояние, называемое критическим радиусом. Время, в течение которого положительные ионы отойдут от нити на критическое расстояние, называют мертвым временем счетчика. В это время в счетчике вообще невозможна вспышка самостоятельного разряда.

Время, в течение которого положительные ионы движутся от критического расстояния до катода, называют восстановительным временем счетчика. «Мертвое» время и время восстановления счетчиков нормальных размеров примерно равны между собой. Продолжительность их порядка нескольких сотен микросекунд\*) и зависит от величины разности между рабочим напряжением и потенциалом зажигания счетчика. Эту разность называют перенапряжением на счетчике.

### Продолжительность жизни счетчика

Как мы видели, гашение разряда производится многоатомными молекулами. В процессе гашения многоатомные молекулы паров гасящей примеси распадаются, в результате чего образуются более легкие молекулы. В частности, опытами установлено, что в результате длительной работы спиртового счетчика спирт распадается на молекулы ацетилена, метана, углерода, водорода, кислорода и другие.

\*) Микросекунда — одна миллионная доля секунды.

В счетчике средних геометрических размеров имеется около  $10^{20}$  молекул спирта. При каждом импульсе на катоде или в результате фотораспада в момент разряда диссоциируют около  $10^9$ — $10^{10}$  ионов спирта. Отсюда видно, что через десять миллиардов ( $10^{10}$ ) импульсов все молекулы распадутся. Опытом подтверждается, что счетчики, наполненные смесью аргона и спирта, выдерживают около  $10^9$ — $10^{10}$  импульсов. «Старение» счетчика замечается по изменениям его свойств: увеличению наклона пада-то за счет уменьшения и изменения гасящих свойств примеси, увеличению потенциала зажигания за счет увеличения количества новых молекул в гасящей примеси. И наконец, когда счетчик отсчитывает  $10^9$  импульсов, качество счетной характеристики настолько ухудшается, что дальнейшее применение счетчика становится невозможным.

Однако ухудшение характеристики счетчика (старение счетчика) происходит не только за счет распада гасящей примеси, но и за счет изменения поверхности катода в результате осаждения на ней продуктов распада молекул. Опыт доказывает это утверждение. Был изготовлен счетчик, у которого катод разделен на отдельные изолированные друг от друга секции. Таким образом, счетчик как бы состоял из ряда отдельных счетчиков. Прибор наполнялся аргоном и метаном. Включалась на длительную работу одна из секций и через определенное число импульсов счетчик, состоящий из секции катода и нити, выходил из строя, то есть старел.

Затем включалась соседняя секция и оказывалось, что она работает как отдельный новый счетчик. Следует отметить, что эта причина старения наиболее свойственна счетчикам, в которых в качестве гасящей примеси применяется метан, бутан, пропан и др. Если отслуживший срок службы счетчик наполнить новой газовой смесью, то он все равно не работает. Для того чтобы он вновь заработал, перед наполнением необходимо промыть катод растворителем, удаляющим органические осадки.

### Влияние температуры окружающей среды на работу счетчика

Вопрос об изменении характеристик счетчика при изменении температуры окружающей среды приобретает очень важное значение в случае применения счетчиков в полевых условиях при геологоразведочных работах.

Изменение общего давления газа в счетчике за счет изменения окружающей температуры незначительно. Но зависимость давления паров гасящих примесей органических соединений от температуры велика и этим пренебрегать нельзя. Так, при понижении температуры в результате конденсации паров резко убывает число гасящих молекул и счетчик может перестать действовать. При повышении температуры давление гасящей примеси повышается, что приводит к повышению потенциала зажигания счетчика, но существенных изменений счетной характеристики не вызывает. Понижение температуры до 20° С ниже нуля делает счетчик совершенно непригодным к работе.

## Б. НИЗКОВОЛЬТНЫЕ ГАЛОГЕННЫЕ САМОГАСЯЩИЕСЯ СЧЕТЧИКИ

### Напряжение зажигания газового разряда

Исследования электрического разряда в чистых газах и в газовых смесях, произведенные многими учеными, показали, что величина напряжения\*), при котором вспыхивает самостоятельный разряд в газоразрядном промежутке, зависит от многих причин. Так было установлено, что напряжение зажигания самостоятельного разряда в одном и том же газе или в одной и той же газовой смеси зависит от интенсивности радиоактивного или другого ионизирующего излучения, от состояния поверхности электродов, от расстояния между электродами, от величины давления газа или газовой смеси в разрядном промежутке и, наконец, от природы газа.

Характер изменения напряжения зажигания от расстояния между электродами и давления для чистых газов и для различных смесей остается один и тот же. На рисунке 16 показана зависимость напряжения зажигания от произведения давления газа в миллиметрах ртутного столба на расстояние между электродами в миллиметрах. Эти кривые носят название кривых Пашена. Как видно из рисунка,

\* ) Разность потенциалов между электродами, при которой разряд из несамостоятельного переходит в самостоятельный, называют напряжением зажигания газового разряда или потенциалом зажигания разряда. Последнее название объясняется тем, что всегда предполагается, что потенциал катода равен нулю и имеется в виду потенциал анода.

характер изменения напряжения зажигания остается один и тот же как для воздуха, представляющего собой смесь многих газов, так и для одного газа — водорода.

Такой характер изменения напряжения зажигания разряда объясняется следующим. Если в газоразрядном промежутке при неизменном расположении электродов изменить давления газа, то при переходе от больших давлений к малым увеличивается длина свободного пробега электронов в газе. Поскольку длина свободного пробега электрона увеличилась, на расстоянии каждого свободного пробега

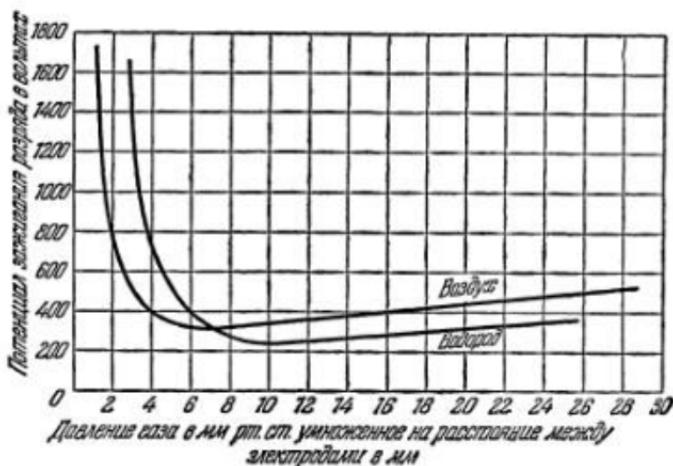


Рис. 16. Кривые Пашена для воздуха и водорода.

электрон проходит большую разность потенциалов, то есть запасается большей энергией. Поэтому увеличивается его возможность ионизировать атомы газа при столкновениях. Но зато число столкновений между электроном и атомами газа при его движении к аноду значительно уменьшается. А по этой причине при переходе в сторону малых давлений до точки, соответствующей самой низкой точке кривой, преобладает явление увеличения энергии, а при дальнейшем уменьшении преобладает уменьшение числа столкновений. После этого, если при неизменном давлении уменьшать расстояние между электродами, то возрастает сила (напряженность) поля, что увеличивает скорость электронов, а с другой стороны, уменьшается пространство, в котором развиваются лавины. Одновременно действие этих двух причин приводит к тому, что кривая Пашена имеет

низшую точку, соответствующую наименьшему напряжению зажигания газового разряда.

Чем выше потенциал ионизации газа, тем выше будет напряжение зажигания разряда в нем, так как при этом требуется большая напряженность поля, потребная для сообщения электрону необходимой для ионизации газа энергии.

В смеси газов процессы, определяющие зажигание разряда, значительно сложнее. Одной из причин, понижающих напряжение зажигания смеси газов являются неупругие соударения второго рода, приводящие к образованию метастабильных состояний атомов. Установлено, что если в газоразрядный прибор, наполненный чистым неоном, добавить немного аргона, то напряжение зажигания полученной смеси будет значительно ниже, чем у чистого неона.

Это объясняется следующими причинами. При соударениях электрона с атомами неона (потенциал ионизации 21, 47 эв) многие из них возбуждаются до метастабильного уровня (до 16,57—16,66 эв). Эти метастабильные атомы при своем беспорядочном движении сталкиваются с атомами аргона, у которого потенциал ионизации (15,7 эв) ниже, чем потенциал метастабильного состояния неона, и отдают ему свою энергию. В результате этого атомы аргона ионизируются и потенциал зажигания разряда значительно понижается. Например, прибавление всего 0,005% аргона при 110 мм рт. ст. неона понижает напряжение зажигания с 770 в до 185 в между параллельными пластинами, установленными на расстоянии 7,5 мм.

Понижения напряжения зажигания разряда можно достичь также путем понижения общего давления, а в случае цилиндрических электродов и уменьшением толщины нити. Уменьшение толщины нити приводит к увеличению напряженности поля, а следовательно, и к понижению напряжения зажигания разряда.

### Низковольтные газовые смеси

Такому условию, когда потенциал метастабильного состояния основного газа выше потенциала ионизации примеси, удовлетворяют многие гасящие примеси, применяемые в газоразрядных счетчиках. Но не всякое количество примеси в основном газе будет приводить к понижению потенциала. Например, спиртовые счетчики известны как

высоковольтные счетчики (потенциал зажигания разряда в них около 700—800 в и более) только потому, что количество паров спирта в них очень велико.

Это приводит к большему числу столкновений электронов, движущихся в газе с молекулами гасителя. В результате энергия электронов долгое время удерживается ниже, чем энергия метастабильного состояния и потенциала ионизации основного газа. А это в свою очередь задерживает развитие и нарастание электронных лавин, вследствие чего возрастает потенциал зажигания разряда.

Если теперь понижать количество паров спирта в счетчике, то при очень небольшом количестве его в смеси наступает такой момент, когда электроны очень мало сталкиваются с молекулами спирта. Тогда начинает действовать механизм понижения потенциала ионизации смеси за счет передачи энергии метастабильных атомов неона молекулам спирта. Однако в этом случае паров спирта в счетчике будет настолько мало, что они не будут в состоянии гасить разряд и счетчик не станет самогасящимся. Были, например, изготовлены счетчики с низким потенциалом зажигания путем прибавления многоатомных паров при давлении в доли миллиметра ртутного столба к смеси неон — аргон. Однако такие счетчики имели очень небольшое время жизни и для гашения разряда в них необходимо было применять гасящие схемы, то есть такие счетчики были практически не самогасящимися. Ясно, что если бы удалось найти такой газ, который имел бы потенциал ионизации ниже потенциала возбуждения метастабильного состояния основного газа и при малых примесях его к основному газу сохранял свои гасящие свойства и позволял счетчику долго служить, то задача с понижением напряжения зажигания разряда в счетчике была бы решена.

Такими газами оказались пары галогенов (хлор, бром, иод). Было установлено на опыте, что небольшие примеси галогенов также способны понизить напряжение зажигания разряда. В случае применения галогенов условия для снятия метастабильных состояний основного газа имеются. Так, например, потенциал ионизации брома равен 12,8 эв, а потенциал метастабильного состояния неона 15,6 эв. Поэтому при столкновении метастабильного атома неона его энергия будет затрачиваться на ионизацию молекул брома. Однако появилось другое явление, приводящее к повышению потенциала зажигания разряда в данной смеси. Дело в

том, что галогены относятся к электроотрицательным газам и легко присоединяют к себе электроны, становясь отрицательными ионами. Поэтому в счетчике со смесью неон — галоген при достаточной концентрации галогена молекулы его действуют, как электронные ловушки, не давая тем самым развиваться электронным лавинам и, следовательно, повышая напряжение зажигания разряда. По мере того как понижается концентрация галогенов в счетчике, вероятность прилипания электронов понижается, а поэтому и потенциал зажигания разряда понижается.

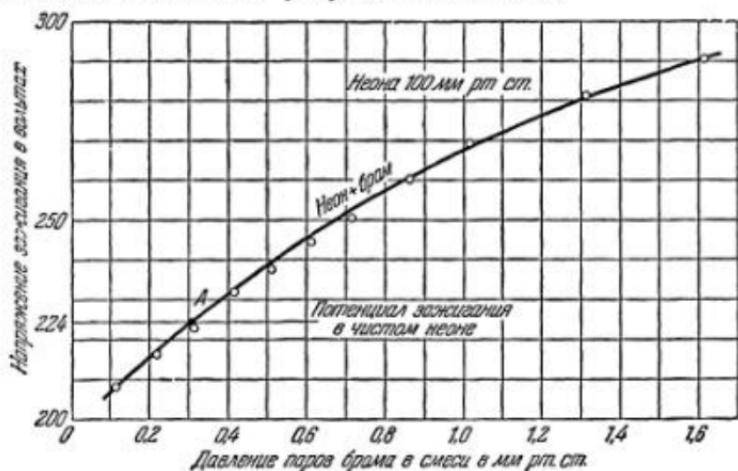


Рис. 17. Изменение напряжения зажигания счетчика от количества брома в газовой смеси.

Наглядно можно проследить изменение напряжения зажигания галогенного счетчика, наполненного смесью неон—бром, от изменения величины давления брома по кривой, представленной на рисунке 17. От точки *A*, где кривая пересекается с прямой, равной потенциальному зажигания счетчика, наполненного чистым неоном, вправо с увеличением брома потенциал зажигания смеси увеличивается. От точки *A* влево присутствие брома понижает потенциал зажигания. Так, при прибавке к неону брома по 0,1 мм рт. ст. потенциал зажигания смеси понизился с 224 в до 208 в. Надо, однако, иметь в виду, что потенциал зажигания счетчика зависит и от многих других факторов (от геометрических размеров, от общего давления неона, от обработки электродов и др.).

При значительном уменьшении примеси галогена в газовой смеси счетчик также может перестать действовать из-за появления так называемого предварительного разряда; как говорят, счетчик начинает коронировать. Поэтому при выборе величины концентрации галогена в примеси исходят одновременно из двух желаний: с одной стороны, желая получить как можно меньший потенциал зажигания, количество галогенной присадки уменьшают, с другой стороны, для получения устойчивой работы счетчика количество галогенной присадки увеличивают. Счетчики, наполняемые смесью неон — аргон — бром и неон — бром, в общем имеют потенциал зажигания ниже, чем неон — аргон — хлор, так как потенциал ионизации хлора выше потенциала ионизации брома.

Как мы увидим дальше, хорошие качества галогенных смесей не ограничиваются их низкими напряжениями зажигания.

#### Как изготавливаются галогенные счетчики

Большая химическая активность галогенов (в частности хлора, брома, чаще всего применяемых для наполнения счетчиков) создает основную трудность при изготовлении галогенных счетчиков. Если не принять специальных мер, то небольшое количество паров хлора или брома, которое было в смеси при наполнении счетчика, через некоторое, весьма небольшое время в результате химического взаимодействия с электродами счетчика полностью поглотится ими, превратившись при этом в новые вещества — хлориды. В результате этого счетчик становится практически негодным.

Исследователи разных стран, в том числе и Советского Союза, опробовали многие металлы для изготовления электродов галогенных счетчиков. Так были применены железо, медь, латунь, алюминий, молибден, серебро и многие другие, но все они давали неудовлетворительные результаты. После долгих поисков было установлено, что наиболее подходящими материалами для изготовления электродов галогенных счетчиков могут служить хромо-никелевые сплавы, никром и нержавеющая сталь, а из чистых металлов — tantal. Последний металл является пока слишком дорогим и для изготовления электродов не применяется.

Устройство одного из галогенных счетчиков, выпускаемых нашей промышленностью, показано на рисунке 18.

Бета-гамма-счетчик типа СТС-5 (стальной счетчик) представляет собой тонкостенный (до 50  $\mu$  цельнотянутый цилиндр, изготовленный из нержавеющей стали. На поверхности его для придания ему прочности выдавлены ребра жесткости.

С обеих сторон цилиндра приварены шайбы плотным воздухонепроницаемым швом. Они изготовлены из специального сплава — ковара. Ковар хорошо сваривается со стеклом и позволяет, таким образом, впаять в шайбы стеклянные трубочки. Эти трубочки, вваренные в коваровые шайбы, служат одновременно изоляторами между анодом и катодом, и дают возможность произвести откачуку из счетчика

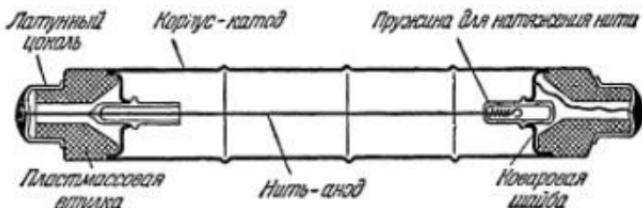


Рис. 18. Схематический разрез счетчика СТС-5.

воздуха и наполнить его газовой смесью. Внутренние концы стеклянных трубок служат охранными «соломками» и держателями нити. Нить — анод изготавливается из коваровой проволоки. Такая нить достаточно стойка к действию брома и хорошо спаивается со стеклом, что позволяет легко осуществить ее вывод наружу.

Собранные счетчики припаиваются на откачные посты, где из них откачивается воздух до давления  $10^{-6}$  мм рт. ст. Откаченный и обезгаженный счетчик проходит специальную обработку сухим хлором. В результате этой обработки внутренние стенки счетчика становятся менее восприимчивыми к действию галогенных примесей, и самопроизвольного поглощения их при работе не происходит. Затем счетчик наполняется газовой смесью, состоящей из неона и паров брома. Наполненные счетчики отпаивают, снабжают цоколем и подвергают отборочным испытаниям.

#### Бром поглощает фотоны и гасит разряд

Как нам уже известно, одно из условий, которому должен удовлетворять газ, используемый в счетчиках в качестве гасителя, состоит в том, чтобы ни один из возбужденных и

ионизированных атомов, способных произвести вторичную эмиссию с катода, не достигал его поверхности. Для этого, как мы знаем, потенциал ионизации гасящей примеси должен быть ниже потенциала возбуждения метастабильного состояния основного газа. Другое условие гашения состоит в том, чтобы гасящая примесь поглощала кванты света (фотоны), образующиеся в процессе разряда, не давая им попадать к катоду. Этим требованиям в достаточной мере удовлетворяют галогены — хлор и бром.

Обычное состояние хлора и брома, так же как и многих других газов (кислорода, водорода, азота и др.), молекулярное, то есть при обычных условиях отдельных атомов брома и хлора не существует. Молекулы хлора и брома состоят каждая из двух атомов. Потенциал ионизации хлора 13,2 эв, а брома 12,8 эв, тогда как потенциал ионизации неона, чаще всего применяемого для наполнения счетчиков в качестве основного газа, равен 21,5 эв, а потенциал метастабильного состояния составляет 16,5 эв. Как видно, первое условие выполняется полностью при сочетании неона с хлором или бромом.

Вторым хорошим качеством хлора и брома является их сплошной спектр поглощения света с длинами волн до 1500 Å, т. е. все фотоны, имеющие длину волны от 1500 Å и ниже, поглощаются хлором и бромом. Но так как возбужденный атом неона высвечивает наиболее интенсивный фотон с длиной волны 736 Å, то, очевидно, и второе условие гашения для галогенов также удовлетворяется.

Несмотря на то, что и хлор и бром вполне удовлетворяют условиям гашения, предпочтение пока отдают брому. Главной причиной этого предпочтения является меньшая химическая активность брома сравнительно с хлором.

Общая картина механизма разряда галогенных счетчиков сходна с рассмотренной выше картиной механизма разряда спиртовых счетчиков. Однако при подробном рассмотрении обнаруживается целый ряд явлений, присущих только галогенным счетчикам. Подробно останавливаться на всех этих явлениях мы не будем, а отметим только некоторые особенности разряда, дающие возможность применять галогенные счетчики не только в счетном (импульсном) режиме, а еще в так называемом токовом режиме, о котором будет сказано ниже.

При поглощении фотона ультрафиолетового излучения, возникающего при высвечивании возбужденного неона, мо-

лекула брома (хлора) распадается на отдельные нейтральные возбужденные атомы. Как указывалось в первом разделе, атомы хлора и брома имеют на внешней оболочке по семи электронов. Поэтому они соединяются в двойные молекулы, образуя устойчивую восьмиэлектронную оболочку. Образовавшиеся под действием кванта света атомы брома вновь соединяются в молекулу, и таким образом молекула брома вновь восстанавливает все свои свойства. Следовательно, в результате работы брома (или хлора) как гасителя, его количество не изменяется, как это имело место с органическими парами. Поэтому с этой точки зрения счетчик, наполненный смесью неона с бромом, может работать сколь угодно долгое время. Это позволяет применять галогенные счетчики при измерении излучений большой активности. При больших мощностях дозы радиоактивного излучения спиртовые счетчики не успевают справиться с гашением разряда и быстро переходят в непрерывный разряд, в результате которого счетчик перестает работать навсегда. Галогенные счетчики, вследствие способности галогенов быстро восстанавливаться в молекулы, не боятся таких перегрузок. Больше того, они способны устойчиво работать в полях излучения сравнительно большой мощности. При этом частота следования импульсов настолько велика, что проще измерять не число их в единицу времени, а общую сумму, то есть средний ток, протекающий через счетчик.

Так же как и в случае спиртовых счетчиков, образовавшиеся ионы основного газа передают свою энергию ионизации молекулам гасящей примеси (брома). Оставшаяся энергия у возбужденного атома неона в 8,7 эв испускается в виде фотона, который поглощается бромом. Образовавшиеся таким образом ионы брома приходят на катод.

Для того чтобы завершить гашение разряда, как об этом уже говорилось, надо, чтобы пришедшие на катод ионы брома не вызвали появления вторичного электрона. Для этого должно быть выполнено условие: энергия иона должна быть меньше удвоенной работы выхода материала катода. Работа выхода нержавеющей стали около 4,7 эв, а энергия иона брома 12,8 эв. Условие не выполняется. Однако в случае применения брома и хлора в качестве гасителей и при предварительной обработке хлором поверхности металла его работа выхода электронов значительно возрастает (до 8—9 эв) и условие становится реализуемым.

Отрицательной стороной галогенов как гасителей является их большое сродство с электроном, т. е. их большая способность присоединять к себе электроны. При этом образуются отрицательные ионы, которые движутся так же, как электроны к нити — аноду, но со значительно меньшей скоростью. В галогенных счетчиках это приводит к так называемому запаздыванию импульса.

Следует заметить, что достаточно стройной и четкой теории работы галогенных счетчиков еще не существует.

### Токовая характеристика счетчика

Еще в 1935 году советские физики В. Векслер, А. Бибераль и М. Иванов впервые указали на возможность применения счетчиков для измерения радиоактивного излучения больших интенсивностей. Они показали, что в спиртовом счетчике средних размеров количество электричества, образующееся в отдельном импульсе, примерно равно одной миллиардной ( $10^{-9}$ ) кулона. Поэтому при ста импульсах в секунду средний ток, равный сумме количества электричества от ста импульсов, составляет около одной десятимиллионной доли ампера (около 0,1 микроампера). Такой ток можно измерять гальванометром. Так как средний ток через счетчик образуется как сумма токов отдельных импульсов, то, очевидно, он должен быть пропорциональным числу частиц, прошедших через счетчик в единицу времени.

Если бы счетчик имел бесконечно большую разрешающую способность, то есть мог бы сосчитывать любое число частиц, то эта пропорциональность между током и числом частиц была бы прямая. Но с увеличением числа частиц, проходящих через счетчик, все большее число частиц будет проходить через него в тот момент, когда счетчик не способен их регистрировать (в течение «смертного» времени). Следовательно, прямая пропорциональность нарушится.

Надо отметить, что спиртовые счетчики очень плохо выдерживают большие интенсивности ионизирующего потока и поэтому в токовом режиме не применяются.

Для этой цели весьма ценными являются галогенные счетчики. Схема, по которой включаются счетчики при работе их в токовом режиме, чрезвычайно проста (рис. 19). Она состоит из счетчика, в анод которого включено нагрузочное сопротивление от 1 до 8 мгом, измерительного при-

бора — микроамперметра — и источника питания — батареи с напряжением порядка 400 в.

Изменяя мощность дозы γ-излучения, падающего на счетчик, мы каждый раз при этом будем получать разную величину среднего тока. Зависимость величины среднего тока, протекающего через счетчик, от изменения мощности дозы излучения и носит название токовой характеристики счетчика. Обычно принято токовую характеристику счетчика вычерчивать в полулогарифмическом масштабе (рис. 20), то есть по вертикальной оси откладывать величину тока в микроамперах, по горизонтальной — логарифм мощности дозы в рентгенах в час.

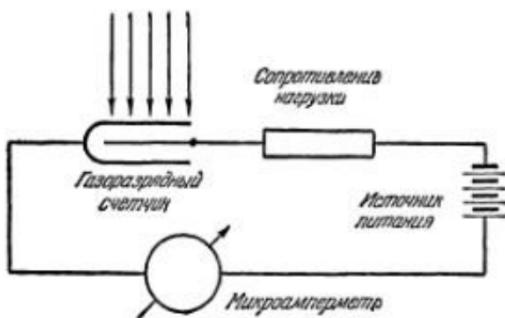


Рис. 19. Схема включения счетчика при работе в токовом режиме.

Токовая характеристика счетчика снимается по схеме, приведенной на рисунке 19. На счетчик подается постоянное рабочее напряжение, которое так же, как и в случае работы счетчика в импульсном режиме, выбирается в середине плато счетной характеристики. Счетчик устанавливается в точке поля, в которой каким-либо способом измерена мощность дозы, и записывается показание микроамперметра. Затем счетчик передвигается в новую точку с известной мощностью дозы и вновь записывается показание прибора. Снимая таким образом ряд показаний прибора в точках с различной мощностью дозы, получают таблицу данных. По этим данным строят кривую (рис. 20), которая и будет токовой характеристикой счетчика.

Вначале, при малых мощностях доз, через счетчик проходит слабый ток и нарастает медленно. Затем на участке от *A* до *B* кривая приближается к прямой линии, ток нара-

стает почти прямо пропорционально логарифму мощности дозы. Этот участок характеристики считается рабочим участком. Он имеет наибольшую крутизну.

Затем после точки *B* рост тока вновь замедляется и наступает его насыщение, то есть при дальнейшем увеличении мощности дозы ток остается неизменным. При некоторых параметрах схемы после насыщения может наступить вновь падение тока. Падающий участок характеристики обычно стараются ликвидировать, так как наличие такого

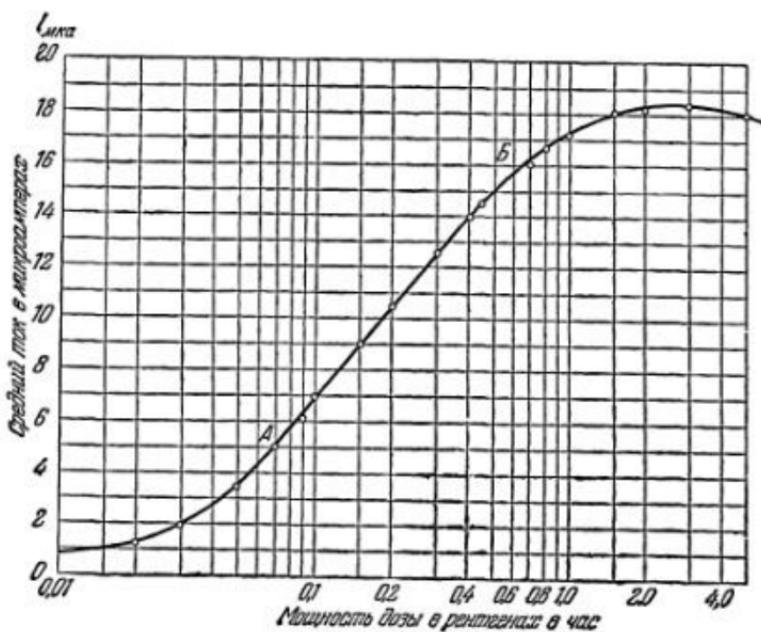


Рис. 20. Токовая характеристика счетчика СТС-5.

участка, расположенного в близкой области мощностей доз излучения, может привести к грубым ошибкам в измерениях.

Таким образом, при использовании счетчика в токовом режиме для измерения больших мощностей доз, необходимо обычным микроамперметром измерить средний ток через счетчик и иметь при этом токовую характеристику счетчика. По измеренному току по кривой (рис. 20) можно определить мощность дозы излучения. В этом случае счетчик дает настолько большие ионизационные токи, что их измерение

не требует никаких усилительных приспособлений. Так, у счетчика СТС-5 при нагрузочном сопротивлении, равном  $4.7 \cdot 10^6$  ом при максимальной мощности дозы облучения ток составляет около 18 микроампер.

### Рабочий объем счетчика

Будем облучать  $\gamma$ -счетчик узким пучком  $\gamma$ -лучей, каждый раз направляя его на различные участки прибора. Узкий пучок  $\gamma$ -лучей можно получить, заключив источник  $\gamma$ -излучения в толстую свинцовую оболочку (рис. 21), имеющую

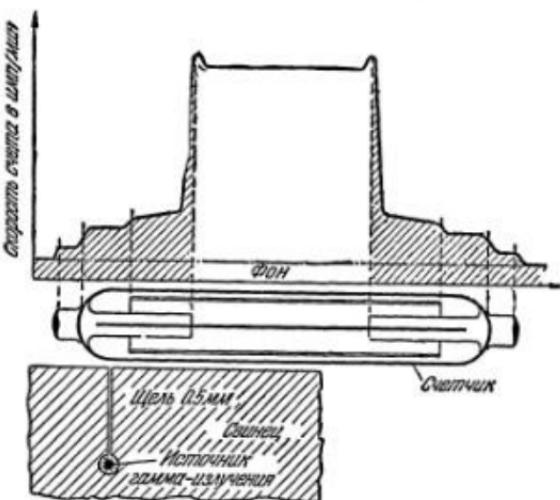


Рис. 21. Кривая относительной чувствительности  
вдоль оси счетчика.

узкую щель (порядка 0,5 мм). Будем передвигать такую щель, из которой выходит пучок  $\gamma$ -лучей, вдоль счетчика от одного конца к другому с помощью микрометрического винта, позволяющего делать перемещения порядка 0,2 мм. После каждого перемещения на 0,2 мм будем замерять скорость счета, которую дает счетчик. Оказывается, скорость счета меняется от того, в каком месте на счетчик падает  $\gamma$ -излучение. Вначале, когда пучок проходит мимо счетчика, скорость счета равна натуральному фону счетчика.

Если пучок попадает на цоколи (не попадая внутрь счетчика), скорость счета несколько возрастает за счет попадания внутрь счетчика электронов больших энергий, образую-

шихся от встречи  $\gamma$ -лучей с цоколями. Передвигая пучок на охранные «соломки» счетчика, мы видим, что скорость счета вновь несколько возрастает и остается постоянной до тех пор, пока пучок  $\gamma$ -лучей не доходит до начала цилиндра катода, где скорость счета возрастает далее. Не доходя некоторого расстояния до среза охранной соломки, скорость счета круто поднимается, приобретая самое большое значение точно над срезом соломки. Потом она несколько снижается и остается постоянной до тех пор, пока пучок не дойдет до среза другой соломки. Дальше картина повторяется в обратном порядке. Если теперь по полученным данным построить кривую, то она будет иметь вид, показанный на рисунке 21.

Из этого рисунка следует, что наиболее чувствительным участком счетчика является открытый участок нити. Концевые участки счетчика зависят от толщины ограничительных соломок. Чем больше диаметр этих «соломок», тем меньше становится скорость счета, приходящаяся на концы. Таким образом мы как бы отгораживаем открытый участок нити от концов счетчика. Длину открытого участка нити называют рабочей длиной нити. А объем, ограниченный рабочей длиной нити и цилиндром катода, называют рабочим объемом счетчика.

### Чувствительность счетчика

Из всех существующих приборов для измерения ионизирующего излучения газоразрядный счетчик является наиболее чувствительным. Опытами установлено, что появление в рабочем объеме счетчика хотя бы одного электрона приводит к появлению самостоятельного разряда. Это значит, что абсолютная чувствительность счетчика предельно высока. В отличие от абсолютной чувствительности, собственно не зависящей от геометрических размеров счетчика, относительная чувствительность различных счетчиков различна.

В самом деле, если мы имеем радиоактивный источник, излучающий равномерно во все стороны определенное количество  $\gamma$ -квантов, то скорость счета, измеренная счетчиком больших размеров в данной точке, будет больше скорости счета, измеренной счетчиком малых размеров. Таким образом, для измерения излучения большей интенсивности надо применять счетчики меньших геометрических размеров.

Так, например, если счетчик с диаметром катода 14 мм и рабочей длиной нити 84 мм при некоторой активности источника и определенном расстоянии от него до счетчика дает скорость счета, равную 16 350 имп/мин, то счетчик с диаметром катода 4 мм и рабочей длиной нити 24 мм дает всего лишь 714 имп/мин. Следовательно, с уменьшением геометрических размеров счетчика уменьшается его относительная чувствительность.

Если счетчик применяется в токовом режиме, то при уменьшении его геометрических размеров увеличивается значение мощности дозы, при которой наступает насыщение тока, то есть величина предельной мощности дозы, которую можно еще замерить с помощью данного счетчика.

Так появились малочувствительные счетчики, могущие работать в полях излучения с мощностью дозы, доходящей до 300 и более рентгенов в час.

Но уменьшение относительной чувствительности счетчика достигается не только за счет уменьшения его геометрических размеров. Изменение полярности питающего напряжения приводит также к резкому снижению чувствительности счетчика. На рисунке 22 приведена кривая зависимости чувствительности счетчика в направлении, перпендикулярном продольной оси счетчика при обратной полярности питающего напряжения на счетчике. Положительный потенциал подавался на цилиндр-катод; а отрицательный — на нить-анод. Узкий пучок  $\gamma$ -лучей, полученный с помощью ранее описанного приспособления, передвигался перпендикулярно счетчику.

Из рисунка 22 видно, что наибольшая чувствительность счетчика достигается только в момент прохождения пучка  $\gamma$ -лучей над нитью и в непосредственной близости от нее. При прямой же полярности питающего напряжения получается кривая 2, нанесенная на том же рисунке прерывистой линией.

При обратной полярности питающего напряжения счетчик как бы вырывается из общего потока  $\gamma$ -квантов, падающих на поверхность счетчика, только узкий пучок, соответствующий сечению нити, поэтому скорость счета при одном и том же источнике излучения резко уменьшается (в 10—20 раз в зависимости от диаметра нити).

Надо отметить, что при изменении полярности на электродах счетчика меняется структура поля, значительно (на 50—100 в) повышается потенциал зажигания разряда в счет-

чике и ухудшаются счетные характеристики. Однако токовая характеристика имеет нормальный вид. У счетчика СТС-5, имевшего при прямом включении предельную

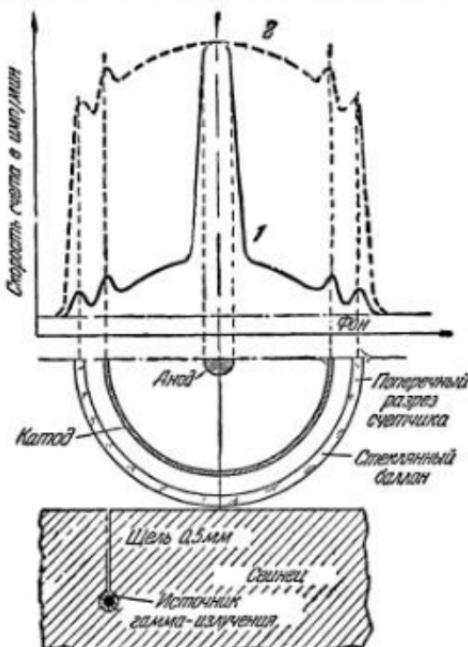


Рис. 22. Кривая относительной чувствительности счетчика перпендикулярно продольной оси при обратной полярности напряжения на электродах (кривая 1) и при прямой полярности (кривая 2).

мощность дозы около 1  $r/\text{час}$ , при обратном включении предельная мощность дозы повышается до 10  $r/\text{час}$ .

### Влияние температуры окружающей среды на работу галогенных счетчиков

Как мы видели, изменение рабочих свойств спиртового счетчика при изменении температуры окружающей среды происходит в основном за счет изменения давления паров гасящей примеси и главным образом за счет их конденсации. В самом деле, при наполнении счетчика парами спирта давление их при температуре 20° С ниже нуля не может превысить 3,3 мм рт. ст. Таким образом, нижний температурный предел счетчика определяется упругостью паров над жидккой фазой гасящей примеси.

Известно, что если в закрытый сосуд поместить немного жидкости, то при определенной температуре наступит так называемое равновесное состояние между жидкой и парообразной фазами, то есть количество испаряющихся с поверхности жидкости молекул будет равно количеству молекул, поглощаемых жидкостью из объема. В объеме установится определенное давление паров этой жидкости. Так, например, при температуре  $-50^{\circ}\text{C}$  давление паров брома над жидким бромом будет равно  $1,09\text{ mm rt.st.}$ , а при температуре  $-20^{\circ}\text{ C}$  —  $17,1\text{ mm rt. st.}$  Поэтому если счетчики наполнить парами брома при температуре  $+20^{\circ}\text{ C}$  давлением в  $1,09\text{ mm rt. st.}$ , то до температуры  $-50^{\circ}\text{ C}$  пары брома будут подчиняться основному закону состояния газов.

При небольших объемах счетчика это приводит к небольшому изменению давления гасящей примеси, а следовательно, к незначительным изменениям характеристики счетчика — счетчик практически продолжает действовать.

При дальнейшем понижении температуры окружающего воздуха бром начнет сжижаться и давление его паров в счетчике начнет быстро падать, что приводит к резкому ухудшению характеристик счетчика и счетчик становится неработоспособным. Так, счетчик СТС-5 работает в диапазоне температур от  $-40^{\circ}\text{ C}$  до  $+50^{\circ}\text{ C}$ .

При наполнении счетчика хлором диапазон температур расширяется, так как тому же самому давлению в  $1,09\text{ mm rt. st.}$  соответствует температура около  $-100^{\circ}\text{ C}$ .

Такой широкий температурный диапазон работы галогенных счетчиков позволяет применять их в приборах для геологоразведочных работ.

### Эффективность счетчиков

Как мы уже знаем, проникающая способность  $\gamma$ -лучей очень велика. А это означает, что  $\gamma$ -кванты, проходя через вещество, очень мало с ним взаимодействуют, то есть вещество мало поглощает их. Поэтому при прохождении  $\gamma$ -кванта через газоразрядный промежуток счетчика мало вероятно, что квант ионизирует газ и оставит после себя хотя бы одну пару ионов.

Обнаружение  $\gamma$ -лучей газоразрядным счетчиком основано главным образом на подсчете числа электронов, вышедших под действием  $\gamma$ -кванта из стенок счетчика. В за-

висимости от энергии  $\gamma$ -излучения («жесткости») выход электронов будет обусловлен преобладающим одним из трех видов взаимодействия, описанных на страницах 20 и 21. Так, под действием излучения относительно малых энергий электроны выходят в основном за счет фотоэлектрического поглощения.

С увеличением энергии излучения число фотоэлектронов, приходящихся на один падающий квант, будет уменьшаться, приближаясь к нулю. При энергии падающих квантов, равной примерно 1 миллиону электрон-вольт, фотоэлектроны практически выходить не будут. Но при энергиях от 0,8 эВ до нескольких миллионов электрон-вольт выход электронов будет в основном обусловливаться наличием комптон-эффекта. При очень «жестких»  $\gamma$ -лучах преобладающую роль играет эффект образования пар.

Из всего числа образовавшихся в стенах счетчика электронов счетчик сосчитает только часть электронов, так как часть их не попадет в рабочий объем счетчика, часть поглотится в самих стенах катода.

Следовательно, из всего числа падающих на поверхность счетчика  $\gamma$ -квантов только очень малая часть их будет сосчитана счетчиком. Коэффициент полезного действия (эффективность счетчика) невелик и зависит от длины волны излучения и материала катода. Так, например, для счетчика с катодом из нержавеющей стали эффективность счетчика к  $\gamma$ -излучению с энергией 1,25 млн. эВ составляет всего 0,0075 (коэффициент полезного действия около 0,75%).

Коэффициент полезного действия газоразрядных счетчиков для  $\beta$ -частиц достигает 95%, так как почти каждая  $\beta$ -частица, попавшая внутрь счетчика, вызовет в нем разряд, то есть будет сосчитана.

Было опробовано много способов повышения коэффициента полезного действия гамма-счетчиков. Наиболее распространенным методом является увеличение удельной площади поверхности катода, то есть площади катода, приходящейся на единицу рабочего объема счетчика. В этом случае число вторичных электронов, попадающих в рабочий объем, увеличивается. Увеличение поверхности можно произвести за счет нарезки резьбы на внутренней поверхности цилиндрического катода, за счет изготовления катода в виде спирали, за счет применения сетчатых катодов и т. п. Некоторые из указанных приемов дают увеличение коэффициента полезного действия раза в два и более.

## В. КОНСТРУКЦИИ СЧЕТЧИКОВ

### Устройство гамма-счетчиков

За свое полувековое существование конструкции газоразрядных счетчиков претерпевали самые разнообразные изменения. По назначению самогасящиеся счетчики можно разделить на несколько групп: гамма-счетчики, счетчики «жестких»  $\beta$ -частиц или так называемые бета-гамма-счетчики, счетчики для «мягких»  $\beta$ -частиц, которые в своей конструкции должны иметь окно для пропуска мягких  $\beta$ -частиц внутрь счетчика, счетчики фотонов (квантов света) и т. п.

По своей конструкции гамма-счетчики весьма просты. Конструкцию одного из спиртовых гамма-счетчиков мы видели на рис. 12. Другой тип гамма-счетчика с галогенным



Рис. 23. Схематический разрез счетчика СТС-2.

наполнением показан на рисунке 23. В нем тонкостенный (0,2 мм) цилиндр — катод из нержавеющей стали на стальных распорных пластинчатых пружинах вставляется в стеклянный баллон. От цилиндра с помощью молибденовой проволоки делается вывод наружу. Нить укрепляется так же, как и на рисунке 12, только в этом случае нить изготавливается из ковара. Счетчик наполняется галогенной смесью (неон — аргон — бром) и может применяться как в импульсном (счетном), так и в токовом режимах. Такой счетчик относится к серии СТС (стальной счетчик).

В импульсном режиме счетчик имеет очень долгий срок службы. По техническим условиям им определено отсчитывать миллиард ( $10^9$ ) импульсов без заметного ухудшения счетной характеристики. Как уже указывалось, одно из преимуществ галогенных счетчиков состоит в их работоспособности при больших скоростях счета. Счетчики серии

СТС допускают работу при скоростях счета сто тысяч ( $10^5$ ) импульсов в минуту и выше; при этом сохраняется пропорциональность между интенсивностью облучения и скоростью счета вплоть до двухсот тысяч импульсов в минуту.

Такой скорости счета соответствует мощность дозы около 0,25  $r/\text{час}$ . Величина мощности дозы, до которой скорость счета остается прямо пропорциональна ей, так же как и величина предельной мощности дозы работы счетчика в токовом режиме, зависит от геометрических размеров. Чем меньше диаметр катода и рабочая длина нити, тем больше предельная мощность дозы и тем дольше сохраняется пропорциональность между скоростью счета и мощностью дозы излучения.

При выборе рабочей длины в счетчике руководствуются соотношением: рабочая длина нити не должна быть меньше удвоенного диаметра катода. При меньшей рабочей длине нити счетчик тоже работает, но величина потенциала зажигания разряда в нем резко возрастает. Так, например, для счетчика с диаметром катода 10  $\text{мм}$  при рабочей длине, равной 5 диаметрам (50  $\text{мм}$ ), при определенном газовом наполнении напряжение начала счета составляет 400 в, при рабочей длине, равной двум диаметрам катода — 405 в, при рабочей длине, равной одному диаметру катода — 450 в, а при рабочей длине нити, равной 0,5 диаметра катода, потенциал зажигания возрастает до 500 в.

При уменьшении рабочей длины нити уменьшается также протяженность плато счетной характеристики. Так, для счетчиков диаметром 6  $\text{мм}$  при уменьшении рабочей длины нити от семи диаметров катода до одного протяженность плато уменьшается с 200 до 30 в.

Поэтому из всех счетчиков, выпускаемых советской промышленностью, только опытные образцы гамма-счетчиков типа СИ 2БГ имеют рабочую длину нити меньше одного диаметра.

С уменьшением рабочей длины желательно увеличивать диаметр «охраных» соломок, так как в этом случае на общую скорость счета приходится меньшее количество импульсов, обусловленных концевыми участками счетчика (рис. 21). Например, для счетчика с диаметром катода 6  $\text{мм}$ , диаметром охранной «соломки» 1,5  $\text{мм}$  и рабочей длине нити, равной одному диаметру катода (6  $\text{мм}$ ), скорость счета равна 480 имп/мин, а для такого же счетчика, но с диаметром «соломки» 4  $\text{мм}$  от того же источника и при неизменном расположении

его относительно счетчика скорость счета составляет 280 имп/мин.

У счетчиков с меньшим диаметром охранной «соломки» наклон плато значительно больше, чем у счетчиков с большим диаметром соломки. Это объясняется увеличением рабочего объема счетчика с увеличением напряжения на счетчике за счет «раздутия» электрического поля, т. е. выхода его за пределы катода.

### Устройство счетчиков бета-частиц

Как уже говорилось, конструкция счетчиков  $\beta$ -частиц должна обеспечить попадание их внутрь счетчика. По конструкции счетчики  $\beta$ -частиц делятся на два вида: цилиндрический счетчик с толщиной стенок, допускающей прохождение  $\beta$ -частиц относительно большой энергии («жестких»  $\beta$ -частиц), и торцевой счетчик, представляющий собою

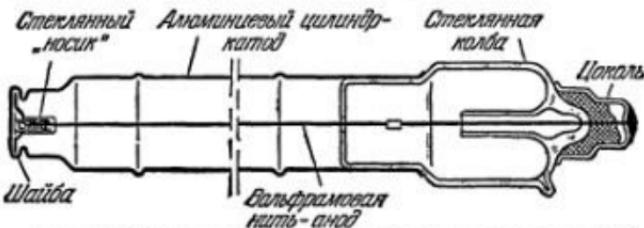


Рис. 24. Схематический разрез бета-счетчика типа АС.

стеклянный цилиндр, торцевая часть которого закрыта тонким листком слюды, пропускающим  $\beta$ -частицы относительно малой энергии.

Из числа цилиндрических бета-счетчиков советская промышленность серийно выпускает четыре типа счетчиков: СТС-5 (рис. 18), СТС-6, АС-1 и АС-2 (рис. 24).

Конструкцию счетчика СТС-5 и его изготовление мы опи- сали на странице 63. Счетчик СТС-6 отличается от предыду- щего только геометрическими размерами (см. таблицу на стр. 80).

Толщину стенки в цилиндрических счетчиках или окна в торцевых принято выражать не в линейных единицах, а в весе материала, приходящемся на один квадратный сантиметр. Так, у счетчиков СТС-5 и СТС-6 толщина стенки стального цилиндра отвечает 45 миллиграммам на квадратный сантиметр, что составляет примерно около 50  $\mu$ . Для

измерения мягкого  $\beta$ -излучения желательно иметь стенки значительно тоньше, но дальнейшее уменьшение их делает счетчик механически непрочным.

Счетчики типа СТС-5 и СТС-6 могут применяться для измерения как жесткого  $\beta$ -излучения, так и  $\gamma$ -излучения. Они имеют хорошие счетные характеристики. Указанная в таблице протяженность плато в 80 в на практике у большинства счетчиков всегда превышается и достигает 200 в.

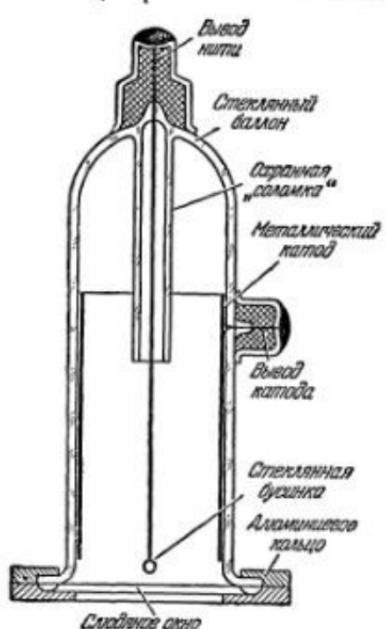


Рис. 25. Схематический разрез торцевого бета-счетчика типа МСТ-17.

подается непосредственно на цилиндр. Счетчики наполняются газовой смесью, содержащей органические пары. Параметры счетчиков типа АС-1 и АС-2 (ранее они назывались Б-1 и Б-2) приведены в таблице на стр. 80.

Торцевые счетчики могут немного отличаться один от другого по конструктивным деталям, но в целом их устройство хорошо иллюстрируется рисунком 25, на котором представлен схематический разрез торцевого счетчика МСТ-17. На торец стеклянной цилиндрической трубки, на развернутые его края, специальной стеклянной пастой приваривается тонкий слюдяной листок. Толщина слюдяного листка достигает  $3-5 \text{ мг}/\text{см}^2$ . Затем на внутреннюю поверхность

Счетчики типа АС (рис. 24) представляют собой штампованный глухой алюминиевый цилиндр с толщиной стенки 0,13 мм (что составляет около  $35 \text{ мг}/\text{см}^2$ ). На поверхности его для прочности нанесены ребра жесткости. В глухой конец цилиндра вставлена и завальцована алюминиевая шайба со стеклянным «носиком», в котором размещается спиральная пружина, предназначенная для натяжения нити. Для откачки и наполнения этих счетчиков алюминиевые цилиндры с помощью карбонильного клея соединяют со стеклянной колбой, как показано на рисунке 24. Через стеклянную колбу выводится наружу.

Отрицательное напряжение

стеклянной трубки либо методом испарения металла в вакууме, либо химическим путем наносят медный катод, от которого через стеклянную стенку трубы делается вывод.

В некоторых типах торцевых счетчиков катод — стальной цилиндр — непосредственно вставляется на пластинчатых пружинах в стеклянный баллон. По оси цилиндра проходит нить, закрепленная с одного конца в стеклянном баллоне счетчика. На другом конце нити наплавляется маленькая стеклянная бусинка. Счетчик МСТ-17 наполняется газовой смесью, содержащей органические пары.

Советской промышленностью освоен выпуск малочувствительных бета-гамма-счетчиков, используемых для работы в токовом режиме с верхним пределом измеряемой мощности дозы в 5, 10, 50, 100 и 300 р/час. Устройство одного из

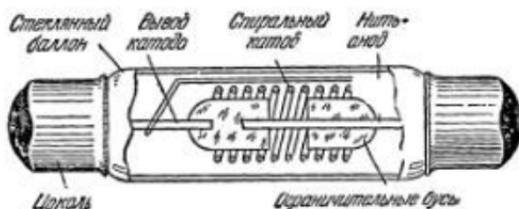


Рис. 26. Схематический разрез малочувствительного бета-гамма-счетчика типа СИ-2БГ.

таких счетчиков показано на рисунке 26, на котором изображен схематический разрез опытного счетчика типа СИ-2БГ. Катоды таких счетчиков представляют собою цилиндрические спирали, изготовленные из никелевой или никромовой проволоки.

Стеклянный баллон счетчика изготавливается либо из тонкостенного (0,1 мм) стекла, либо из толстого стекла. В последнем случае стекло баллона утоньшается над рабочей частью нити до указанной толщины для возможности прохождения  $\beta$ -частиц. Счетчики такого типа наполняются галогенной смесью, и имеют достаточно низкое рабочее напряжение 370—400 в и широкий температурный диапазон работы (от  $-40^{\circ}$  до  $+50^{\circ}$  С).

В заключение этого раздела мы приводим таблицу параметров некоторых счетчиков  $\beta$ -и  $\gamma$ -излучения, выпускаемых советской промышленностью.

**Параметры счетчиков бета-гамма-излучения**

Габаритные размеры диаметр мм	длина мм	Temperatura di- pazón raboty, °C		Cokr cryklu s umn.	Bigr nayepere- nogo nayayenii % 100 a	Torguleniye okna E M2/Cm2	Dlinnaya sanya Ljuminescencija ms
		ot	do				
СТС-1	16	90	380	80	12,5	$1 \cdot 10^8$	гамма
СТС-2	23	180	390	80	12,5	$1 \cdot 10^8$	гамма
СТС-3	23	260	380	80	12,5	$1 \cdot 10^8$	гамма
СТС-5	10*)	110	400	80	12,5	$1 \cdot 10^8$	бета-гамма
СТС-6	18*)	197	400	80	12,5	$1 \cdot 10^8$	бета-гамма
СТС-8	23	215	380	80	12,5	$1 \cdot 10^8$	бета-гамма
МС	от 152 до 31	от 100 до 360	850	200	10	$1 \cdot 10^8$	гамма
AC-1	12*)	128	850	80	18	+35	бета-гамма
AC-2	20*)	156	850	100	18	+35	бета-гамма
MCT-17	20**)		1700	150	5	-30	бета
						$6 \cdot 10^7$	

\*) Диаметр катода. \*\*) Диаметр торцевого окна.

#### IV. ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ САМОГАСЯЩИХСЯ СЧЕТЧИКОВ В НАРОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

С тех пор, как была открыта радиоактивность, ученые начали применять ее в науке и технике. Но дороговизна радия препятствовала широкому внедрению радиоактивности в технику. Открытие искусственной радиоактивности и возможность сравнительно дешево получать радиоактивные изотопы дали возможность развернуть работы по их применению в промышленности и народном хозяйстве.

В директивах XX съезда Коммунистической партии Советского Союза особо подчеркивается необходимость всеобщего развития работ по использованию радиоактивных излучений для управления производственными процессами и автоматического регулирования этих процессов.

Использование радиоактивных излучений для автоматизации производственных процессов, автоматического контроля этих процессов, применения в измерительной технике создает целый ряд преимуществ. К ним следует отнести бесконтактность измерений, отсутствие влияния внешних условий на источник излучения, отсутствие взаимного влияния контролируемой среды и самого измерительного устройства, большая стабильность и большой срок службы источников излучения, быстродействие, безинерционность срабатывания системы и т. п.

В целом ряде областей производства только с применением искусственной радиоактивности появилась возможность контролировать производственные процессы без их нарушения. К таким процессам производства можно отнести измерение толщины немагнитных покрытий на немагнитной основе, бесконтактное измерение толщины и веса движущегося материала — бумаги, стального проката, текстиля и его полуфабрикатов, пластмасс и т. п., обнаружения места повреждения подземных коммуникаций, измерение плотности взвесей, движущихся по трубопроводам и т. д.

С помощью искусственной радиоактивности можно непрерывно контролировать внутреннюю коррозию в рабочих объемах, зондировать типы пластов в нефтяной буревой скважине, определять глубину и толщину залегания рудного пласта при геологической разведке, искать радиоактивные руды, измерять плотность почвы.

Некоторые процессы производства контролировались автоматически и раньше, однако применение радиоактивных изотопов позволило это сделать значительно проще и удобнее.

Во многих случаях приемником излучений в применяющейся аппаратуре используются газоразрядные счетчики, обладающие огромной чувствительностью. В настоящем разделе мы познакомимся с некоторыми приборами и приспособлениями, используемыми в советской промышленности, в которых в качестве приемников радиоактивного излучения применяются газоразрядные счетчики.

### Галогенные счетчики помогают измерять плотность жидких продуктов

В нефтяной промышленности крупные магистральные нефтепроводы используются для транспортировки не только нефти, но и продуктов, получаемых на нефтеперегонных заводах — керосина, бензина, лигроина и др. При этом очередной продукт пускается по трубопроводу непосредственно за предыдущим.

На приемном пункте необходимо во время направить тот или иной продукт в соответствующий резервуар. Существующие приборы, работающие на принципе изменения диэлектрической проницаемости продукта, давали большие погрешности.

На помощь пришли радиоактивность и газоразрядные счетчики. Ученые и инженеры разработали прибор для измерения плотности жидкости, с помощью которого, не нарушая течения жидкости, измеряют ее плотность. По плотности и судят о характере продукта.

Действие этого прибора основано на ослаблении интенсивности  $\gamma$ -излучения исследуемой средой. Прибор состоит из двух блоков (рис. 27). Первый блок представляет собой колено трубопровода, которое можно смонтировать в магистраль. На одном конце колена укреплен источник  $\gamma$ -излучения (радиоактивный изотоп кобальт-60) в свинцовой защите, на противоположном торце — коробка с первой группой галогенных счетчиков, соединенных между собой параллельно.

Различные по плотности жидкости, протекая по колену, меняют интенсивность потока  $\gamma$ -лучей, падающего на счетчики. Изменение интенсивности меняет скорость счета счет-

чиков первой группы. Импульсы от первой группы счетчиков по кабелю длиной 50—100 метров поступают на второй блок в суммирующее устройство.

Во втором блоке расположена вторая группа галогенных счетчиков, «освещаемых» своим источником  $\gamma$ -излучения (кобальт-60) через компенсационный клин. Импульсы от этой группы счетчиков поступают также в суммирующее устройство. В данный момент электрические сигналы от первой и второй группы, поступающие в суммирующее устройство, будут разные.

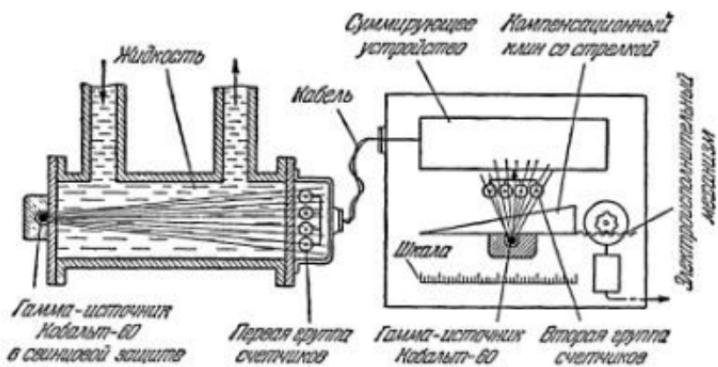


Рис. 27. Схема устройства прибора для измерения плотности жидкости.

Разность электрических сигналов усиливается и подается на электрический исполнительный механизм, который перемещает компенсационный клин, ослабляя или усиливая сигналы второй группы счетчиков. Клин будет двигаться до тех пор, пока сигналы от второй группы счетчиков не будут равны сигналам от первой. С клином связана стрелка, перемещающаяся вдоль шкалы, на которой нанесены деления в единицах плотности. В блоке предусмотрено приспособление для передачи сигналов на самопищущий прибор.

Таким образом, диспетчер может следить за течением различных жидкостей по трубопроводам, находясь в диспетчерской на значительном расстоянии, наблюдая запись на ленте самопищущего прибора или за шкалой плотномера.

### Измерение уровня жидкости в закрытых сосудах

Во многих областях промышленности необходимо замерять уровень жидкостей в закрытых сосудах. В нефтяной промышленности — уровень заполнения цистерн, резер-

вуаров с нефтепродуктами, в пивоваренной и молочной промышленности — уровень пива и молока в цистернах, в металлургии — уровень расплавленного металла и т. п. Наконец, в некоторых отраслях промышленности необходимо замерять уровень сыпучих тел в закрытых сосудах. Для этого разработано несколько уровнемеров. Они делятся на два типа: приборы, позволяющие измерять уровень жидкости в сосуде, и приборы, ведущие автоматический контроль уровня жидкости в сосуде.

На международной выставке по мирному использованию атомной энергии демонстрировался небольшой прибор,

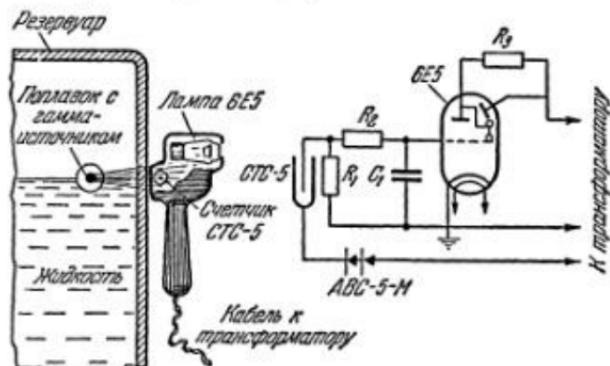


Рис. 28. Электрическая схема и принцип работы радиоактивного индикатора уровня.

определяющий уровень жидкости в закрытом сосуде (рис. 28). Этот прибор разработан советскими инженерами.

Для определения уровня жидкости в сосуд помещается поплавок с радиоактивным источником кобальт-60. В приборе использована известная индикаторная радиолампа 6Е5, обычно применяемая для настройки радиоприемников. Лампа представляет собой двойной триод. В нижней части расположены электроды обычного триода: катод, управляющая сетка и анод. В верхней части размещается никелевый конический экран, покрытый тонким слоем виллемита, светящегося под действием бомбардировки электронами. По оси экрана размещается оксидный катод, около которого расположен управляющий электрод в виде тонкой никелевой пластинки.

Если на экран подать положительный потенциал, а управляющий электрод оставить пока без потенциала, то под

действием электронов, испускаемых катодом, экран светится равномерным зеленоватым светом. Если теперь на управляющий электрод подать отрицательный потенциал, то пролетающие мимо него электроны будут отклоняться, и на экране образуется теневой сектор.

Работа уровнемера РИУ-3 сводится к следующему. При отсутствии сигналов от газоразрядного счетчика на управляющий электрод лампы 6Е5 подан наибольший отрицательный потенциал и на экране будет виден теневой сектор.

Прибор перемещается вдоль стенки сосуда с жидкостью до тех пор, пока теневой сектор лампы 6Е5 совершенно не исчезнет. Это соответствует тому, что от газоразрядного счетчика идет наибольшее число импульсов в минуту, то есть счетчик поровнялся с источником излучения, плавающим на поверхности жидкости.

Существуют и другие уровнемеры, не требующие введения источника внутрь объекта. В научно-исследовательском институте «Теплоприбор» разработана установка для измерения уровня жидких и сыпучих тел, представляющая собой комплект из двух колонок высотой до 6 метров. В одной колонке на гайке ходового винта с помощью синхронного мотора перемещается источник  $\gamma$ -излучения в другой — синхронно ему — газоразрядный счетчик. Колонки устанавливаются около резервуара, где требуется измерить уровень жидкости, таким образом, чтобы  $\gamma$ -лучи проникали через резервуар и попадали на счетчик. В этой установке применяется галогенный  $\gamma$ -счетчик и источник  $\gamma$ -лучей кобальт-60.

Если требуется, например, определить момент окончания заливки резервуара жидким продуктом, применяются неподвижные сигнализаторы (рис. 29), измеряющие не положение уровня, а толщину слоя жидкости.

Сигнализаторы, работающие на принципе уровнемеров, нашли широкое применение не только для измерения уровней жидких тел. В настоящее время они применяются во многих областях народного хозяйства. Радиоактивный «глаз» следит за многими процессами производства.

В металлургической промышленности при выплавке чугуна в доменную печь загружается определенное количество руды и топлива. Для этого исходными материалами предварительно наполняются специальные бункеры до установленных пределов. Но как узнать, достаточно ли загружен бункер? И на этот раз на помощь пришел гамма-счетчик. Уровень загрузки бункеров автоматически быстро

и точно указывает прибор, названный гамма-индикатором. Этот прибор разработали ученые ленинградского института «Гипрошахт» и Центральной лабораторией Института черных металлов. На рисунке 30 показана принципиальная

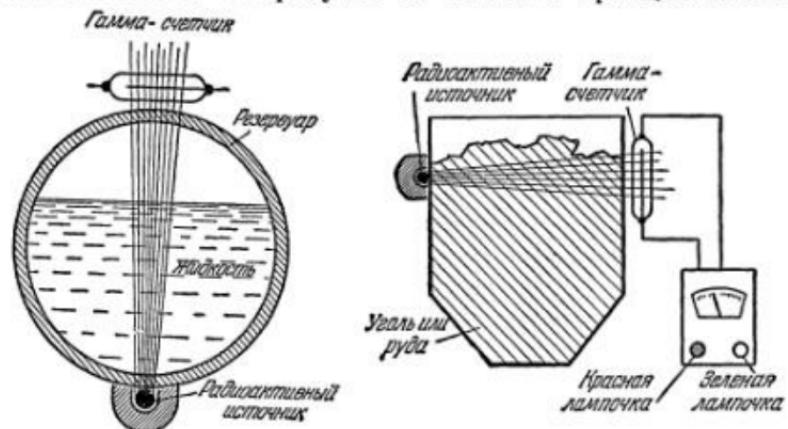


Рис. 29. Неподвижный сигнализатор заполнения.

Рис. 30. Схема прибора для измерения уровня руды в бункере.

схема такого прибора. Приборы такого же типа с успехом применяются в каменноугольной промышленности для

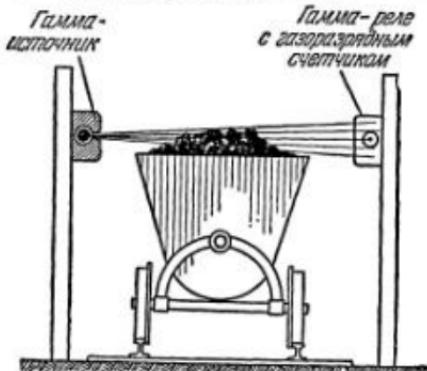


Рис. 31. Применение гамма-реле для контроля заполнения вагонеток углем.

контроля полноты загрузки вагонеток углем и подсчета количества их (рис. 31)\*).

\*.) У читателя может возникнуть вопрос: а почему бы в этом и подобных случаях не применить «электрический глаз» — фотоэлемент?

Радиоактивный контроль полного заполнения тары продуктом применяется и во многих других отраслях народного хозяйства.

Представим себе конвейер, по которому движутся картонные коробочки, заполненные порошком какао. Необходимо проконтролировать и своевременно отделить от общей массы неполностью заполненную коробочку. Для этого с одной стороны конвейера устанавливается радиоактивный источник на такой высоте, чтобы лучи его захватывали верхнюю часть коробочки. По другую сторону конвейера располагается газоразрядный счетчик.

Как только луч перекроется неполностью заполненной коробочкой, импульс тока от счетчика будет значительно больше, чем при прохождении заполненной коробочки. Этот импульс заставит сработать реле, приводящее в действие сбрасывающий механизм. Поэтому пустые или неполностью заполненные коробочки автоматически, без участия человека, не попадают в готовую продукцию вместе с полными.

### Газоразрядный счетчик измеряет толщину материала

Во многих отраслях промышленности происходит процесс изготовления листового материала.

В цехах металлургических заводов на мощных прокатных станах изготавливаются стальные листы, ленты и полосы различных толщин. Высокое качество проката определяется точностью заданной толщины листа. От этого в значительной мере зависит и экономный расход металла.

В бумажной промышленности непрерывным потоком движется бумага, в текстильной промышленности текут бесконечные реки различных тканей. Листовой материал изготавляет промышленность электроизоляционных материалов (различные пластмассы, органическое стекло, эбонит и др.). И всюду необходимо замерять толщину или вес материала. Для этого содержалась огромная армия контролеров, которые беспрестанно микрометрами или специаль-

---

Ведь для питания электрической схемы счетчика радиоактивных излучений все равно нужно подводить электроэнергию. Значит, можно питать и источник света и усилительную схему фотоэлемента. Не проще ли это? Ваши сомнения разрешатся, если я напомню вам, что большое количество пыли, висящее в воздухе в тоннелях и бункерах, делает невозможным применение фотоэлектрических схем с источниками света. (Прим. ред.).

ными толщиномерами контролировали качество выпускаемой продукции.

В настоящее время на смену людям — контролерам — пришли точные, безошибочные, автоматические радиоактивные контролеры. Это привело к значительному ускорению технологических процессов и к огромной экономии средств.

Метод непрерывного измерения толщины листового материала основан на изменении интенсивности излучения в зависимости от изменения толщины материала.

Рисунок 32 дает наглядное представление об этом методе. Под движущейся лентой проката помещается радио-

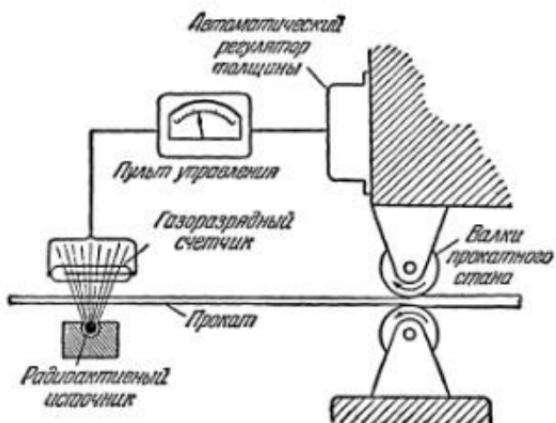


Рис. 32. Схема автоматического измерения и регулировки толщины листовой стали при прокатке.

активный источник излучения. Сверху над источником расположен газоразрядный счетчик. Как только толщина прокатываемого материала изменится, сразу же изменится средний ток счетчика или скорость счета. Усилитель, соединенный со счетчиком, передает сигнал о нарушении допуска на пульт управления. Отсюда автоматически производится соответствующее изменение режима работы прокатного стана.

Приборы подобного типа применяются в бумажной, резиновой и кожевенной промышленности.

Так, для контроля толщины кож по поглощению в них  $\gamma$ -излучения разработан и успешно применяется прибор, в котором используется галогенный счетчик, работающий в

токовом режиме. В приборе применена упрощенная компенсационная схема, в которой компенсирующий источник располагается на стрелке указывающего прибора.

Для измерения толщины тонких покрытий применяются толщиномеры, работающие на принципе обратного рассеяния  $\beta$ -частиц.

Известно, что всякое вещество не только пропускает  $\beta$ -частицы, но и частично отражает их (рассеивает). Отражение происходит не только поверхностью, но и внутренними слоями вещества. Поэтому с увеличением толщины материала количество отраженных лучей увеличивается.

Однако из глубоколежащих отражающих слоев  $\beta$ -частицы уже не способны выйти наружу. При этом с дальней-

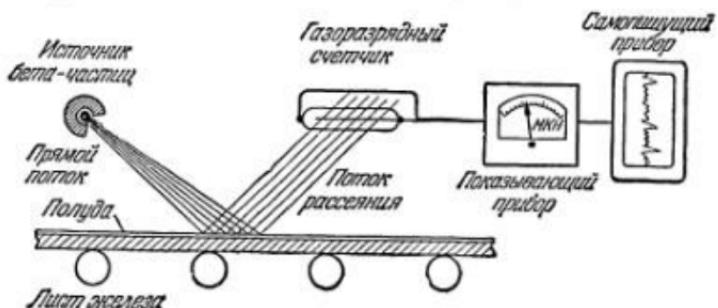


Рис. 33. Схема измерения толщины полуды при изготовлении белой жести.

шим увеличением толщины количество отраженных частиц остается постоянным. Интенсивность рассеяния  $\beta$ -частиц различна для различных материалов и возрастает с ростом атомного номера вещества. Поэтому, если на подложку — скажем, лист железа — нанести тонкий слой олова (полуды), то толщину этого слоя можно измерить вследствие того, что интенсивность отраженного потока от чистого железа будет меньше, чем от луженого. Поэтому с увеличением толщины полуды интенсивность рассеяния возрастает.

Для измерения интенсивности отраженного потока на его пути помещается газоразрядный счетчик (рис. 33), который и зарегистрирует все изменения интенсивности, определяемые изменением толщины полуды. Такие приборы применяются для контроля процесса изготовления белой жести.

Неодинаковая способность вещества рассеивать  $\beta$ - и  $\gamma$ -лучи используется в геологоразведывательных работах для обнаружения и измерения толщины рудного пласта. Для этого в буровую скважину на тросе опускают источник  $\gamma$ -излучения, на некотором расстоянии от которого опускается газоразрядный счетчик, защищенный от прямых  $\gamma$ -лучей.

Гамма-лучи, попадая в толщину различных пластов породы, рассеиваются по-разному. Наиболее плотные пласты, содержащие металлы, рассеивают большее количество  $\gamma$ -лучей. Это рассеянное излучение измеряется газоразрядным счетчиком, и самопищащий прибор на поверхности земли зашипет на ленту все изменения в плотности породы. По наибольшей интенсивности судят о глубине залегания рудных пластов и их толще.

### Газоразрядный счетчик считает штучные изделия на конвейере

При фасовке папирос, круп, конфет, печенья, тюбиков зубной пасты, флаконов с духами и других продуктов в различных областях промышленности применяется конвейерный способ производства. Для подсчета готовой продукции пользуются различными приборами, автоматически регистрирующими число изготовленных изделий. Если конвейер движется медленно, порядка нескольких десятков изделий в минуту, применяют фотоэлементы, на которые падает луч света.

Фотоэлемент регистрирует пересечение изделием светового луча. Однако если скорость движения конвейера составляет от 100 до 10 000 предметов в минуту, применяют газоразрядный счетчик, так как этот прибор работает практически безинерционно. Для этого используют либо отдельный радиоактивный источник, либо вводят в маркировку изделий быстрораспадающийся изотоп радиоактивного вещества, и счетчик улавливает его излучение.

### Газоразрядный счетчик сортирует руду

При добыче радиоактивных руд газоразрядный счетчик применяется для автоматического отбора руды от пустой породы. На рисунке 34 изображена схема автоматической сортировки руды. На медленно движущуюся ленту транс-

портера подаются кусочки мелко раздробленной руды. Над лентой транспортера устанавливается газоразрядный счетчик, защищенный свинцовым экраном.

Как только под счетчиком проходит кусочек руды, содержащий уран или торий, в счетчике возникает импульс

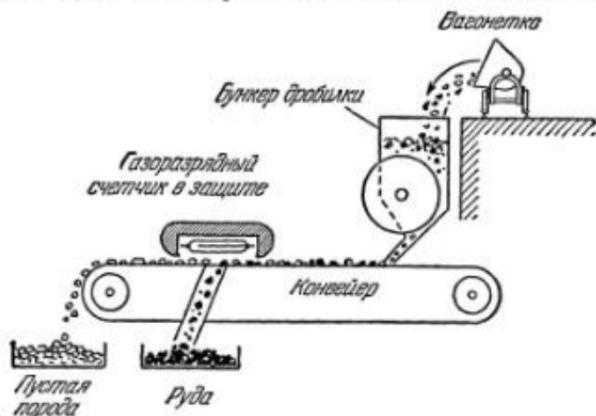


Рис. 34. Схема автоматической сортировки радиоактивной руды.

тока, который заставляет срабатывать сбрасывающее устройство, и кусочек руды сбрасывается с конвейера. А пустая порода проходит мимо счетчика, попадая в отвал.

### Разведчики радиоактивных руд

Из большого числа приборов, применяемых в геологоразведке для обнаружения радиоактивных руд, рассмотрим простейшие типы приборов, указывающих на присутствие радиоактивного излучения. Такие приборы называют индикаторами. Таким образом, индикаторы представляют собой простейшие полевые приборы, предназначенные для обнаружения  $\gamma$ -излучения и суммарного  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения с мощностями доз порядка 0,02—0,8  $r/\text{час}$ .

Схема одного из простейших индикаторов показана на рисунке 35. Работа его сводится к следующему. При отсутствии  $\gamma$ -излучения почти все напряжение приложено к электродам счетчика, так как емкость счетчика во много раз меньше, чем суммарная емкость неоновой лампочки (МН-5) и конденсатора  $C_2$ . Как только на счетчик попадают  $\gamma$ - или  $\beta$ -лучи, в счетчике возникает импульс разряда, вследствие чего заряжается накопительный конденсатор.

Величина емкости конденсатора подобрана таким образом, что через определенное число импульсов от счетчика напряжение не поднимается до величины, равной напряжению зажигания неоновой лампочки, и лампа вспыхивает.

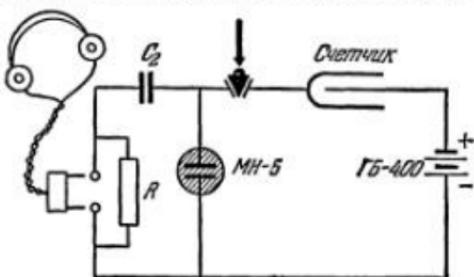


Рис. 35. Схема портативного индикатора радиоактивного излучения.

Хивает. При зажигании лампы конденсатор разряжается, а в телефоне слышится щелчок. Чем выше интенсивность излучения, тем быстрее будет заряжаться конденсатор  $C_2$  и тем чаще будет вспыхивать неоновая лампочка и чаще будут слышны щелчки в телефоне.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**М**ы познакомились с одним из очень интересных современных газоразрядных приборов — счетчиком заряженных частиц. На нескольких примерах мы рассмотрели области его применения.

В наше время человечество все более и более проникает в неизведанные глубины атома, познавая законы строения окружающей нас материи, извлекая из нее неисчерпаемые запасы внутридядерной энергии и ставя их на службу человечеству.

Одним из орудий познания сложного строения материи является газоразрядный счетчик.

Ученым еще многое предстоит сделать, прежде чем механизм работы газоразрядного счетчика будет вполне ясным и понятным. Но и сейчас использование газового разряда для измерения проникающих излучений таит в себе огромные перспективы.

В этой брошюре мы не смогли рассказать о счетчиках нейтронов и о счетчиках световых квантов, которые также

находят все более широкое применение в народном хозяйстве. Мы не остановились на счетчиках космических лучей.

В наш век, когда советские ученые открыли двери в неизведанные космические пространства, послав туда первых разведчиков, наука об ионизационных методах изучения проникающих излучений поднимается на еще большую высоту.

Первые искусственные спутники Земли были снабжены газоразрядными счетчиками, которые рассказывали нам о силе космических лучей и о рентгеновском излучении Солнца.

И недалеко то время, когда человечество, поставив себе на службу энергию атомного ядра, проникнет в далекие неизведанные звездные миры.



## Условные обозначения

$\text{\AA}$  — ангстрем

$v$  — вольт

$v/cm$  — вольт на сантиметр

$imp/min$  — импульсов в минуту

$km/sec$  — километров в секунду

$mg$  — миллиграмм

$Mg/cm^2$  — мегом

$mm$  — миллиметр

$mm$  рт. ст. — миллиметров ртутного столба

$m/sec$  — метров в секунду

$Mev$  — миллионов электрон-вольт

$\mu$  — микрон

$r$  — рентген

$r/час$  — рентген в час

$cm$  — сантиметр

$ev$  — электрон-вольт

---

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение . . . . .	3
I. Строение вещества . . . . .	4
II. Методы обнаружения невидимых лучей . . . . .	23
III. Ионизационные газоразрядные счетчики . . . . .	39
A. Высоковольтные самогасящиеся счетчики . . . . .	39
B. Низковольтные галогенные самогасящиеся счетчики . . . . .	57
B. Конструкции счетчиков . . . . .	75
IV. Применение газоразрядных самогасящихся счетчиков в на- родном хозяйстве . . . . .	81
Заключение . . . . .	92

---

*Анатолий Васильевич Александров.*  
*Счетчики невидимых частиц и излучений.*

Редактор С. А. Шорыгин.  
Техн. редактор Н. Я. Мурашова.  
Корректор В. А. Рокутова.

---

Сдано в набор 7/VII 1958 г.  
Подписано к печати 4/X 1958 г.  
Бумага 84 × 108 $\frac{1}{2}$ з.  
Физ. печ. л. 3,0. Условн. печ. л. 4,92.  
Уч.-изд. л. 4,88. Тираж 50 000. Т-08270.  
Цена книги 1 р. 45 к. Заказ № 2062.

---

Государственное издательство  
технико-теоретической литературы.  
Москва, В-71, Ленинский проспект, 15.

---

Первая Образцовая типография  
имени А. А. Жданова  
Московского городского Совнархоза.  
Москва, Ж-54, Валовая, 28.



Цена 1 р. 45 к.

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

---

---

НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ БИБЛИОТЕКА

- Вып. 72. В. А. ЛЕШКОВЦЕВ. Атомная энергия.  
Вып. 73. А. Ф. ПЛОНСКИЙ. Радио.  
Вып. 74. В. А. ПАРФЕНОВ. Редкие металлы.  
Вып. 75. Ф. М. ИВАНОВ и Г. В. БЯЛОЖЕСКИЙ. Искус-  
ственные камни.  
Вып. 76. Л. К. БАЕВ. Вертолет.  
Вып. 77. Ю. М. БОГДАНОВ. Наука о прочности.  
Вып. 78. М. В. БЕЛЯКОВ. Атмосфера.  
Вып. 79. С. МОРОЗОВ. Фотография в науке.  
Вып. 80. И. А. НАЛИНИН. Катализ.  
Вып. 81. К. П. БЕЛОВ. Что такое магнетизм.  
Вып. 82. И. Л. ОРЕСТОВ. Холодный свет.  
Вып. 83. А. А. ШТЕРНФЕЛЬД. Межпланетные полеты.  
Вып. 84. М. ВАСИЛЬЕВ. Вода работает.  
Вып. 85. И. Ф. ДОБРЫНИН. Электроприборы в быту.  
Вып. 86. В. П. ЗЕНКОВИЧ. Морское дно.  
Вып. 87. А. Ф. ПЛОНСКИЙ. Измерения и меры.  
Вып. 88. Л. А. СЕНА. Светящиеся трубы.  
Вып. 89. К. Л. БАЕВ и В. А. ШИШАКОВ. Всемирное тя-  
готение.  
Вып. 90. Д. Э. ГРОДЗЕНСКИЙ. Атомная энергия — меди-  
цине.  
Вып. 91. А. А. ЖАБРОВ. Почему и как летает самолет.  
Вып. 92. Ф. И. ЧЕСТНОВ. Незримый путеводитель.  
Вып. 93. Б. Т. ИВАНОВ и Б. У. БАРЩЕВСКИЙ. Объем-  
ные изображения.  
Вып. 94. И. А. МЕРКУЛОВ. Газовая турбина.  
Вып. 95. Б. В. ФОМИН. Радиоэлектроника в нашей жиз-  
ни.  
Вып. 96. К. В. ЧМУТОВ. Сорбция.  
Вып. 97. А. С. БЕРНШТЕИН. Термоэлектричество.  
Вып. 98. Г. С. БОБРОВСКИЙ. Водяной пар.  
Вып. 99. Б. С. БЕЛИКОВ. Телеграф и телефон.  
Вып. 100. А. И. КРАСНОВ. Волчок.  
Ф. М. ИВАНОВ. Вакуум.  
Б. Н. СУСЛОВ. Тяжелая вода.