

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Филиал БНТУ «Институт повышения квалификации и переподготовки кадров
по новым направлениям развития техники, технологии и экономики БНТУ»

Кафедра «Метрология и энергетика»

ПОВЕРКА СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Учебно-методическое пособие для руководителей и специалистов
метрологических служб предприятий и организаций, слушателей курсов
повышения квалификации, студентов технических ВУЗов

Под редакцией О.П. Реута, В.Л. Гуревича

Электронный учебный материал

Минск, 2018

УДК 006.91
ББК 30.10
Р44

Авторы
О.П. Реут, В.Л. Гуревич, С.А.Сорока, А.А. Новиков

Под редакцией О.П. Реута, В.Л. Гуревича

Рецензент

Д.В. Василевский, заместитель начальника Испытательного центра БелГИСС

В учебно-методическом пособии подробно рассмотрены вопросы проведения поверки приборов общего применения, получивших наиболее широкое распространение в измерениях ионизирующих излучений: активности, различных дозиметрических величин. Данное учебно-методическое пособие представляет интерес для руководителей и специалистов метрологических служб предприятий и организаций, слушателей курсов повышения квалификации, а так же студентов технических ВУЗов.

Белорусский национальный технический университет
пр-т Независимости, 65, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.(017)292-77-52 факс (017)292-91-37
E-mail: kme-ipk@mail.ru
<http://www.bntu.by/>
Регистрационный № БНТУ/ИПКиПК-53.2018

© БНТУ, 2018
© Реут О.П., Гуревич В.Л. 2018

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Общие понятия метрологии ионизирующих излучений	5
1.1 Виды метрологического контроля	5
1.2 Виды средств измерений ионизирующих излучений	6
1.3 Порядок присвоения обозначений средствам измерений ионизирующих излучений	24
Глава 2. Основные характеристики средств измерений ионизирующих излучений	26
Глава 3. Единицы измерений в области измерений ионизирующих излучений	27
Глава 4. Эталонная база Республики Беларусь в области измерений ионизирующих излучений включает в себя три эталона	32
Глава 5. Средства измерений активности радионуклидов	34
5.1 Методы абсолютных измерений	34
5.2 Методы относительных измерений	36
5.3 Радиометры удельной (объемной) активности нуклидов объектов внешней среды	37
5.4 Радиометры объемной активности радионуклидов в газе и аэрозолях	38
5.5 Радиометры плотности потока ионизирующих частиц и фотонов	40
Глава 6. Дозиметры (гамма и рентгеновские)	42
Глава 7. Средства измерений нейтронного излучения	48
Глава 8. Спектрометры энергий ионизирующих излучений	49
8.1 Альфа-спектрометры	49
8.2 Гамма-спектрометры	50
Глава 9. Поверка источников ионизирующего излучения	51
9.1 Образцовые спектрометрические альфа-источники (осаи)	52
9.2 Источники альфа-, бета-излучений	52
9.3 Источники гамма-излучений	53
9.4 Образцовые спектрометрические гамма-источники (осги)	53
9.5 Образцовые радиоактивные растворы (орр)	54
Список рекомендуемой литературы	55

ВВЕДЕНИЕ

Развитие атомной науки и техники, применение радиоактивных веществ и источников ионизирующих излучений в различных сферах при одновременном расширении их номенклатуры выдвинули перед метрологией ионизирующих излучений проблему обеспечения единства и правильности измерений основных величин, которыми мы характеризуем радиоактивные источники и создаваемые ими поля ионизирующего излучения.

Метрология есть наука об измерениях, методах достижения их единства и требуемой точности. Конечно, она тесно связана и развивается совместно с измерительной техникой, являющейся разделом прикладной физики. Измерительные приборы являются объектом исследований метрологии. Развивая общую теорию измерений, метрология основной упор в своей деятельности делает на исследования способов достижения единства измерений.

Метрология ионизирующих излучений развивается совместно с ядерным приборостроением, используя приемы и методологию общей метрологии, занимается созданием методов и средств обеспечения единства измерений характеристик радионуклидов, потоков излучений и дозиметрических величин.

Исследования в области метрологии ионизирующих излучений в нашей стране имеют историю, охватывающую несколько десятилетий. Определенным этапом в развитии этих работ явилось утверждение в 1969 г. Комитетом стандартов, мер и измерительных приборов шести эталонных комплексов в качестве государственных эталонов СССР. Эталоны были разработаны во ВНИИ метрологии им. Д.И.Менделеева. Одновременно была утверждена иерархическая соподчиненность (поверочные схемы) эталонов, образцовых мер и рабочих средств измерений массы радия, активности нуклидов, экспозиционной дозы рентгеновского и гамма-излучений, поглощенной дозы бета- и нейтронного излучения, потока нейтронов и плотности потока тепловых нейтронов.

Результаты этих работ в течение 70-х годов были обобщены специалистами ВНИИМ им. Д.И.Менделеева, а также ВНИИ физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ), где исследования в области метрологии ионизирующих излучений были начаты в начале 70-х годов в серии монографий. Каждая из этих монографий посвящена измерениям одной из групп физических величин, характеризующих ионизирующие излучения (дозиметрии, радиометрии, измерению характеристик полей нейтронов). В них с достаточной полнотой изложены методы измерений соответствующих величин, состав и принцип работы эталонных установок, методы передачи размеров единиц от эталонов эталонным и рабочим приборам. Лишь одна книга этого периода содержит изложение практического вопроса метрологии — методов и средств проверки широкого класса приборов для измерений ионизирующих излучений. Многие из того, что изложено в этих монографиях, не потеряло актуальности и на сегодняшний день. Вместе с тем ряд новых метрологических разработок, выполненных в последние годы, нашли отражение лишь в периодической научной печати.

ГЛАВА 1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ МЕТРОЛОГИИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

1.1 Виды метрологического контроля

Метрологический контроль это совокупность работ, в ходе выполнения которых устанавливаются или подтверждаются метрологические, технические характеристики средств измерений, определяется соответствие средств измерений, методик выполнения измерений требованиям законодательства Республики Беларусь об обеспечении единства измерений, а также соответствие методик выполнения измерений своему назначению. Метрологический контроль включает в себя:

- утверждение типа средств измерений;
- метрологическую аттестацию средств измерений;
- поверку;
- калибровку;
- метрологическое подтверждение пригодности методик выполнения измерений.

В соответствии с Законом Республики Беларусь «Об обеспечении единства измерений» правила осуществления метрологического контроля устанавливаются Государственным комитетом по стандартизации Республики Беларусь

Утверждению типа средств измерений подлежат средства измерений, предназначенные для применения в сфере законодательной метрологии, в отношении которых утверждение типа средств измерений не осуществлялось. Это работы, в ходе которых на основании государственных испытаний средств измерений устанавливаются их метрологические и технические характеристики, определяется соответствие средств измерений требованиям законодательства Республики Беларусь об обеспечении единства измерений и принимается решение об утверждении типа средств измерений. Решение об утверждении типа средств измерений принимается Государственным комитетом по стандартизации Республики Беларусь и удостоверяется сертификатом об утверждении типа средств измерений. Сведения о средствах измерений, в отношении которых принято решение об утверждении типа средств измерений, вносятся в Государственный реестр средств измерений Республики Беларусь.

Метрологической аттестации средств измерений подлежат средства измерений, предназначенные для применения в сфере законодательной метрологии, произведенные в Республике Беларусь или ввозимые в Республику Беларусь в единичном экземпляре, а также в случаях, предусмотренных Президентом Республики Беларусь. В ходе метрологической аттестации устанавливаются метрологические характеристики средств измерений.

Поверка включает выполнение работ, в ходе которых подтверждаются метрологические характеристики средств измерений и определяется соответствие средств измерений требованиям законодательства Республики Беларусь об

обеспечении единства измерений осуществляется при выпуске средств измерений из производства или ремонта, при их применении и ввозе в Республику Беларусь. Периодичность осуществления поверки средств измерений, применяемых в сфере законодательной метрологии, устанавливается Государственным комитетом по стандартизации Республики Беларусь, применяемых вне сферы законодательной метрологии, устанавливается юридическими лицами, индивидуальными предпринимателями и иными физическими лицами, применяющими эти средства измерений.

Калибровка включает выполнение работ, в ходе которых устанавливаются метрологические характеристики средств измерений путем определения в заданных условиях соотношения между значением величины, полученным с помощью средства измерений, и соответствующим значением величины, воспроизводимым эталоном единицы величины. Осуществляется при выпуске средств измерений из производства или ремонта, при их применении и ввозе в Республику Беларусь. Периодичность калибровки средств измерений, применяемых в сфере законодательной метрологии, устанавливается Государственным комитетом по стандартизации Республики Беларусь, применяемых вне сферы законодательной метрологии, устанавливается юридическими лицами, индивидуальными предпринимателями и иными физическими лицами, применяющими эти средства измерений.

Метрологическое подтверждение пригодности методик выполнения измерений осуществляется на основе экспертизы, которая может сопровождаться проведением экспериментальных исследований. В ходе экспертизы определяется соответствие области применения методик выполнения измерений требованиям, предъявляемым к измерениям, для подтверждения возможности проведения измерений с применением этих методик.

1.2 Виды средств измерений ионизирующих излучений

Все средства измерений ионизирующих излучений имеют одинаковую структурную схему, которая включает три основных блока. Это блок детектирования, блок обработки и блок индикации.

Блоки детектирования или детекторы это первичные преобразователи, которые преобразуют ионизирующее излучение в электрические импульсы или ток.

Типы детекторов ионизирующих излучений

Детекторами ионизирующих излучений могут быть различные по устройству и принципам работы датчики:

- Газоразрядные детекторы ионизирующих излучений
 - ионизационная камера
 - датчики Гейгера - Мюллера (например, «бета-1» для α, β, γ -излучения или «СБМ-20» для β, γ -излучения или СНМ-50 для нейтронного излучения)

- Сцинтилляционные детекторы и счетчики
- Полупроводниковые детекторы излучений
- Детекторы на основе алмаза
- Фотодиодные детекторы
- Калориметрические детекторы
- Интегрирующие детекторы для индивидуальной дозиметрии
 - Фотоплёночные
 - Камерно-ионизационные
 - Термолюминесцентные
 - Радиофотолюминесцентные
 - Электретные
 - Трековые

Детекторы ионизационного типа

К рабочей среде этих детекторов прикладывается электрическое поле. При ионизации среды заряженной частицей возникает кратковременный электрический ток, регистрируемый соответствующей электроникой. Сама детектирующая среда может быть газообразной, жидкой или твердой.

Наиболее обширную группу детекторов этого типа образуют газонаполненные детекторы. Простейшим из них является ионизационная камера. Она представляет собой систему двух электродов в объеме, заполненном инертным газом (чаще всего аргоном и неоном). Если частица полностью останавливается в объеме камеры, то по величине собранного заряда (количеству электронов, пришедших на анод) легко определить энергию частицы.

Недостатком ионизационной камеры являются очень низкие токи. Этот недостаток ионизационной камеры преодолевается в ионизационных детекторах с газовым усилением. Газовое усиление это увеличение количества свободных зарядов в объеме детектора за счёт того, что первичные электроны на своём пути к аноду в больших электрических полях приобретают энергию достаточную для ударной ионизации нейтральных атомов рабочей среды детектора. Такой режим работы отвечает пропорциональному счётчику (камере). Пропорциональный счётчик способен выполнять функции спектрометра, как и ионизационная камера. Если ещё больше увеличить разность потенциалов между анодом и катодом и довести коэффициент газового усиления до 10^4 - 10^5 , то начинает нарушаться пропорциональность между потерянной частицей в детекторе энергией и величиной импульса тока. Прибор переходит в режим ограниченной пропорциональности и уже не может быть использован как спектрометр, а лишь как счётчик частиц.

При дальнейшем увеличении напряжённости электрического поля (и газового усиления) счётчик переходит в такой режим работы, когда достаточно появления в его объеме одного электрона, чтобы он запустил столь мощный лавинообразный процесс, который способен ионизовать всю область вблизи нити-

анода. При этом импульс тока достигает предельного значения (насыщается) и не зависит от первичной ионизации. Счётчик, работающий подобным образом, называется счётчиком Гейгера-Мюллера.

Если разность потенциалов между анодом и катодом в газонаполненном счетчике превысит некоторое критическое значение, то появление в его объёме свободных носителей зарядов вызовет искровой пробой (разряд). При этом амплитуда электрического сигнала с такого счётчика (называемого искровым) может достигать сотен вольт.

Газонаполненные детекторы имеют два недостатка. Во-первых, плотность газа низка и энергия, теряемая частицей в объёме детектора мала, что не позволяет эффективно регистрировать высокоэнергичные и слабоионизирующие частицы. Во-вторых, энергия, необходимая для рождения пары электрон-ион в газе велика (30-40 эВ), что увеличивает относительные флуктуации числа зарядов и ухудшает энергетическое разрешение.

Ионизационная камера

Ионизационная камера - простейший газонаполненный детектор. Она представляет собой систему из двух или трёх электродов в объеме, заполненном газом ($\text{He}+\text{Ar}$, $\text{Ar}+\text{C}_2\text{H}_2$, Ne). Ионизационная камера может быть выполнена в виде плоского или цилиндрического конденсатора. Величина прикладываемого напряжения (обычно сотни вольт) подбирается так, чтобы образованные в камере при пролёте заряженной частицы свободные заряды максимально быстро, не успев рекомбинировать достигали электродов.

Ионизационные камеры бывают интегрирующие и импульсные. В интегрирующих камерах при больших потоках частиц импульсы сливаются и регистрируется ток пропорциональный среднему энерговыделению

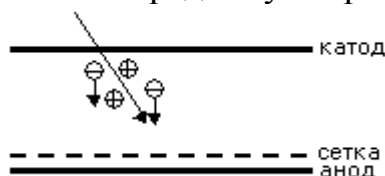


Рисунок 1. Схема ионизационной камеры.

В импульсных камерах регистрируются отдельные импульсы от каждой ионизирующей частицы. Импульсные камеры обычно трехэлектродные. Рабочим объемом служит пространство между катодом и сеткой. Образовавшиеся в результате ионизации электроны под действием поля $E_{\text{кс}}$ двигаются по направлению к сетке, проходят ее под действием поля $E_{\text{са}} > E_{\text{кс}}$ и собираются на аноде. Более подвижные электроны собираются за время 10^{-6} с. Положительные ионы, время сбора которых на три порядка больше за это время остаются практически на месте. Сетка экранирует анод от индукционного воздействия положительных ионов.

Временное разрешение ионизационной камеры определяется временем сбора зарядов. Таким образом, при регистрации импульса тока от электронов временное разрешение ионизационной камеры будет достигать 10^{-6} с.

Если частица полностью останавливается в объеме камеры, то по величине собранного заряда (количеству электронов, пришедших на анод) легко определить энергию частицы. Эта энергия равна произведению числа электронов n на среднюю энергию, необходимую на образование частицей одной пары электрон-ион (для газа 30-40 эВ).

Недостатком ионизационной камеры являются очень низкие токи. Этот недостаток ионизационной камеры преодолевается в ионизационных детекторах с газовым усилением.

Для регистрации нейтронов используют специальную модификацию ионизационной камеры - камеру деления.

Принцип работы ионизационной камеры

Одним из старых, но до сих пор широко применяемых детекторов ядерного излучения является ионизационная камера. Простейшая ионизационная камера представляет собой замкнутый газовый объем, в котором расположены два плоско-параллельных электрода. К электродам прикладывается разность потенциалов U , создающая в рабочем объеме камеры электрическое поле напряженности E .

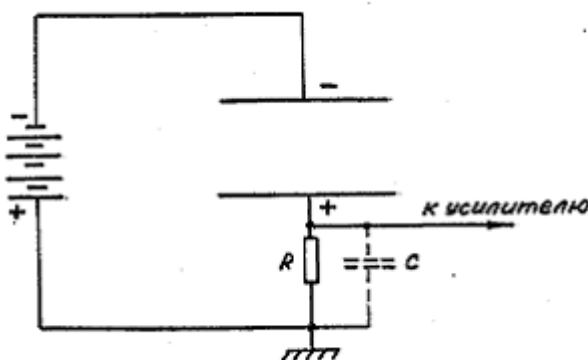


Рисунок 2. Принципиальная схема ионизационной камеры.

На рис.2 представлена принципиальная схема такой камеры. Здесь R - сопротивление нагрузки, с которой снимается сигнал, а C - распределенная емкость, включающая межэлектродную емкость камеры, входную емкость усилителя и емкость монтажа камеры.

Заряженные частицы, проходя через рабочий объем камеры, производят ионизацию атомов газа, в результате чего вдоль пути частицы образуются электроны и положительные ионы. Под действием электрического поля E они начинают двигаться к соответствующим электродам камеры.

Во время движения электронов и ионов к электродам во внешней цепи камеры индуцируется ток, заряжающий емкость C . Нарастание импульса, т.е. зарядка емкости C , прекращается в тот момент, когда все электроны и ионы,

созданные в газе камеры, достигнут соответствующих электродов. R , величина которого выбирается такой, чтобы с одной стороны, не происходила разрядка емкости C в течение времени, пока идет ее зарядка током, идущим через камеру, а с другой стороны, емкость C успела бы почти полностью разрядиться к моменту попадания в камеру следующей частицы. Таким образом, сопротивление R выбирается так, чтобы $T \ll RC \ll \Delta t$, где T - время собирания зарядов, а Δt - временной интервал между импульсами.

Время собирания зарядов, образованных частицей в газе камеры, зависит от скорости их движения к электродам, так называемой скорости дрейфа, причем скорость дрейфа электронов и ионов различна из-за разницы в их массах (так, скорость дрейфа электронов в $\sim 10^3$ раз больше, чем ионов, а время собирания электронов в $\sim 10^3$ раз меньше). Амплитуда импульса обусловлена двумя составляющими - электронной и ионной, причем вклад в полную амплитуду импульса зарядов того или иного знака определяется отношением пройденной ими разности потенциалов к полной разности потенциалов, приложенной к электродам камеры.

Характер работы ионизационной камеры существенно зависит от величины напряжения U , приложенного к электродам.

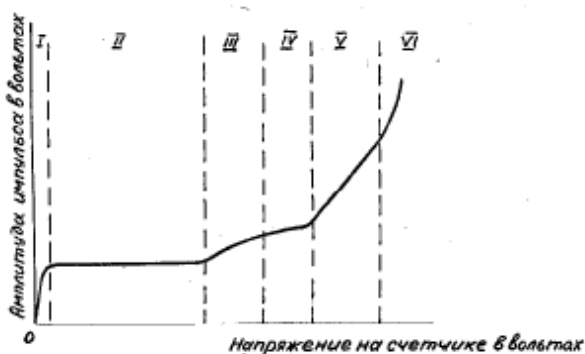


Рисунок 3. Зависимость амплитуды импульса от напряжения на счетчике.

На рис.3 представлена зависимость амплитуды импульса, появляющегося на сопротивлении R , от напряжения на счетчике.

В области напряжений I происходит два противоположных процесса: ионизация и собирание зарядов на электродах и рекомбинация ионов. При возрастании напряжения U скорость ионов увеличивается, а рекомбинация уменьшается, что приводит к возрастанию амплитуды импульса.

В области II доля рекомбинации пренебрежимо мала, все ионы, образованные частицей, собираются на электродах. Этот участок кривой называется областью насыщения или областью ионизационной камеры. Ионизационная камера может служить не только счетным, но и спектрометрическим детектором, т.е. позволяет определять энергию частицы. Это возможно вследствие независимости средней энергии, затрачиваемой в газе на образование одной пары электрон-ион, от энергии ионизирующей частицы и от производимой ею удельной ионизации, определяющейся зарядом и скоростью частицы. Поэтому величина заряда, образованного частицей в рабочем объеме

камеры, пропорциональна энергии, потерянной частицей в газе, а в случае полного поглощения частицы в рабочем объеме камеры - ее энергии.

III происходит ударная ионизация, в результате которой число ионов сильно увеличивается. Если каждый электрон на пути к аноду создает за счет ионизации соударениями A новых электронов, то A называется коэффициентом газового усиления. A может достигать величины 10^7 и не зависит от первоначальной ионизации; амплитуда импульса при этом пропорциональна числу пар ионов, созданных первоначальной частицей. Эта область называется пропорциональной областью.

В области IV при возрастании приложенного напряжения пропорциональность амплитуды импульса величине первоначальной ионизации нарушается, а коэффициент газового усиления начинает зависеть от числа первоначально образованных пар ионов. Это область ограниченной пропорциональности.

При дальнейшем увеличении напряжения - область V - амплитуды импульсов от частиц с различной ионизацией становятся одинаковыми. В этой области регистрируется каждая частица, которая создала хотя бы одну пару ионов в объеме камеры. Прибор, работающий в таком режиме, называется счетчиком Гейгера-Мюллера. Область VI - это область непрерывного разряда.

Рассмотрим теперь подробнее работу ионизационной камеры в области пропорциональности. Пропорциональный счетчик - это ионизационная камера, в которой нет зависимости коэффициента газового усиления от места начальной ионизации.

Пропорциональные счетчики могут быть различных размеров и формы. Наиболее часто употребляются цилиндрические счетчики.

Пропорциональный счётчик

Недостатком ионизационной камеры являются очень низкие токи. Этот недостаток ионизационной камеры преодолевается в ионизационных детекторах с газовым усилением. Это позволяет регистрировать частицы с энергией < 10 кэВ, в то время как сигналы от частиц таких энергий в ионизационных камерах "тонут" в шумах усилителя.

Газовое усиление это увеличение количества свободных зарядов в объёме детектора за счёт того, что первичные электроны на своём пути к аноду в больших электрических полях приобретают энергию достаточную для ударной ионизации нейтральных атомов рабочей среды детектора. Возникшие при этом новые электроны в свою очередь успевают приобрести энергию достаточную для ионизации ударом. Таким образом, к аноду будет двигаться нарастающая электронная лавина. Это "самоусиление" электронного тока (коэффициент газового усиления) может достигать 10^3 - 10^4 . Такой режим работы отвечает пропорциональному счётчику (камере). В названии отражено то, что в этом приборе амплитуда импульса тока (или полный собранный заряд) остаётся пропорциональной энергии, затраченной заряженной частицей на первичную

ионизацию среды детектора. Таким образом, пропорциональный счётчик способен выполнять функции спектрометра, как и ионизационная камера. Энергетическое разрешение пропорциональных счетчиков лучше, чем у сцинтилляционных, но хуже, чем у полупроводниковых.

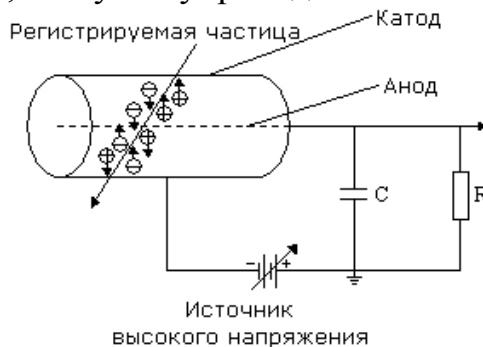


Рисунок 4. Схема подключения пропорционального счетчика.

Конструктивно пропорциональный счётчик обычно изготавливают в форме цилиндрического конденсатора с анодом в виде тонкой металлической нити по оси цилиндра, что обеспечивает вблизи анода напряженность электрического поля значительно большую, чем в остальной области детектора. При разности потенциалов между анодом и катодом 1000 вольт напряжённость поля вблизи нити-анода может достигать 40 000 вольт/см., в то время как у катода она равна сотням в/см.

Если ещё больше увеличить разность потенциалов между анодом и катодом и увеличить коэффициент газового усиления до значений $>10^4$, то начинает нарушаться пропорциональность между потерянной частицей в детекторе энергией и величиной импульса тока. Прибор переходит в режим ограниченной пропорциональности и уже не может быть использован как спектрометр, а лишь как счётчик частиц.

Временное разрешение пропорционального счетчика может достигать 10^{-7} с.

Пропорциональные счетчики используются для регистрации альфа-, бета-частиц, протонов, гамма-квантов и нейтронов. Пропорциональные счетчики чаще всего заполняют гелием или аргоном. При регистрации заряженных частиц и гамма-квантов для того, чтобы избежать потерь энергии частицами до регистрации используют тонкие входные окна. Иногда источник помещают в объём счетчика. Эффективность регистрации для мягких гамма-квантов с энергией < 20 кэВ $> 80\%$. Для повышения эффективности регистрации более энергетичных гамма-квантов используют ксенон.

Дрейфовая камера

Дрейфовая камера является координатным детектором. Это проволочный газонаполненный ионизационный детектор (как и пропорциональная камера), в котором координата частицы определяется по времени дрейфа электронов в газе от места ионизации (пролёта частицы) до сигнальных анодных проволочек. Расстояние между проволочками обычно несколько сантиметров. В отличие от пропорциональной камеры в дрейфовой камере создаётся однородное

электрическое поле с помощью специальных электродов. Пролёт частицы через камеру фиксируется по стартовым сигналам внешних детекторов (чаще всего сцинтилляционных счётчиков). Далее появившиеся в объёме камеры свободные электроны дрейфуют в однородном и постоянном поле к ближайшим проволочкам. Напряжённость поля в дрейфовом промежутке 1 кВ/см. В непосредственной близости от анодных проволочек происходит образование лавин (газовое усиление достигает 10^6) и по времени задержки прихода лавин на анодные проволочки относительно стартового сигнала определяются координаты частицы.

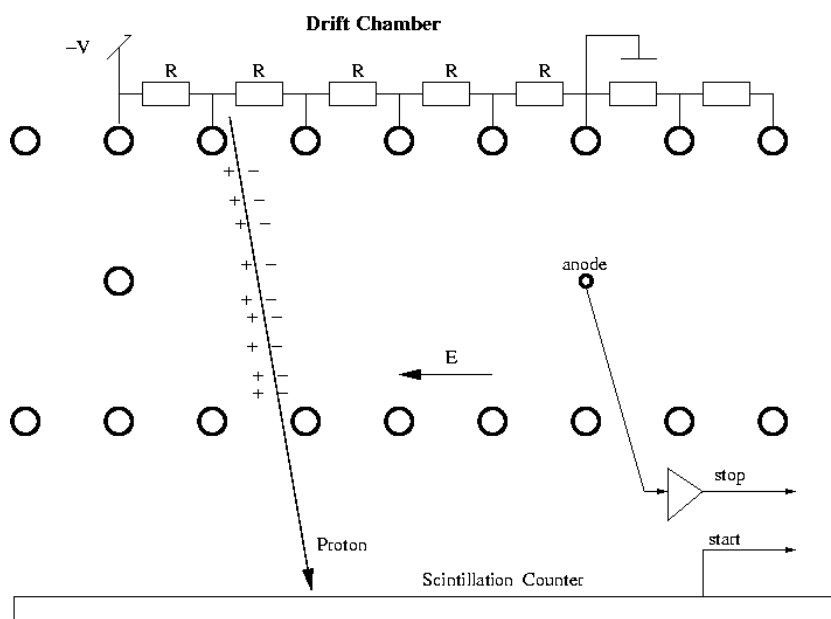


Рисунок 5. Схема работы дрейфовой камеры.

Пространственное разрешение дрейфовой камеры порядка 0,1-0,2 мм, временное - наносекунды.

Дрейфовые камеры могут быть плоскими, цилиндрическими и сферическими, Плоские дрейфовые камеры больших размеров используются в экспериментах на ускорителях высоких энергий. Так в ЦЕРНе разработана дрейфовая камера размером 2x4x5 м³.

Счетчики Гейгера-Мюллера

Счетчики Гейгера-Мюллера - самые распространенные детекторы ионизирующего излучения.

В своей основе счетчик Гейгера прост. Герметичный объем с двумя электродами заполнен газовой смесью, состоящая в основном из неона и аргона. Корпус может быть стеклянным, металлическим и др. Обычно счетчики воспринимают излучение всей своей поверхностью, но существуют и такие, у которых для этого в баллоне предусмотрено специальное "окно". К электродам прикладывают высокое напряжение U , которое само по себе не вызывает каких-либо разрядных явлений. В этом состоянии счетчик будет пребывать до тех пор,

пока в его газовой среде не возникнет центр ионизации - след из ионов и электронов, порождаемый пришедшей извне ионизирующей частицей. Первичные электроны, ускоряясь в электрическом поле, ионизируют "по дороге" другие молекулы газовой среды, порождая все новые и новые электроны и ионы. Развиваясь лавинообразно, этот процесс завершается образованием в межэлектродном пространстве электронно-ионного облака, резко увеличивающего его проводимость. В газовой среде счетчика возникает разряд, видимый в прозрачном баллоне даже простым глазом.

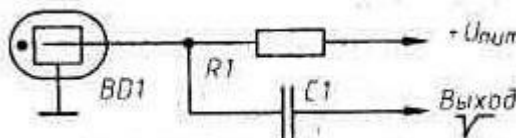


Рисунок 6. Включение счетчика Гейгера.

Возвращение газовой среды в ее исходное состояние в так называемых галогеновых счетчиках происходит за счет добавок. В действие вступают галогены (обычно хлор или бром), в небольшом количестве содержащиеся в газовой среде, которые способствуют интенсивной рекомбинации зарядов. Но этот процесс идет значительно медленнее. Отрезок времени, необходимый для восстановления радиационной чувствительности счетчика Гейгера и фактически определяющий его быстродействие - "мертвое" время - является важной его паспортной характеристикой.

Галогеновые самогасящиеся детекторы характеризуются низким напряжением питания, удобными для регистрации параметрами выходного сигнала и достаточно высоким быстродействием

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

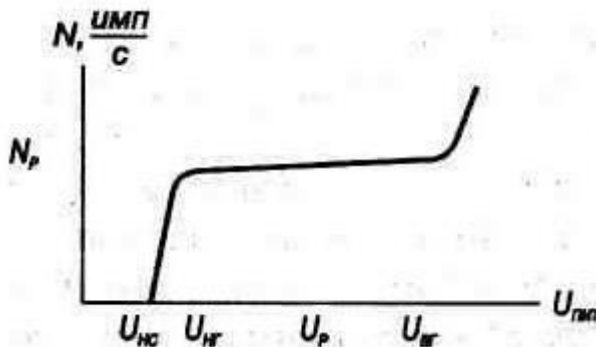


Рисунок 7. Зависимость скорости счета от напряжения питания в счетчике Гейгера.

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

Каждая фиксируемая счетчиком частица вызывает появление в его выходной цепи короткого импульса. Число импульсов, возникающих в единицу времени, – скорость счета счетчика Гейгера – зависит от уровня ионизирующей радиации и напряжения на его электродах. Типичный график зависимости скорости счета от напряжения питания $U_{\text{пит}}$ показан на рис. Здесь $U_{\text{нс}}$ – напряжение начала счета; $U_{\text{нг}}$ и $U_{\text{вг}}$ – нижняя и верхняя граница рабочего участка, так называемого плато, на котором скорость счета почти не зависит от напряжения питания счетчика. Рабочее напряжение $U_{\text{р}}$ обычно выбирают в середине этого участка. Ему соответствует $N_{\text{р}}$ – скорость счета в этом режиме.

Зависимость скорости счета от уровня радиационного облучения счетчика – важнейшая его характеристика. График этой зависимости имеет почти линейный характер и поэтому нередко радиационную чувствительность счетчика выражают через имп/мкЗв (импульсов на микрозиверт; эта размерность следует из отношения скорости счета – имп/с – к уровню радиации – мкЗв/с).

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

То, что счетчик Гейгера является лавинным прибором, имеет и свои минусы – по реакции такого прибора нельзя судить о первопричине его возбуждения. Выходные импульсы, генерируемые счетчиком Гейгера под действием α -частиц, электронов, γ -квантов

Ниже на рисунке показаны конструкции счетчиков Гейгера отечественного производства.

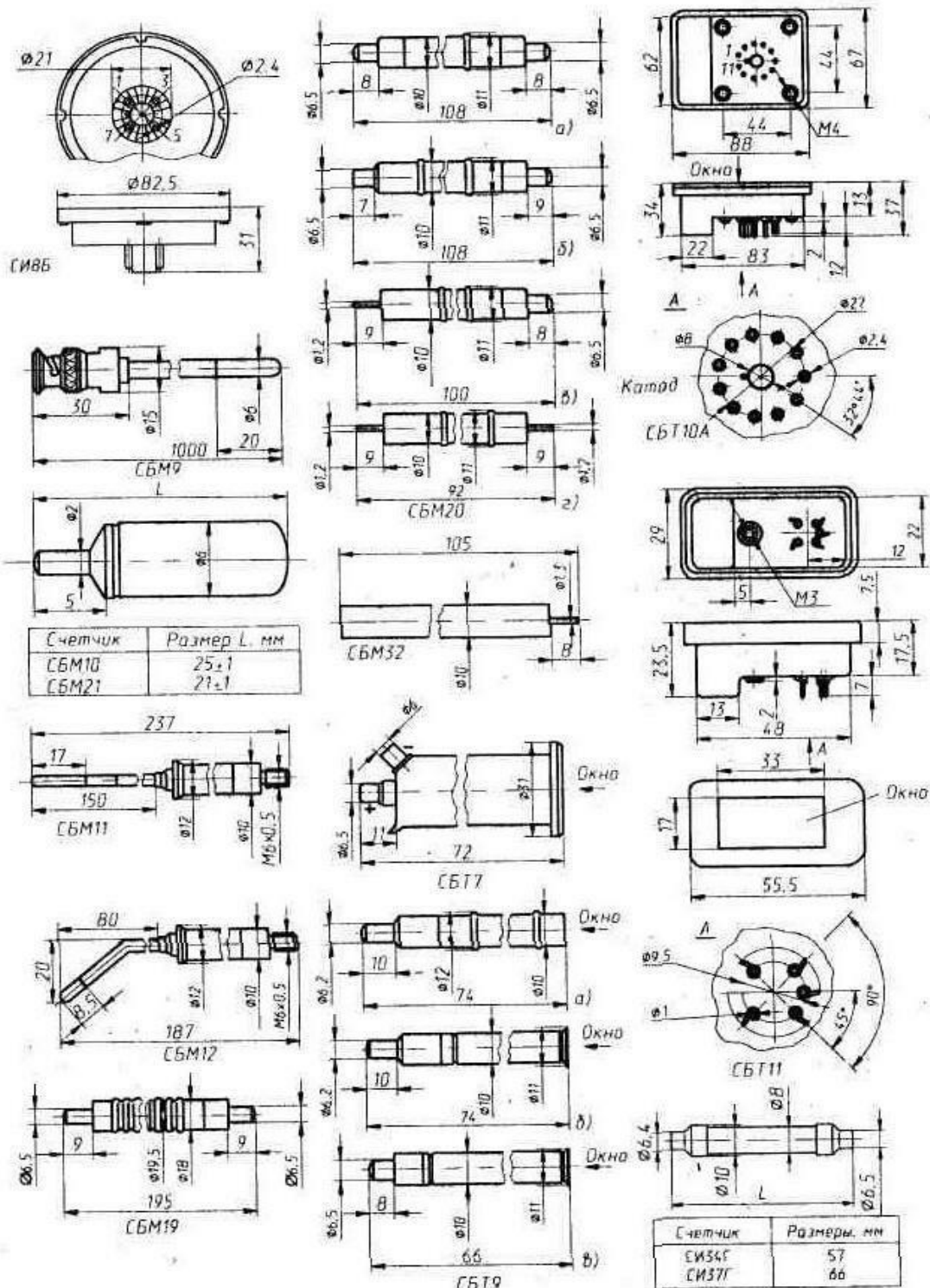


Рисунок 8. Схемы счетчиков Гейгера-Мюллера

Полупроводниковые детекторы

Газонаполненные детекторы имеют два недостатка. Во-первых, плотность газа низка и энергия, теряемая частицей в объеме детектора мала, что не позволяет эффективно регистрировать высокоэнергичные и слабоионизирующие частицы. Во-вторых, энергия, необходимая для рождения пары электрон-ион в газе велика (30-40 эВ), что увеличивает относительные флуктуации числа зарядов

и ухудшает энергетическое разрешение. Значительно более удобными в этом плане являются детекторы с твёрдотельной рабочей средой. Наибольшее распространение получили полупроводниковые детекторы из кристаллов кремния (плотность 2,3 г/см³) и германия (5,3 г/см³). В полупроводниковом детекторе определенным образом создается чувствительная область, в которой нет свободных носителей заряда. Попав в эту область, заряженная частица вызывает ионизацию, соответственно в зоне проводимости появляются электроны, а в валентной зоне - дырки. Под действием напряжения, приложенного к напылённым на поверхность чувствительной зоны электродам, возникает движение электронов и дырок, формируется импульс тока. К полупроводниковому кристаллу прикладывается напряжение до нескольких кВ, что обеспечивает сбор всех зарядов, образованных частицей в объёме детектора.

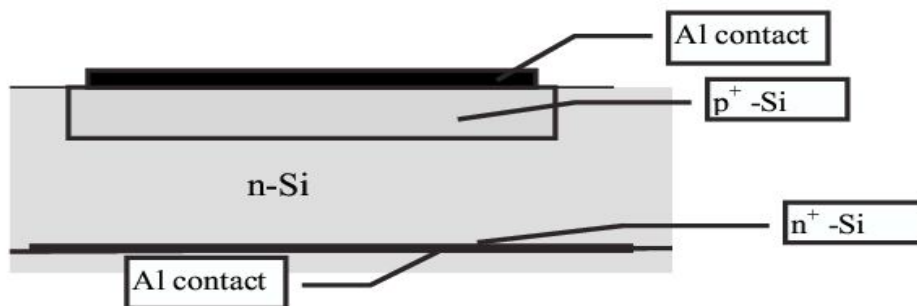


Рисунок 9. Устройство кремниевого детектора

Энергия, необходимая для рождения одной пары электрон-дырка равна 3,62 эВ при температуре $T = 300$ К, 3,72 эВ при $T = 80$ К в кремнии и 2,95 эВ германии при $T = 80$ К. Это при использовании полупроводникового счётчика в качестве спектрометра позволяет в несколько раз улучшить энергетическое разрешение по сравнению с газонаполненными счётчиками, такими как ионизационная камера и пропорциональный счётчик.

Для регистрации заряженных частиц используют кремниевые детекторы и детекторы из сверхчистого германия (HpGe). Толщина чувствительной области кремниевых детекторов не превышает 5 мм, что соответствует пробегу протонов с энергией ~ 30 МэВ и α -частиц с энергией ~ 120 МэВ. Для германия толщина 5 мм соответствует пробегам протонов и α -частиц с энергиями ~ 40 МэВ и ~ 160 МэВ соответственно, более того, германиевые детекторы могут быть изготовлены с гораздо более толстой чувствительной областью.

Кремниевые детекторы часто используют при комнатной температуре. Германиевые детекторы всегда охлаждают до азотных температур.

Большие преимущества даёт применение полупроводниковых детекторов в спектрометрах γ -квантов. В этом случае применяются специально выращенные кристаллы сверхчистого германия объёмом до нескольких сот см³. Германий имеет довольно высокий атомный номер $Z = 32$ и поэтому эффективное сечение взаимодействия γ -квантов велико (вероятность фотоэффекта пропорциональна Z^5 , Комптон-эффекта – Z , рождения пар – Z^2). Чтобы добиться наилучшего энергетического разрешения германиевые кристаллы во время эксперимента

охлаждают до температуры жидкого азота (77°K). Энергетическое разрешение германиевых детекторов при регистрации α -квантов достигает 0.1%, что в десятки раз выше, чем у сцинтилляционных детекторов. Временное разрешение лучших полупроводниковых детекторов 10^{-8} - 10^{-9} с.



Рисунок 10. Внешний вид полупроводниковых детекторов

Микростриповые детекторы

Для очень точного определения координат частиц используют полупроводниковые микростриповые детекторы. Они представляют собой пластины монокристалла кремния, на одну из поверхностей которых наносятся тонкие электроды (стрипы), отстоящие друг от друга на расстоянии 20 мкм, а другая покрывается металлическим слоем. На электроды подается напряжение несколько вольт. Электронно-дырочные пары, образованные пролетающей заряженной частицей в кристалле, двигаются к ближайшим электродам и регистрируются в виде импульсов тока. Пространственное разрешение микростриповых детекторов уступает только ядерным эмульсиям и достигает 10 мкм. Временное разрешение – 10^{-8} с.

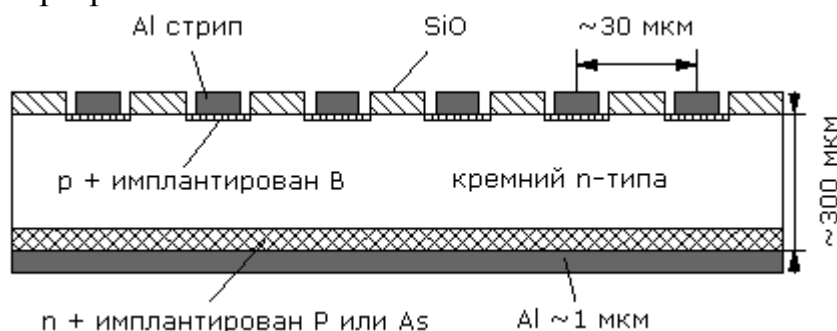


Рисунок 11. Устройство кремниевого микрострипового детектора

Сцинтилляционный детектор

Первый сцинтилляционный детектор, названный спинтарископом, представлял собой экран, покрытый слоем ZnS. Вспышки, возникавшие при попадании в него заряженных частиц, фиксировались с помощью микроскопа. Именно с таким детектором Гейгер и Марсден в 1909 г. провели опыт по рассеянию альфа-частиц атомами золота, приведший к открытию атомного ядра. Начиная с 1944 г. световые вспышки от сцинтиллятора регистрируют

фотоэлектронными умножителями (ФЭУ). Позже для этих целей стали использовать также светодиоды.

Сцинтиллятор может быть органическим (кристаллы, пластики или жидкости) или неорганическим (кристаллы или стекла). Используются также газообразные сцинтилляторы. В качестве органических сцинтилляторов часто используются антрацен ($C_{14}H_{10}$), стильбен ($C_{14}H_{12}$), нафталин ($C_{10}H_8$). Жидкие сцинтилляторы обычно известны под фирменными именами (например NE213). Пластиковые и жидкие сцинтилляторы представляют из себя растворы органических флуоресцирующих веществ в прозрачном растворителе. Например, твердый раствор антрацена в полистироле или жидкий раствор р-терфенила в ксилоле. Концентрация флуоресцирующего вещества обычно мала и регистрируемая частица возбуждает в основном молекулы растворителя. В дальнейшем энергия возбуждения передается молекулам флуоресцирующего вещества. В качестве неорганических кристаллических сцинтилляторов используются ZnS , $NaI(Tl)$, CsI , $Bi_4Ge_3O_{12}$ (BGO) и др. В качестве газовых и жидких сцинтиллятор используют инертные газы (Xe, Kr, Ar, He) и N.

Так как в органических сцинтилляторах возбуждаются молекулярные уровни, которые излучают в ультрафиолетовой области для согласования со спектральной чувствительностью регистрирующих свет устройств (ФЭУ и фотодиодов) используются светопреобразователи, которые поглощают ультрафиолетовое излучение и переизлучают видимый свет в области 400 нм.

Световой выход - доля энергии регистрируемой частицы конвертируемая в энергию световой вспышки. Световой выход антрацена $\sim 0,05$ или 1 фотон на 50 эВ для частиц высокой энергии. У NaI световой выход $\sim 0,1$ или 1 фотона на 25 эВ. Принято световой выход данного сцинтиллятора сравнивать со световым выходом антрацена, который используется как стандарт. Типичные световые выходы пластиковых сцинтилляторов 50-60 %.

Интенсивность световой вспышки пропорциональна энергии, потерянной частицей, поэтому сцинтилляционный детектор может использоваться в качестве спектрометра, т. е. прибора, определяющего энергию частицы.



Рисунок 12. Сцинтиллятор и ФЭУ

С помощью сцинтилляционных счетчиков, присоединенных к амплитудным анализаторам, можно изучать спектры электронов и γ -лучей. Несколько хуже обстоит дело с изучением спектров тяжелых заряженных частиц (α -частицы и др.),

создающих в сцинтилляторе большую удельную ионизацию. В этих случаях пропорциональность интенсивности вспышки потерянной энергии наблюдается не при всяких энергиях частиц и проявляется только при значениях энергии, больших некоторой величины. Нелинейная связь амплитуд импульсов с энергией частицы различна для различных фосфоров и для различных типов частиц.

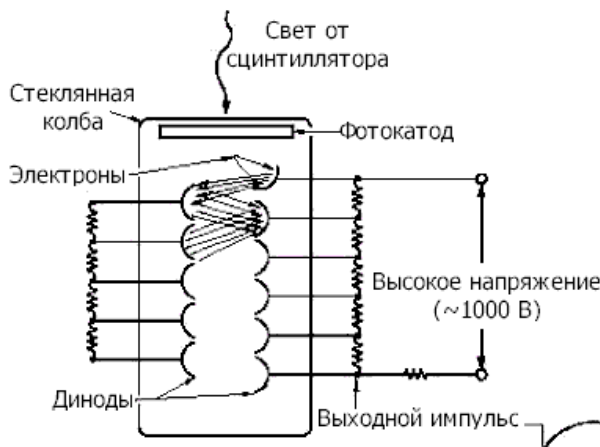


Рисунок 13. Устройство ФЭУ

Фотоны, возникшие в сцинтилляторе под действием заряженной частицы, по светопроводу достигают ФЭУ и через его стеклянную стенку попадают на фотокаатод. ФЭУ представляет собой баллон, внутри которого в вакууме располагается фотокаатод и система последовательных динодов, находящихся под положительным увеличивающемся от динода к диноду электрическим потенциалом. В результате фотоэффекта из фотокаатода вылетают электроны, которые затем, ускоряясь в электрическом поле, направляются на систему динодов, где за счет вторичной (ударной) электронной эмиссии образуют нарастающую от динода к диноду электронную лавину, поступающую на анод. Обычно коэффициент усиления ФЭУ (число электронов, достигших анода при выбивании из фотокаатода одного электрона) составляет 10^5 - 10^6 , но может достигать и 10^9 , что позволяет получить на выходе ФЭУ легко регистрируемый электрический импульс. Временное разрешение ФЭУ составляет 10^{-8} - 10^{-9} с.

Энергетическое разрешение сцинтилляционных детекторов обычно не лучше нескольких процентов. Временное разрешение определяется главным образом длительностью световой вспышки (временем высвечивания люминофора) и меняется в пределах 10^{-6} - 10^{-9} с.

Большие объёмы сцинтилляторов позволяют создавать детекторы очень высокой эффективности, для регистрации частиц с малым сечением взаимодействия с веществом.

Трековые и координатные детекторы

Трековыми детекторами называют группу детекторов, в которых при прохождении заряженной частицы возникает визуально наблюдаемый след (трек) этой частицы. Трековые детекторы сыграли выдающуюся роль в силу наглядности и возможности получения исчерпывающей пространственной

картины изучаемого процесса. Благодаря этим детекторам были открыты ядерные распады и реакции, частицы (позитрон, мюон, заряженные пионы, странные и очарованные частицы).

В трековых детекторах след частицы визуально наблюдаем. В то же время есть группа детекторов (многопроволочная пропорциональная камера, дрейфовая камера, полупроводниковый микростриповый детектор и некоторые другие), в которых треки частиц ненаблюдаемы, но с высокой точностью фиксируются их пространственные координаты. Детекторы такого типа мы будем называть координатными.

Микростриповые детекторы, а также прецизионные многослойные пропорциональные камеры и дрейфовые камеры часто используют в качестве центральных (или вершинных) детекторов, непосредственно окружающих мишень (или место столкновения пучков в коллайдерах). Центральные детекторы играют важную роль в современных экспериментах на ускорителях высоких энергий. Они фиксируют с почти 100%-ной вероятностью продукты взаимодействия пучка с мишенью практически в точке их зарождения и определяют направление их вылета. Более габаритные детекторы, окружающие центральный детектор, предназначены для идентификации этих родившихся и вторичных частиц и определения их характеристик (координат, импульсов, энергий и др.).

Ядерные фотозмульсии

Впервые с возможностью регистрации ядерных излучений фотографическим методом столкнулся А. Беккерель, открывший в 1896 г. с помощью фотопластинок радиоактивность урана. Но по настоящему в практику субатомных исследований этот метод вошёл в конце сороковых годов прошлого века после создания С. Пауэллом специальных фотопластинок с толстым эмульсионным слоем (эта работа была отмечена Нобелевской премией).

Ядерные эмульсии, как и обычные светочувствительные, состоят из желатина и взвешенных частиц кристаллического бромистого серебра (AgBr) размером до 0,3 мкм, но в отличие от последних имеют существенно большую толщину - до нескольких сотен микрон (толщина обычных эмульсий 10 мкм). Заряженные частицы, проходя через слой эмульсии, ионизируют атомы, лежащие на их пути. В результате происходит разложение бромистого серебра и образование центров скрытого изображения. При последующей проявке в эмульсии образуются мельчайшие зёрна металлического серебра размером до 1 мкм, которые наблюдаются под микроскопом в виде точек различной жирности. След частицы имеет вид цепочки таких точек со средним расстоянием между ними, не превышающим 5 мкм. По характеру этого следа (концентрации точек и отклонению от прямолинейности) можно идентифицировать тип частицы.

Искровой счетчик

Если разность потенциалов между анодом и катодом в газонаполненном

счетчике превысит некоторое критическое значение, то появление в его объеме свободных носителей зарядов вызовет искровой пробой (разряд). При этом амплитуда электрического сигнала с такого счётчика (называемого искровым) может достигать сотен вольт. После разряда счётчику требуется время 10^{-3} - 10^{-4} с для восстановления (очистки рабочего газового объема от положительных ионов), после чего он будет в состоянии зарегистрировать новую частицу. В простейшем варианте искровой счётчик представляет собой два плоскопараллельных металлических электрода, к которым приложена разность потенциалов несколько кВ. Площадь электродов – десятки квадратных сантиметров. Пространство между электродами обычно заполнено инертным газом. Зазор между электродами может варьироваться в пределах 0,1-10 мм. Разрядная искра строго локализована. Она возникает там, где появляются первичные электроны, и поэтому указывает место попадания частицы в счётчик.

Многопроволочная пропорциональная камера

Многопроволочная пропорциональная камера (МПК) представляет собой систему многих тонких (10 мкм) параллельных проволочек, расположенных в одной плоскости и являющихся анодами, которые находятся в газовом объеме между двумя плоскими параллельными друг другу и аноду катодами (сплошными или проволочными). В типичном случае анодные проволочки удалены друг от друга на 2 мм и от катодов на расстоянии 8 мм. Разность потенциалов между анодом и катодом несколько кВ. Такие параметры МПК обеспечивают газовое усиление 10^4 - 10^5 и пропорциональность амплитуды сигнала энергии, оставленной частицей в объеме газа. Таким образом, МПК это, по существу, система размноженных пропорциональных счётчиков.

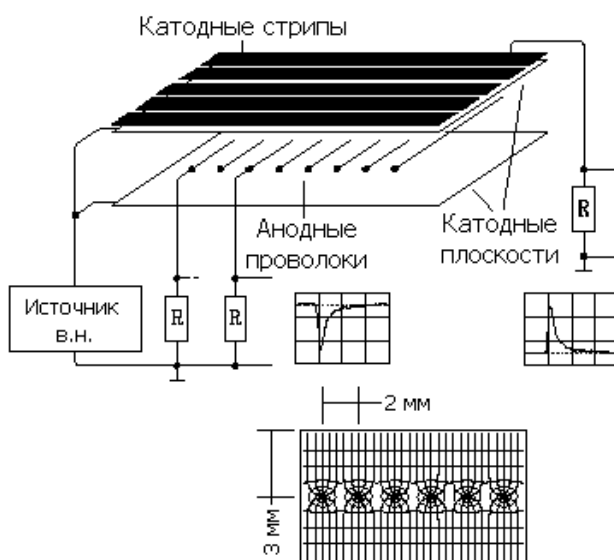


Рисунок 14. Устройство МПК.

При прохождении заряженной частицы через МПК образовавшиеся вдоль следа частицы свободные электроны дают начало лавинам, приходящим на анодные проволочки ближайšie к этим первичным электронам. Электроника

регистрирует сигнал с каждой проволоочки. Таким образом, приходящие сигналы указывают положение (координаты) частицы в МПК. Для того, чтобы получить трёхмерные координаты частицы в большом объёме, используются системы из десятков МПК площадью до 10 м^2 , располагающихся параллельно одна за другой, с общим числом проволоочек несколько десятков тысяч, причём проволоочки двух соседних МПК натянута взаимно перпендикулярно. Типичное пространственное разрешение современной МПК 0,05-0,3 мм. Временное разрешение несколько наносекунд. Энергетическое разрешение пропорциональной камеры 10 %. МПК применяют главным образом в исследованиях элементарных частиц на ускорителях высоких энергий. МПК были разработаны Г. Чарпаком в ЦЕРНе в 1968 г., что было отмечено Нобелевской премией 1992 г.

Блоки обработки представляют собой в большинстве случаев либо счетчик импульсов либо измеритель тока.

Блок индикации выполнен в виде аналогового стрелочного индикатора или цифрового индикатора.

Эти блоки могут быть размещены в одном корпусе (индивидуальные или портативные дозиметры) либо выполнены в виде отдельных блоков (комбинированные средства измерений), причем блоки обработки и индикации как правило совмещены, а блоки детектирования представляют собой независимые интеллектуальные узлы. Современные блоки детектирования имеют возможность подключаться непосредственно к ПЭВМ, а обработку и индикацию выполняет прикладное программное обеспечение. Ярким примером таких приборов могут служить дозиметр-радиометр МКС-АТ1117М, Система радиационного контроля СРК-АТ2327 и многие типы спектрометров.

Условно средства измерений ионизирующих излучений можно разбить на три группы:

Дозиметрические

Дозиметр – это прибор или установка для измерений ионизирующих излучений, предназначенные для получения измерительной информации о дозе или мощности дозы фотонного излучения и (или) энергии, переносимой ионизирующим излучением или переданной им объекту, находящемуся в поле действия излучения.

В зависимости от вида регистрируемого излучения можно встретить дозиметры гамма-, бета-, нейтронного или рентгеновского излучений. В зависимости от назначения дозиметры можно разделить на индивидуальные, клинические, полевые (защитная дозиметрия), бытовые.

Радиометрические

Радиометр – прибор или установка для измерений ионизирующих излучений, предназначенные для получения измерительной информации об активности радионуклида в источнике или образце, производных от нее величин, о плотности потока и (или) потоке и флюенсе ионизирующих частиц.

Радиометры активности или удельной активности радионуклида, которые предназначены для измерения активности в источнике либо каком-либо образце. Радиометры поверхностной активности радионуклида или загрязненности поверхности служат для контроля загрязненности радионуклидами и получения измерительной информации о поверхностной активности радионуклида либо о потоке ионизирующих частиц, испускаемых с поверхности, загрязненной радиоактивными веществами. Также можно встретить радиометры объемной активности газа или аэрозоля, плотности потока ионизирующих частиц, назначение которых читается в их названии.

Спектрометрические

Спектрометр – прибор или установка для измерений ионизирующих излучений, предназначенные для получения измерительной информации о распределении ионизирующего излучения по одному и более параметрам, характеризующим источники и поля ионизирующих излучений. Основным параметром является энергия ионизирующего излучения. С помощью спектрометров можно не только измерять активность или поток ионизирующего излучения, но и идентифицировать радионуклиды, находящиеся в измеряемом образце.

В последнее время получили распространение многофункциональные приборы, включающие функции нескольких групп в одном приборе.

1.3 Порядок присвоения обозначений средствам измерений ионизирующих излучений

Для обозначения средств измерений ионизирующих излучений принято буквенное обозначение из трех элементов.

Первый элемент буквенного обозначения обозначает функциональное назначение средства измерений:

Д - дозиметры (дозиметрические установки);

Р - радиометры (радиометрические установки);

С - спектрометры (спектрометрические установки);

М - комбинированные средства измерений (дозиметры-радиометры, дозиметры-спектрометры, радиометры-спектрометры);

БД - блоки детектирования;

УД - устройства детектирования.

Второй элемент буквенного обозначения обозначает физическую величину, измеряемую средством измерений:

Д - поглощенная доза излучения;

М - мощность поглощенной дозы излучения;

Э - экспозиционная доза фотонного (гамма- или рентгеновского) излучения;

Р - мощность экспозиционной дозы фотонного (гамма- или рентгеновского) излучения;

В - эквивалентная доза излучения;

Б - мощность эквивалентной дозы излучения;
Ф - поток энергии ионизирующих частиц;
Н - плотность потока энергии ионизирующих частиц;
Т - перенос энергии ионизирующих частиц;
И - активность радионуклида в источнике;
У - удельная активность радионуклида;
Г - объемная активность радионуклида в газе;
Ж - объемная активность радионуклида в жидкости;
А - объемная активность радиоактивного аэрозоля;
З - поверхностная активность радионуклида;
Л - поток ионизирующих частиц;
П - плотность потока ионизирующих частиц;
Е - энергетическое распределение ионизирующего излучения;
С - перенос ионизирующих частиц;
Ч - временное распределение ионизирующего излучения;
К - две и более физических величин.

Третий элемент буквенного обозначения обозначает вид ионизирующего излучения:

А - альфа-излучение;
Б - бета-излучение;
Г - гамма-излучение;
Р - рентгеновское излучение;
Н - нейтронное излучение;
П - протонное излучение;
Т - тяжелые заряженные частицы;
С - смешенное излучение;
Х - прочие излучения.

Примеры буквенных обозначений средств измерений:

ДДБ - дозиметр (дозиметрическая установка) поглощенной дозы бета-излучения;
РЗА - радиометр (радиометрическая установка) поверхностной активности альфа-активного радионуклида (радиометр загрязненности поверхностей);
СЕГ - спектрометр (спектрометрическая установка) энергетического распределения гамма-излучения;
ДКН - дозиметр нейтронного излучения, измеряющий несколько физических величин (например дозиметр эквивалентной дозы и мощности эквивалентной дозы нейтронного излучения);
МКБ - комбинированное средство измерения бета-излучения (например дозиметр-радиометр бета-излучения);
УДДР - устройство детектирования поглощенной дозы рентгеновского излучения;
БДУГ - блок детектирования удельной активности гамма-излучения.

Нормы кодировки СИ ионизирующего излучения были приняты еще в конце прошлого века и соответственно не всегда могут удовлетворять потребности современных СИ, в таких случаях допускается отклонение от этих норм.

ГЛАВА 2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Диапазон измерений — область значений измеряемой величины, для которой нормируются погрешности средства измерений.

Диапазон показаний — область значений измеряемой величины, ограниченная начальным и конечным значениями шкалы отсчетного устройства средства измерений.

Предел измерений — наибольшее или наименьшее значение диапазона измерений.

Чувствительность — отношение изменения сигнала на выходе средства измерений к вызывающему его изменению измеряемой величины. Следует обратить внимание, что это — дифференциальная характеристика преобразования средства измерений, в общем случае определяемая для каждой точки диапазона измерений. Она имеет постоянное значение в случае линейной характеристики преобразования средства измерений. Следует также отметить неправильное использование данного понятия для обозначения нижнего предела измерений.

В общем виде погрешность средства измерений — это отклонение его действительной характеристики преобразования от номинальной.

Абсолютная погрешность средства измерений — разность между показанием средства измерений и действительным (истинным) значением измеряемой величины (разность между номинальным и действительным значением величины — для меры), выражаемая в единицах измеряемой величины.

Относительная погрешность средства измерений — отношение абсолютной погрешности к показанию средства измерений (номинальному значению — для меры). Она обычно выражается в процентах.

Приведенная погрешность средства измерений — отношение абсолютной погрешности к некоторому условно принятому значению величины, указываемому в техническом описании данного средства измерений.

Предел допускаемой погрешности средства измерений — наибольшая без учета знака погрешность (абсолютная или относительная) средства измерений, при которой оно может быть признано исправным и допущено к применению.

Выделяют основную и дополнительные погрешности средств измерений, что связано с понятиями нормальные и рабочие условия его применения.

Нормальные условия применения средства измерений — условия, при которых все влияющие на показания средства измерений величины находятся в пределах значений, установленных в НТД на данное средство измерений в качестве нормальных. Для нормальных условий применения нормируется основная погрешность средства измерений, причем нормируется для совокупности всех влияющих величин.

Рабочие условия применения средства измерений — диапазон значений влияющих величин (каждой в отдельности), для которых нормируются дополнительные погрешности средства измерений при отклонении их за пределы нормальной области значений. Дополнительные погрешности нормируются для каждой влияющей величины в отдельности.

ГЛАВА 3. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЙ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

В соответствии с ГОСТ 15484 ионизирующее излучение определяется как излучение, взаимодействие которого со средой приводит к образованию ионов различных знаков.

В настоящее время принято видимый свет и ультрафиолетовое излучение не включать в понятие "ионизирующее излучение", хотя они тоже в некоторых случаях могут производить ионизацию среды. Обычно ионизирующее излучение подразделяют на два больших класса - непосредственно ионизирующее излучение и косвенно ионизирующее излучение. Под непосредственно ионизирующим излучением понимается излучение, состоящее из заряженных частиц, имеющих кинетическую энергию, достаточную для ионизации при столкновении (электроны, протоны, альфа-частицы и др.). Под косвенно ионизирующим излучением понимается излучение, состоящее из незаряженных частиц, которые могут создавать непосредственно ионизирующее излучение или вызывать ядерные превращения (фотоны, нейтроны и др.).

В научно-технической литературе часто применяется термин "измерение ионизирующих излучений". Под этим термином следует понимать измерение любой физической величины, характеризующей радионуклидный (или другой) источник ионизирующего излучения или поле ионизирующего излучения, радиоактивные материалы (образцы) или взаимодействие ионизирующих излучений с веществом.

Основной особенностью радионуклидов является их самопроизвольное (спонтанное) превращение или распад с испусканием ионизирующего излучения. Этот процесс определяется основным уравнением распада:

$$N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda t} = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}} \approx N_0 \cdot e^{-0.693 \frac{t}{T}}$$

где N_0 и N_t – число атомов данного радионуклида на момент начала наблюдения (измерения) и по истечении времени, соответственно;

λ - постоянная распада рассматриваемого радионуклида;

T - период полураспада радионуклида;

e - основание натуральных логарифмов

Активность радионуклидов

Основной величиной в области радиометрии следует считать активность радионуклида в источнике (образце). Активность A радионуклида в любом источнике определяется отношением числа ΔN спонтанных ядерных переходов из определенного ядерно-энергетического состояния радионуклида, происходящих в данном его количестве за интервал времени Δt , к этому интервалу

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t}$$

Единицей активности радионуклида является беккерель (Бк), названный в честь французского ученого А.Беккереля, открывшего в 1896 г. явление

радиоактивности. Единица активности - беккерель, равная одному спонтанному переходу (распаду) за 1 с., принята в 1975 г. Генеральной конференцией по мерам и весам. До этого для измерения активности радионуклидов применялась единица кюри (Ки): $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$ и $1 \text{ Бк} = 2,70 \cdot 10^{-11} \text{ Ки}$.

Беккерель — производная единица, имеющая специальное наименование и обозначение, через основные единицы СИ выражается следующим образом:

$$\text{Бк} = \text{с}^{-1}.$$

Удельная активность радионуклидов

Удельная активность A_m радионуклида определяется отношением активности A радионуклида в образце к массе m , этого образца:

$$A_m = \frac{A}{m}$$

Под массой образца в случае твердых радионуклидных источников следует понимать массу химического элемента. Для правильного использования значений удельной активности радионуклида при применении этой физической величины следует в паспорте (свидетельстве об аттестации) на образцовый радионуклидный источник ионизирующего излучения четко указывать, к какой массе отнесено значение активности радионуклида. Это особенно необходимо при указании удельной активности растворов радионуклидов. Активность нуклида в растворе может быть отнесена к массе всего раствора, массе соединения, содержащегося в растворе, или к массе радионуклида, входящего в рассматриваемое соединение.

При определении удельной активности почвы, воды, продуктов питания активность обычно относят к массе образца.

Единицей удельной активности радионуклида является 1 Бк/кг:

$$1 \text{ Ки/кг} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк/кг}, \quad 1 \text{ Бк/кг} = 2,7 \cdot 10^{-11} \text{ Ки/кг}.$$

Объемная активность радионуклидов

Объемная активность A_v радионуклида определяется отношением активности A радионуклида в радиоактивном образце к объему V образца

$$A_v = \frac{A}{V}$$

Единицей СИ объемной активности радионуклида является 1 Бк/м³. В практических измерениях обычно применяется единица 1 Бк/л или 1 Ки/л: $1 \text{ Ки/л} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк/л}$, $1 \text{ Бк/л} = 2,7 \cdot 10^{-11} \text{ Ки/л}$. Для жидкостей с плотностью, близкой к 1 г/см³, применяется 1 Бк/кг ~ Бк/л.

Поверхностная активность радионуклидов

Поверхностная активность A_s радионуклида определяется отношением активности радионуклида A в радиоактивном материале, распределенном по данному элементу поверхности S , к площади этого элемента. Единицей СИ поверхностной активности радионуклида является 1 Бк/м². На практике обычно применяется единица 1 Бк/см², $1 \text{ Бк/см}^2 = 10^4 \text{ Бк/м}^2$

Поток и плотность потока ионизирующих частиц

Поток Φ ионизирующих частиц определяется отношением числа ионизирующих частиц, падающих на данную поверхность за интервал времени t , к этому интервалу. При применении этой величины для характеристики радионуклидных источников ионизирующих излучений надо учитывать следующее. В случае изотропно-излучающих источников гамма- и нейтронного излучений эти источники характеризуют потоком соответственно гамма-квантов или нейтронов в телесном угле 4π ср, т.е. числом ионизирующих частиц, испускаемых источником за 1 с через всю поверхность источника. При наличии асимметрии испускаемого излучения источником указывают коэффициент асимметрии.

Радионуклидные источники альфа- и бета-излучения рекомендуется характеризовать потоком соответственно альфа- или бета-частиц, выходящих из источника в телесном угле 2π ср. В случае источников, у которых телесный угол меньше 2π ср вследствие конструктивных особенностей, и его трудно определить (например, у источников, в которых активный материал заключен в углублении), эти источники характеризуют потоком частиц, выходящих через его рабочую поверхность (т.е. поверхность источника, предназначенная для выхода излучения). В этом случае поток частиц называют "внешним излучением источника".

Единицей потока ионизирующих частиц является 1 част/с.

Плотность потока φ_N ионизирующих частиц определяется отношением потока Φ_N ионизирующих частиц, проникающих в объем элементарной сферы, к площади S поперечного сечения этой сферы. Это определение справедливо для характеристик полей любых ионизирующих излучений.

Единицей СИ плотности потока ионизирующих частиц является 1 част/(с·м²).

Поглощенная доза излучения и мощность поглощенной дозы

Поглощенная доза D излучения определяется отношением средней энергии E , переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе m вещества в этом объеме:

$$D = \frac{E}{m}$$

Понятие поглощенной дозы ионизирующего излучения относится к любому виду излучения. При применении этой величины для характеристики самого ионизирующего излучения необходимо указывать точный состав среды, в которой определяется поглощенная доза. Единицей поглощенной дозы в международной системе является 1 Дж/кг облученного вещества. Генеральная конференция по мерам и весам в 1975 г. по предложению МКРЕ присвоила этой единице наименование "Грей": 1 Гр = 1 Дж/кг. Ранее применявшаяся единица 1 рад = 0,01 Гр; 1 Гр = 100 рад.

Экспозиционная доза и мощность экспозиционной дозы

Экспозиционная доза D_0 фотонного излучения определяется отношением суммарного заряда Q всех ионов одного знака, созданных в воздухе, когда все электроны и позитроны, освобожденные фотонами в элементарном объеме воздуха с массой m , полностью остановились в воздухе, к массе воздуха в указанном объеме

$$D_0 = \frac{Q}{m}$$

Как видно из определения, эта величина применяется для характеристики только фотонного излучения. В качестве единицы СИ экспозиционной дозы фотонного излучения следует применять 1 Кл/кг (воздуха). Временно допускается применение специальной единицы рентген (Р):

$$1 \text{ Р} = 2.58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг (точно); } 1 \text{ Кл/кг} = 3.876 \cdot 10^3 \text{ Р.}$$

Ввиду того, что очень трудно создать условия электронного равновесия при определении экспозиционной дозы фотонного излучения с большой энергией фотонов, применение единицы кулон на килограмм (рентген) допускается для измерения экспозиционных доз с энергией фотонов, не превышающей ~ 3 МэВ.

Эквивалентная дозы и мощность эквивалентной дозы

Эквивалентная доза $D_{\text{экв}}$ ионизирующего излучения определяется произведением поглощенной дозы D любого вида излучения в стандартной биологической ткани на коэффициент качества K этого излучения в данном элементе биологической ткани $D_{\text{экв}} = D \cdot K$

Как следует из определения, эта величина может применяться для характеристик полей любого вида ионизирующих излучений. Она также применяется для определения уровня радиационной опасности при хроническом облучении человека малыми дозами (до 250 мЗв в год) при работе со смешанным ионизирующим излучением.

Руководствуясь последними рекомендациями МКРЕ, в качестве биологической ткани стандартного состава принимается состав: O-76,2 %; C-11,1 %; H-10,1 %; N - 2,6 %.

В соответствии с ГОСТ 8.496-83 под коэффициентом качества ионизирующего излучения понимается безразмерное число, зависящее от линейной передачи энергии заряженных частиц в воде, значения которого приведены в табл.1.

Таблица 1. Зависимость коэффициента качества ионизирующего излучения от линейной передачи энергии заряженных частиц в воде

Линейная передача энергии в воде, кэВ/мкм	Коэффициент качества
$\leq 3,5$	1
7,0	2
23	5
53	10
≥ 175	20

Коэффициент качества для промежуточных значений линейной передачи энергии находится путем линейного интерполирования между указанными в таблице коэффициентами для данного интервала линейной передачи энергии. Например, для линейной передачи энергии, равной 29 кэВ/мкм, $K = 6$.

При косвенно ионизирующем излучении коэффициент качества определяется на основании линейной передачи энергии вторичных заряженных частиц в воде, создаваемых незаряженными частицами рассматриваемого косвенно ионизирующего излучения.

Единицей эквивалентной дозы в международной системе является зиверт, равный 1 Дж/кг. Зиверт равен эквивалентной дозе, при которой произведение поглощенной дозы в биологической ткани стандартного состава на коэффициент качества равно 1 Дж/кг.

Ранее применявшаяся единица эквивалентной дозы - бэр равна 0,01 Зв. Бэр следует расшифровывать как биологический эквивалент рада (а не рентгена, как это иногда указывается в литературе).

Эффективная и эквивалентная дозы — это нормируемые величины, то есть, величины, являющиеся мерой ущерба (вреда) от воздействия ионизирующего излучения на человека. К сожалению, они не могут быть непосредственно измерены. Поэтому в практику введены операционные дозиметрические величины, однозначно определяемые через физические характеристики поля излучения в точке, максимально возможно приближенные к нормируемым. Основной операционной величиной является амбиентный эквивалент дозы (синонимы, встречающиеся в русскоязычных документах — эквивалент амбиентной дозы, амбиентная доза).

Амбиентный эквивалент дозы $H^*(d)$ — эквивалент дозы, который был создан в шаровом фантоме МКРЕ (международной комиссии по радиационным единицам) на глубине d (мм) от поверхности по диаметру, параллельному направлению излучения, в поле излучения, идентичном рассматриваемому по составу, флюенсу и энергетическому распределению, но мононаправленном и однородном, то есть амбиентный эквивалент дозы $H^*(d)$ — это доза, которую получил бы человек, если бы он находился на месте, где проводится измерение. Единица амбиентного эквивалента дозы — зиверт (Зв, Sv).

Керма — сумма начальных кинетических энергий всех заряженных частиц, освобождённых незаряженным ионизирующим излучением (таким как фотоны или нейтроны) в образце вещества, отнесённая к массе образца. Определяется коэффициентом $K = \frac{dE}{dm}$, где E — переданная заряженным частицам энергия. Керма в общем случае отличается от поглощённой дозы. При низких энергиях первичного излучения керма примерно равна поглощённой дозе, тогда как при высоких энергиях K намного выше поглощённой дозы, поскольку часть энергии уносится из поглощающего объёма в форме рентгеновского тормозного излучения или быстрых электронов.

Единица кермы, как и поглощённой дозы — джоуль на килограмм, или грей, Гр (Gy); 1 Гр = 1 Дж/кг.

ГЛАВА 4. ЭТАЛОННАЯ БАЗА РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Эталонная база Республики Беларусь в области измерений ионизирующих излучений включает в себя три эталона:

НЭ РБ 07-01 «Национальный эталон единицы измерения кермы и мощности кермы в воздухе»

Метрологические характеристики:

Диапазон кермы в воздухе, в котором воспроизводится единица, составляет $7 \cdot 10^{-9} \div 3 \cdot 10^6$ Гр

Диапазон мощности кермы в воздухе, в котором воспроизводится единица, составляет $7 \cdot 10^{-10} \div 45$ Гр/с

Эталон обеспечивает воспроизведение со средней квадратической погрешностью результатов измерений, не превышающей 0,5 %

НЭ РБ 38-18 «Национальный эталон единицы активности радионуклидов»

Таблица 2. Метрологические характеристики эталона

Наименование метрологической характеристики эталона	Диапазон	Неисключённая систематическая погрешность, %, не более	Случайная погрешность %, не более	Расширенная неопределённость, %, не более
Активность источников альфа-излучения из радионуклида плутония - 239 на твёрдой плоской подложке	$(4 \div 2 \cdot 10^7)$ Бк	5	3	6
Поток альфа-частиц в телесном угле 2л	$(2 \div 10^7)$ с ⁻¹	5	3	6
Активность источников бета-излучения из радионуклидов стронция-90 + иттрия-90 на твёрдой плоской подложке	$(10 \div 2 \cdot 10^7)$ Бк	5	3	6
Поток бета-частиц в телесном угле 2л	$(3,7 \div 7,5 \cdot 10^6)$ с ⁻¹	5	3	6
Наименование метрологической характеристики эталона	Диапазон	Неисключённая систематическая погрешность, %, P = 0,95, не более	Случайная погрешность, %, P = 0,95, не более	Расширенная неопределённость, %, P = 0,95, не более
Активность точечных гамма-излучающих нуклидных источников	$(10 - 10^6)$ Бк Диапазон энергий гамма-излучения от 50 до 3 000 кэВ	2	2	3

Удельная активность растворов гамма-излучающих нуклидов	$(0,01 \div 10^6)$ Бк·г ⁻¹ Диапазон энергий гамма-излучения от 50 до 3 000 кэВ	4	2	6
Наименование метрологической характеристики эталона	Диапазон	Неисключённая систематическая погрешность, %, P = 0,95, не более	Случайная погрешность, %, P = 0,95, не более	Расширенная неопределённость, %, P = 0,95, не более
Удельная активность растворов чисто бета-излучающих мононуклидов	$(200 \div 20\ 000)$ Бк·г ⁻¹	2	3	4
Удельная активность растворов радионуклидов стронция-90 +иттрия-90 в равновесии	$(4 \div 20\ 000)$ Бк·г ⁻¹	2	3	4

НЭ РБ 41-18 «Национальный эталон единицы объемной активности радона в воздухе»

Таблица 3. Метрологические характеристики эталона

Наименование метрологической характеристики эталона	Диапазон измерений	Неисключённая систематическая погрешность, %, не более	Случайная погрешность, %, не более	Расширенная неопределённость, %, не более
Объёмная активность ²²² Rn в воздухе	$(20 \div 2 \cdot 10^6)$ Бк/м ³	5	3	11

Нестабильность эталона за год должна составлять не более 0,5 %.

Помимо эталонов для передачи единиц измерений в области измерений ионизирующих излучений используются эталонные поверочные установки УКПН для поверки дозиметров нейтронного излучения, УПГД2, УПДЗ и УПД-ИНТЕР для поверки дозиметров гамма-излучения

ГЛАВА 5. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ АКТИВНОСТИ РАДИОНУКЛИДОВ

Методы измерений активности радионуклидов

5.1 Методы абсолютных измерений

Метод абсолютного счета заряженных частиц и фотонов основан на знании числа частиц или фотонов, испускаемых при каждом акте распада нуклида, и их регистрации в выбранном телесном угле. Существует несколько разновидностей этого метода:

- *Метод определенного телесного угла* применяется в основном при измерении α -излучения и низкоэнергетического фотонного излучения (от 1 до 80 кэВ). При этом используются пропорциональные счетчики, сцинтилляторы из ZnS, тонкие кристаллы из CsI, а также полупроводниковые детекторы. Минимальная погрешность измерений активности оценивается в 0,1 % для α -излучения и 1 % для фотонного излучения. Менее перспективен данный метод для измерения активности по β -излучению, поскольку наличие большого числа поправочных коэффициентов увеличивает погрешность метода до 5—10 %.
- *Метод 4π -счета* предназначен для измерения активности α - и β -излучающих нуклидов. Он реализуется с помощью счетчиков Гейгера — Мюллера, пропорциональных 4π -счетчиков, монокристаллических сцинтилляционных детекторов, а также детекторов на основе жидких сцинтилляторов. Погрешность определения удельной активности α - и β -излучателей при использовании пропорциональных счетчиков оценивается в 0,3—0,5 %, а с помощью жидких сцинтилляторов 0,2—0,3 % (для β -излучателей с максимальной энергией более 150 кэВ) и 0,05—0,1% (для α -излучателей). Для низкоэнергетических β -излучателей погрешность измерения активности составляет 1—3 %.
- *Метод счетчиков внутреннего наполнения*, или метод внутреннего газового счета, применяется для измерения активности нуклидов с малой энергией β -частиц (^1H , ^{14}C , ^{28}S и др.). Используются пропорциональные счетчики, в которых предусмотрены меры по исключению концевго эффекта. Погрешность измерения активности низкоэнергетических β -излучателей составляет примерно 1 %.

Метод совпадений используется для измерения активности нуклидов, распад которых сопровождается испусканием одного или нескольких фотонов γ - или рентгеновского излучения. При измерении активности этим методом регистрируются совпадения между α -частицами и фотонами ($\alpha\gamma$ -совпадения), между двумя γ -квантами ($\gamma\gamma$ -совпадения), между β -частицами и фотонами ($\beta\gamma$ -совпадения) и т.д. Данный метод реализуется с помощью установок совпадений, имеющих два измерительных канала, в каждом из которых используется детектор

с максимальной чувствительностью к одному виду излучения. Измерительные каналы работают как в самостоятельном режиме, так и в режиме совпадений.

Метод ионизационной камеры основан на ионизационном эффекте, создаваемом излучением в рабочем объеме ионизационной камеры. Для случая, когда излучение полностью поглощается в газе ионизационной камеры, активность рассчитывается по формуле

$$A = IW/(eE),$$

где I — сила ионизационного тока в цепи камеры; W — средняя энергия ионообразования; e — заряд электрона; E — энергия α -частиц или средняя энергия β -частиц.

Метод применим и для измерения активности γ -излучающих нуклидов. Заметим, что в этом случае камера должна быть отградуирована по образцовому источнику или раствору, и, следовательно, метод не будет абсолютным. Метод ионизационной камеры используется для измерения активности в диапазоне 10^6 — 10^9 Бк. Хотя метод и не обеспечивает высокой точности, он применяется в тех случаях, когда требуется быстрое определение активности, а также в качестве контрольного при сравнении результатов измерений, полученных различными абсолютными методами.

Калориметрический метод основан на физическом явлении, заключающемся в выделении энергии при радиоактивном распаде. При помещении радиоактивного препарата в калориметр последний будет нагреваться за счет поглощения в его объеме выделяемого тепла. Активность источника связана с тепловой мощностью J , переданной калориметру, следующим соотношением

$$A = J/(kE),$$

где E — энергия, освобожденная при одном акте распада; k — коэффициент, учитывающий степень поглощения излучения в стенке калориметра.

Метод наиболее перспективен при измерении больших активностей (10^9 — 10^{12} Бк), где использование других методов затруднено из-за больших погрешностей в определении мертвого времени, эффектов наложения импульсов и т. д. При соответствующем подборе калориметров и измерительных устройств он может обеспечить измерение активности α -излучающих нуклидов с погрешностью 0,2—0,5 %, β -излучающих нуклидов — 0,8—1,5 %, γ -излучающих нуклидов — 1—3 %. Погрешность определения активности β -излучающих нуклидов в основном определяется погрешностью, с которой установлены значения средней энергии β -частиц.

Электростатический метод основан на измерении электрического заряда, накопленного на изолированном источнике за счет уноса из него заряда противоположного знака α - или β -частицами. Зная заряд, накопленный источником за определенное время, и тип распада, можно определить активность нуклида в источнике. Поскольку этот метод не имеет каких-либо преимуществ

перед другими методами измерений и, кроме того, имеется ряд сложностей в его реализации, он не нашел широкого применения.

Анализ методов абсолютных измерений активности нуклидов показывает, что ни один из них не является универсальным. Каждый метод обладает своими достоинствами и недостатками. Поэтому выбор того или иного метода должен осуществляться с учетом различных факторов: диапазона измеряемых активностей, особенностей схем распада, физико-химического состояния радиоактивного образца, требуемой точности измерений и т. д.

5.2 Методы относительных измерений

Абсолютные методы измерений используются лишь в научных исследованиях и в метрологической практике. В последнем случае абсолютные методы реализуются в эталонных установках. Во всех других случаях используют методы относительных измерений. Эти методы значительно проще в практической реализации, методика измерения в них не требует анализа и оценки источников погрешности в том объеме, как это требуется для абсолютных методов. Средства измерений, реализующие такие методы, отличаются простотой работы с ними и сравнительно невысокой стоимостью.

Все методы абсолютных измерений активности можно сделать относительными, если градуировку приборов и установок осуществлять с помощью образцов с известным содержанием радионуклида.

Когда эталонный и исследуемый источники аналогичны по технологии изготовления и конструкции и содержат один и тот же радионуклид, данные средства измерения представляют собой компарирующее устройство, выполняющее измерение по формуле

$$A_x = A_0(I_x/I_0),$$

где A_x , A_0 — активности измеряемого и эталонного источника соответственно; I_x , I_0 — зарегистрированные эффекты за один и тот же промежуток времени от измеряемого и образцового источников соответственно.

Средства, реализующие методы относительных измерений активности радионуклидов и производных от нее величин (радиометрические приборы и установки, далее — радиометры) в соответствии с классификацией, установленной ГОСТ 27451—87, подразделяются на радиометры активности радионуклида в источнике, удельной активности радионуклида, объемной активности радионуклида в жидкости, объемной активности радионуклида в газе, объемной активности радиоактивного аэрозоля, поверхностной активности радионуклида, потока ионизирующих частиц, плотности потока ионизирующих частиц и многофункциональные радиометры, измеряющие две или более физические величины. Кроме того, каждый тип радиометра подразделяется на группы в зависимости от регистрируемого излучения (альфа-, бета-, гамма-радиометр).

К основным параметрам радиометров ГОСТ 4.59—79 относят диапазон измеряемой активности или производных от нее величин, предел допускаемой основной погрешности или основную погрешность при доверительной вероятности, равной 0,95, чувствительность, энергетическую зависимость чувствительности, нестабильность показаний, уровень собственного фона. В зависимости от типа радиометра этот перечень дополняется в соответствии с требованиями НТД на конкретный тип радиометров (ГОСТ 23923—89, ГОСТ 22251—89, ГОСТ 21496—89, ГОСТ 17225—85).

5.3 Радиометры удельной (объемной) активности нуклидов объектов внешней среды

Среди радиометров этого класса наиболее многочисленными являются радиометры, регистрирующие γ -излучение (РКГ-АТ1320, РУГ-92, радиометры РКГ марки «Алиот»). Различные разновидности радиометров такого типа обеспечивают измерение удельной активности в диапазоне от 3,0 до 10^6 Бк/кг. Как правило, эти радиометры предназначены одновременно и для измерения объемной активности жидких проб.

Проверка радиометров удельной (объемной) активности проводится с помощью эталонных источников ионизирующих измерений. Большинство, выпускаемых и эксплуатируемых в республике радиометров удельной (объемной) активности предназначены для измерения Цезия-137 в различных пробах, поэтому при проверке используются радиоактивные источники из этого радионуклида. При проверке диапазона измерения активности следует использовать источники со значениями активности, позволяющими провести измерения значения удельной(объемной) активности в каждой декаде. Если радиометр, помимо ^{137}Cs , предназначен для измерения других радионуклидов, необходимо также использовать для проверки как минимум один источник, изготовленный из каждого радионуклида.

Источники для проверки радиометров удельной (объемной) активности представляют собой эталонные радиоактивные растворы или эталонные меры активности специального назначения, помещенные в сосуд необходимой геометрии. Допускается использовать для проверки эталонные спектрометрические гамма источники типа ОСГИ. При этом для имитации объемного источника используется специальное дистансерное устройство, конструкция которого описана в технической документации на радиометр, а коэффициент перехода от показаний радиометра к активности источника получен в ходе проведения государственных испытаний. Примерами таких радиометров могут служить, выпускаемые в настоящее время в республике, радиометры РКГ-АТ1320 (рисунок 15) и РУГ-92-2.

Говоря о погрешности измерения удельной или объемной активности, необходимо подчеркнуть, что она зависит от ряда факторов, характеризующих весь измерительный процесс. Поэтому достаточно однозначно можно говорить лишь о погрешности градуировки прибора и статистической погрешности. Суммарная погрешность для разных радиометров находится в пределах 20 - 30 %



Рисунок 15. Гамма-радиометр удельной активности РКГ-АТ1320

5.4 Радиометры объемной активности радионуклидов в газе и аэрозолях.

Из этой группы приборов наиболее распространенными являются радиометры радона (РРА-01М) и радиоактивных аэрозолей (РАА-10), измеряющие объемную активность радона и радиоактивных аэрозолей по α -излучению. Существующая номенклатура таких радиометров охватывает диапазон измеряемых объемных активностей от 20 до $5 \cdot 10^6$ Бк/л. Погрешность измерения составляет $\pm 30\%$.



Рисунок 16. Радиометр радона РРА-01М-03

Для поверки таких радиометров помимо наличия эталонного средства измерений необходимо создать атмосферу, содержащую соответствующий радиоактивный газ или аэрозоль.

В связи с тем, что во многих странах нормируется содержание радона и его дочерних продуктов распада (ДПР) в воздухе помещений, широкое распространение получили как раз радиометры радона и его ДПР. В качестве эталонного средства измерения объемной активности радона во многих национальных метрологических институтах используется радиометр радона Alpha Guard, откалиброванный с помощью первичных эталонов.

Для создания атмосферы, содержащей определенное количество радона, используются герметичные емкости различного объема. Т.к. радон является дочерним продуктом распада радия-226, то для получения радона используются различные формы радия-226 помещенные в герметичные емкости либо барботеры. По прошествии 38 суток (десять периодов полураспада радона), активность радона в этой емкости становится равной активности содержащегося в ней радия-226. Используя для расчётов закон радиоактивного распада время накопления можно уменьшить до достижения необходимой значения активности внутри герметичной емкости, часто называемой «генератор радона».

Активность радона, накопленного в генераторе рассчитывается по формуле:

$$A_{Rn} = f A_{Ra} e^{-\lambda_{Ra} T_D} (1 - e^{-\lambda_{Rn} T_A}),$$

где f – коэффициент эманации ^{222}Rn ,

A_{Rn} – активность ^{222}Rn накопленная в барботере за время T_A ,

A_{Ra} – полная активность ^{226}Ra в барботере на момент аттестации t_r ,

λ_{Ra} – постоянная распада ^{226}Ra ,

λ_{Rn} – постоянная распада ^{222}Rn ,

T_D – временной интервал от аттестации активности ^{226}Ra до начала накопления,

T_A – время накопления ^{222}Rn в барботере.

После накопления необходимого количества радона в «генераторе радона» его подключают в замкнутую цепь с радоновой камерой и переводят радон из генератора в камеру путем продувки генератора воздухом камеры.

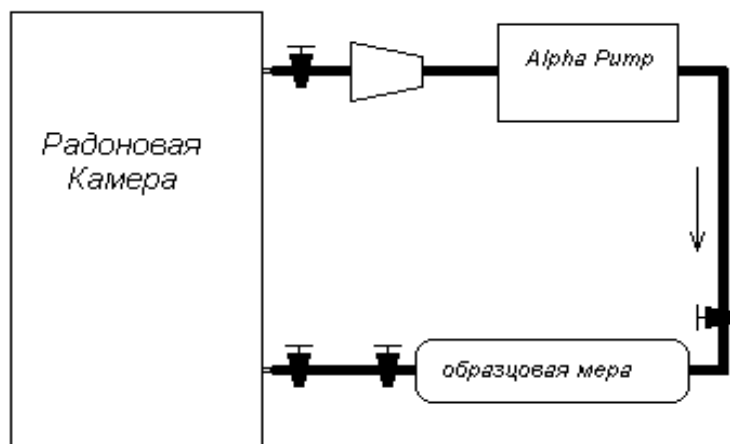


Рисунок 17. Схема соединения оборудования для перевода радона из образцовой меры (генератора радона) в радоновую камеру, Alpha Pump – насос из состава эталонного радиометра AlphaGuard.

Существует для метода передачи единицы объемной активности радона в воздухе:

- метод непосредственного сличения;
- метод прямых измерений.

При использовании метода непосредственного сличения единица передается от эталонного прибора. Эталонный прибор помещается внутри камеры, средство измерения (СИ), которому передается единица – в камеру либо вне ее, в

последнем случае прибор подключается к камере в замкнутую цепь. За истинное значение объемной активности (ОА) радона в камере принимается значение, измеренное эталонным радиометром радона.

Метод прямых измерений. В этом методе за истинное значение ОА радона в камере принимается значение, рассчитанное по формуле:

$$A_{Rn} = \frac{f A_{Ra} e^{-\lambda_{Ra} T_D} (1 - e^{-\lambda_{Rn} T_A})}{V} + A_{BG},$$

где A_{BG} – фоновая объемная активность радона в камере до перевода внутрь радона,

V – объем радоновой камеры с учетом объема приборов, помещенных внутрь.

Эталонный радиометр служит для контроля значения ОА радона в камере. СИ, которому передается единица, располагается таким же образом, как и в предыдущем методе.

Первый метод более прост в использовании и наиболее широко используется для проверки рабочих средств измерений. Для проверки эталонных средств измерений более подходит метод прямых измерений, он позволяет получить гораздо более точные значения объемной активности радона в воздухе, однако требует гораздо больших затрат.

5.5 Радиометры плотности потока ионизирующих частиц и фотонов

Радиометры данного типа измеряют уровень радиоактивной загрязненности различными радионуклидами, главным образом по их α - или β -излучению. Например, дозиметр-радиометр МКС-АТ1117М с блоком БДПА-01 определяет плотность потока α -частиц в диапазоне $0,1 \cdot 10^5$ часц.мин⁻¹см⁻², а с блоком БДПБ-01 - плотность потока β -частиц в диапазоне $1,0 \cdot 5 \cdot 10^5$ часц.мин⁻¹см⁻². Погрешность измерений находится на уровне ± 20 %. К этому же классу приборов можно отнести измеритель скорости счета УИМ2-2 с блоком БДЗА2-01 (для α -излучения) и блоком БДБ2-01-И1 (для β -излучения).

Такие приборы в принципе могут использоваться и как радиометры поверхностной активности при их соответствующей градуировке с помощью плоских эталонных источников с достаточно большой площадью активного слоя, с известной поверхностной активностью и создаваемой им плотностью потока частиц. Однако в реальных измерениях воспроизводить условия, аналогичные условиям градуировки, очень сложно. Не идентичность этих условий приводит к большим и трудно учитываемым погрешностям.

Для проверки радиометров такого типа используются плоские эталонные источники β -излучения из радионуклида $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ типа С0 и источники α -излучения из радионуклида ^{239}Pu типа П9. Источники этих типов выпускаются шести типоразмеров с различной площадью активного слоя. Рекомендуется использовать для проверки источники с площадью активного слоя равной или немного большей, чем площадь детектора.

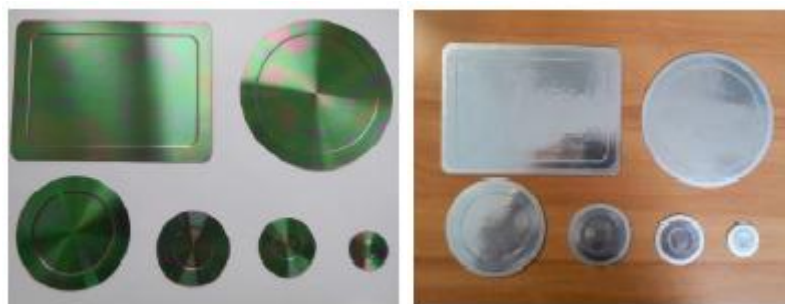


Рисунок 18. Плоские эталонные источники типа П9 (слева) и С0 (справа) излучения

Источники подразделяются на типы в зависимости от площади активной части источников в соответствии с таблицей 2.

Таблица 4. Типы источников в зависимости от площади активной части

Тип бета источников $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$	Тип альфа источников ^{239}Pu	Площадь активной части источников, см^2
1С0	1П9	1
2С0	2П9	4
3С0	3П9	10
4С0	4П9	40
5С0	5П9	100
6С0	6П9	160

ГЛАВА 6. ДОЗИМЕТРЫ (ГАММА И РЕНТГЕНОВСКИЕ)

Дозиметрические приборы составляют самую многочисленную группу средств измерений ионизирующих излучений. В основном это показывающие приборы, предназначенные для прямых измерений соответствующих величин.

Для дозиметрических приборов одной из главных нормируемых метрологических характеристик является предел допускаемой относительной основной погрешности. Максимальное значение допускаемой погрешности для приборов, измеряющих определенную дозиметрическую величину, регламентируется государственным стандартом на соответствующую государственную поверочную схему. Это значение определяется, как правило, не только запросами практической деятельности, в интересах которой производится измерения, но и уровнем развития измерительной техники, ее возможностями в настоящее время. Для измерений дозиметрических величин разных видов излучений значение предела допускаемой относительной основной погрешности может достигать 50 %. Если предел допускаемой погрешности превышает установленный максимальный уровень для данного типа, прибор относится к разряду индикаторов.

Для дозиметрических приборов ГОСТ 27451—87 требует нормирования дополнительных погрешностей. Они определяются как пределы допускаемой погрешности в зависимости от температуры, относительной влажности, атмосферного давления, напряжения электропитания, постоянного и переменного магнитного поля и др. Пределы их отклонений в рабочих условиях измерений должны указываться в стандартах и технических условиях на конкретные дозиметрические приборы.

Важной нормируемой метрологической характеристикой дозиметрического прибора является его энергетическая зависимость (зависимость чувствительности прибора от энергии измеряемого излучения). Разработчики прибора стремятся свести к минимуму эту зависимость, что связано с техническими, а в некоторых случаях и с принципиальными затруднениями. ГОСТ 27451—87 устанавливает верхний предел энергетической зависимости дозиметрических приборов.

Можно выделить три основные области применения средств измерений дозиметрических величин по функциональному признаку.

Первая область — **контроль радиационной безопасности.**

К средствам измерений такого назначения относят инспекционные приборы, применяемые для оценки радиационной обстановки на местности, регистрирующие фон излучения от естественных радионуклидов и искусственных техногенных радиоактивных источников (ДКС-АТ1123, СРП-88, МКС-АТ1117, МКС-АТ6130), дозиметрические приборы, применяемые для оценки радиационной обстановки в помещениях, в том числе дозиметрические блоки детектирования, входящие в системы радиационного контроля, смонтированные стационарно (ДКС-1119, СРК-2327, УИМ с блоком детектирования БДМГ). К этой же группе приборов относятся и индивидуальные дозиметры (ДКГ-АТ2503, ДКГ-РМ1610, ДКГ-РМ1621, комплекс термолюменесцентных дозиметров ДТУ).

Измерения при контроле радиационной безопасности характеризуются низкими уровнями доз и мощностей доз и сравнительно невысокими требованиями к точности.

Вторая область применения приборов для измерения дозиметрических величин — *лучевая терапия заболеваний*. По сравнению с измерениями при контроле радиационной безопасности эта область характеризуется на 1—3 порядка большими уровнями доз и мощности доз, а также существенно более высокими требованиями к точности измерений.

В этой области используются приборы: Unidos и Nomex с различными типами ионизационных камер, мультиметр Varacuda, Piranha, Unfors.

Третья область использования приборов и методов измерений дозиметрических характеристик — *радиационная технология*. Задача технологической дозиметрии — измерение степени облучения различных материалов с целью придания им определенных свойств. Ионизирующие излучения, применяемые в радиационной технологии, характеризуются значениями доз и мощностей доз, на несколько порядков превышающими область терапевтического использования излучений.

Таким образом, задача дозиметрии — это измерение степени облучения различных объектов при уровнях от близких к естественному фону при контроле радиационной безопасности до вызывающих изменения в материалах, стойких к воздействию ионизирующих излучений. Эти уровни доз и мощностей доз перекрывают значения на 11 —12 порядков при различных требованиях к точности измерений в зависимости от решаемой задачи. Естественно, что как физические принципы, лежащие в основе измерений, так и конструктивные особенности средств измерений отличаются многообразием.

Общий момент во всех трех областях дозиметрии — разделение решаемой задачи на две. В первой определяются характеристики поля излучения или источника с целью предварительной оценки того, какое воздействие излучение может оказать, если объект (в том числе человек при решении задач контроля радиационной безопасности и лучевой терапии) окажется в этом поле. Во второй — определяется степень воздействия излучения на объект, т. е. определяется значение той физической величины, которая является мерой радиационного воздействия.

Пределы допускаемых относительных погрешностей рабочих дозиметрических приборов контроля радиационной безопасности составляют 8—30 %. Поэтому вся номенклатура этих приборов может быть поверена с помощью эталонных СИ, имеющих погрешности 1,5 – 10 %.

В качестве эталонных СИ используются дозиметрические поверочные установки и эталонные дозиметры. Наиболее жесткие требования предъявляются к поверочным дозиметрическим установкам 1-го и 2-го разрядов. Установки 3-го разряда — это, как правило, устройства, позволяющие проводить поверку с выездом поверителя (транспортабельные) и использующие методы подобия радиационного поля и эквивалентных полей. В настоящее время практически не используются.

В состав поверочной установки входят источник излучения и система крепления прибора в его поле. Поле излучения, воздействующее на поверяемый прибор, может меняться перемещением прибора относительно источника, источника относительно прибора, применением фильтров, либо изменением режима работы электрофизической установки, генерирующей излучение.

В состав поверочных дозиметрических установок 1-го и 2-го разрядов, поле излучения которых создается радионуклидными источниками γ -излучения, рекомендуется включать эталонные приборы соответствующих разрядов, хотя это требование и не является обязательным. Поверочные установки, в которых источником излучения служат электрофизические аппараты, должны иметь в своем составе эталонные приборы для постоянного контроля характеристик поля излучения.

В установках с источниками γ -излучения 1-го и 2-го разрядов, как правило, создается коллимированный пучок излучения. Они имеют в своем составе градуировочную линейку с ценой деления 1 мм и юстировочную систему для установки первичного преобразователя прибора в пучке таким образом, чтобы погрешность установки не превышала 0,2 % необходимого расстояния между источником излучения и первичным преобразователем. Установки комплектуются наборами источников ^{60}Co ($E_\gamma = 1,25$ МэВ), ^{137}Cs ($E_\gamma = 0,66$ МэВ), ^{241}Am ($E_\gamma = 59,5$ кэВ) и в ряде случаев ^{226}Ra ($E_\gamma = 0,840$ МэВ).

Дозиметрические поверочные установки с источниками γ -излучения, как правило, имеют типовой узел коллимации. В СССР стандартизован коллиматор, изображенный на рис.19 (справа). Канал коллиматора должен иметь цилиндрическую форму. Длина его от центра источника должна быть не менее 150 мм по направлению выхода излучения; отношение диаметра канала коллиматора к длине канала должно составлять 0,2; 0,4 и 0,6 при отклонении не более 10 %. В международных стандартах требования к коллимационному узлу несколько другие. Он представляет собой набор минимум шесть свинцовых (а в идеале – вольфрамовых) диафрагм толщиной 15 мм с коническим отверстием установленные с промежутком в 20 мм. Диафрагмы имеют различный диаметр такой, что образуют конус с вершиной в точке расположения источника. Коллиматор имеющий такую конструкцию практически лишен рассеянного излучения. На рис.19 (слева) приведены изображения классического коллимационного узла и современного коллиматора приведенного в международных стандартах.

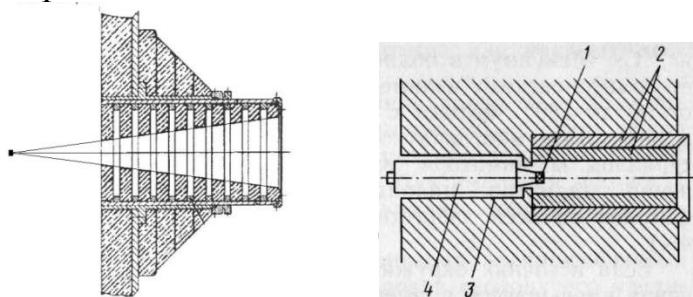


Рисунок 19. Типовые коллиматоры, используемые в дозиметрических поверочных установках.

В диапазоне энергий примерно от 10 до 140 кэВ поверка дозиметрических приборов проводится на образцовых установках, в состав которых входят рентгеновские аппараты, генерирующие фотонное излучение в этом диапазоне энергий. ГОСТ 8.087—2000 устанавливает общие требования к этим установкам.

Оценка погрешности дозиметрических приборов при их поверке (эталонных и рабочих дозиметров контроля радиационной безопасности) имеет особенность, связанную с тем, что поверяемый прибор имеет погрешность, сравнимую с той, которая приписывается прибору или установке, на которой он поверяется. Поэтому погрешность поверочного средства необходимо принимать в расчет. Это отличает рассматриваемую область измерений от некоторых других, в которых погрешностью образцовых средств обычно пренебрегают.

Погрешность эталонных средств при этом следует рассматривать как неисключенную систематическую с равномерным законом распределения (если иное не указано в свидетельстве на эталонный прибор). Общий подход к таким оценкам нашел отражение в государственных стандартах.



Рисунок 20. Примеры современных поверочных дозиметрических установок.

Для поверки дозиметров, используемых в терапии, как правило используются установки с источниками из ^{60}Co большой активности. При поверке используются водные фантомы и эталонные СИ поверенные в единице поглощенной в воде дозы.

При поверке индивидуальных дозиметров также используются фантомы различной формы и размеров для имитации частей тела, на которых должны располагаться эти дозиметры при эксплуатации.

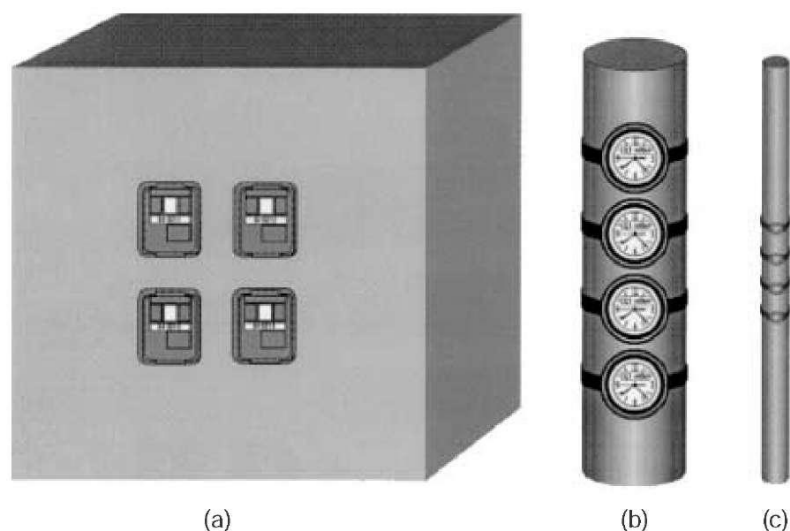


Рисунок 21. Примеры фантомов, используемых при поверке индивидуальных дозиметров.

Процедура поверки дозиметров

В соответствии с СТБ 8065 при проведении поверки дозиметров должны быть выполнены следующие операции:

- внешний осмотр
- опробование
- определение основной погрешности

При внешнем осмотре должно быть установлено: соответствие комплектности поверяемого дозиметрического прибора техническому описанию в объеме необходимом для поверки; отсутствие на приборе, блоках детектирования загрязнений, механических повреждений, влияющих на их работу; наличие свидетельства о предыдущей поверке.

При опробовании необходимо проверить в соответствии с ТД: действие органов управления; работоспособность источников питания и осветительных систем; показания прибора от контрольного источника, если он входит в комплект поверяемого прибора; возможность установки нуля при включении и выключении питания и при переключении диапазонов.

Для определения основной относительной погрешности используются эталонные поверочные дозиметрические установки 1^{го}, 2^{го} и 3^{го} разрядов, а также рабочие эталоны, удовлетворяющие требованиям ГОСТ 8.087. Все средства поверки должны иметь действующие свидетельства о поверке или метрологической аттестации. Допускается применять другие средства поверки, удовлетворяющие по точности требованиям СТБ 8065.

Основную погрешность поверяемых СИ определяют одним из следующих методов:

- Методом прямых измерений

- Методом сличения при помощи компаратора с образцовыми 1^{го} или 2^{го} разряда дозиметрическими приборами

- Методом сличения с использованием эквивалентного поля или подобия радиационных полей для рабочих дозиметрических приборов.

Подробно методы изложены в приложении А СТБ 8065.

Расчет основной относительной погрешности дозиметра осуществляется в соответствии с методикой поверки

Положительные результаты поверки оформляются свидетельством о поверке по форме, установленной Госстандартом и приведенной в ТКП 8.003. Поверенный дозиметр пломбируют или клеймят.

Дозиметры не прошедшие поверку бракуют, к применению не допускают и на них выдается извещение о непригодности с указанием причин по форме в соответствии с приложением Г ТКП 8.003. Свидетельство о предыдущей поверке аннулируется.

ГЛАВА 7. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Поверка дозиметров нейтронных излучений может осуществляться в соответствии с государственной поверочной схемой, возглавляемой государственным первичным эталоном единиц мощности поглощенной и эквивалентной доз нейтронного излучения (ГОСТ 8.347—79). Поверочная схема предусматривает эталонные средства двух разрядов. В качестве типового эталонного средства может служить поверочная установка УКПН-1М, разработанная во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. В установке используются радионуклидные источники нейтронов, заключенные в контейнер с коллиматором из полиэтилена с 3 % бора. Установка снабжена измерительной линейкой (как и дозиметрические поверочные установки γ -излучения) и перемещающейся на ней тележкой для размещения поверяемого прибора. Аттестация такой установки заключается в определении значения максимальной мощности эквивалентной дозы, создаваемой в фантоме из тканеэквивалентного вещества падающим на него пучком нейтронов. Так как максимальная мощность дозы создается на поверхности фантома, измеренное значение приписывается той точке, где ось пучка пересекала поверхность фантома, обращенную к источнику. Аттестация производится с помощью аппаратуры, входящей в состав рабочего эталона единицы мощности эквивалентной дозы нейтронного излучения. Фантом используется только для аттестации установки. При поверке рабочих дозиметров нейтронов центр блока детектирования прибора помещается в аттестованную точку поля установки. Эталонные установки 1-го разряда могут быть аттестованы с погрешностью 6—10%, а 2-го—11—18% при $P = 0,95$.



Рисунок 22. Поверочная нейтронная дозиметрическая установка УКПН-1М

ГЛАВА 8. СПЕКТРОМЕТРЫ ЭНЕРГИЙ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Спектрометры энергии ионизирующих излучений можно условно разделить на спектрометры энергии альфа-, гамма- и рентгеновского излучений с полупроводниковыми и сцинтилляционными детекторами.

Основные параметры этих спектрометров включают:

- энергетическое разрешение;
- диапазон энергий регистрируемого излучения;
- предел допускаемой основной погрешности характеристики преобразования (интегральной нелинейности);
- эффективность регистрации в пике полного поглощения;
- максимальная входная статистическая нагрузка;
- нестабильность показаний (амплитуды сигнала во времени);
- время установления рабочего режима;
- время непрерывной работы.

Методы определения этих параметров подробно описаны в ГОСТ 26874-86.

8.1 Альфа-спектрометры

При проведении поверки гамма спектрометров определяются следующие метрологические характеристики:

- энергетическое разрешение
- интегральная нелинейность
- максимальная входная статистическая нагрузка
- эффективность регистрации

В качестве эталонов используются: комплект эталонных спектрометрических альфа источников типа ОСАИ в составе: источник $^{233}\text{U} + ^{239}\text{Pu} + ^{238}\text{Pu}$, источник ^{238}Pu , энергетическое разрешение источника (собственная ширина линии альфа-излучения на половине высоты) не более 20 кэВ, незманирующийся источник ^{226}Ra , источник ^{239}Pu ; генератор импульсов, амплитуда импульсов от 0,01 до 10 В, частота следования импульсов от 50 Гц до 100 кГц; частотомер, диапазон частот от 0 до 500 МГц

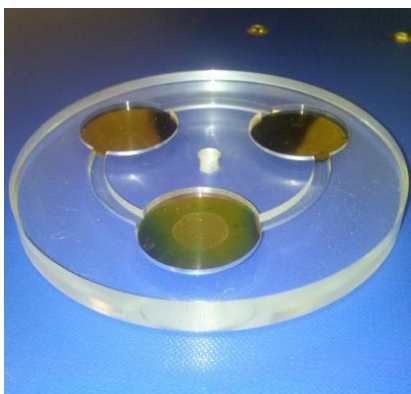
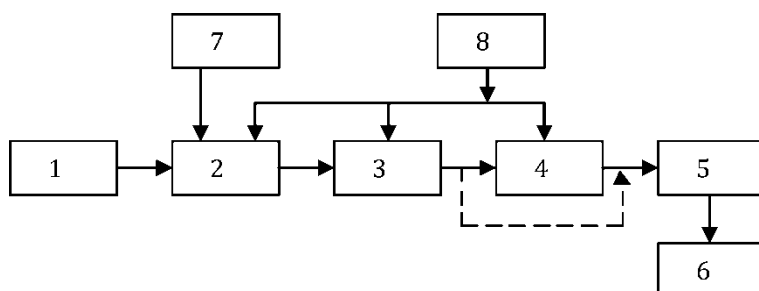


Рисунок 23. Эталонные спектрометрические источники типа ОСАИ (слева) типа ОСГИ (справа)

В том случае, если поверяемый альфа-спектрометр собран из отдельных серийно выпускаемых блоков, необходимо проверить правильность их соединения в соответствии с рисунком 10 или с эксплуатационной документацией на поверяемый альфа-спектрометр.



- 1 – блок детектирования; 2 – предусилитель; 3 – основной усилитель;
 4 – усилитель-экспандер; 5 – многоканальный амплитудный анализатор;
 6 – вывод информации; 7 – высоковольтный блок питания детектора;
 8 – блок питания электронной аппаратуры

Рисунок 24 Блок схема поверяемого альфа-спектрометра

Подробно процедура поверки альфа-спектрометров описана в разработанном БелГИМ стандарте СТБ 8066-2016.

8.2 Гамма-спектрометры

При проведении поверки гамма спектрометров определяются следующие метрологические характеристики:

- энергетическое разрешение
- диапазон энергии регистрируемого гамма-излучения и интегральной нелинейности
- максимальная входная статистическая нагрузка
- погрешность измерения «живого» времени
- эффективность регистрации в пике полного поглощения
- минимальная измеряемая активность
- погрешность измерения активности

В качестве эталонов используются эталонные спектрометрические источники типа ОСГИ из радионуклидов ^{57}Co , ^{139}Ce , ^{203}Hg , ^{113}Sn , ^{137}Cs , ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{88}Y , ^{152}Eu , ^{133}Ba , ^{65}Zn , ^{22}Na , ^{228}Th , активность от 10^2 до 10^5 Бк, погрешность активности не более 6 %. А также эталонные источники специального назначения или эталонные радиоактивные растворы из радионуклидов ^{57}Co , ^{139}Ce , ^{203}Hg , ^{113}Sn , ^{137}Cs , ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{88}Y , ^{152}Eu , ^{133}Ba , ^{65}Zn , ^{22}Na , ^{228}Th , удельная активность от 10^2 до 10^5 Бк/кг, погрешность активности не более 6 %

Подробно процедура поверки гамма-спектрометров описана в разработанном БелГИМ стандарте СТБ 8067-2017. Поверка рентгеновских спектрометров включает те же этапы что и гамма-спектрометров. Отличие состоит только в используемых эталонных источниках, для рентгеновских спектрометров, как правило, используются источники с низкоэнергетическими радионуклидами.

ГЛАВА 9. ПОВЕРКА ИСТОЧНИКОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Источники ионизирующего излучения.

Образцовые источники и растворы являются образцовыми мерами физических величин, характеризующих ионизирующие излучения. Их применение позволяет с максимальной эффективностью и с наименьшей потерей точности передавать размеры этих физических величин от эталонов к рабочим средствам измерений.

В зависимости от назначения образцовые источники и растворы аттестуются по следующим характеристикам:

активность радионуклида в источнике;

удельная активность радионуклида (отношение активности радионуклида к массе образца);

объемная активность радионуклида (отношение активности радионуклида к объему образца);

внешнее ионизирующее излучение (поток ионизирующих частиц или фотонов, выходящих из радиоактивного источника излучения через его рабочую поверхность);

внешний выход (число ионизирующих частиц или фотонов данной энергии, испускаемых радиоактивным источником в заданный телесный угол);

энергия ионизирующих частиц, испускаемых радиоактивным источником;

собственное энергетическое разрешение радиоактивного источника (полная ширина на половине высоты энергетического распределения ионизирующих частиц, испускаемых источником для соответствующего энергетического перехода);

мощность экспозиционной дозы.

Для большинства источников и растворов в соответствии с техническими условиями, устанавливается также максимально допустимое содержание радиоактивной примеси в % к активности основного радионуклида, которое контролируется в процессе их аттестации.

Использование образцовых источников и растворов предполагает знание соответствующих параметров радиоактивного распада радионуклидов. Поэтому в паспортах или свидетельствах о метрологических аттестациях включены ядерно-физические данные, характеризующие радиоактивный распад конкретного радионуклида: период полураспада, энергия α -, β -, γ -, рентгеновского излучений или конверсионных электронов, абсолютная интенсивность (число частиц или квантов данной энергии, испускаемых на 100 актов распада) и др.

Первичную аттестацию и поверку осуществляют квалифицированные специалисты головных институтов государственной метрологической службы. По результатам аттестации (поверки) образцовым источникам присваивается I, II или III разряд в соответствии с действующими поверочными схемами.

Срок службы образцовых источников и растворов указан в паспорте. В том случае если этот срок превышает срок действия выданного на них свидетельства, они могут быть переаттестованы метрологическими лабораториями Госстандарта,

а также метрологическими лабораториями министерств и ведомств, имеющих соответствующее разрешение Госстандарта.

9.1 Образцовые спектрометрические альфа-источники (ОСАИ)

ОСАИ предназначены для градуировки α -спектрометров.

Набор ОСАИ содержит четыре источника на основе радионуклидов: ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{226}Ra +дочерние продукты распада ($^{238}\text{Pu}+^{239}\text{Pu}+^{233}\text{U}$). Каждый источник представляет собой металлическую подложку диаметром 24 и толщиной 2 мм. На одну из сторон подложки нанесен и прочно зафиксирован соответствующий радионуклид или смесь радионуклидов. Диаметр активного пятна источника составляет 12 мм.

Аттестуемыми характеристиками являются: энергия α -частиц, испускаемых источником, активность радионуклида (смеси радионуклидов) и собственное энергетическое разрешение. Погрешность аттестации по энергии α -частиц равна $\pm 1,6 \cdot 10^{-15}$ Дж (10 кэВ) при доверительной вероятности 0,95. Погрешность аттестации по активности составляет ± 5 % при доверительной вероятности 0,95.

Активность отдельных радионуклидов в источнике, содержащем несколько радионуклидов, отличается не более чем на ± 60 %.

Комплект ОСАИ упакован в футляр из органического стекла или пластмассы.

Назначенный срок службы ОСАИ — 3 года.

По истечении этого срока комплект ОСАИ должен быть проверен на соответствие его качества требованиям ТУ 95.703—80.

9.2 Источники альфа-, бета-излучений

Источники α -, β -излучений предназначены для поверки дозиметрической, радиометрической и электронно-физической аппаратуры, а также для поверки аналогичных источников по низшему разряду.

Источники представляют собой металлические подложки с углублением, в котором нанесен и зафиксирован радиоактивный препарат с соответствующим радионуклидом: ^{239}Pu , ^{234}U , ^{238}U (природный) — для источников α -излучения и $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ — для источников β -излучения.

Подложки для источников α -излучения изготавливаются из нержавеющей стали, а для источников β -излучения — из алюминия или его сплавов. Толщина подложки 1 мм, углубление 0,5 мм.

Радиоактивный препарат имеет защитное покрытие:

для источников α -излучения в виде окисной пленки металлов;

для источников β -излучения в виде алюминиевой фольги толщиной 0,05 мм

В соответствии с поверочной схемой ГОСТ 8.033 источники аттестуются по активности по I, II или III разряду с погрешностями ± 5 , ± 7 , ± 10 % соответственно при доверительной вероятности 0,99.

Допустимое отклонение активности от номинального значения и неравномерность распределения активного вещества не превышают $\pm 10\%$.

В процессе аттестации для источников α - и β -излучения устанавливается значение внешнего излучения в телесный угол 2π , погрешность которого зависит от погрешности аттестации по активности.

Для получения данных внешнего излучения в телесный угол 2π нужно значение активности разделить на коэффициент 2,04 (для источников α -излучения) и 2,66 (для источников β -излучения).

Источники могут эксплуатироваться при нормальном атмосферном давлении в воздушных средах, имеющих загрязнение химическими веществами в пределах, соответствующих предельно допустимой концентрации для воздуха производственных помещений по ГОСТ 19445.

Назначенный срок службы для источников α -, β -излучения — 5 лет. Срок действия свидетельства — 2 года.

9.3 Источники гамма-излучений

Источники предназначены для градуировки и поверки дозиметров, по мощности экспозиционной, поглощенной и эквивалентной доз и для аттестации источников γ -излучения по мощности экспозиционной, поглощенной, эквивалентной доз и активности.

Источники γ -излучения из ^{60}Co представляют собой облученные нейтронами цилиндры из металлического кобальта, помещенные в герметичные одинарные капсулы из нержавеющей стали, а из ^{137}Cs — цилиндрические одинарные или двойные капсулы из нержавеющей стали, заполненные порошком ^{137}Cs в виде гранул на основе цеолита или в виде стеклосплава на основе цеолита.

Допустимые отклонения измеренных значений внешнего γ -излучения от номинала на момент изготовления не превышают:

у источников из ^{60}Co +60%;

у источников из ^{137}Cs $\pm 25\%$.

Назначенный срок службы:

источников из ^{60}Co — 10 лет;

источников из ^{137}Cs — 7 лет.

Аттестуемой характеристикой является мощность экспозиционной дозы; погрешность аттестации для источников I разряда составляет 3—4%, для источников II разряда — 5—8% при доверительной вероятности 0,95.

9.4 Образцовые спектрометрические гамма-источники (ОСГИ)

ОСГИ предназначены для градуировки γ -спектрометров и радиометров в диапазоне энергии 9,5 — 432 фДж (59,16 — 2700 кэВ). С помощью ОСГИ можно измерять также основные характеристики спектрометрической аппаратуры (энергетическое разрешение, форма аппаратурной линии, интегральная нелинейность и др.).

В комплект ОСГИ входит 11 источников с радионуклидами: ^{65}Zn , ^{54}Mn , ^{137}Cs , ^{22}Na , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{88}Y , ^{203}Hg , ^{241}Am , ^{139}Ce , ^{113}Sn .

Каждый источник выполнен в виде кольца с размещенными в середине двумя органическими пленками толщиной 6 ± 1 мг/см², между которыми в центре нанесено радиоактивное вещество. Диаметр активного пятна 4 мм. Диаметр источника 29 мм. Аттестуемой характеристикой ОСГИ является активность.

Погрешность определения активности радионуклида в источнике составляет 3% при доверительной вероятности 0,99. Номинальное значение активности радионуклида в источнике 10^5 Бк за исключением источника с радионуклидом ^{203}Hg , для которого это значение составляет $3\cdot 10^5$ Бк.

Назначенный срок службы источников ^{137}Cs , ^{22}Na , ^{60}Co , ^{241}Am составляет 2 года, для остальных источников — 1 год. Срок действия свидетельства соответствует сроку службы.

9.5 Образцовые радиоактивные растворы (ОРР)

ОРР предназначены для градуировки радиометрической и спектрометрической аппаратуры, а также для измерения активности радиоактивных препаратов, содержащих аналогичные радионуклиды, относительным методом.

ОРР представляют собой растворы известного химического состава, содержащие определенные радионуклиды и расфасованные в герметичные стеклянные ампулы.

Аттестуемой характеристикой ОРР является удельная активность радионуклида в растворе. Погрешность определения удельной активности радионуклида дается с доверительной вероятностью 0,99. Она зависит от радионуклида и соответствующего разряда, по которому проводится аттестация.

ОРР сохраняют свои характеристики в диапазоне температур 10-35°C. Срок годности ОРР и срок действия свидетельства зависит от радионуклида.

Список рекомендуемой литературы

1. Закон Республики Беларусь «Об обеспечении единства измерений» от 5 сентября 1995 г. № 3848-ХП
2. ТКП 8.003-2011 (03220) Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь. Поверка средств измерений. Правила проведения работ
3. СТБ 8065-2016 Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь. ДОЗИМЕТРЫ И ИЗМЕРИТЕЛИ МОЩНОСТИ ДОЗЫ ФОТОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ. Методика поверки
4. СТБ 8066-2016 Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь. АЛЬФА-СПЕКТРОМЕТРЫ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ДЕТЕКТОРАМИ. Методика поверки
5. СТБ 8067-2017 Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь. Спектрометры энергии гамма-излучений. Методика поверки
6. СТБ ISO 4037-1-2014 Эталонные рентгеновские и гамма-излучения для калибровки дозиметров и измерителей мощности дозы и определения их отклика как функции энергии фотона. Часть 1. Характеристики и методы получения излучения
7. СТБ ISO 4037-3-2013 Эталонные рентгеновские и гамма-излучения для калибровки дозиметров и измерителей мощности дозы и определения их отклика как функции энергии фотона. Часть 3. Калибровка дозиметров окружающей среды и индивидуальных дозиметров и измерение их отклика в зависимости от энергии и угла падения излучения
8. ГОСТ 17225—85 Радиометры загрязненности поверхностей альфа- и бета-активными веществами. Общие технические требования и методы испытаний
9. ГОСТ 21496—89 Средства измерений объемной активности радионуклидов в газе. Общие технические требования и методы испытаний
10. ГОСТ 22251—89 Средства измерений объемной активности искусственного радиоактивного аэрозоля. Общие технические требования и методы испытаний
11. ГОСТ 23923—89 Средства измерений удельной активности радионуклида. Общие технические требования и методы испытаний
12. ГОСТ 26874-86. Спектрометры энергий ионизирующих излучений. Методы измерения основных параметров
13. ГОСТ 27451-87 Средства измерений ионизирующих излучений. Общие технические условия
14. ГОСТ 8.031-82 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений потока и плотности потока нейтронов
15. ГОСТ 8.033-96 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений активности

- радионуклидов, потока и плотности потока альфа-, бета-частиц и фотонов радионуклидных источников
- 16.ГОСТ 8.034-82 ГСИ. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы и потока энергии рентгеновского и гамма-излучений
 - 17.ГОСТ 8.035-82 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений поглощенной дозы и мощности поглощенной дозы бета-излучения
 - 18.ГОСТ 8.039-79 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений активности нуклидов в бета-активных газах
 - 19.ГОСТ 8.040-84 Государственная система обеспечения единства измерений. Радиометры загрязненности поверхностей бета-активными веществами. Методика поверки
 - 20.ГОСТ 8.041-84 Государственная система обеспечения единства измерений. Радиометры загрязненности поверхностей альфа-активными веществами. Методика поверки
 - 21.ГОСТ 8.070-96 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений поглощенной и эквивалентной доз и мощности поглощенной и эквивалентной доз фотонного и электронного излучений
 - 22.ГОСТ 8.087-2000 Государственная система обеспечения единства измерений. Установки дозиметрические рентгеновского и гамма-излучений эталонные. Методика поверки по мощности экспозиционной дозы и мощности кермы в воздухе
 - 23.ГОСТ 8.090-79 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений объемной активности радиоактивных аэрозолей
 - 24.ГОСТ 8.105-80 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный специальный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений плотности потока и флюенса нейтронов на ядерно-физических установках
 - 25.ГОСТ 8.203-76 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений поглощенной дозы рентгеновского излучения с максимальной энергией фотонов от 3 до 9 фДж (от 20 до 60 кэВ)
 - 26.ГОСТ 8.308-78 Государственная система обеспечения единства измерений. Функциональные узлы, блоки и устройства аппаратуры для измерения ионизирующих излучений. Счетчики импульсов. Методы и средства поверки

- 27.ГОСТ 8.347-79 Государственная система обеспечения единства измерений.
Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений мощности
- 28.ГОСТ 8.355-79 Государственная система обеспечения единства измерений.
Радиометры нейтронов. Методы и средства поверки
- 29.ГОСТ 8.368-79 Государственная система обеспечения единства измерений.
Плотномеры радиоизотопные жидких сред и пульп. Методы и средства поверки
- 30.ГОСТ 8.473-82 Государственная система обеспечения единства измерений.
Государственный специальный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений экспозиционной дозы, средней мощности экспозиционной дозы, среднего потока и средней плотности потока энергии импульсного рентгеновского излучения.
- 31.ГОСТ 8.521-84 Государственная система обеспечения единства измерений.
Установки поверочные нейтронного излучения. Методика поверки
- 32.ГОСТ 8.526-85 Государственная система обеспечения единства измерений.
Радиометры естественных радиоактивных аэрозолей. Методика поверки
- 33.ГОСТ 8.527-85 Государственная система обеспечения единства измерений.
Средства измерений объемной активности искусственных радиоактивных аэрозолей. Методика поверки
- 34.ГОСТ 8.529-85 Государственная система обеспечения единства измерений.
Средства измерений объемной активности парообразного йода-131.
Методика поверки
- 35.ГОСТ 8.565-99 Государственная система обеспечения единства измерений.
Порядок установления и корректировки межповерочных интервалов эталонов
- 36.ГОСТ 8.576-2001 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений потока электронов, плотности потока электронов и флюенса (переноса) электронов, потока энергии, плотности потока энергии и флюенса (переноса) энергии электронного и тормозного излучений
- 37.ГОСТ 8.581-2003 Государственная система обеспечения единства измерений. Источники альфа-излучения радиометрические эталонные.
Методика поверки
- 38.ГОСТ 8.582-2003 Государственная система обеспечения единства измерений. Источники бета-излучения радиометрические эталонные.
Методика поверки
- 39.ГОСТ Р 8.804-2012 Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений кермы в воздухе, мощности кермы в воздухе, экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы, амбиентного, направленного и индивидуального эквивалентов дозы, мощностей амбиентного, направленного и индивидуального эквивалентов дозы и потока энергии рентгеновского и гамма-излучений