

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ И КАДРОВ

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»**

Ю. Н. Бушуев, Ю. В. Азаренко

РАДИОМЕТРИЯ И ДОЗИМЕТРИЯ

В двух частях

Часть 1

РАДИОМЕТРИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

**Рекомендовано учебно-методическим объединением по
образованию в области сельского хозяйства в качестве
практикума для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по специальности 1-33 01 06 Экология сельского
хозяйства (специализация 1-33 01 06 01 Сельскохозяйственная
радиоэкология)**

**Горки
БГСХА
2014**

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ И КАДРОВ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»

Ю. Н. Бушуев, Ю. В. Азаренко

РАДИОМЕТРИЯ И ДОЗИМЕТРИЯ

В двух частях

Часть 1

РАДИОМЕТРИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию в области сельского хозяйства в качестве практикума для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 1-33 01 06 Экология сельского хозяйства (специализация 1-33 01 06 01 Сельскохозяйственная радиоэкология)

Горки
БГСХА
2014

УДК 539.1.074:(076.5)
ББК 31.42я73
Б 90

*Рекомендовано Научно-методическим советом БГСХА
26.05.20 (протокол №)
и методической комиссией агроэкологического факультета
29.06.20 (протокол №).*

Авторы:
Старший преподаватель *Ю.Н. Бушуев*;
Ассистент *Ю.В. Азаренко*

Рецензенты:
Кандидат сельскохозяйственных наук, доцент *А.В. Щур*;
кандидат технических наук, доцент *В.Н. Основин*;
кандидат технических наук, *С.И. Козлов*

Бушуев, Ю.Н.
Б 90 Радиометрия и дозиметрия: практикум. В 2 ч. Ч 1. Радиометрия
ионизирующих излучений. /Ю.Н. Бушуев, Ю.В. Азаренко. – Горки:
БГСХА, 2014. –170 с.: ил.
ISBN 978-985-467.

Приведены краткая теория и методические указания по выполнению лабораторных работ по дозиметрии ионизирующих излучений, контрольные вопросы и рекомендуемая литература.

Для студентов учреждений высшего образования, обучающихся по специальности 1-33 01 06 Экология сельского хозяйства (специализация 1-33 01 06 01 Сельскохозяйственная радиэкология).

УДК 539.1.074:(076.5)
ББК 31.42я73

ISBN 978-985-467

© УО «Белорусская государственная
сельскохозяйственная академия», 2014

ВВЕДЕНИЕ

Радиометрия является одним из основных разделов метрологии в области ионизирующих излучений, в задачу которого входит разработка методов и средств точных измерений количественных характеристик радиоактивных источников излучения с целью обеспечения единства и правильности этих измерений.

Специфические свойства ионизирующих излучений позволяют создавать различные методы бесконтактного определения, как содержания радиоактивных изотопов, так и измерения состава сред, плотности, уровня и т. д.

Методы обнаружения излучений, которыми сопровождаются естественная или искусственная радиоактивность и ядерные реакции, а также космических лучей основаны на взаимодействии излучения с облучаемым веществом. Эти излучения при прохождении через вещество отдают свою кинетическую энергию непосредственно орбитальным электронам облучаемого вещества.

При взаимодействии любых видов ионизирующих излучений с веществом образуются ионы и свободные электроны в поглощающем веществе. Энергия, затрачиваемая частицей в результате различных процессов взаимодействия, в дальнейшем может преобразовываться в иные формы энергии, наиболее удобные для регистрации. В большинстве случаев это электрический сигнал в виде электрического тока или напряжения. На этом принципе основаны практически все методы регистрации ионизирующих излучений. Все эти процессы, заключающиеся в преобразовании энергии излучения в другие виды энергии, используют для регистрации частиц и квантов. Чтобы зарегистрировать указанные процессы, необходимы определенные устройства.

Устройства, предназначенные для преобразования энергии ионизирующего излучения в другие виды энергии, удобные для индикации и последующей регистрации и измерения, называются **детекторами ионизирующего излучения** (от лат. *detector* – тот, кто раскрывает, обнаруживает).

Но детекторы, как правило, это лишь часть комплекса аппаратуры, предназначенной для регистрации излучений. Эффект, создаваемый излучением в детекторе, должен быть преобразован в электрический ток, который может привести в действие электрическое регистрирующее измерительное устройство.

Построение аппаратуры для измерения и контроля величины интенсивности излучения связано с созданием электронных измерительных и регистрирующих устройств.

Несмотря на различие методов измерения и способов контроля содержания конкретных излучателей в средах, измерительная аппаратура во многих случаях оказывается весьма схожей. Это, как правило, детектор излучений, преобразующий какой-либо из параметров излучения в параметр электрических сигналов (амплитуда, длительность, средняя частота); устройство амплитудного или временного отбора и регистрирующие схемы (показывающие устройства).

Каскады, определяющие входные параметры приборов, должны выделять сигналы определенной амплитуды: разделение регистрируемого сигнала и шума схемы или фона, разделение сигналов разной энергии или разного вида излучения. Входной сигнал может быть очень малой величины, поэтому непосредственно около детектора часто располагают предварительный усилитель импульсов.

Радиометры – приборы, предназначенные для получения информации об активности нуклидов, плотности потока и потоке ионизирующих частиц или фотонов.

Существует электрофизическая аппаратура, которая позволяет расшифровать в деталях свойства излучения, проходящего через детектор. Приборы, предназначенные для анализа свойств (состав, энергия и т. д.) излучений, называются анализаторами. В настоящее время различные типы анализаторов принято называть спектрометрами.

Спектрометры – приборы, предназначенные для получения информации о спектре распределения ионизирующего излучения по одному или более параметрам, например, по энергии квантов или частиц в потоке излучения.

В качестве детекторов ионизирующего излучения наиболее широко применяются ионизационные камеры, газоразрядные счетчики, сцинтилляторы различных типов и полупроводниковые детекторы (ППД).

В практикуме рассмотрены основные положения радиометрии ионизирующих излучений, особенности построения и работы электронных схем радиометров, принципы и методы регистрации различных видов излучений и измерения активности. Для закрепления изучаемого курса в практикуме приведены лабораторные работы.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОМЕТРИИ

1.1. Условные обозначения радиометрических приборов

Буквенное обозначение средств измерений в радиометрии состоит из трех элементов.

Первый элемент – функциональное назначение средств измерений: Р – радиометры, С – спектрометры, БД – блоки детектирования, УД – устройство детектирования.

Второй элемент – физическая величина, измеряемая данным средством измерения: К – 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 величины.

Третий элемент – 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 – смешанное излучение, Х – прочие излучения.

Примеры буквенных обозначений средств измерения ионизирующих излучений: РКГ – радиометр для измерения активности нуклида в гамма-источнике; СЕГ – спектрометр для регистрации энергетического распределения гамма-излучения в источнике; БДГ – блок детектирования гамма-излучения; БДБ – блок детектирования бета-излучения.

1.2. Устройство и принцип работы радиометрических приборов

Электрические схемы радиометрических приборов представляют собой определенные сочетания соответствующим образом соединенных деталей, предназначенных преимущественно для преобразования параметров электрических сигналов, поступающих в схемы от детекторов ядерных излучений.

Измерительная схема выделяет, преобразует, накапливает, хранит и

выдает информацию в виде электрических сигналов, удобных для наблюдения, записи, вычисления или управления другими приборами. Вспомогательные элементы обеспечивают заданные режимы работы детектора и измерительной схемы. К ним относятся источники питания, блоки программирования режима работы, контроля исправности и градуировки, регистрирующие устройства (цифropечатающие устройства, самописцы, осциллографы, счетчики импульсов и т. д.).

Функциональные схемы приборов в значительной мере определяются формой сигналов, поступающих от детекторов излучений и с выхода измерительной схемы (в виде импульсов – дискретная форма информации или в виде медленно меняющегося тока или напряжения – аналоговая форма информации).

Коротко остановимся на основных компонентах радиометрической аппаратуры. В состав радиометрического прибора обычно входят:

- детектор ионизирующего излучения с источником электропитания (здесь энергия ионизирующего излучения преобразуется в электрический сигнал);

- блок преобразования электрических сигналов (здесь осуществляется изменение амплитуды, формы, количества, длительности электрических сигналов и их анализ, т.е. приведение полученных с детектора электрических сигналов к виду, удобному для их расшифровки и регистрации);

- регистрирующее и показывающее устройство (здесь регистрируются преобразованные электрические сигналы, и выдается информация о параметрах ионизирующего излучения, попавшего на детектор в виде цифровой или компьютерной визуализации);

- источники питания детектора и электронной схемы предусилителя и усилителя сигналов;

- остальные блоки радиометра могут питаться как от основного источника питания радиометра, так и от самостоятельных блоков питания, находящихся в конкретных блоках радиометра.

Функциональная блок-схема основных узлов радиометрического прибора представлена на рисунке 1.

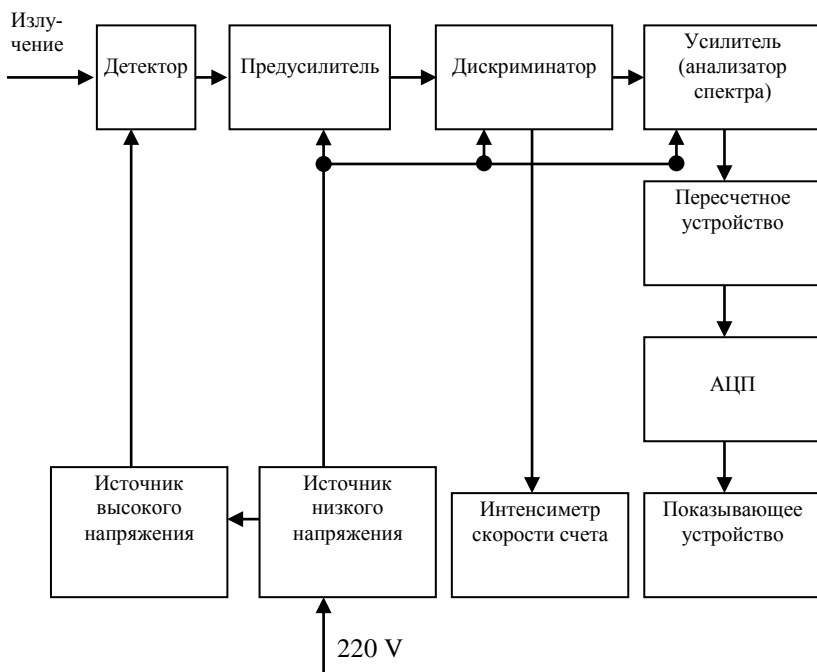


Рис.1. Функциональная блок-схема основных узлов радиометра

Незначительные различия всех приборов состоят лишь в том, что в «простых» радиометрах типа ПП-8, ПП-12, ПП-15, КРК-1, КРВП-ЗАБ, РКБ4-1еМ и т.п. анализаторы спектра и аналого-цифровой преобразователь (АЦП) отсутствуют, а для многоканальных спектрометров эти блоки необходимы.

Очень большое значение на качество работы радиометра (шумы, помехоустойчивость, чувствительность) оказывает схема связи детектора с пересчетным блоком. Основные схемы связи детекторов с усилителем (предусилителем) приведены на рисунках 2–5. Схема согласования детекторов для уменьшения шумов, как правило, монтируется в непосредственной близости от выхода детектора, а лучший вариант – непосредственно на анодном выводе детектора.

Схемы связи (согласования) детекторов с электронными устройствами. Детекторы ионизирующих излучений работают в комплексе с различными электронными усилителями, преобразовательными и измерительными показывающими, регистрирующими, индикаторными и другим устройствами, имеющими определенные электрон-

ные схемы. Снимаемый с сопротивления нагрузки детектора сигнал поступает на вход электронной схемы, которой часто служит усилительный каскад с определенными входными параметрами. Для обеспечения максимальной амплитуды сигнала входная емкость усилителя должна быть минимальной, а входное сопротивление должно быть больше сопротивления нагрузки. При этом меньше сказывается влияние изменения входного сопротивления на параметры сигнала. Если в схему поступает непосредственно ток детектора, то входное сопротивление усилительного каскада должно быть меньше выходного сопротивления самого детектора.

Связь сопротивления нагрузки R_n с усилительным каскадом бывает гальванической и через разделительный конденсатор (рис.2).

В первой схеме сопротивление нагрузки детектора одновременно является элементом усилительного каскада и подключено к затвору полевого транзистора, а во второй схеме эти функции выполняются разными сопротивлениями и конденсатор связи C_c имеет большой запас по рабочему напряжению с абсолютным отсутствием утечек, которые создают ложные сигналы на входе усилителя. В эквивалентной схеме входа емкость детектора C_d подключена параллельно сопротивлению нагрузки R_n , а емкость входа электронной схемы C_1 параллельно сопротивлению R_c . В этой схем сигнал с нагрузки детектора поступает на вход усилителя с минимальным искажениями.

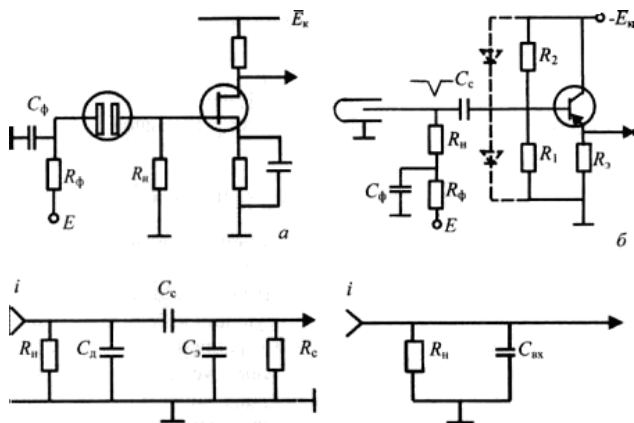


Рис. 2. Схемы связи детекторов с электронными схемами:
 а - гальваническая связь; б - связь через разделительный конденсатор;
 в - эквивалентная схема входа при передаче сигнала через разделительный конденсатор; г - обобщенная эквивалентная схема.

Для передачи сигнала с выхода ФЭУ сцинтилляционного детектора в соединительный или формирующий кабель применяется составной

повторитель (рис. 3). Коэффициент усиления составной схемы определяется коэффициентами усиления входящих в нее транзисторов и поэтому его входное сопротивление может быть значительным. Его выходное сопротивление не зависит от сопротивления источника сигнала. В схеме выход составного повторителя подается на высокочастотный кабель, выполняющий две функции. Часть кабеля ЛЗ₁ служит для передачи сигнала от детектора к электронной установке, а короткозамкнутый отрезок ЛЗ₂ формирует сигнал, укорачивая его. Сопротивление R', включенное на входе кабеля ЛЗ₁ необходимо для согласования выходного сопротивления повторителя и волнового сопротивления кабеля.

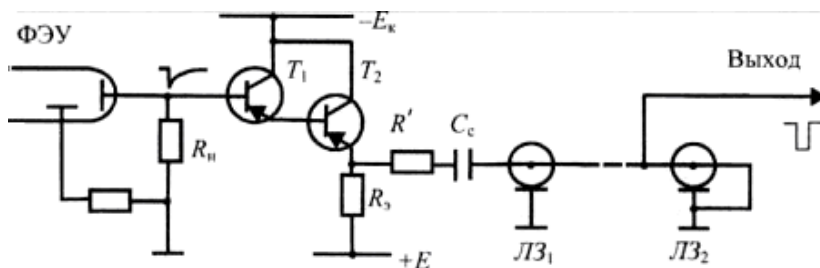


Рис.3. Применение составного повторителя для передачи сигналов с выхода ФЭУ в кабель.

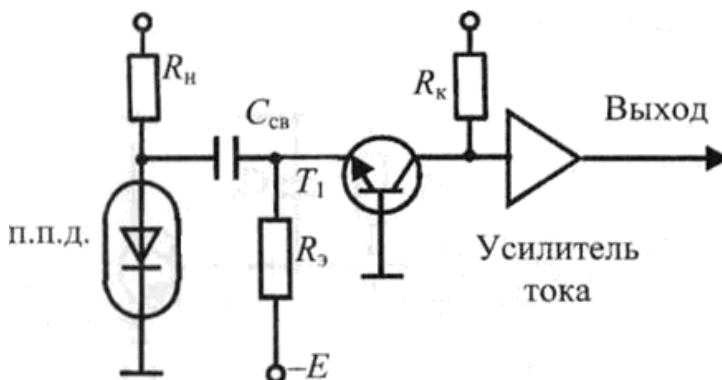


Рис.4. Передача импульса тока полупроводникового детектора каскадом с общей базой.

В быстродействующих схемах, предназначенных для определения временных корреляций и требующих минимальной длительности им-

пульсов, используются непосредственно импульсы тока детектора без предварительного интегрирования. Для передачи импульсов тока применяют схемы с малым входным сопротивлением. Входное сопротивление схемы с общей базой определяется сопротивлениями эмиттерного и базового переходов и не превышает десятков Ом. Поэтому даже при значительной емкости полупроводникового детектора (ППД) постоянная времени входа мала и обеспечивается работа с большими нагрузками. Емкость связи $C_{св}$ подбирается из условий неискаженной передачи импульса тока детектора в низкоомную цепь эмиттера T_1 (Рис.4).

Схема передачи импульсов тока детектора с последующим интегрированием приведена на рисунке 5. Импульс тока ФЭУ сцинтилляционного счетчика через соединительный высокочастотный кабель поступает на вход каскада с заземленной базой T_1 . Из-за малого входного сопротивления каскада затягивание импульсов тока на входе не происходит. Необходимое интегрирование производится цепью $-R_i C_{и}$, включенной в коллектор T_1 . Каскад на эмиттерном повторителе T_2 , обладающий высоким входным сопротивлением, обеспечивает передачу импульсов напряжения для последующего усиления. Сопротивление R вводится для согласования малого входного сопротивления схемы с волновым сопротивлением кабеля.

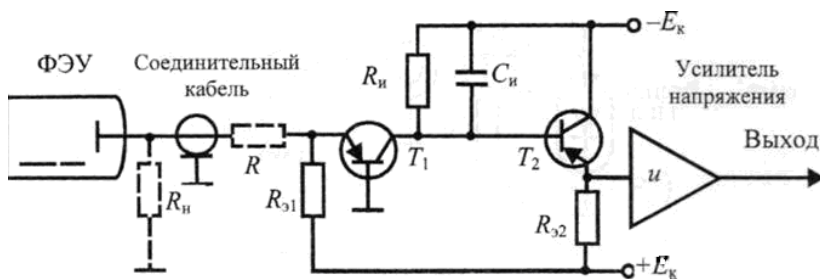


Рис.5. Схема передачи импульса с последующим интегрированием.

Ниже рассмотрен принцип работы основных функциональных блоков радиометрических приборов.

Предусилители и усилители импульсов. Амплитуда сигналов детекторов, как правило, недостаточна для срабатывания регистрирующих и анализирующих устройств. Так у импульсных ионизационных камер и полупроводниковых детекторов она составляет единицы – сотни микровольт. В то же время динамический диапазон входных

сигналов таких, например, приборов как АЦП (аналого-цифровой преобразователь) обычно составляет 0,1-10 В. Поэтому сигналы детекторов необходимо усиливать до 10^2 раз (сцинтилляционный счётчик, ППД) и до 10^7 раз (ионизационная камера) в зависимости от типа детектора и энергии регистрируемого излучения. Предусилители требуются для улучшения характеристик детекторов, выходной сигнал которых является коротким по времени импульсом тока с низкой амплитудой. Обычный импульс может иметь амплитуду, равную не более 10мВ и длительность – 200нс. Предусилитель преобразует этот импульс тока в импульс напряжения, амплитуда которого пропорциональна энергии, потерянной излучением в процессе взаимодействия с детектором. Для того чтобы получить максимальное отношение сигнал/шум и сохранить информацию относительно энергии излучения, предусилитель следует помещать как можно ближе к детектору. Близость предусилителя минимизирует емкость на входе предусилителя, уменьшая этим уровень выходного шума. Предусилитель также служит в качестве устройства, которое согласует высокий импеданс детектора и низкий импеданс коаксиального кабеля, который передает основному усилителю усиленный сигнал детектора. Усилитель же и предусилитель могут быть разнесены друг от друга на расстояние в несколько сотен метров.

Так как детектор и предусилитель должны располагаться близко друг к другу, то предусилитель часто находится в неудобном месте, окруженном защитой, и недоступен для регулировок в процессе использования. Большинство предусилителей не имеют внешнего управления, поэтому регулировка коэффициента усиления и формы импульса производится в основном усилителе, который обычно находится в более удобном месте, близко к другим электронным устройствам системы. Из-за отсутствия внешнего управления, объем предусилителя составляет лишь несколько сотен кубических сантиметров. Когда предусилитель должен быть расположен внутри защиты детектора, его небольшой объем является достоинством. Предусилитель обычно помещают в небольшую прямоугольную или круглую коробку. Для одиночных детекторов предусилитель часто встраивают в корпус детектора, который имеет панель для включения в схему.

Хотя обычно предусилители почти не управляемы, они содержат несколько разъемов. Обычно это один выходной и один тестовый, через который могут подаваться импульсы от электронного генератора импульсов для моделирования импульсов от детектора с целью про-

верки работы предусилителя и других устройств обработки сигнала системы. Часто через вмонтированный в блок предусилителя разъем к детектору прикладывается напряжение смещения (ППД) или высокое напряжение (ФЭУ и счетчики Гейгера). Обычно для обеспечения питания предусилителя используется источник питания основного усилителя. Некоторые предусилители получают необходимое низкое напряжение от источника напряжения смещения детектора.

В предусилителях используются различные способы обработки сигналов, в зависимости от типа детектора и от того, измеряется или амплитуда (энергия) или время. Сигналы от детекторов некоторых типов, таких например, как сцинтилляторы с фотоэлектронными умножителями (ФЭУ), довольно велики, что при временных измерениях и простом счете событий позволяет соединять их непосредственно с усилителями с малыми входными сопротивлениями. А при измерении энергии можно использовать относительно простые предусилители, с учетом того, что они не будут вносить заметного ухудшения в и так невысокое разрешение этих устройств. Для рентгеновской и гамма-спектроскопии, спектроскопии заряженных частиц часто используются детекторы с существенно лучшим энергетическим разрешением, такие как кремниевые и германиевые детекторы и пропорциональные счетчики. Сигналы с этих детекторов малы и важно, чтобы входные цепи предусилителей были малозумящими. Для этого во входных цепях зарядочувствительных предусилителей используют полевые транзисторы. Предусилители для кремниевых и германиевых детекторов заряженных частиц и пропорциональных счетчиков обычно работают при комнатной температуре.

Выходной импульс предусилителя имеет форму быстро растущей положительной ступеньки, за которой следует медленный спад. Время нарастания импульса равно нескольким десяткам микросекунды, а время спада изменяется от 50 до 100 мкс. Разработаны различные схемы предусилителей, которые оптимизированы для различных типов детекторов. Такие параметры, как уровень шума, чувствительность, время нарастания импульса и пропускная способность (максимальная загрузка) могут отличаться для различных моделей. Максимальная загрузка обычно определяется как максимальный заряд в единицу времени (Кл/с), переданный от детектора на вход предусилителя.

При детектировании ядерных излучений в большинстве случаев получается слабый электрический сигнал от предусилителя в виде усреднённого постоянного электрического тока или отдельных электри-

ческих сигналов различной формы. В связи с этим, импульсы от преусилителя усиливаются и формируются так, чтобы удовлетворять требованиям анализатора амплитуд или пересчетным устройствам, которые расположены за основным усилителем. В тех и других случаях сигнал преобразуется электронной схемой до параметров, удобных для регистрации. **Приборы, применяемые для увеличения амплитуды электрических сигналов от детекторного блока, называются усилителями.** Для усиления слабого постоянного тока используют усилители постоянного тока, для усиления электрических быстро меняющихся во времени и изменяющих свою полярность сигналов – усилители переменного тока. Усилители переменного тока, специально предназначенные для усиления электрических импульсов, называются импульсными усилителями. Те и другие приборы содержат много элементов в электрических схемах, но имеют специфические особенности.

Сигналы, поступающие от детекторов излучений, имеют крутой передний фронт и довольно пологий спад. Длительность переднего фронта колеблется для различных детекторов излучений в очень широких пределах – от миллисекунд до наносекунд. Во многих задачах возникает необходимость в правильной передаче переднего фронта импульса с минимальными задержками. Такие требования становятся особенно жесткими в тех случаях, когда необходимо точно знать момент регистрации частицы или кванта. Длительный спад импульса не желателен, так как он ограничивает разрешение устройства. Поэтому спад должен быть уменьшен в схеме самого усилителя. Следовательно, усилители импульсов детекторов излучений должны не только усиливать сигналы, но и формировать их. Для этого в такие усилители вводятся укорачивающие схемы, а их частотная характеристика выбирается из условия правильной передачи переднего фронта импульса. Повышенные требования предъявляются к спектрометрическим усилителям. Для правильной передачи соотношений между амплитудами импульсов усилители должны обладать стабильным коэффициентом усиления, а линейность их амплитудной характеристики должна быть высокой.

Для усиления импульсов напряжения, получаемых от детекторов, в ядерной физике и атомной технике используют импульсные усилители. Основными требованиями, предъявляемыми к усилителям, являются следующие: коэффициент усиления, стабильность коэффициента усиления, время нарастания и время задержки выходного сигнала, за-

вал плоской вершины выходного импульса, входное сопротивление и выходное, уровень собственных шумов, линейность амплитудной характеристики и перегрузочная способность.

Коэффициент усиления определяется как отношение амплитуды сигнала на выходе усилителя к амплитуде сигнала на его входе. В зависимости от назначения усилителя его коэффициент усиления может быть от 20-30 до 10^5 и более раз. Нестабильность коэффициента усиления усилителя показывает, как он может варьировать во времени, при изменении питающих напряжений и других внешних условий.

Время нарастания выходного сигнала усилителя определяется как интервал времени, за который напряжение на выходе усилителя нарастает от 0,1 до 0,9 максимального значения, **время задержки** – как интервал времени между моментом подачи напряжения на вход усилителя и моментом, когда сигнал на выходе достигает половины максимального значения.

Характеристики импульса показаны на рис. 6.

При усилении сигналов, амплитуда которых зависит от энергии излучения, усилитель должен обладать линейной амплитудной характеристикой в широком диапазоне амплитуд усиливаемых импульсов. Амплитудную характеристику импульсных усилителей оценивают величиной, называемой коэффициентом нелинейных искажений:

$$\delta = \frac{\Delta U}{U_{\text{вых}}} \cdot 100\%,$$

где, δ – коэффициент нелинейных искажений;

ΔU – отклонение амплитудной характеристики от линейного закона;

$U_{\text{вых}}$ – амплитуда выходного сигнала.

При плохой перегрузочной способности усилителя на его выходе могут быть потеряны некоторые сигналы малой амплитуды или возникнуть ложные импульсы. Амплитудная характеристика показана на рис. 7.

Завал плоской вершины выходного импульса – это постепенное уменьшение амплитуды импульса. Он определяется в процентах по отношению к амплитуде в начале плоской части вершины импульса.

Завал плоской вершины выходного импульса – это постепенное уменьшение амплитуды импульса. Он определяется в процентах по отношению к амплитуде в начале плоской части вершины импульса.

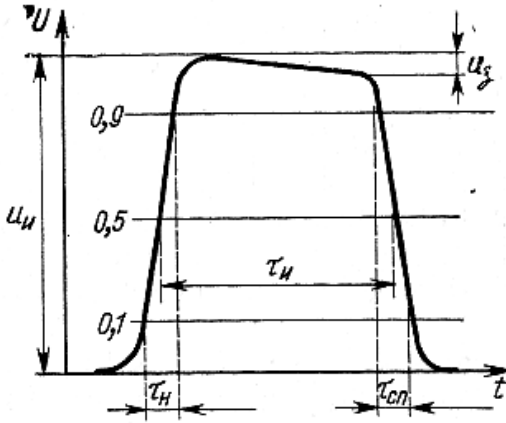


Рис.6. Характеристика импульса: U_n - амплитуда; t_n - длительность; t_n и $t_{пл}$ - время нарастания и спада; $U_з$ - завал.

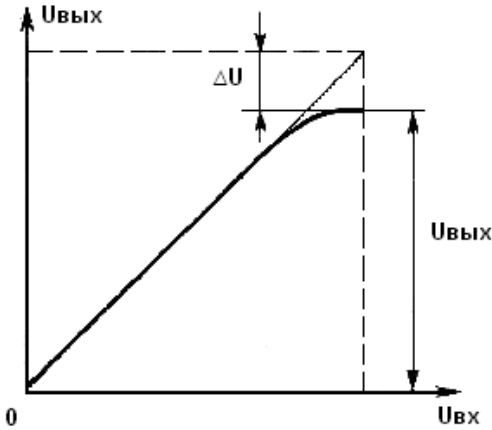


Рис.7. Амплитудная характеристика усилителя.

Уровень собственных шумов определяет минимальный уровень сигнала, который может быть зарегистрирован данным усилителем. Он определяется как напряжение эквивалентного генератора, приложенное к входу усилителя. Для измерения уровня шумов на практике из-

меряют напряжение на выходе усилителя при замкнутом входе и делят его на коэффициент усиления усилителя.

Кроме того, во многих экспериментах усилители не должны быть подвержены перегрузкам – временному изменению параметров от сигналов больших амплитуд либо от кратковременного значительного увеличения частоты их следования. В усилителях с большим коэффициентом усиления (10^6 - 10^7), рассчитанных для работы с малыми сигналами, следует стремиться к минимальному уровню шумов $u_{ш}$ с целью улучшения отношения $u_{сг}/u_{ш}$, что необходимо как для лучшего отделения полезного сигнала от помехи в случае простой регистрации, так и для повышения точности измерения в спектрометрии. В спектрометрических усилителях импульсов удаётся уменьшить уровень шумов до нескольких микровольт при полосе пропускания, обеспечивающей хорошую передачу сигналов. Таким образом, обычно усилительное устройство сигналов детектора состоит из двух частей – предусилителя и основного усилителя. Основная задача, которую выполняют предусилители – это усилить и преобразовать сигнал с детектора без заметного ухудшения отношения сигнал/шум. Предусилитель располагается как можно ближе к детектору, чтобы свести к минимуму паразитные емкости и наводки на входные цепи. Регулировки, необходимые для оперативной работы, в предусилителе сведены к минимуму. Основной усилитель располагается обычно за радиационной защитой, часто на довольно большом расстоянии от предусилителя и детектора.

Таким образом, в соответствии с назначением, применяемые в радиометрах усилители можно разделить на два основных типа: временные и спектрометрические или линейные. Временные усилители служат для извлечения прецизионной временной информации о регистрируемых событиях в наносекундном и субнаносекундном диапазонах, а также для счета событий с высокой частотой следования. Временные усилители должны хорошо передавать короткие фронты сигналов от предусилителей и соответственно обладать широкой полосой пропускания (до 10^8 - 10^9 Гц). Однако, желательно, чтобы полоса пропускания усилителя не была избыточна, т.к. в этом случае не улучшив временные характеристики, будет ухудшено отношение сигнал/шум. Длительность импульсов быстрых усилителей меньше 20 нс. Таким образом, возможен счет событий со средней частотой в несколько МГц всего с ~10% потерями на мертвое время. Коэффициент усиления временных усилителей не превышает 100-200. Во временных усилителях может быть предусмотрена возможность формирования импульсов. Они ис-

пользуются с ФЭУ и кремниевыми детекторами заряженных частиц. Для получения временной информации при работе с германиевыми детекторами обычно используются быстрые усилители без формирования импульсов. Соответственно длительность выходных импульсов в таких усилителях определяется предшествующей электроникой и детектором.

Спектрометрические усилители используются при амплитудном анализе сигналов. Одна из функций спектрометрических усилителей - линейное увеличение амплитуд выходных сигналов предусилителей, которые находятся в диапазоне милливольт, до диапазона 0,1-10 В, в котором работают амплитудные анализаторы. Коэффициенты усиления спектрометрических усилителей бывают до нескольких тысяч. Кроме того, спектрометрические усилители должны иметь хорошую линейность (<0.2%). Для амплитудного анализа важно обеспечить хорошее отношение сигнал/шум, так как оно определяет амплитудное, а стало быть, и энергетическое разрешение спектрометра. Так как источники шума в детекторе и первых усилительных каскадах имеют более широкую частотную полосу, чем полоса полезной информации, отношение сигнал/шум может быть улучшено соответствующей фильтрацией. Но оптимальное энергетическое разрешение требует довольно длительных импульсов. Длительность выходных сигналов спектрометрических усилителей находится в микросекундном диапазоне (~3-70 мкс). Однако при высоких скоростях регистрации событий для минимизации наложений импульсов, они наоборот должны быть короткими. Кроме того, нередко нужно сохранить и временную информацию, а это связано с достаточно широкой полосой пропускания. Оптимальное решение часто является результатом компромисса. Современные линейные усилители позволяют работать при нагрузках до $\sim 7000 \text{ с}^{-1}$ без ухудшения разрешения и до $\sim 90000 \text{ с}^{-1}$ с небольшим его ухудшением.

Передача сигнала от детектора на усилитель. Передача сигнала от детекторного блока на измерительно-показывающие устройства является одним из важных вопросов в конструировании радиометрической аппаратуры. Обычно эти две составные части прибора разделены расстоянием от 1 метра до десятков метров, и правильная передача сигнала особенно важна в спектрометрии излучений.

Поскольку основные виды детекторов радиоактивного излучения (камеры, сцинтилляционные счетчики, счетчики Гейгера-Мюллера и пропорциональные счетчики) представляют собой генераторы тока,

возможна передача от детекторного блока к измерительному как импульса тока, так и импульса напряжения, создаваемого на выходной $R_g C_g$ -цепи детектора при прохождении импульса тока.

Например, при размещении детектора в окружающей среде с очень высокой температурой (более 100°C) или в сильных радиационных полях исключается возможность введения в детекторный блок электронных узлов; при этом передача импульсов тока предпочтительней. Если же детектор близко расположен от пересчетного блока и по задачам измерения необходимо обеспечить сбор заряда, то передача импульсов напряжения более целесообразна. Иногда в детекторный блок вводят и источник высокого напряжения, что исключает использование специального высоковольтного кабеля.

Пример передачи сигнала в виде импульса тока с предварительным интегрированием показан на рис. 8.

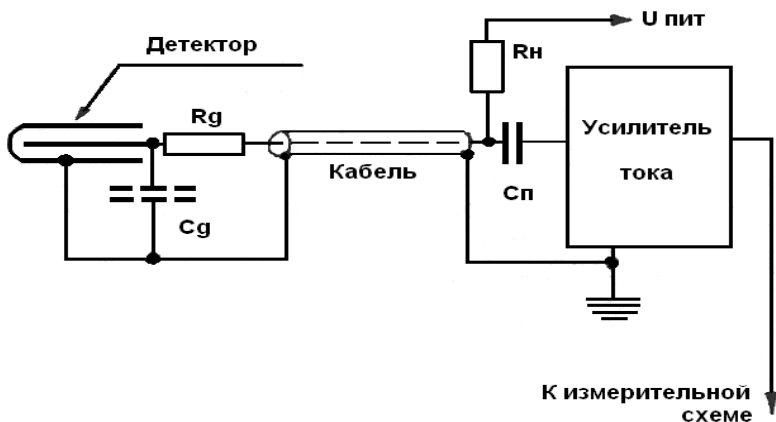


Рис.8. Схема передачи сигнала с предварительным интегрированием.

Сигналы с детектора подаются на усилитель через дополнительное активное сопротивление R_g , и на емкости детектора C_g происходит интегрирование импульса с постоянной времени $R_g \cdot C_g$. При такой схеме включения детектора сигнал можно передавать на расстояние до 1км.

Дискриминаторы. В радиометрии имеется большой круг задач, связанных с исследованием амплитуды и формы импульсов, получаемых от детекторов излучений. Простейший метод амплитудного анализа импульсов состоит в отделении (дискриминации) импульсов, соответствующих исследуемому излучению от сигналов меньших ам-

плитуд, например от шумов или от импульсов более мягкого излучения. Для этого применяются амплитудные дискриминаторы.

Дискриминатор (от лат. *Discrimino* – отделяю, различаю), устройство, преобразующее изменение контролируемого параметра электрического сигнала (на входе) в изменение полярности напряжения (на выходе). Амплитудный дискриминатор выдаёт импульс на выходе в том случае, когда амплитуда входного сигнала превышает некоторую определённую величину – порог дискриминации $u_{пор}$. Обычно имеется возможность изменять порог дискриминации в широких пределах и тем самым отделять для последующей регистрации импульсы определённых амплитуд.

В дискриминаторе сравниваются значения параметра (амплитуды, длительности, полярности, частоты, фазы) входного сигнала с выбранным (номинальным) значением этого параметра отдельного (опорного) источника сигнала. В результате сравнения на выходе дискриминатора возникает разностное напряжение (напряжение рассогласования). Его амплитуда и полярность определяются степенью и знаком отклонения значения данного параметра входного сигнала от номинального. Дискриминаторы различают по сравниваемым параметрам сигнала. Амплитудный дискриминатор имеет определённый уровень срабатывания и пропускает только сигналы с амплитудой выше (ниже) номинального значения. Во временном дискриминаторе, собранном по схеме совпадений, сигнал на его выходе появляется, а в дискриминаторе, собранном по схеме антисовпадений, – пропадает при совпадении во времени входного и опорного импульсных сигналов. При частотном и фазовом детектировании промодулированные по частоте и фазе колебания высокой частоты преобразуются дискриминатором в амплитудно-модулированные колебания, которые затем в большинстве случаев подаются на детектор. В этом случае в фазовом дискриминаторе применяют опорный сигнал с фиксированной начальной фазой. Временная привязка (хронирование) служит для фиксации момента регистрации события в детекторе.

Различается два типа устройств, реализующих временную привязку. Одни используют "медленные" спектрометрические сигналы. Это временные одноканальные анализаторы. Другие, быстрые дискриминаторы, используют сигналы либо непосредственно от детекторов, либо от быстрых усилителей.

И в тех, и в других устройствах используются следующие методы временной привязки:

- привязка по переднему фронту импульса,
- привязка по нулю биполярного импульса,
- метод следящего порога и его разновидности.

Амплитудный дискриминатор - один из основных узлов спектрометрической аппаратуры, используемой для амплитудного анализа импульсов напряжения, пропорциональных энергии ядерного излучения. Дискриминатор предназначен для пропускания импульсов в последующие устройства анализатора только с определёнными амплитудами.

Амплитудный дискриминатор – устройство, автоматически выделяющее электрические сигналы, амплитуда которых превышает определённое (пороговое) значение величины. Амплитудные дискриминаторы применяют для выделения полезного сигнала из шумов и при исследовании случайных процессов с помощью амплитудных анализаторов.

Схема дискриминатора на одном транзисторе приведена на рис. 9. По принципу действия эта схема ближе к электронному затвору. Положительный входной сигнал поступает на эмиттер (1), а на базу транзистора подается регулируемое положительное напряжение (3), запирающее транзистор. Когда напряжение входного сигнала превышает напряжение базы, транзистор начинает проводить, и в цепи коллектора вырабатывается положительный выходной сигнал (2).

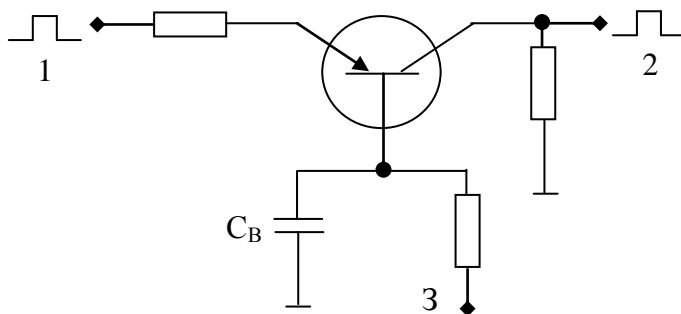


Рис.9 Схема дискриминатора на одном транзисторе.

Сигналы некоторых детекторов несут информацию об энергии зарегистрированного кванта или частицы: их амплитуда пропорциональна энергии. Поэтому, исследуя распределение амплитуд импульсов нетрудно получить спектр излучения. В простейшем случае такие из-

мерения могут быть выполнены также с помощью амплитудного дискриминатора.

Для этого производится подсчёт импульсов на выходе дискриминатора при разных порогах срабатывания в течение одинаковых интервалов времени. Получаемая при этом кривая $n=f(u_{\text{пор}})$ (Рис. 10а) называется интегральным амплитудным спектром. Каждая точка кривой показывает какое число импульсов имеет амплитуду A , превышающую порог срабатывания $u_{\text{пор}}$ дискриминатора. По форме интегральной кривой можно судить о составе спектра исследуемого излучения. Интегральный дискриминатор вырабатывает выходной сигнал под действием каждого входного сигнала, напряжение которого превышает заданный уровень, называемый порогом дискриминатора. В зависимости от требований, предъявляемых к интегральному дискриминатору, выходной сигнал или воспроизводит в определённом масштабе часть входного импульса, лежащего над порогом дискриминатора, или является стандартным по амплитуде и форме.

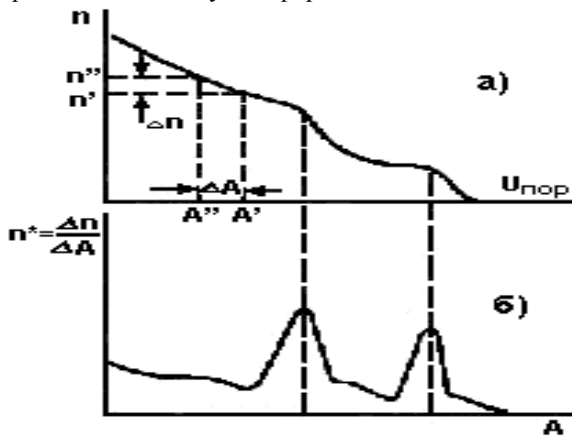


Рис. 10. Амплитудные спектры:
а)-интегральный; б)- дифференциальный.

В первом случае дискриминатор имеет линейно-ломаную амплитудную характеристику (рис. 10а), тангенс угла наклона которой выражает коэффициент усиления входного импульса. Такой дискриминатор в сочетании с усилителем на выходе применяется для дополнительного растягивания интересующей части спектра и называется расширителем динамического диапазона или экспандером.

Расширитель – устройство, преобразующее входные импульсы в импульсы прямоугольной формы, сохраняя при этом амплитуду. Расширители используются при сложении аналоговых сигналов или для уменьшения искажений амплитудных распределений, вызванных так называемыми "резаными" импульсами в АЦП. Этот эффект возникает когда аналого-цифровой преобразователь, обработав сигнал, открывается для обработки следующего во время его спада. Использование сигналов с плоской вершиной и коротким задним фронтом уменьшают вероятность таких событий (рис. 11а).

Во втором случае, когда выходной сигнал является стандартным по амплитуде и форме, дискриминатор имеет скачкообразную характеристику (Рис. 11б) и в сочетании с формирующим устройством на выходе применяется для получения интегрального спектра. В большинстве случаев удобнее пользоваться дифференциальным амплитудным спектром, который показывает сколько имеется импульсов каждой амплитуды. Дифференциальный спектр может быть получен из интегрального спектра путём дифференцирования последнего. Подобный метод получения дифференциального спектра связан с длительными расчётами, требует повышенной стабильности порога срабатывания дискриминаторов и вынуждает вести измерения интегрального спектра с очень большой статистической точностью.

Для непосредственного получения дифференциального спектра разработаны специальные приборы – одноканальные и многоканальные дифференциальные амплитудные анализаторы.

Дифференциальный дискриминатор срабатывает и выдаёт на выходе стандартный сигнал только от импульсов с амплитудами, лежащими в определённых пределах, задаваемых двумя порогами дискриминатора – нижним и верхним. Разница между порогами называется **шириной окна**. Изменяя синхронно нижний и верхний пороги дискриминатора, можно получать дифференциальный спектр. Дифференциальный дискриминатор включает в себя два интегральных дискриминатора с порогами срабатывания, отличающимися на ширину окна, и схему антисовпадений, запрещающую прохождение на выход сигнала с амплитудой, большей срабатывания верхнего дискриминатора. Дифференциальный дискриминатор имеет двойную скачкообразную амплитудную характеристику (Рис. 11в).

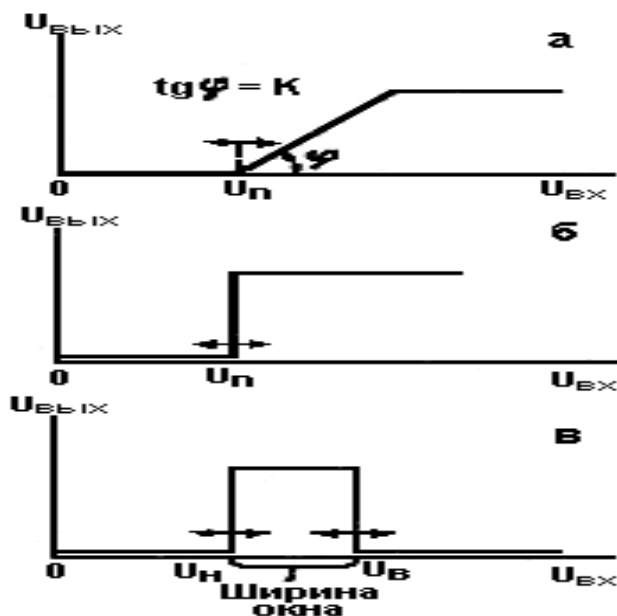


Рис. 11. Амплитудные характеристики дискриминаторов:
 а – экспандера; б – интегрального дискриминатора;
 в – дифференциального дискриминатора.

К дискриминаторам предъявляются общие требования:

- стабильность порога срабатывания во времени,
- линейность и чёткость излома амплитудной дискриминационной характеристики,
- нечувствительность к амплитудным перегрузкам и постоянство порога срабатывания для импульсов, различающихся по длительности и фронту нарастания,
- высокое быстродействие (малое разрешающее время),
- постоянство сопутствующей задержки импульсов и большое входное сопротивление для исключения влияния на предшествующие каскады.

Важным параметром дискриминатора является его входная чувствительность.

В амплитудном дискриминаторе используют электронные схемы, имеющие амплитудную характеристику с резко выраженной нелинейностью (изломом) (рис. 12).

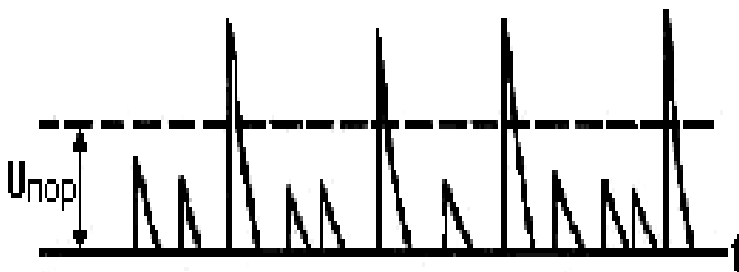


Рис. 12. Простая дискриминация импульсов по амплитуде.

Таковыми характеристиками обладают диоды (особенно электровакuumные), некоторые приёмно-усилительные лампы и специальные электронные спусковые схемы. Наиболее распространена диодная схема с использованием излома характеристики анодного тока. В зависимости от запирающего напряжения, которое в такой схеме равно порогу дискриминации, через диод проходят только сигналы с амплитудой, превышающей запирающее напряжение. Точность такого амплитудного дискриминатора в основном определяется стабильностью диодной характеристики. Для надёжной работы с сигналами малой амплитуды применяют предварительное усиление, а для исследования наносекундных импульсов производят дополнительное формирование сигналов с помощью специальных схем. Спусковые схемы в качестве амплитудного дискриминатора позволяют получить на выходе импульсы, амплитуда и длительность которых не зависят от формы входного сигнала.

Медленный дифференциальный дискриминатор (одноканальный анализатор) это устройство, которое анализирует амплитуду входного сигнала и, если она находится в установленных пределах (между нижним и верхним уровнями дискриминации), генерирует стандартный логический импульс (Рис. 13). Нижний (LLD) и верхний (ULD) уровни дискриминации могут устанавливаться независимо. При установке ULD на максимум одноканальный анализатор работает в интегральном режиме. В одноканальных анализаторах также обычно есть режим, когда устанавливается нижний уровень дискриминации и ширина окна ΔE . Таким образом $ULD = LLD + \Delta E$.

Как видно из рисунка 13, время появления выходного импульса в таких одноканальных анализаторах не зависит от амплитуды и формы входного импульса. Они в основном используются для счета событий. Одноканальные анализаторы устанавливаются в «медленных» спек-

тронетрических цепях. Входные импульсы они обычно получают от спектрометрических усилителей и от время-амплитудных конвертеров.

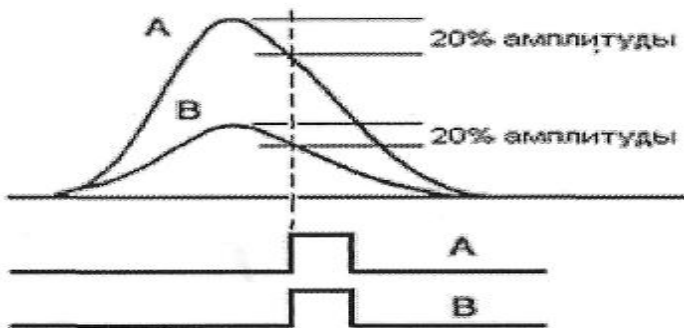


Рис. 13. Входные и выходные импульсы временного одноканального анализатора с временной привязкой к определённой доле амплитуды на заднем фронте входного импульса.

Большими возможностями обладают одноканальные анализаторы с **временной привязкой** или **временные одноканальные анализаторы**. В них выходные сигналы привязаны по времени к моменту появления входных импульсов. Существует несколько способов временной привязки (к максимуму импульса, по переднему фронту импульса, по нулю биполярного импульса, привязка со следящим порогом). Временные одноканальные анализаторы используются не только для амплитудного, но и временного анализа. Их сигналы подаются на схемы "медленных" совпадений/антисовпадений и на время-амплитудные конвертеры. Точность временной привязки во временных одноканальных анализаторах варьируется от единиц наносекунд до ~ 100 нс. Для временного согласования временные анализаторы обычно имеют встроенную регулируемую задержку выходных импульсов до ~ 10 мкс.

Анализаторы импульсов. Дифференциальные амплитудные анализаторы используются для непосредственного получения дифференциального амплитудного спектра. **Амплитудный анализатор** импульсов – устройство для определения закона распределения амплитуд электрических импульсов. С помощью амплитудного анализатора обычно анализируют распределение амплитуд случайного импульсного процесса, по зависимости числа появлений импульсов в заданном интервале амплитуд.

Амплитудный анализатор широко применяют для анализа распределения энергии частиц различных видов излучения, для исследования непрерывных стационарных случайных процессов при условии выделения дискретных амплитудных значений случайного процесса в виде последовательности импульсов. В состав простейшего одноканального амплитудного анализатора входят два амплитудных дискриминатора и схема антисовпадений, пропускающая на выход сигналы с амплитудами, значения которых укладываются в разность между уровнями дискриминаторов (ширина канала) (рис. 14).



Рис14. Блок-схема одноканального амплитудного анализатора

Исследование спектра производят последовательными измерениями при постоянной ширине канала, но с разными абсолютными значениями уровней дискриминации. Существует много различных систем амплитудных анализаторов, отличающихся диапазоном и одновременностью измеряемых величин, точностью, наличием регистрации на выходе: многоканальные амплитудные анализаторы, с электронным коммутатором, и др.

Одноканальный амплитудный анализатор регистрирует все импульсы, амплитуды которых превышают некоторый нижний порог $U_{пор.н}$ и не достигают верхнего порога $U_{пор.в}$ (рис. 15). Разность $U_{пор.в} - U_{пор.н} = U_k$ называется шириной канала амплитудного анализатора. При снятии дифференциального спектра ширина канала U_k сохраняется неизменной, меняется только его положение. Так, первое измерение ведётся при $U_{пор.н}=0$; второе – $U_{пор.н}=U_k$; третье – при $U_{пор.н}=2U_k$. Все измерения проводятся в течение одинаковых интервалов времени; когда интервалы неодинаковы, результаты нормируются.

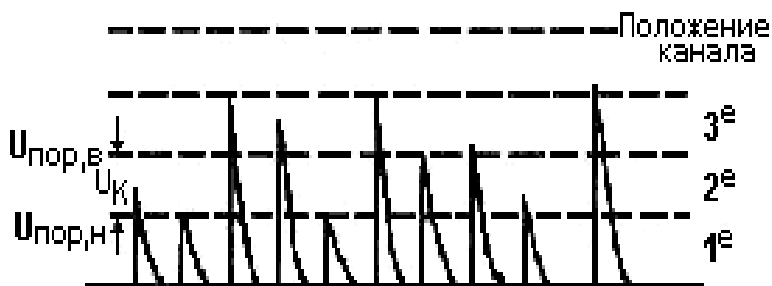


Рис. 15. Измерение дифференциального амплитудного спектра.

Нетрудно видеть, что во время измерений одноканальным анализатором регистрируется лишь небольшая часть импульсов, амплитуды которых лежат в пределах канала ($U_{пор.н} \leq A \leq U_{пор.в}$); все остальные импульсы теряются. Поэтому в тех случаях, когда исследуются слабые эффекты, или короткоживущие изотопы, применяются многоканальные амплитудные анализаторы (рис.16).

В многоканальном анализаторе регистрация возможна в любом из N каналов с шириной U_k . Обычно каналы устанавливаются так, что их нижние пороги соответственно равны $0, 1U_k, 2U_k, 3U_k$ и т.д.

Существуют разные системы многоканальных анализаторов с числом каналов от нескольких десятков до нескольких тысяч.

Число каналов амплитудного анализатора определяется в основном энергетическим разрешением детектора.

Увеличение числа каналов в современных анализаторах достигается применением специальных запоминающих устройств. Кроме прямого измерения амплитуд импульсов, в некоторых экспериментах (например, при исследовании осколков деления) требуется определять отношения амплитуд двух импульсов A_1/A_2 . В этом случае используются специальные схемы, позволяющие получать распределение таких отношений. Разработаны также методы для разделения импульсов сцинтилляционных детекторов по их форме, зависящей от типа регистрируемого излучения.

Существуют анализаторы, определяющие зависимость числа импульсов от двух и более параметров. Например, при исследовании гамма-лучей от реакции захвата нейтронов измеряется ряд спектров гамма-лучей для разных энергий нейтронов $n=f(E_n; E_\gamma)$.

Анализаторы, предназначенные для этих целей, регистрируют момент появления импульса от гамма-кванта и его амплитуду A , т.е. $n=f(t,A)$.



Рис. 16. Функциональная блок-схема многоканального анализатора.

В результате измерений получается двумерный спектр. Многомерные измерения находят место также в гамма-спектрометрии при исследовании каскадных переходов; в экспериментах по рассеянию нейтронов; в исследованиях с частицами высоких энергий. В последних двух случаях анализаторами накапливается и сортируется информация, поступающая от большого числа детекторов, расположенных в пространстве. Анализаторы, предназначенные для решения подобных задач, называются двумерными, трёхмерными и т.д., иначе многомерными или многопараметрическими (рис. 17).

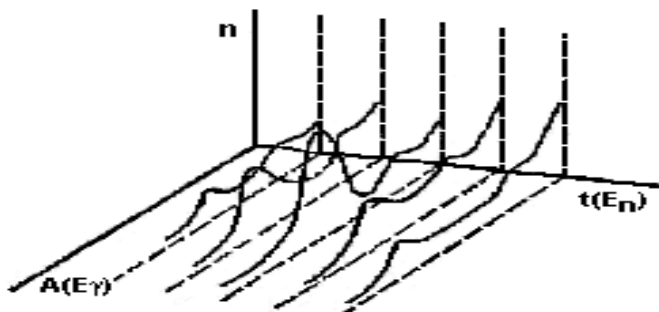


Рис. 17. Двумерный амплитудно-временной спектр.

Пересчетные схемы. Регистрируемые с помощью детекторов излучений события носят статистический характер, поэтому в радиометрии при проведении различных измерений для уменьшения вероятностной ошибки производится подсчет большого числа событий. В простейших измерениях подсчитываются все импульсы, возникающие при нагрузке детектора, в более сложных задачах определяется число импульсов, имеющих определенную амплитуду либо возникающих в определенном момент времени и т.п. в большинстве экспериментов измеряется число импульсов в течение некоторого интервала времени. Иногда решается обратная задача – измеряется время, в течение которого регистрируется определенное число импульсов. Информация в виде числа импульсов, зарегистрированных в течение некоторого времени очень удобна. Она позволяет легко вычитать фон, вести количественную обработку и т.п. Для измерения числа импульсов пересчетные схемы и запоминающие устройства.

Счетные системы являются дискретными (цифровыми) устройствами и регистрируют абсолютное число сигналов, поступивших за произвольный интервал времени и распределенных в нём равномерно или случайно. В радиометрической аппаратуре счетные схемы применяются для регистрации числа электрических импульсов, создаваемых детектором ядерного излучения, для счета совпадений, антисовпадений, импульсов от амплитудных дискриминаторов, а также в ряде других случаев. С помощью специальных счетных систем, регистрирующих, например, разность числа сигналов от двух детекторов или определяющих отношение между скоростями их поступления, ведущих измерения сразу в нескольких энергетических или временных интервалах (многоканальные анализаторы) и т.п., можно получить более полное представление об измеряемом объекте, а также сократить при этом время накопления необходимой информации. На вход пересчетных устройств обычно подаются стандартные логические сигналы от быстрых дискриминаторов или одноканальных анализаторов. Если длительность сигналов детектора не является лимитирующим фактором, быстрые дискриминаторы позволяют обеспечить разрешающее время от 5 до 65 нс. Разрешающее время в данном случае нужно понимать, как способность различать два следующих один за другим сигнала. Для статистически распределенных по времени сигналов максимальная скорость счета, которая ограничивается разрешающим временем при этом может достигать $\sim 20 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$ при $\sim 10\%$ потерях за счет мертвого времени. Такие детекторы как ФЭУ и микроканальные пла-

стины вместе с быстрыми дискриминаторами позволяют получить временное разрешение ~ 5 нс. С другими детекторами, такими как сцинтилляционные и полупроводниковые детекторы, разрешающее время будет заметно больше.

Разрешающее время счётной системы – минимальный интервал времени между двумя входными сигналами, при котором они регистрируются счётной системой ещё как отдельные.

Одноканальное пересчетное устройство считает количество поступивших на его вход импульсов. Оно может запускаться и останавливаться вручную. Можно также использовать автоматическую остановку. В этом случае могут быть два режима. В одном из них предварительно устанавливается время измерения и результатом, который может отражаться на дисплее устройства, является количество импульсов сосчитанных за это время, в другом – устанавливается количество импульсов и результатом является время, за которое предустановленное количество импульсов сосчитано. Одноканальное пересчетное устройство с внешним автоматическим управлением (например, от компьютера) позволяет также получать зависимости скорости счета от времени. Мертвое время, в данном случае это время между измерениями, необходимое для считывания, сброса информации и повторного запуска счета, у обычных пересчетных устройств довольно большое (от микросекунд до миллисекунд). Кроме того, временные интервалы Δt , которые могут устанавливаться у одноканальных пересчетных устройств, редко бывают меньше 10мс. Устройство многоканального пересчета считает количество поступающих на его вход в интервал времени от t до $t + \Delta t$ импульсов как функцию времени. Время квантуется,

$$t = n \cdot \Delta t,$$

где n – номер канала.

Результаты счета последовательно ("поканально") записываются в память. Минимальное квантование Δt у устройств многоканального пересчета может быть от нескольких микросекунд до нескольких наносекунд, максимальное – до нескольких часов. Разрешающее время у устройств многоканального пересчета может составлять ~ 5 нс, а мертвое время быть практически нулевым. Ёмкость счёта – максимальное число сигналов, которое может быть зарегистрировано и храниться в счётной системе. Определяет предельное значение статистической счётной системы. Разрешающее время и ёмкость счётной системы оп-

ределяют время, необходимое для измерения средней скорости поступления случайных сигналов с заданной погрешностью.

Измерители скорости счёта. В некоторых радиометрических приборах, а также в промышленных установках часто необходимо измерять скорость счёта, т.е. определять среднее число импульсов в единицу времени. Для этой цели применяются **измерители скорости счёта (интенсиметры)**. Их показания либо считываются со шкалы электроизмерительного прибора, либо автоматически вычерчиваются на бумажной ленте самописца, либо поступают непосредственно в компьютер.

Измерители скорости счёта – интенсиметры – предназначены для непрерывного контроля средней скорости счёта или её изменений во времени. Для непрерывного контроля скорости счёта в отличие от обычных пересчётных устройств применяются специальные схемы, каждая из которых включает три основных элемента: устройство формирования импульса, интегрирующую систему, регистрирующее устройство. Устройство формирования импульса предназначено для создания электрического импульса с постоянной амплитудой и минимально необходимой длительностью каждый раз, когда с детектора излучений поступает усиленный сигнал. В качестве формирующих устройств чаще всего применяются ждущие мультивибраторы и пересчётные ячейки. Интегрирующая система превращает дискретную информацию (в виде нормализованных импульсов) в непрерывную в виде постоянного напряжения, величина которого пропорциональна среднему числу импульсов, поступающих в единицу времени, т.е. средней скорости счёта.

Интегрирование сформированных импульсов тока может быть осуществлено обычным стрелочным прибором с сильным демпфированием. Распространённым методом является использование простой интегрирующей RC–цепи, в которой конденсатор большой ёмкости C зашунтирован разрядным сопротивлением R . Для повышения точности, стабильности и разрешающей способности в интегрирующую цепь добавляют дозирующий конденсатор.

Схема антисовпадений. Схема антисовпадений используется в установке для регистрации очень малых активностей. В такой установке детектор должен быть очень хорошо защищён от внешних излучений. Однако свинцовая и бетонная защита не могут полностью исключить попадание в детектор космических лучей и частиц от радиоактивного загрязнения материалов. Поэтому установка защищается «ковром» из счётчиков, которые вместе с детектором, регистрирующим излучение

исследуемого образца, подключаются к схеме антисовпадений. Задача схемы антисовпадений заключается в том, чтобы выдавать сигнал на выходе, когда на неё приходит импульс от внутреннего детектора, и не давать сигнала, когда на ее входы приходит одновременно импульсы от внутреннего детектора и от ковра счётчиков. Таким образом, исключается регистрация внешнего излучения, пронизывающего счётчики защиты и внутренний рабочий счётчик (рис.18).

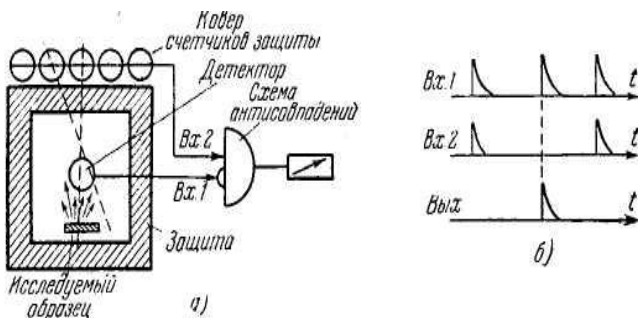


Рис. 18. Работа схемы антисовпадений.

Схема антисовпадений – электронное устройство, действие которого основано на выделении определённой группы событий (появление электрических импульсов, ионизирующих частиц и др.) при условии, что по крайней мере одно из них произошло не одновременно с другими в пределах заданного промежутка времени. Схемой антисовпадений называется импульсная схема, в которой электрический сигнал на выходе возникает только при отсутствии сигнала в одном из каналов. Схему антисовпадений можно рассматривать как частный вариант схемы совпадений. Для надёжной работы схемы антисовпадений необходимо, чтобы запрещающий сигнал поступал с некоторым опережением во времени, учитывая реакцию схемы, что гарантирует необходимые условия для надёжного запрещения импульсов, поступающих на сигнальные входы. Схемы антисовпадений широко применяют в амплитудных анализаторах, дискриминаторах и др. Наиболее распространены схемы антисовпадений диодно-реостатные, диодно-трансформаторные, выполненные на многосеточных электронных лампах или на транзисторах, с различным числом входов, но с одним выходом. В случае двух входов схема антисовпадений реализует элементарную логическую функцию $X_1 \cdot X_2$. Схема антисовпадений характеризуется числом входов и разрешением во времени, т. е. способно-

стью разделять события, происходящие через малые промежутки времени (до 10 нсек).

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП). АЦП служит для измерения напряжения, т.е. преобразования аналоговой информации в цифру. Амплитудам в диапазоне $V_n + \Delta V$ ставится в соответствие число n . Одной из характеристик АЦП является его разрядность, т.е. количество дискретных значений напряжения, на которые может делиться весь рабочий диапазон входных (анализируемых) напряжений. Когда АЦП используется для амплитудного анализа, число, получаемое на выходе АЦП используется для адресации памяти и называется номером канала, а ΔV – шириной канала. Номер канала несет информацию об амплитудном значении сигнала. Амплитуда в свою очередь связана с измеряемой физической величиной (энергией, временем и т.п.). Максимальное количество каналов связано с разрядностью АЦП. АЦП нередко служат интерфейсом между измерительной аппаратурой и компьютером. Современные АЦП обычно имеют до 14 двоичных разрядов (16384 каналов). В зависимости от требований эксперимента измерения могут производиться при разных диапазонах конверсии (512, 1024 и т.д.) вплоть до максимального, определяемого разрядностью АЦП. Важными характеристиками АЦП, используемых для спектроскопии, являются интегральная и дифференциальная нелинейности.

Показывающие устройства. После преобразования и усиления (ограничения) импульсы поступают на вход пересчетной схемы, а затем на показывающее устройство. Это, как правило, счетчик импульсов в декадном исполнении. Подсчитанные импульсы отображаются с помощью: декастронов ОГ-3, ОГ-4, ОГ-8 (установленные в радиометрах КРВП-3АБ, ПП-8, ПП-12); газоразрядных индикаторов ИН-2, ИН-8 и т.п. (ПП-15, РКБ4–1еМ); многоразрядных люминесцентных цифровых индикаторов (РКГ-01 «Алиот»); светодиодных семисегментных матриц типа АЛС-324 и т.п. (РУГ-92 «Адани») или жидкокристаллических индикаторов (радиометры РКГ-02А, РКГ-АТ1320).

В современных многоканальных спектрометрах информация выводится на монитор компьютера (радиометр МКС-АТ1315).

В качестве измерителя времени используется встроенный в блок электронный секундомер (ПП-8, ПП-12, ПП-15), встроенные в прибор механические часы (КРВП-3АБ) или цифровые часы с кварцевой стабилизацией в памяти схемы с выдачей звукового сигнала через 5 мин (РКГ-01), через 2 или 20 мин (РУГ-92 «Адани»), а также с возможно-

стью на электронных часах задать время измерения пробы от нескольких минут до десятков часов (РКГ-АТ1320, МКС- АТ1315).

1.3. Источники высокого напряжения детекторных блоков.

Источник высокого напряжения (высоковольтный выпрямитель) является обязательным узлом радиометрической аппаратуры. Основными требованиями, предъявляемыми к нему, являются, как правило, стабильность напряжения питания детекторов во времени, а также нечувствительность к температуре окружающей среды и колебаниям напряжения питающей сети и току нагрузки детектора.

Наименьшие требования предъявляются к газоразрядным счетчикам, так как они имеют достаточно протяжённое плато (80-300 вольт) и их амплитуда выходного импульса не зависит от энергии частицы. Здесь достаточно иметь стабильность не менее 2-3%. При повышенных частотных нагрузках наклон плато увеличивается, поэтому при прецизионных измерениях необходимо более жестко стабилизировать высокое напряжение.

Для пропорциональных счетчиков дрейф напряжения не должен превышать 0,05-0,10%.

Сцинтилляционные счетчики на основе ФЭУ обладают резкой зависимостью выходного сигнала от напряжения питания. Обычно напряжение питания составляет 1000–5000 В. Точность поддержания напряжения составляет 0,07-0,10% для спектрометрии и до 1% при использовании ФЭУ в счетных схемах. Для уменьшения пульсаций, поступающих от источника питания на вход предусилителя, анод ФЭУ заземляют через сопротивление нагрузки. Высокий входной потенциал, создаваемый на фотокатоде умножителя относительно корпуса, приводит к повышению уровня шума ФЭУ, но все же, такой режим предпочтительнее.

В "простых" радиометрах используется высоковольтный трансформатор со стабилизацией выпрямленного напряжения с помощью газоразрядных коронных стабилизаторов типа: СГ-301С, СГ-302С, СГ-303С. Иногда используется высоковольтный стабилизированный источник с регулируемым выходным напряжением (например, в радиометре ПП-8 блок высокого напряжения ВСВ-2 поддерживает напряжение от 400 до 2200В).

В современных радиометрах, как правило, в качестве источника высокого напряжения используют умножители напряжения с использованием диодов и конденсаторов (рис. 19).

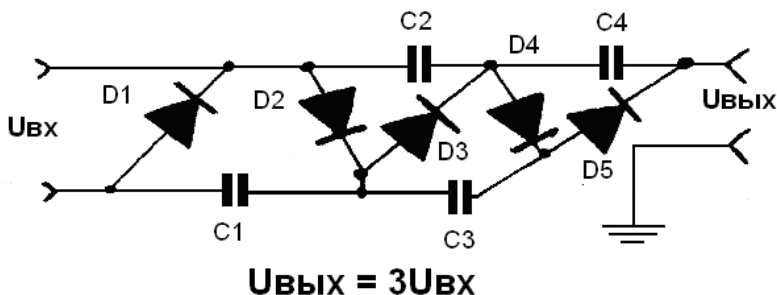


Рис.19. Умножитель напряжения на 3.

Стабилизация режима работы сцинтилляционного детектора.

Особенно большую нестабильность сцинтилляторы имеют при работе в условиях изменяющейся температуры. В интервале температур от -10 до +50°C изменение выходного сигнала может достигать 20%. Основная причина дрейфа, это изменение параметров кристалла, в частности, изменение спектральной характеристики. Если фотокатоды ФЭУ нанесены без подложки, нестабильность еще больше увеличивается.

Для снижения погрешности, вызванной нестабильностью работы спектрометрического детектора, используют устройство автоматической стабилизации работы сцинтилляционного детектора с помощью контрольного сигнала. Стабилизирующее устройство с помощью цепи обратной связи изменяет коэффициент усиления одного из элементов усилительного тракта так, чтобы амплитуда контрольного сигнала была постоянной. В качестве контрольного сигнала, как правило, используется спектральная линия от опорного моноэнергетического излучения радиоактивного препарата, вводимого в сцинтиллятор.

В системе стабилизации по интегральному спектру амплитуда сигналов контрольного источника должна превышать максимальную амплитуду рабочих сигналов, а интенсивность сигналов должна быть постоянной. Например, в радиометрах РКГ-01 «Алиот» в качестве репера используется радионуклид америций-241 с энергией 59,53 кэВ. Тумблером «обратная связь», находящимся на задней панели ра-

диометра, при необходимости можно отключить обратную связь, в результате стабилизация амплитуды контрольного источника не будет поддерживаться.

Если условия измерений не позволяют располагать контрольный пик в области больших энергий, применяется система стабилизации по дифференциальному спектру. Измерение амплитуды контрольного сигнала осуществляется двухканальным дискриминатором, оба канала которого имеют одинаковую ширину и общую границу.

В качестве элемента для регулирования усиления измерительной схемы удобно использовать один из диодов ФЭУ, изменяя напряжение смещения на нем. При этом в спектр не вносятся никаких искажений (рис.20).

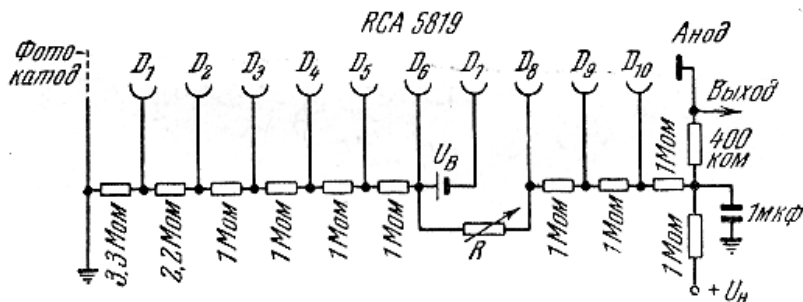


Рис.20. Схема стабилизации усиления ФЭУ.

1.4. Факторы, влияющие на качество работы электронной аппаратуры.

Воздействие температуры. Температурные воздействия, и особенно резкие перепады температуры, крайне отрицательно сказываются почти на всех видах детекторов и других элементах блоков детектирования.

Наибольшей температурной нестабильностью обладают сцинтилляционные счетчики. Изменение температуры влияет на световыход сцинтиллятора, коэффициент усиления ФЭУ, что приводит к температурной погрешности порядка процента на один градус.

Параметры газонаполненных счетчиков ионизирующих излучений меняются под воздействием температуры в меньшей степени. При изменении температуры происходит увеличение напряжения начала сче-

та и наклона плато, сокращается протяженность плато, увеличивается уровень шумов. Газонаполненные детекторы в зависимости от типа, режима работы и конструкции имеют разную температурную нестабильность, как правило, она составляет доли процента на один градус.

Полупроводниковые детекторы ионизирующих излучений заметно меняют параметры при повышении температуры. Более того, некоторые типы ППД обладают настолько низкой термопрочностью, что их хранение при комнатной температуре приводит к резкому ухудшению параметров детектора. Повышение температуры окружающей среды приводит к возрастанию уровня шумов и ухудшению энергетического разрешения полупроводниковых детекторов. Из элементов электрических схем блоков детектирования наиболее подвержены воздействию температуры полупроводниковые диоды и триоды.

Борьба с воздействием температуры сводится к следующему: выбору детектора и элементов электронных схем блока детектирования, наименее чувствительных к воздействию температуры; применению в электронных схемах элементов, зависимость параметров которых от воздействий температуры имеет характер, позволяющий скомпенсировать температурную нестабильность остальных элементов блока детектирования; наконец, компенсации изменения параметров блока детектирования под воздействием температуры с помощью специальных электронных схем. В некоторых случаях применяется принудительное охлаждение жидкими газами, (для блоков детектирования с ППД) или водой, протекающей в зазоре между внешним и внутренним кожухами блока детектирования.

Температурные воздействия являются одной из наиболее важных и часто встречающихся в практике эксплуатации причин возникновения дополнительных погрешностей измерений, ухудшающих точность и повторяемость измерений. Значения температурных погрешностей указываются в технических условиях, и их необходимо учитывать при интерпретации результатов измерений.

С температурными воздействиями связан еще один важный эксплуатационный параметр блоков детектирования ионизирующих излучений, так называемое время установления рабочего режима. Действительно, даже при жесткой стабилизации условий внешней среды, температура внутри блока детектирования будет меняться в течение некоторого времени, после момента его включения, за счет нагревания элементов электрической схемы блока детектирования. Момент установления теплового равновесия можно считать началом рабочего ре-

жима блока детектирования. В период установления рабочего режима параметры блока детектирования меняются в значительной степени, что делает результаты измерений малодостоверными. Время установления рабочего режима зависит от конструкции блока детектирования, типа примененного детектора и элементов электрической схемы и на практике бывает равно 30–60 мин с момента включения.

Воздействие влаги. Воздействие влаги на детекторы и блоки детектирования может привести к коррозии материалов конструкции блока детектирования, понижению сопротивления изоляции и появлению токов утечки, поверхностных пробоев и т.п., что может явиться причиной ухудшения параметров блоков детектирования или полному выходу его из строя.

Проникновение влаги в контейнеры, в которые упакованы гигроскопичные сцинтилляторы, вызывает нарушение прозрачности сцинтилляторов и резко ухудшает его параметры. В соответствии с этим допустимая относительная влажность для ионизационных камер и гигроскопичных сцинтилляционных детекторов обычно составляет не более $65 \pm 10\%$. Для фотоумножителей эта величина равна 95–98% относительной влажности.

Надежным способом защиты блоков детектирования от воздействия влаги и агрессивных сред является герметизация внутреннего объема с помощью кожухов с резиновыми уплотнениями, прокладками и сальниками. При эксплуатации блоков детектирования необходимо тщательно следить за состоянием элементов конструкции блоков детектирования, обеспечивающих герметизацию внутреннего объема, так как нарушение герметичности может привести к значительным погрешностям измерений и к выходу из строя блока детектирования. В блоках детектирования для измерения бета-активных газов, альфа- и бета-активных жидкостей разгерметизация может привести к заражению окружающей среды радиоактивными веществами.

Воздействие электромагнитных полей. Влияние электромагнитных полей почти не сказывается на параметрах газоразрядных детекторов и ППД, но для фотоумножителей, характеристики которых во многом зависят от качества электроннооптической фокусировки, это влияние весьма существенно. Установлено, например, что влияние постоянного магнитного поля изменяет не только коэффициент усиления ФЭУ, но и его амплитудное разрешение.

Для защиты от электромагнитных полей блоки детектирования, ис-

пользующие чувствительные к их воздействию детекторы, имеют экраны из материалов с большой магнитной проницаемостью. Однако в процессе эксплуатации следует помнить, что подобная экранировка обеспечивает работоспособность блоков детектирования только при напряженности электромагнитного поля, по величине не превышающего оговоренного в технических условиях. Если имеется необходимость эксплуатировать блок детектирования в электромагнитных полях, превышающих указанные в технических условиях, то нужно прибегнуть к дополнительной экранировке блока детектирования.

Воздействие ионизирующих излучений. Из ряда понятий, характеризующих воздействие ионизирующих излучений на детекторы и элементы электрических схем блоков детектирования, основными являются радиационная устойчивость и радиационная прочность детекторов и элементов блока детектирования. Радиационная устойчивость детекторов характеризует зависимость параметров детектора от влияния одного излучения при регистрации другого резиновыми уплотнениями, прокладками и сальниками. При эксплуатации блоков детектирования необходимо тщательно следить за состоянием элементов конструкции блоков детектирования, обеспечивающих герметизацию внутреннего объема, так как нарушение герметичности может привести к значительным погрешностям измерений и к выходу из строя блока детектирования. В блоках детектирования для измерения бета-активных газов, альфа- и бета-активных жидкостей разгерметизация может привести к заражению окружающей среды радиоактивными веществами.

Воздействие механических нагрузок. По отношению к воздействию механических нагрузок детекторы ионизирующих излучений обладают относительно низкой устойчивостью. Вибропрочность счетчиков обычно не превышает 3-10 g, для ФЭУ вибропрочность гарантируется при ускорениях не более 4-10 g. Некоторые специально разработанные детекторы могут иметь значительно большую механическую прочность.

Защита от механических нагрузок обеспечивается как амортизацией блоков детектирования в целом, так и индивидуальной амортизацией отдельных его элементов, наиболее чувствительных к воздействию механических нагрузок, например, амортизацией ФЭУ.

Таким образом, среди многих факторов внешней среды, влияющих на качество работы электронной аппаратуры, можно выделить следую-

щие основные виды воздействия: температура, влажность, электромагнитные поля, ионизирующие излучения, механические нагрузки.

1.5. Фон радиометрической установки.

Каждая измерительная установка характеризуется определенными метрологическими параметрами, которые необходимо знать при оценке возможности применения прибора для радиометрического анализа и выбора оптимальных условий измерений.

К общим метрологическим параметрам радиометрических установок интегрального типа можно отнести фон, чувствительность и порог чувствительности (минимальная детектируемая активность).

Основными факторами возникновения фоновых сигналов могут быть следующие причины:

- наличие естественных радионуклидов в деталях блока детектирования;
- внешнее излучение;
- внешнее загрязнение поверхности блоков детектирования;
- собственные флуктуации блока детектирования и линейной части прохождения сигналов;
- электрические помехи.

После подготовки прибора к работе и выбора оптимальных режимов необходимо достаточно точно оценить среднее значение фона и уровня его флуктуации.

Если имеется n измеренных значений скорости счета фона ($\Phi_1, \Phi_2, \Phi_i, \Phi_n$), то среднее значение составит:

$$\bar{\Phi} = \left(\sum_{i=1}^n \Phi_i \right) / n,$$

где, Φ_i — результат i -го измерения фона.

Средняя квадратическая погрешность:

$$\sigma_n = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Phi_i - \bar{\Phi})^2 / n(n-1)}.$$

Стандартная погрешность отдельного измерения σ_Φ при условии, что все замеры произведены в одинаковых условиях, с одинаковой тщательностью и одинаковой точностью (равноточные измерения):

$$\sigma_{\Phi} = \sigma_n \sqrt{n} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Phi_i - \bar{\Phi})^2 / n(n-1)}.$$

Чувствительность установки h определяется как отношение приращения регистрируемой скорости счета I к изменению измеряемой величины активности A :

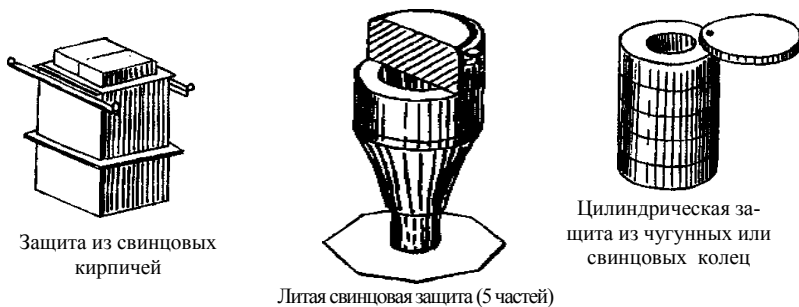
$$h = dI/dA; \text{ или } h = I/A,$$

где, I – скорость счета от источника за вычетом фона, имп/с;

A – активность источника, Бк.

Порог чувствительности s определяет минимальное значение измеряемой величины, при котором регистрируемая прибором скорость счета статистически достоверно ($P=0,997$) отличается от фона установки.

Как правило, детекторы гамма-излучения помещают в специальные свинцовые контейнеры, которые называют защитой. Защита экранирует детектор от фонового гамма-излучения и, в какой-то мере, от космического излучения. Тем самым повышается точность измерения очень малых активностей радионуклидов. С этой же целью лаборатории гамма – спектрометрии располагают на первых или цокольных этажах зданий или в подвалах. Существует множество конструкций защит, некоторые из наиболее типичных и широко распространенных конструкций защит представлены на рисунке 21.



Защита из свинцовых кирпичей

Литая свинцовая защита (5 частей)

Цилиндрическая защита из чугунных или свинцовых колец

Рис.21. Примеры некоторых конструкций защит

Как правило, защиты делают из свинца толщиной 5–10 см. Для уменьшения токсического воздействия свинца защиты покрывают краской.

Для особо малофоновых лабораторий защиту изнутри выкладывают чистой электролизной медью, снаружи – полиэтиленовыми, парафиновыми или тефлоновыми блоками. Лучшие защиты позволяют уменьшить фон до 1–2 фоновых событий в минуту.

1.6. Минимально детектируемая активность.

Основной характеристикой для спектрометрических и радиометрических установок является минимально детектируемая активность (МДА), иногда ее называют минимально измеряемая активность (МИА), это величина, которая определяет чувствительность анализа. Значение МДА зависит от типа детектора, эффективности регистрации гамма-квантов, времени измерения пробы, относительной погрешности измерения. Главная проблема определения содержания радиоактивности в пробах окружающей среды состоит в низком содержании активности в этих пробах, кроме того, результаты измерений для достоверности должны обладать точностью не менее 50 %, поэтому приходится использовать дорогие, но чувствительные электронно-физические измерительные комплексы с детекторами, которые позволяют решать поставленные задачи. Для гамма- и рентгеновских спектрометров – это полупроводниковые детекторы большого объема из особо чистого германия и планарные низкоэнергетические детекторы с максимальной площадью входного окна (более 600 мм), задача которых с максимальной чувствительностью анализировать всю энергетическую шкалу гамма-квантов, начиная от 2 кэВ до 2 МэВ и выше.

Для проб с низким содержанием радиоактивности основным источником погрешностей служат статистические флуктуации. Даже при больших временах измерения их величина может оказаться недопустимой, что влияет на МДА. Кроме этого, если в пробе присутствуют большие и малые активности разных радионуклидов, то определение прямым методом малых активностей на фоне больших становится затрудненным. Поэтому сверхнизкие концентрации радионуклидов в пробах окружающей среды определяют после концентрирования или радиохимического выделения.

Минимально детектируемая активность оценивается по разрешению пика в канале, числу фоновых импульсов в пике полного поглощения и эффективности полупроводникового детектора (ППД).

При проведении сравнительных испытаний определения чувствительности разных полупроводниковых детекторов гамма-излучений в

эксперименте был выбран лучший серийный российский детектор типа ДГДК-125В и детектор из особо чистого Ge типа GC10023 с относительной эффективностью 100,3 % производства США. У отечественных детекторов цифра 125 показывает объем активной области, который определяет его чувствительность, а у зарубежных полупроводниковых детекторов берется отношение чувствительности его самого к детектору на основе кристалла NaI(Tl) объемом 3х3 дюйма, которая называется относительной эффективностью полупроводниковых детекторов. Для измерения была приготовлена насыпная мера с радионуклидами, энергия гамма-излучения которых лежит в диапазоне от десятков кэВ до 1000 кэВ и более, т. е. в пределах почти всей шкалы определения гамма-квантов. Активность каждого радионуклида составляла приблизительно 3 Бк, т. е. их значения активности были близки к пределу обнаружения и чувствительности аппаратуры. Данную насыпную меру измеряли с разной экспозицией от 60 до 5000 с, проводили идентификацию радионуклидов и регистрировали его ошибку определения. Было установлено, что уже через 1000 с детектор из особо чистого Ge типа GC10023 определил все радионуклиды с максимальной ошибкой определения 33 %. При увеличении экспозиции уменьшалась величина ошибки измерения. Российский детектор типа ДГДК-125В не смог идентифицировать радионуклиды ^{133}Ba , ^{152}Eu и ^{240}Am за максимальное время измерения 5000 с.

Результаты исследований еще раз показывают, что при прецизионных измерениях и при определении низких содержаний активностей в пробах внешней среды требуется применять чувствительные гамма-детекторы с большой областью регистрации гамма-квантов.

Сцинтилляционный метод позволяет измерять активность радионуклидов в пробах с основной относительной погрешностью в диапазоне 10–50 %.

Нижний предел измеряемой минимальной измеряемой активности (МДА) определяется при аттестации сцинтилляционного гамма-спектрометра и составляет как правило величину 1-100 Бк/пробу.

Методика измерения низких активностей рассчитана на равномерное распределение радионуклида по объему пробы, поэтому она должна быть тщательно перемешана и измельчена. При измерении удельной активности продуктов питания их подвергают очистке или мытью, как на первом этапе приготовления пищи, для удаления возможного поверхностного загрязнения.

При выборе измерительной кюветы необходимо учитывать объем подготовленной на анализ пробы, ожидаемый уровень радиоактивного

загрязнения, время и погрешность измерения. Перед измерениями необходимо убедиться, что интегральный фон гамма-спектрометра не увеличивается более чем на 10 % при размещении пустой кюветы в защите детектора, что будет являться свидетельством радиационной чистоты кюветы.

Заполнение измерительной кюветы до нужного объема проводят, используя заранее нанесенные на поверхности кюветы метки либо отмеривая объем мерной посудой. Объем заполнения должен соответствовать номинальному значению кюветы с погрешностью не более + 10 %. Массу пробы определяют взвешиванием до и после заполнения кюветы с погрешностью не более +2 %. Плотность пробы — путем деления массы на ее объем.

Практически обработка синтиллиационных спектров базируется на одном из двух методов, которые можно условно назвать: **«модельный» метод** и **метод «окон»**.

В «модельном» методе проводят аппроксимацию информативных участков, содержащих пики полного поглощения (ППП). В этом случае основным информационным параметром является площадь ППП.

В методе «окон» необходимо наличие аттестованных по активности отдельных калибровочных источников для каждого из радионуклидов, которые могут присутствовать в спектре. В спектре выделяется некоторое количество интервалов – «окон», соответствующих наиболее характерным участкам спектра каждого радионуклида. Это области, содержащие ППП наиболее интенсивных линий измеряемых радионуклидов.

Суммарная активность. Для радиометров не имеющих анализаторов спектра при измерении активности проб без применения методик выделения радионуклидов из проб используется понятие «суммарная активность»).

Понятие "суммарная активность" используется в радиационном контроле уже около сорока лет. И все эти годы ему придавали различный смысл, что вызывало некоторую путаницу.

На самом деле, суммарная активность и физическая величина – "активность" – это совершенно разные понятия. Определение активности как физической величины можно найти в словаре метрологических понятий и в справочниках. Активность – это ожидаемое количество спонтанных ядерных превращений в образце в единицу времени. Суммарная же активность – ожидаемое количество отсчетов радиометра в единицу времени за вычетом собственного фона прибора при измере-

нии данного счетного образца. Другими словами, **суммарная активность – мера реакции прибора на пробу неизвестного состава.**

Отклик радиометра может служить (и служит в большинстве измерений) мерой активности, но при условии, что в состав измеряемого счетного образца входит один известный радионуклид. В этом случае радиометр выступает в качестве компаратора, т. е. прибора, сравнивающего две величины. Одна величина в этом случае – неизвестная активность измеряемого образца, другая – известная активность другого, как правило, идентичного или близкого по физическим свойствам и химическому составу к измеряемому, образца сравнения. В случае равенства скоростей счета радиометра от этих образцов можно утверждать, что активности их равны с точностью до погрешности измерения.

Если в предложенной схеме убрать утверждение о наличии лишь одного, и притом известного радионуклида в измеряемом образце, то измерение активности становится невозможным. Однако определение суммарной активности как раз и не предполагает, что состав измеряемого счетного образца известен заранее.

Если внимательно изучить методики, то можно заметить, что все они относятся к так называемым "относительным измерениям", т.е. измерениям, проводимым по одной и той же методике на одном и том же типе прибора периодически в течение длительного времени, с целью отслеживания изменений того или иного радиационного фактора.

Например, в качестве образца сравнения используется равновесный источник ($Sr-90+Y-90$). Это означает, что если скорости счета от измеряемого образца и от образца сравнения ($Sr-90+Y-90$) равны, то суммарная активность измеряемого образца равна активности образца сравнения. Понятно, что в этом случае суммарная активность является условной, а не физической величиной.

Выбор образца сравнения важнейший этап методики, предназначенной для измерения суммарной активности. Образец сравнения должен удовлетворять следующим требованиям.

1. Образец сравнения должен быть максимально приближен по своим физическим свойствам и химическому составу к типичным счетным образцам.

2. По типу и характеристикам излучения образец сравнения должен быть близок к типичному составу измеряемых счетных образцов.

3. Нуклидный состав образца сравнения не должен меняться с течением времени. Это значит, что в образце сравнения следует исполь-

зовать либо долгоживущие радионуклиды, либо радионуклиды с близкими периодами полураспада, чтобы характеристики излучения образца сравнения не менялись.

Второй этап разработки методики – **выбор радиометра**. К радиометрам предъявляются следующие требования.

1. Радиометр должен быть способен измерять счетные образцы того агрегатного состояния и размеров, которые получаются в результате применения методики пробоподготовки.

2. Радиометр должен иметь близкие значения эффективности ко всем радионуклидам, могущим появиться в пробе и представляющим интерес с точки зрения задачи методики. Необходимо отметить, что для регистрации некоторых радионуклидов могут использоваться предшественники или дочерние продукты распада, тогда сказанное относится к ним.

3. Нижний предел измерений радиометра должен быть по крайней мере в пять раз меньше установленных контрольных уровней.

Таким образом, понятие суммарной активности имеет смысл только в том случае, если определены методика пробоподготовки, образец сравнения и радиометр (или хотя бы установлены требования к ним).

На практике методики измерения суммарной активности реализуются следующим образом. После выбора конкретного радиометра проводят его градуировку с помощью образца сравнения, определяя эффективность регистрации (или коэффициент связи) радиометра в зависимости от характеристик счетного образца (массы, плотности, геометрических размеров и т. д.). Впоследствии градуировочные характеристики используются для приведения скорости счета радиометра при измерении счетного образца к суммарной активности.

Важной особенностью суммарной активности является невозможность проверки полученного результата с помощью радиометра другого типа. Пренебрежение этим фактом может привести (и часто приводит) к недоразумениям, хотя оба радиометра могут быть исправны и поверены. В настоящее время все большую популярность приобретает концепция двухуровневого радиационного контроля. Она предполагает принятие контрольных уровней для величин, которые можно легко и быстро измерить с большой степенью надежности и которые являлись бы обобщенными критериями безопасности для определенного вида проб. Если проба не превышает контрольного уровня по такой величине, то предполагается, что дальнейшее ее исследование нецелесообразно и в этом случае говорят, что проба "снимается с контроля".

В случае превышения контрольного уровня необходимо проведение дополнительных исследований.

Суммарная активность – это условная активность счетного образца, полученного с помощью регламентированной методики пробоподготовки. Она численно равна активности назначенного образца сравнения при одинаковых показаниях используемого радиометра.

Предлагаемое определение характерно тем, что объединяет целое семейство определений, отличающихся методиками пробоподготовки, образцами сравнения и используемыми радиометрами. Каждая попытка организовать измерение суммарной активности или ввести это понятие в нормативные документы должна сопровождаться конкретизацией определения суммарной активности.

Измерение суммарной активности, при условии правильного выбора методики пробоподготовки, образца сравнения и радиометра, является мощным методом радиационного контроля, позволяя надежно, быстро и недорого проводить измерения и принимать решения, используя интегральные контрольные уровни.

Контрольные вопросы

1. Что понимают под амплитудными интегральными измерениями?
2. Что понимают под амплитудными дифференциальными измерениями?
3. Как называют радиоэлектронные блоки усиления сигналов?
4. Что такое коэффициент усиления усилителя импульсов?
5. Начертите форму импульса, приведите его основные характеристики.
7. Объясните принцип интегрального метода дискриминирования сигнала.
8. Объясните принцип дифференциального метода дискриминирования сигнала.
9. Начертите схему передачи сигнала от детектора к пересчетному прибору.
10. Какие основные требования предъявляются к источникам высокого напряжения?
11. Объясните принцип стабилизации режима работы детектора с помощью контрольного сигнала.
12. Какие элементы индикации используют в современных радио-

метрах?

13. Начертите функциональную блок-схему радиометра.

14. Что такое суммарная активность?

15. В каких случаях используют схему совпадений?

2. ЗАДАНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Лабораторная работа №1.

УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ РАДИОМЕТРА ПП-8

Радиометрическая установка ПП-8 (стационарный радиометр ПП-8) применяется для количественного определения радиоактивности проб. Радиометр ПП-8 состоит из четырех блоков (рис. 22).

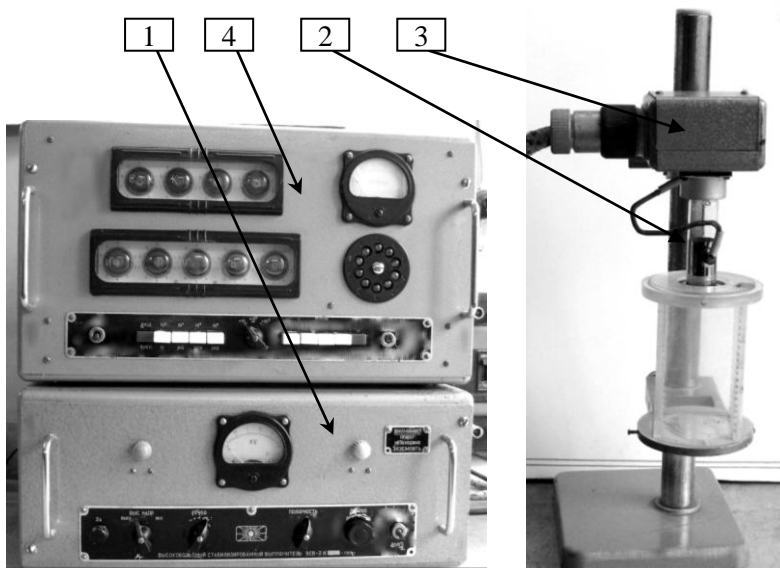


Рис. 22. Радиометрическая установка ПП-8:

1 – высоковольтный стабилизированный выпрямитель ВСВ-2; 2 – газоразрядный счетчик; 3 – блок УГС-1; 4 – пересчетный прибор ПСТ-100.

Высоковольтный стабилизированный выпрямитель ВСВ-2 выдает высокое напряжение, регулируемое в пределах 400–2200 В,

которое подается на детектор (счетчик). Для разных видов счетчиков необходимо различное по величине и полярности напряжение.

Блок УГС-1 является усилителем-ограничителем импульсов напряжения, посылаемых от газоразрядного счетчика. Импульсы малой величины усиливаются, а большой, наоборот, ограничиваются приблизительно до 6 В, причем полярность импульсов меняется на положительную. В результате на выходе блока УГС-1 получаются импульсы напряжения одинаковой амплитуды, одинаковой продолжительности и положительной полярности. Эти импульсы напряжения подаются на вход пересчетного прибора ПСТ-100. В качестве детектора ионизирующего излучения используется либо счетчик Гейгера, либо сцинтилляционный счетчик на основе йодистого натрия.

Пересчетный прибор ПСТ-100 выполняет следующие функции:

- а) регистрирует количество импульсов, поступающих от блока УГС или от сети переменного тока (при проверке пересчетного прибора);
- б) регистрирует время работы;
- в) измеряет среднюю скорость счета импульсов;
- г) производит автоматическую остановку.

Регистрация количества импульсов производится при помощи счетчика импульсов. Счетчик импульсов имеет пять декатронов и десять неоновых лампочек, расположенных на черном диске. На защитном стекле счетчика импульсов имеется надпись «импульсы». Число зарегистрированных импульсов определяется по цифрам, возле которых горят лампочки. Результат читается слева направо. Число импульсов всегда целое.

Регистрация времени работы прибора производится при помощи электронного секундомера. На защитном стекле секундомера имеется надпись «секунды». Электронный секундомер имеет четыре декатрона. Показание электронного секундомера определяется по цифрам, возле которых горят разрядные промежутки декатронов. Измерение времени производится с точностью до одной десятой секунды. Десять доли секунды отсчитывает крайний правый декатрон.

Измерение средней скорости счета импульсов производится стрелочным прибором – интенсиметром (имп/с). Чувствительность интенсиметра изменяется при помощи переключателя, расположенного внизу на передней панели прибора ПСТ-100. Измерения производятся на трех диапазонах. При определении скорости счета необходимо показание индикатора умножить на тот коэффициент, на который указывает переключатель. Этим прибором пользуются при больших скоростях счета.

Автоматическая остановка прибора ПСТ-100 может производиться в двух вариантах:

- а) по заданному количеству набранных импульсов;
- б) по заданному интервалу времени.

Чтобы прибор автоматически остановился по заданному количеству импульсов, необходимо тумблер таймера поставить в положение «имп» (верхнее положение) и нажать одну из белых кнопок, над которыми имеются надписи количества импульсов: 10^3 , 10^4 , 10^5 , 10^6 .

Чтобы прибор производил автоматическую остановку по заданному интервалу времени, следует тумблер таймера поставить в положение «сек» (нижнее положение) и нажать одну из белых кнопок, под которыми имеются надписи интервалов времени в секундах: 10, 100, 1000. При нажатии кнопки с надписью «∞» автоматическая остановка осуществляться не будет.

Внизу на лицевой панели пересчетного прибора расположены все органы управления, состоящие из:

- а) кнопки «накал» (справа, красного цвета) – для включения / выключения накальных цепей прибора;
- б) кнопки «анод» (слева, красного цвета) – для включения / выключения анодных цепей прибора;
- в) кнопки «пуск» – для включения работы в режим регистрации импульсов напряжения от газоразрядного счетчика;
- г) кнопки «стоп» – для ручной остановки работы прибора;
- д) кнопки «сброс» – для установки электронного секундомера и счетчика импульсов на ноль;
- е) кнопки «проверка» – для проверки правильности работы пересчетного прибора.

Переключатель полярности входного сигнала при работе с газоразрядным счетчиком должен находиться в положении «+», так как блок УГС-1 выдает импульс положительной полярности.

Подготовка прибора к работе:

1. Включить пересчетный прибор ПСТ-100.
 - 1.1. Проверить заземление пересчетного прибора и выпрямителя.
 - 1.2. **Внимательно осмотреть переднюю панель прибора. В исходном состоянии красные кнопки выключения цепей накала и анода должны быть вдавлены (цепи выключены).**
 - 1.3. Осмотреть заднюю панель прибора. Проверить, хорошо ли вставлены соединительные кабели. **Проверить наличие заземления.**
 - 1.4. Включить шнуры питания выпрямителя и пересчетного прибора в розетку электрической сети.

1.5. Включить накальные цепи электронных ламп прибора, нажав кнопку «стоп». Должна загореться лампочка в звездочке в правой части прибора.

1.6. По истечении 3–5 минут (это время необходимо для подогрева катодов электронных ламп) включить анодные цепи прибора, нажав кнопку «1000». Должны загореться отдельные промежутки всех дека-тронов и одна из неоновых лампочек.

1.7. Нажать кнопку «сброс». **Прибор готов к работе.**

1.8 Проверка исправности пересчетного прибора ПСТ-100. Нажать кнопку «проверка». При этом в качестве генератора импульсов используется сеть переменного тока. Частота тока в сети переменного тока равна 50 Гц и является весьма стабильной. Вход счетчика импульсов связан с трансформатором через полупроводниковый диод, вследствие чего на вход счетчика импульсов поступает только положительная часть синусоидального напряжения, т.е. за 1с на вход счетчика поступает 50 импульсов, а за одну минуту (60 с) поступает 3000 импульсов (50 импульсов × 60 секунд = 3000 импульсов/мин). Таким образом, если счетчик импульсов исправен, то за 1 мин он зафиксирует 3000 импульсов. Количество импульсов, зафиксированное прибором за единицу времени, называется **скоростью счета**.

По истечении $t=360$ с нажать кнопку «стоп». Записать количество зарегистрированных прибором импульсов n .

Рассчитать скорость счета импульсов по формуле:

$$N = n/t, \text{ имп/мин.}$$

Рассчитать относительную ошибку скорости счета:

$$\varepsilon = \frac{(N - 3000)}{3000} \cdot 100\%.$$

Относительная ошибка не должна превышать 1%, (прибор считается исправным).

Выключить пересчетный прибор, нажав красные кнопки сначала «анод», затем «накал».

Выпрямитель ВСВ-2 выдает регулируемое высокое напряжение от 400 до 2200 В. Напряжение стабилизируется при помощи электронного стабилизатора. Это напряжение снимается с одного из гнезд «вых. напр.» на задней панели выпрямителя. По экранированному кабелю

высокое напряжение подводится к пересчетному прибору и далее к газоразрядному счетчику.

На передней панели выпрямителя расположены ручки управления и стрелочный измерительный прибор – киловольтметр. Цена деления киловольтметра равна 0,1 кВ (100 В). При выключенном высоковольтном выпрямителе, если рукоятки «грубо» и «плавно» находятся в крайнем левом положении, стрелка киловольтметра указывает не «0», а начальное стабилизированное напряжение (400–500 В). Не следует при помощи винта корректора возвращать ее в нулевое положение. Назначение ручек управления: тумблер «сеть» – для подключения прибора к сети, ручки «плавно» и «грубо» – для регулирования высокого напряжения, ручка «выс. напр.» – для включения высокого напряжения, а также переключатель полярности. При работе с газоразрядными счетчиками эта ручка должна находиться в положении «+».

Слева внизу расположен держатель предохранителя.

Справа от киловольтметра находится зеленый колпачок, а под ним – индикаторная лампочка включения сети, слева – красный колпачок, под которым расположена индикаторная лампочка включения высокого напряжения.

Исходное положение ручек управления блоком ВСВ-2:

- а) «сеть» – в положение «выкл.»;
- б) «плавно» – в крайнее левое положение;
- в) «полярность» – в положение «+»;
- г) «грубо» – в положение крайнее левое;
- д) «выс. напр.» – в положение «выкл.».

Включение блока ВСВ-2. Выключатель «сеть» поставить в верхнее положение. Должна загореться лампочка под зеленым колпачком. При этом включаются только накальные цепи электронных ламп выпрямителя.

По истечении 3–5 минут переключатель «выс. напр.» следует повернуть в положение «вкл.». Должна загореться индикаторная лампочка под красным колпачком. Стрелка киловольтметра установится на 0,4–0,5 кВ (400–500В).

При установке напряжений нужно соблюдать следующее правило: **регулирование высокого напряжения всегда начинать ручкой «плавно».** Если не удастся достичь заданного напряжения, ручку «плавно» переводят в крайнее левое положение, а ручкой «грубо» делают один щелчок вправо. Затем снова ручкой «плавно» начинают регулировать высокое напряжение до нужной величины.

Выключение высоковольтного выпрямителя ВСВ-2:

- ручки «плавно» и «грубо» повернуть в крайнее левое положение;
- ручку «выс. напр.» повернуть в положение «выкл.»;
- выключатель «сеть» поставить в положение «выкл.».

Контрольные вопросы

1. Каково назначение радиометра ПП-8?
2. Какие функции выполняет пересчетный прибор ПСТ-100?
3. Для чего предназначены газоразрядные счетчики?
4. Какие функции выполняет блок УГС-1?
5. Как отсчитывается время по электронному секундомеру прибора ПСТ-100?
6. Правило включения пересчетного прибора ПСТ-100.
7. Правило установки необходимого высокого напряжения на блоке ВСВ-2.
8. Как провести проверку правильности работы блока ПСТ-100?
9. Как работает автоматическая остановка блока ПСТ-100?
10. Правило выключения блоков ПСТ-100 и ВСВ-2.

Задание 1. Измерение и регулировка уровня дискриминации пересчетной установки ПСТ-100.

На рис. 23, приведена блок-схема экспериментальной установки для выполнения задания.

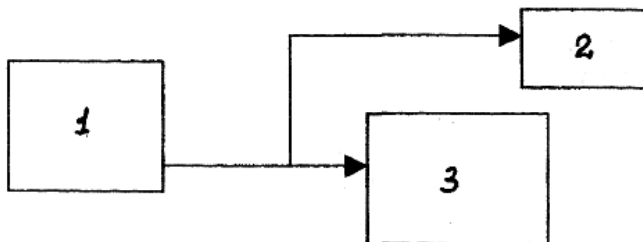


Рис. 23. Блок-схема установки для измерения уровня дискриминации:
 1. Генератор импульсов; 2. Пересчетный блок;
 3. Импульсный вольтметр или осциллограф.

Цель работы. Определить уровень дискриминации пересчетной установки ПСТ-100 и установить его равным значению, рекомендуемым заводом-изготовителем.

Материалы и оборудование: радиометр ПП–8, генератор прямоугольных импульсов Г5-2А, осциллограф С1-77, технический паспорт радиометра.

Выполнение работы. 1. Включите кнопку «сеть» радиометра, держите радиометр в этом положении 5 минут. Эти же операции повторите с генератором и осциллографом.

2. Подключите выходной кабель генератора ко входу пересчетного блока ПСТ-100 на задней панели.

3. Подключите выход генератора ко входу "У" осциллографа.

4. Нажмите кнопку «пуск» на панели ПСТ-100.

5. Увеличивайте выходное напряжение генератора до появления импульсов на пересчетном блоке.

5. Определите по шкале осциллографа амплитуду подаваемых импульсов (уровень дискриминации).

6. Если уровень дискриминации не соответствует паспортным данным, то установите на выходе генератора необходимый уровень дискриминации.

7. Вращая ось подстроечного резистора на плате дискриминатора отрегулируйте его до появления импульсов на декаде из неоновых лампочек.

6. Подкорректируйте резистором уровень дискриминации так, чтобы при вращении оси в одну сторону – счет импульсов прекращался, в другую – начинался.

Лабораторная работа №2. ИЗУЧЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО ХАРАКТЕРА ЗАКОНА РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА

Распад радиоактивных ядер (равно как и их регистрация) носит хотя и закономерный, но все же случайный характер. Установить закономерности радиоактивного распада можно лишь набрав достаточно большое число результатов наблюдений (как правило, не менее 100). При единичных наблюдениях никаких закономерностей не наблюдается. Учетом и обработкой большого числа наблюдений (так называемых статистических данных) занимается статистика. Исходя из этого и говорят о статистическом характере закона радиоактивного распада. Это значит, что закон радиоактивного распада справедлив для большого числа радиоактивных ядер. Для одного, двух или трех отдельно взятых

радиоактивных ядер закономерностей радиоактивного распада не наблюдается.

Чтобы определить вероятность регистрации N_p импульсов по формуле Пуассона, или нормального распределения, следует пользоваться соответствующими таблицами, поскольку непосредственные вычисления вероятностей довольно громоздки. В таблицах распределения Пуассона значения вероятностей приводятся непосредственно для величин N_p и \bar{N} . Таблицы плотности вероятности нормального распределения построены для нормированного значения аргумента:

$$P(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}},$$

где величина z вычисляется по формуле

$$z = \frac{N_p - \bar{N}}{\sqrt{\bar{N}}}. \quad (1)$$

Перейти к значению вероятностей для данного числа импульсов $P(N_p)$ можно, разделив взятое из таблиц значение на $\sqrt{\bar{N}}$:

$$P(N_p) = \frac{P(z)}{\sqrt{\bar{N}}}.$$

Для экспериментальной проверки законов распределения скоростей счета во времени удобно пользоваться интегральной формой нормального распределения, которая записывается следующим образом:

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{z^2}{2}} \cdot dz.$$

Функцию $\Phi(z)$ часто называют функцией Лапласа. Ее можно представить графически (рис.24). Из графика ясно, что смысл этой функции сводится к определению вероятности того, что полученный результат будет лежать в пределах от 0 до некоторого значения z . Чаще всего "истинным" результатом измерений будет являться вершина

графика, где вероятность регистрации равна 1, т.е. $[P(N_p)=1]$, которая определяет истинную среднюю скорость счета. За истинную среднюю скорость счета принимается средняя арифметическая скорость счета N , определенная из ряда измерений, результаты которых различаются из-за колебаний (флуктуации), связанных со статистическим характером радиоактивного распада и процесса регистрации излучения.

Для вычисления функции Лапласа также пользуются специальной таблицей (приложение 1). В таблице даны значения функции $\Phi(z)$ для положительных значений z и для $z=0$. Для $z<0$ пользуются той же таблицей, учитывая, что функция $\Phi(z)$ нечетная, т.е. $\Phi(z)=-\Phi(z)$. В таблице приведены значения интеграла лишь до $z = 5$, так как для всех $z > 5$ принимают $\Phi(z) = 0,5$.

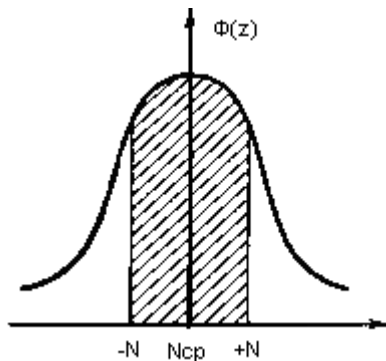


Рис.24. Функция Лапласа.

Все изложенное сводится к утверждению, что закон радиоактивного распада носит вероятностный, статистический характер и, следовательно, подчиняется распределению Пуассона (если $N_p < 10$ за некоторый выбранный промежуток времени) или нормальному распределению (если $N_p > 10$ за тот же промежуток времени). Нам необходимо проверить, правильно ли это утверждение.

Эмпирические и теоретические частоты. Рассмотрим дискретную случайную величину N_p , закон распределения которой неизвестен. Пусть произведено m регистраций этой величины, в которых величина N_p приняла m_1 раз значение n_1 , m_2 раз значение n_2, \dots, m_k раз значение n_k , причем

$$\sum_{i=1}^k m_i = m.$$

Эмпирическими (опытными) частотами $f_{\text{оп}}$ называют фактически наблюдаемые частоты m_i .

Пусть имеется основание предположить, что изучаемая величина N_p распределена по некоторому определенному закону. Для того, чтобы проверить, согласуется ли это предположение с данными наблюдений, вычисляют частоты наблюдаемых значений, т.е. находят теоретически, сколько раз величина N_p должна была принять каждое из наблюдаемых значений, если она распределена по предполагаемому закону. **Теоретическими**, в отличие от фактически наблюдаемых эмпирических частот, называют частоты f , найденные теоретически (вычислением).

Теоретические частоты находят по равенству:

$$f = m \cdot P(z), \quad (2)$$

где m – общее число наблюдений (измерений);

$P(z)$ – вероятность наблюдаемого значения n_i , вычисленная при допущении, что N_p имеет предполагаемое распределение.

Итак, теоретическая частота f наблюдаемого значения n_i дискретного распределения равна произведению числа наблюдений на вероятность этого наблюдаемого значения.

Чтобы вычислить теоретические частоты, необходимо весь интервал наблюдаемых значений N_p делить на несколько частичных интервалов желательной одинаковой длины (обычно на 6-8 интервалов). В каждый интервал должно быть включено не менее 5-ти отсчетов. Если число отсчетов оказывается меньше, то отдельные интервалы надо объединить. Вычисляют теоретические вероятности $P(z)$ попадания N_p в интервалы $(n_i; n_{i+1})$ по равенству

$$P_i = \Phi(z_{i+1}) - \Phi(z_i), \quad (3)$$

где $\Phi(z)$ – функция Лапласа.

И, наконец, находят по формуле (2) искомые теоретические частоты f . Сравнительно небольшое расхождение эмпирических и теоретических частот подтверждает предположение, что рассматриваемое распределение подчиняется выбранному закону распределения. Обыч-

но сравнение частот лучше производить с помощью гистограммы, **Гистограмма** – это ступенчатая фигура, состоящая из прямоугольников, основаниями которых служат частичные интервалы (на которые разбиваются все измеренные значения) а высоты равны частотам появления отсчетов в данных интервалах измеренных значений (рис. 25). При определении интервалов, расчете вероятностей для построения гистограммы вычитание фона из измеренного числа импульсов не производится.

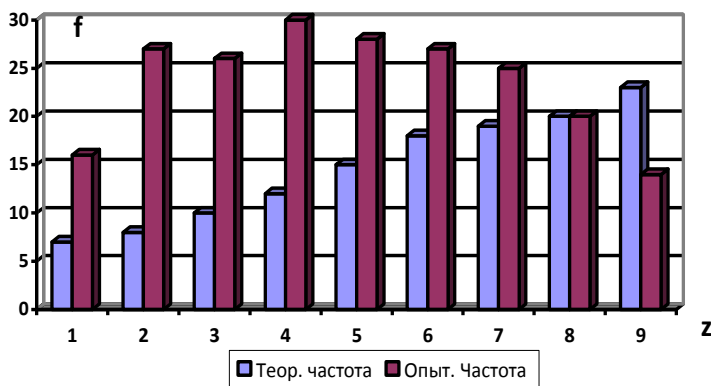


Рис.25. Гистограмма теоретических и опытных частот распределения скоростей счета.

Пример 1. Найти теоретические частоты по заданному интервальному распределению, предполагая, что речь идет о нормальном распределении (табл.1). Среднее арифметическое $\bar{N} = 12,6$.

Таблица 1. Результаты вычислений.

Номер интервала i	Граница интервала		Частота m _i
	n _i	n _{i+1}	
1	4	6	15
2	6	8	26
3	8	10	25
4	10	12	30
5	12	14	26
6	14	16	21
7	16	18	24
8	18	20	20
9	20	22	13

m=200

Решение. Найдем значения z_i для границ интервалов по формуле (11), $\Phi(z_i)$ по приложению 1 и $P(z)$ по формуле (2). Все расчеты сведем в таблицу 2.

Таблица 2. Результаты вычислений.

Номер интервала i	Границы		$\Phi(z_i)$	$\Phi(z_{i+1})$	$P(z)$	f
	z_i	z_{i+1}				
1	-2,42	-1,86	-0,4922	-0,4666	0,0256	6
2	-1,86	-1,30	-0,4666	-0,4032	0,0654	13
3	-1,30	-0,73	-0,4032	-0,2673	0,1359	27
4	-0,73	0,17	-0,2673	0,0675	0,3348	67
5	0,17	0,39	0,0675	0,1517	0,0842	17
6	0,39	0,96	0,1517	0,3315	0,1798	36
7	0,96	1,52	0,3315	0,4357	0,1042	21
8	1,52	2,08	0,4357	0,4812	0,0455	10
9	2,08	2,65	0,4812	0,4959	0,0147	4

Для сравнения построим гистограмму (рис. 26).

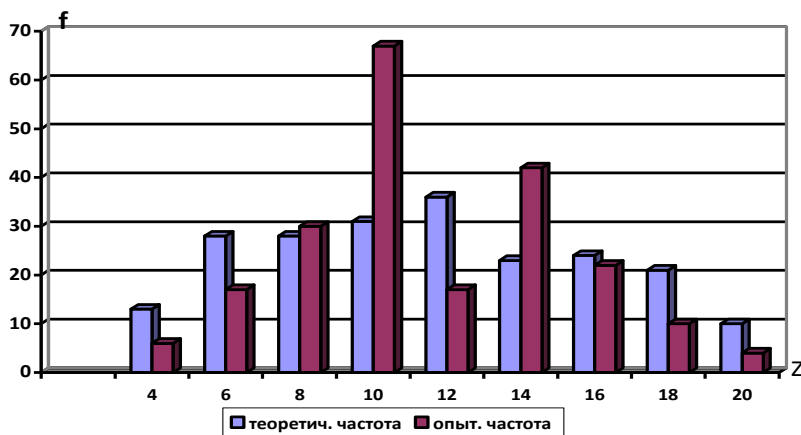


Рис.26. Гистограмма частот распределения.

Проверка гипотезы о нормальном распределении. Критерий согласия Пирсона. С помощью гистограммы можно произвести лишь качественную оценку совпадений экспериментальных и теоретических частот распределений скоростей счета. Для количественной оценки полученных результатов пользуются критерием согласия. Это крите-

рий проверки гипотезы о предполагаемом законе неизвестного распределения. Имеется несколько критериев согласия: χ^2 К.Пирсона, Колмогорова, Смирнова и др.

Ограничимся описанием применения критерия Пирсона к проверке гипотезы о нормальном распределении (критерий аналогично применяется и для других распределений, в этом состоит его достоинство). С этой целью будем сравнивать эмпирические и теоретические частоты.

Обычно эмпирические и теоретические частоты различаются. Например (см. пример 1):

Эмпирические частоты	15	26	25	30	26	21	24	20	13
Теоретические частоты	6	13	27	67	17	36	21	10	4

Случайно ли расхождение частот? Возможно, что расхождение случайно (незначимо) и объясняется малым числом наблюдений, либо способом их группировки, либо другими причинами. Возможно, что расхождение частот неслучайно (значимо) и объясняется тем, что теоретические частоты вычислены исходя из неверной гипотезы о нормальном распределении.

Критерий Пирсона отвечает на поставленный выше вопрос. Правда, как и любой другой критерий, он не доказывает справедливость гипотезы, а лишь устанавливает на принятом уровне значимости ее согласие или несогласие с данными наблюдений.

Итак, пусть по некоторому числу значений получено эмпирическое распределение:

Варианты	n_1	n_1	n_2	n_3	$\dots n_k$
Эмп. частоты	$f_{оп}$	f_1	f_2	f_3	$\dots f_k$

Допустим, что в предположении о нормальном распределении вычислены теоретические частоты f . При уровне значимости α требуется проверить гипотезу: данное распределение является нормальным распределением.

В качестве критерия проверки гипотезы примем случайную величину.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^l \frac{(f_{оп} - f)^2}{f}, \quad (4)$$

где l – число интервалов, на которые разбиты полученные значения. Эта величина, случайная, так как в различных опытах она принимает

различные, заранее неизвестные значения. Ясно, что чем меньше различаются эмпирические $f_{оп}$ и теоретические f частоты, тем меньше величина критерия (4) и, следовательно, он в известной степени характеризует близость эмпирического и теоретического распределений.

Заметим, что возведением в квадрат разностей частот устраняют возможность взаимного погашения положительных и отрицательных разностей. Делением на f достигают уменьшения каждого из слагаемых. В противном случае сумма была бы настолько велика, что привела бы к отклонению гипотезы даже тогда, когда она справедлива. Разумеется, приведенные соображения не являются обоснованием выбранного критерия, а лишь пояснением.

Обозначим значение критерия, вычисленное по данным наблюдений, через $\chi^2_{набл}$ и сформулируем правило проверки гипотезы.

Правило. Для того, чтобы при заданном уровне значимости проверить выдвинутую гипотезу о нормальном распределении, надо сначала вычислить теоретические частоты, а затем наблюдаемое значение критерия

$$\chi^2_{набл} = \sum_{i=1}^l \frac{(f_{оп} - f)^2}{f},$$

и по таблице критических точек распределения $\chi^2_{кр}$ (**приложение 2**), по заданному уровню значимости α и числу степеней свободы $K = l - 3$ найти критическую точку $\chi^2_{кр}(\alpha, k)$.

Если $\chi^2_{набл} < \chi^2_{кр}$ – нет оснований опровергнуть гипотезу.

Если $\chi^2_{набл} > \chi^2_{кр}$ – гипотезу опровергают.

Замечание 1. Число отсчетов (измерений) должно быть достаточно большим, во всяком случае не менее 50. При разбивке на интервалы в каждый интервал включается не менее 5 отсчетов. Если число отсчетов оказывается меньше, то отдельные интервалы надо объединить.

Замечание 2. Если предполагают, что имеется распределение по закону Пуассона, то число степеней свободы $k = l - 2$.

Замечание 3. Всегда есть вероятность совершить ошибку, которая состоит в том, что будет отвергнута правильная гипотеза. Эту вероятность принято обозначать через α . Ее называют уровнем **значимости**. Наиболее часто уровень значимости принимают равным 0,05 или 0,01. Если, например, принят уровень значимости равный 0,05, то это означает, что в 5 случаях из 300 мы рискуем отвергнуть правильную гипотезу.

Пример 2. При 5%-ном уровне значимости проверить гипотезу о нормальном распределении вероятности регистрации по данным из примера 1.

Решение. Вычислим $\chi^2_{\text{набл}}$, для чего составим расчетную таблицу (табл. 3). Найдем число степеней свободы, учитывая, что $l=9$, Тогда $k = 9-3 = 6$.

Таблица 3. Результаты расчетов

i	$f_{\text{он}}$	f	$f_{\text{он}}-f$	$(f_{\text{он}}-f)^2$	$(f_{\text{он}}-f)^2/f$
1	15	6	9	81	13,5
2	26	13	13	169	13
3	25	27	-2	4	0,15
4	30	67	-37	1369	20,43
5	26	17	9	81	4,76
6	21	36	-14	196	5,44
7	24	21	3	9	0,43
8	20	10	10	100	10
9	13	4	9	81	20,25

$$\chi^2_{\text{набл}} = 87,96$$

По таблице критических точек распределения $\chi^2_{\text{кр}}$ (приложение 2), по уровню значимости $\alpha=0,05$ и числу степеней свободы $k = 6$ находим $\chi^2_{\text{кр}}(0,05; 6) = 12,6$. Так как $\chi^2_{\text{набл}} > \chi^2_{\text{кр}}$, то принятая гипотеза о нормальном распределении неверна. Следовательно, данные наблюдений не подчиняются нормальному распределению.

Цель работы: необходимо проверить предположение (гипотезу), что закон радиоактивного распада носит статистический вероятностный характер и, следовательно, подчиняется нормальному распределению (если $N_p > 10$ за единичный промежуток времени) или распределению Пуассона (если $N_p < 10$ за единичный промежуток времени).

Приборы и материалы:

1. Радиометр ПП-8 или КРВП-ЗАБ;
2. Радиоактивные источники;
3. Калькулятор;
4. Миллиметровая бумага, линейка.

Порядок выполнения работы:

1. Подготовьте радиометр к работе;
2. Произведите проверку правильности работы пересчетного блока;
3. Создайте скорость счета порядка 100-1000 имп/мин (подберите необходимую позицию);
4. Произведите 100 отсчетов по 30 с;

5. Найдите среднее значение как среднее арифметическое по формуле

$$\bar{N} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m n_i = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{100} n_i$$

с точностью до 2-х знаков после запятой;

6. Разбейте полученные результаты на 6-8 интервалов. Для этого сначала запишите полученные результаты измерений в порядке возрастания (от самого меньшего зарегистрированного числа импульсов до самого большого), проставляя против каждого варианта результатов число появлений его в данных измерениях:

Вариант n_1 n_2 n_3 ... n_m

Частота f_1 f_2 f_3 ... f_m .

Учтите, что в каждом интервале должно быть не менее 5 отсчетов (частот);

7. Найдите эмпирическую (опытную) частоту отсчетов $f_{\text{оп}}$, лежащих в каждом интервале. Частота отсчетов $f_{\text{оп}}$ находится как сумма всех отсчетов (частот), лежащих в данном интервале. Необходимо учитывать, что один и тот же вариант результатов будет концом одного интервала, а также началом другого, поэтому частоту появлений в этом случае распределяют поровну между двумя интервалами. Например:

Вариант 107 108 111 112 113 115 116 320

Частота 2 3 2 6 1 2 3 4

Интервалы Эмпирические частоты

1: 107-111 $f_{\text{оп}}=2+3+2=6$

2: 111-115 $f_{\text{оп}}=2/2+6+1+2/2=9$

3: 115-120 $f_{\text{оп}}=2/2+3+4=8$

8. Рассчитайте теоретические частоты (пример 1). Расчеты производите в следующем порядке:

а) найдите значение λ для границ интервалов по формуле (1);

б) определите функцию Лапласа для каждого z_i , то есть $\Phi(z)$ по таблице приложения 1, учитывая оговоренные в тексте свойства этой функции;

в) вычислите P_i для каждого интервала по формуле (3);

г) найдите теоретическую вероятность f по формуле (2).

Для удобства, расчеты сведите в расчетную таблицу (табл. 4);

Таблица 4. Расчет теоретической вероятности.

Интервал i	Границы интервала		$\Phi(z_i)$	$\Phi(z_{i+1})$	Pi	f _i
	z _i	z _{i+1}				
1						
2						
...						
i						

9. Постройте гистограмму распределений теоретических и экспериментальных частот;

10. Рассчитайте критерий согласия $\chi^2_{\text{набл}}$ по формуле (4) (пример 2). Расчеты запишите в таблицу 5;

11. Найдите число степеней свободы k для нормального распределения;

12. Зная k, определите $\chi^2_{\text{кр}}$ по приложению 2 при 5 %-ном уровне значимости;

Таблица 5. Расчет критерия $\chi^2_{\text{набл}}$.

i	f _{оп}	f	f _{оп} -f	(f _{оп} -f) ²	(f _{оп} -f) ² /f
1					
2					
...					
i					

$$\chi^2_{\text{набл}} =$$

13. Используя правило проверки гипотезы, сделайте вывод о правильности утверждения: регистрация распадов радиоактивных ядер (также и закон радиоактивного распада) подчиняется нормальному распределению (или распределению Пуассона).

Контрольные вопросы

1. Дайте определение случайной величины.
2. Объясните, почему закон радиоактивного распада носит статистический характер.
3. Дайте определение вероятности.
4. Какая величина называется дискретной?
5. Зависит ли вероятность распада от внешних условий? Ответ поясните.
6. Запишите закон радиоактивного распада.

7. Как определяется вероятность распада отдельного радиоактивного ядра? Вывести из закона радиоактивного распада.
8. Запишите выражение для вероятности распада и регистрации отдельного радиоактивного ядра. Буквенные обозначения, входящие в формулу, поясните.
9. Дайте определение закона распределения дискретной случайной величины.
10. Как можно задать закон распределения дискретной случайной величины?
11. Дайте определение биномиального распределения.
12. Объясните, почему биномиальное распределение применимо к закону радиоактивного распада?
13. В каком случае биномиальное распределение переходит в распределение Пуассона?
14. В каком случае применяется распределение Пуассона?
15. Когда распределение Пуассона переходит в нормальное распределение?
16. Какую функцию называют функцией Лапласа?
17. Перечислите свойства функции Лапласа,
18. Что называют истинной средней скоростью счета?
19. Поясните график функции Лапласа.
20. Дайте определение эмпирических частот.
21. Дайте определение теоретических частот.
22. Как рассчитать теоретические частоты?
23. Дайте определение гистограммы.
24. Для чего используется гистограмма частот?
25. Как учитывается фон счетчика при построении гистограммы?
26. Объясните, как определить функцию Лапласа, используя приложение 1.
27. Что называют критерием согласия?
28. Почему наряду с гистограммой используют критерий согласия?
29. Для чего используют критерий согласия Пирсона?
30. Что характеризует критерий согласия Пирсона?
31. Сформулируйте правило проверки выдвинутой гипотезы.
32. Какие замечания необходимо учитывать, используя правило проверки гипотезы?
33. Что характеризует уровень значимости?
34. Как определить критерий χ^2 по приложению 2?
35. Для чего определяется критерий χ^2 по приложению 2?

36. Как правильно рассчитать частоту отсчетов, лежащих в данном частичном интервале?

37. На основании чего делается вывод о правильности или неправильности выдвинутой гипотезы?

38. Какова цель данной лабораторной работы?

Лабораторная работа №3. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Поскольку радиоактивный распад – процесс статистический, то и число импульсов, регистрируемых счетной установкой в единицу времени при измерении активности препарата подвержено статистическим флуктуациям. Действительно, измеряя несколько раз скорость счета при неизменном положении радиоактивного препарата, можно заметить, что полученные значения не совпадают между собой. Например, могут быть получены такие значения скорости счета (имп/мин): 540, 555, 535, 545, 542 и т. д. Эти числа группируются около какого-то среднего значения, которое и принимают за экспериментальное выражение скорости счета препарата.

Нет смысла говорить об истинной скорости счета импульсов, поступающих от детектора. В данном случае можно говорить лишь об истинной средней скорости счета, то есть о величине, к которой стремится результат измерения по мере увеличения полного числа отсчетов, используемых для определения среднего. Число зарегистрированных на опыте частиц должно быть тем больше, чем выше наши требования к достоверности (точности) окончательного результата измерения. Это достигается либо увеличением числа отдельных измерений, либо повышением времени отдельного измерения. Иначе говоря, получение результата высокой точности требует большого статистического материала (большой информации).

Итак, статистический характер радиоактивного распада приводит к своеобразным случайным ошибкам измерений, так называемым статистическим ошибкам. Оценка величины этой ошибки является необходимой частью математической, обработки результатов измерений.

При измерении любой физической величины принципиально невозможно определить истинное значение этой величины. Разность между измеренным и истинным (действительным) значениями физической величины называются **погрешностью** или **ошибкой измерения**.

Многokратное измерение одной и той же постоянной величины приводит к различным значениям этой величины, которые отличаются от действительного. Без оценки ошибок результат измерения становится ненадежным, а в ряде случаев может оказаться, что он вообще не содержит информацию об измеряемой величине.

Ошибки измерения могут быть связаны с техническими трудностями (несовершенство измерительных приборов, ограниченные возможности зрительного аппарата человека, с помощью которого во многих случаях регистрируются показания приборов и т. д.), а также целым рядом факторов, которые трудно или невозможно учесть (колебания температуры воздуха, движение потоков воздуха вблизи измерительного прибора, вибрация измерительного прибора вместе с лабораторным столом и т. д.).

Различают три типа погрешностей (ошибок) измерения: грубые ошибки (промахи), систематические и случайные ошибки.

Грубые ошибки (промахи) обычно бывают связаны с неисправностью измерительной аппаратуры, ошибкой экспериментатора в отсчете или записи показаний приборов, резким изменением условий измерений. В этих случаях результаты измерений необходимо отбрасывать и взамен производить новые измерения.

Систематические ошибки измерений – это такие ошибки, которые при многократном измерении одной и той же величины остаются постоянными или изменяются по определенному закону. Систематические ошибки включают в себя методические и инструментальные (приборные) погрешности измерений.

Методические погрешности вызываются недостатками применяемого метода измерения, несовершенством теории физического явления, к которому относится измеряемая величина, неточностью расчетной формулы. Методические погрешности можно уменьшать путем совершенствования метода измерения, введением уточнений или поправок в расчетную формулу.

Инструментальные (приборные) погрешности вызываются несовершенством конструкции и неточностью изготовления измерительных приборов (применение отстающих или спешащих часов, несовпадение в стрелочном приборе центра шкалы с осью вращения стрелки и т. д.). Уменьшение приборной погрешности достигается применением более точных и совершенных приборов. Однако полностью устранить приборную погрешность невозможно.

Случайными ошибками измерений называются ошибки, абсолютная величина и знак которых изменяются при многократных измерениях одной и той же физической величины. Равновеликие положительные и отрицательные случайные отклонения одинаково часто будут встречаться на опыте. Случайные погрешности вызываются многими факторами, эффекты действия которых столь незначительны, что их нельзя выделить и учесть в отдельности. Полностью избавиться от случайных погрешностей невозможно, но их можно уменьшить путем многократного повторения измерений. При этом происходит частичная компенсация случайных отклонений результатов измерений в сторону завышения и в сторону занижения. Расчет случайных погрешностей производится методами теории вероятностей и математической статистики.

Погрешности результатов измерения радиоактивных препаратов (образцов) обусловлены двумя причинами:

- статистическим характером радиоактивного распада;
- случайными погрешностями, которые вызваны неконтролируемыми изменениями факторов, влияющих на результаты измерений.

В зависимости от организации эксперимента и процедуры измерений случайные погрешности можно связать с теми или иными конкретными причинами. Например, если проводят несколько измерений активности одного и того же препарата, не изменяя его положения, то источниками случайных погрешностей могут быть колебания подаваемого на детектор напряжения и (или) величины фона.

Если при измерениях поворачивают препарат на некоторый случайный угол, используя цилиндрический или торцовый счетчик со щелевой диафрагмой, то кроме названных причин на возникновение случайных погрешностей могут влиять неравномерность распределения радиоактивного вещества по поверхности препарата и (или) недостаточно четкая фиксация препарата в кассете для образцов.

Когда измеряют активность серии препаратов, приготовленных из одинаковых объемов радиоактивного раствора, то помимо колебаний стабилизированного напряжения и фона, неоднородности препаратов и смещения их относительно счетчика на флуктуации результатов, возможно, будут влиять и факторы, связанные с методикой приготовления препаратов (точность определения объемов, неполнота осаждения и т. д.).

Этот перечень можно продолжить и дальше — случайные погрешности возникают на любой стадии эксперимента. Но каковы бы ни бы-

ли случайные погрешности, искажающие результат отдельного измерения, в каждый результат вносится погрешность, обусловленная статистическим характером радиоактивного распада.

Конечно, говорить о погрешностях, связанных со статистическим характером радиоактивного распада, можно лишь условно. Это не погрешности в обычном понимании. Поскольку появление случайных погрешностей вызвано неконтролируемыми изменениями тех или иных факторов, то, стабилизируя их, можно добиться снижения погрешностей до уровня, когда ими можно практически пренебречь. Ликвидировать флуктуации результатов, обусловленные колебаниями числа распадающихся атомов, принципиально невозможно, так как причина этих колебаний заключена в вероятностной природе радиоактивного распада. Если в первом случае речь действительно идет о случайных погрешностях измерений, то в другом — о случайных колебаниях (флуктуациях) самой измеряемой величины. В дальнейшем мы будем пользоваться термином «погрешность, обусловленная статистическим характером распада».

Необходимо отметить, что число импульсов n , регистрируемых детектором за время t , подчиняется закону Пуассона. Это говорит о том, что если несколько раз подряд измерять активности долгоживущего изотопа, то результаты получатся неодинаковыми, то есть будут отклоняться в ту или другую сторону, группируясь вокруг некоторого среднего значения. По полученным данным можно построить график, это хорошо известная кривая распределения Пуассона.

Нельзя знать истинное значение результата данной счетной операции. Можно определить лишь среднее значение \bar{N} измеренной скорости счета, которое будет являться лучшей оценкой истинного значения ее при условии, что проведено большое число определений (не менее 10).

Существует несколько основных способов определения погрешности измерения:

1. Определение средней квадратичной ошибки результата измерений по способу наименьших квадратов;
2. Определение стандартного отклонения на основании закона распределения Пуассона;
3. Определение относительной ошибки измерения, выраженной в процентах;
4. Определение вероятной погрешности результата измерения;

5. Определение вероятной погрешности результата измерения при использовании уравнения Пуассона.

Каждый из способов определения погрешности имеет свои преимущества и недостатки. Рассмотрим указанные способы определения погрешности измерений.

Ниже приведены формулы с пояснениями для расчетов основных характеристик погрешностей радиометрических измерений.

Измеряя активность некоторого препарата за один и тот же промежуток времени t , мы получили ряд значений скорости счета $N_1, N_2, N_3, N_4, N_5, \dots, N_n$. За наиболее достоверное значение непосредственно измеряемой величины необходимо принять среднее **арифметическое** из всех полученных n значений:

$$\bar{N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i = \frac{N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + \dots + N_n}{n}.$$

Разность между значением среднего арифметического \bar{N} измеряемой величины и значениями, полученными при отдельных измерениях, называют **абсолютным и ошибками отдельных измерений**:

$$\Delta N_1 = N_1 - \bar{N}; \Delta N_2 = N_2 - \bar{N}; \dots; \Delta N_n = N_n - \bar{N};$$

Они могут быть как положительными, так и отрицательными. Абсолютная погрешность показывает, на сколько отклоняется измеренное значение от среднего арифметического.

Средней абсолютной ошибкой результата называется среднее арифметическое абсолютных значений ошибок всех измерений независимо от их знака:

$$\Delta N = \frac{|\Delta N_1| + |\Delta N_2| + |\Delta N_3| + \dots + |\Delta N_n|}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta N_i|.$$

Результат измерения величины N можно представить в виде:

$$N = \bar{N} \pm \Delta N.$$

Это указывает на то, что значение измеряемой величины колеблется в пределах: от $\bar{N} - \Delta N$ до $\bar{N} + \Delta N$. При записи такого результата необходимо соблюдать следующие правила:

1. Величину погрешности ΔN необходимо округлить до двух значащих цифр, если первая из них единица, и до одной значащей цифры во всех остальных случаях;

2. При записи значения \overline{N} необходимо указывать все цифры вплоть до последнего десятичного разряда, использованного для записи погрешности.

Средней относительной ошибкой E результата измерения называют отношение средней абсолютной ошибки результата ΔN к его среднему значению \overline{N} , что определяется формулой:

$$E = \frac{\Delta N}{\overline{N}}. \quad (5)$$

Относительные ошибки принято выражать в процентах:

$$E = \frac{\Delta N}{\overline{N}} \cdot 100\%. \quad (6)$$

Отношение абсолютных ошибок отдельных измерений к соответствующим значениям, полученным в результате измерения, называют **относительными ошибками отдельных измерений**:

$$\frac{\Delta N_1}{N_1}, \frac{\Delta N_2}{N_2}, \frac{\Delta N_3}{N_3}, \dots, \frac{\Delta N_n}{N_n}.$$

При статистической обработке материала, следует отметить следующее: среднее арифметическое всегда определяет собой основное и наиболее вероятное значение измеряемой величины, а степень достоверности полученных данных определяется значением ошибок измерения.

Величина квадратичного отклонения, приходящаяся на одно измерение, называется **дисперсией** и определяется по формуле

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta N_i^2}{n}, \quad (7)$$

откуда величина среднего квадратичного отклонения

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta N^2_1}{n}}. \quad (8)$$

Если число измерений n меньше 30 ($n < 30$), то

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta N^2_1}{n-1}}. \quad (9)$$

Значение σ часто называют **средней квадратичной ошибкой отдельного измерения** или **стандартным отклонением**.

Средней квадратичной ошибкой результата по теории вероятностей называется стандартное отклонение, деленное на корень квадратный из числа наблюдений:

$$m = \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (10)$$

или

$$m = \pm \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta N_i^2}{n}}}{\sqrt{n}} = \pm \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta N_i^2}. \quad (11)$$

Если $n < 30$, то

$$m = \pm \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta N_i^2}{n-1}}}{\sqrt{n}} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta N_i^2}{n(n-1)}}. \quad (12)$$

Таким образом, истинное значение измеряемой величины

$$N = \bar{N} \pm m$$

или
$$N = \bar{N} \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n}} . \quad (13)$$

Совершенно естественно, что истинная скорость счета образца равна скорости счета образца+фон (N) минус скорость счета фона (N_ϕ), которые соответственно равны:

$$\bar{N} \pm m \text{ и } \bar{N}_\phi \pm m_\phi .$$

Что касается ошибки результата при определении собственной скорости счета образца, то в ней должны быть учтены и средняя квадратичная ошибка результата, полученная при измерении скорости счета образца+фон, то есть m , и средняя квадратичная ошибка результата, полученная при измерении скорости счета фона, то есть m_ϕ .

Согласно теории вероятностей, средняя квадратичная ошибка равна корню квадратному из суммы квадратов отдельных ошибок, то есть:

$$m_o = \pm \sqrt{m^2 + m_\phi^2} . \quad (14)$$

Тогда собственная скорость счета образца будет равна:

$$N_o = N - N_\phi = \bar{N} - \bar{N}_\phi \pm \sqrt{m^2 + m_\phi^2} . \quad (15)$$

Иногда при статистической обработке результатов измерений используют вероятную ошибку наблюдений и вероятную ошибку результата.

Все ошибки наблюдения (измерения) заключаются между наибольшими по абсолютной величине положительными и отрицательными значениями абсолютных ошибок Δa_i , причем большие случайные ошибки в ту или другую сторону реже встречаются и менее вероятны, чем малые. Поэтому есть основание сузить пределы погрешностей, определяемых по формулам для квадратичной ошибки отдельно измерения σ и средней квадратичной ошибки результата m .

Для этого вводят некоторый коэффициент, меньший 1 и равный по теории вероятностей 0,67 (точнее, 0,6745). Таким образом, вероятная ошибка отдельного наблюдения f (от французского *faute* – ошибка)

будет равна: $f = \pm 0,67\sigma = \pm 0,67\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta N_i^2}{n-1}}$, если $n < 30$, (16)

и

$$f = \pm 0,67\sigma = \pm 0,67\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta N_i^2}{n}}, \text{ если } n \geq 30. \quad (17)$$

Вероятная ошибка F будет:

$$F = \pm 0,67 \cdot m = \pm 0,67\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta N_i^2}{n(n-1)}}, \text{ если } n < 30, \quad (18)$$

$$F = \pm 0,67 \cdot m = \pm 0,67 \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta N_i^2}, \text{ если } n \geq 30, \quad (19)$$

Таким образом, для окончательного значения измеряемой величины A можно написать:

$$N = \bar{N} \pm 0,67m \quad \text{или} \quad N = \bar{N} \pm 0,67 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (20)$$

где \bar{N} — среднее арифметическое, которое определяет собой наиболее вероятное значение измеряемой величины; $\pm 0,67 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ — величина вероятной ошибки результата измерений.

Задание 1. Определение скорости счета данного радиоактивного образца и расчет средней квадратичной ошибки результата измерения.

Приборы и материалы:

1. Радиометр ПП-8 или КРВП-3АБ;
2. Стронциево-иттриевые источники различной активности;

Последовательность выполнения работы:

1. Включите и подготовьте радиометр к работе;

2. Проверьте правильность работы пересчетного блока;
 3. Измерьте фон счетчика, проведя 15 измерений по 1 минуте.
 Результаты измерений занесите в табл. 6;

4. Найдите сумму результатов измерений $\sum_{i=1}^{15} N_i$ и занесите в табл. 6;

Таблица 6. Результаты измерений скорости счета фона

Индекс измерения i	Результат измерения a_i , имп/мин	Абсолютная ошибка измерения $\Delta N_i = N_i - \bar{N}$ имп/мин	Квадрат отклонения ΔN_i^2
1			
2			
...			
15			

$$n=15 \quad \sum_{i=1}^{15} N_i = \quad \sum_{i=1}^{15} \Delta N_i^2 =$$

5. Измерьте скорость счета предлагаемого радиоактивного источника, проведя 15 измерений по 1 минуте. Результаты измерений занесите в табл. 7;

6. Найдите сумму результатов измерений $\sum_{i=1}^{15} N_i$ и занесите ее в табл. 7;

7. Проведите обработку результатов измерений в следующем порядке:

Таблица 7. Результаты измерений скорости счета образца+фон

Индекс измерения i	Результат измерения N_i , имп/мин	Абсолютная ошибка измерения $\Delta N_i = N_i - \bar{N}$, имп/мин	Квадрат отклонения ΔN_i^2
1			
2			
...			
15			

$$N = 15 \quad \sum_{i=1}^{15} N_i = \quad \sum_{i=1}^{15} \Delta N_i^2 =$$

7. Проведите обработку результатов измерений в следующем порядке:

а) определите среднее арифметическое для фона $\overline{N_\phi}$.

б) определите абсолютные ошибки отдельных измерений ΔN_ϕ , полученные значения занесите в третью колонку табл. 6 (табл. 7 для образца+фон);

в) определите значения квадратов отклонений $\Delta N_{i\phi}^2$ и занесите в четвертую колонку табл. 6 (или табл. 7);

г) найдите сумму квадратов отклонений $\sum_{i=1}^{15} \Delta N_{i\phi}^2$ и занесите в табл. 6 (или табл. 7);

д) определите значение средней квадратичной ошибки отдельного отклонения σ_ϕ ;

е) рассчитайте $3\sigma_\phi$ и определите, все ли измеренные значения относятся к нашему ряду. Для этого сравните с $3\sigma_\phi$ отклонения ΔN_i всех измерений. Если $\Delta N_i \leq 3\sigma_\phi$, то значение относится к данному ряду и должно учитываться, когда $\Delta N_i > 3\sigma_\phi$ то значение не учитывается и действия пунктов а-е повторяются снова;

ж) определите среднюю квадратичную ошибку результата m_ϕ ;

з) запишите скорость счета измерения фона в виде $N_\phi = N_\phi \pm m_\phi$ имп/мин;

и) найдите относительную ошибку результата измерений E . Сделайте вывод о точности измерения;

8. Проведите расчеты, аналогичные пункту 7 для результатов измерений образца с учетом фона;

9. Найдите истинную скорость образца, для чего из значения скорости счета с учетом фона N необходимо вычесть значение скорости счета фона N_ϕ , то есть $N_o = N - N_\phi$. Учтите, что ответ должен быть записан в виде $N_o = (N - N_\phi) \pm m_o$;

10. Определите относительную ошибку E_o . Сделайте вывод о точности измерения.

Задание 2. Определение скорости счета данного радиоактивного образца при длительном измерении.

Последовательность выполнения работы:

1. Подготовьте радиометр к работе;
2. Проверьте правильность работы пересчетного блока;
3. Измерьте фон счетчика в течение 10 (или 15) минут;
4. Запишите число импульсов n_{ϕ} , зарегистрированных за данный промежуток времени t_{ϕ} ;
5. Рассчитайте скорость счета фона N_{ϕ} ;
6. Установите данный радиоактивный образец и измерьте скорость счета образца в течение 15 минут;
7. Запишите число импульсов n , зарегистрированных за данное время t ;
8. Рассчитайте скорость счета образца с учетом фона N ;
9. Найдите истинную скорость счета образца N_o по формуле (25), окончательный ответ запишите в виде $N_o = (N - N_{\phi}) \pm m_o$;
10. Определите относительную ошибку E в процентах и сделайте вывод о точности измерения. Если истинная скорость счета предложенного образца будет мало отличаться от скорости счета фона (образец малой активности), то необходимо рассчитать и вероятную ошибку F ;
11. Повторите пункты 3–9;
12. Определите вероятную ошибку F ;
13. Запишите истинную скорость счета образца N_o ;
14. Определите относительную ошибку E в процентах и сделайте вывод о точности измерения.

Задание 3. Измерение скорости счета при определении активности данного радиоактивного образца с заданной статистической точностью.

Последовательность выполнения работы:

1. Подготовьте радиометр к работе;
2. Проверьте правильность работы пересчетного блока;
3. Измерьте фон счетчика в течение двух минут;
4. Запишите число импульсов n_{ϕ} , зарегистрированных за данное время t_{ϕ} ;
5. Определите скорость счета фона ($N_{\phi} = n_{\phi}/t_{\phi}$);
6. Измерьте в течение двух минут количество импульсов (n) от предложенного радиоактивного источника;

7. Запишите число импульсов n , зарегистрированных за данное время t ;
8. Определите скорость счета источника по формуле $N=n/t$;
9. Определите коэффициент K по формуле

$$K = \frac{n}{t} : \frac{n_{\phi}}{t_{\phi}};$$

10. Зная K и заданную точность измерения (задается преподавателем), по таблице Бэлла (приложение 3) определите число импульсов n_{ϕ} и n , которое необходимо зарегистрировать, чтобы обеспечить заданную точность измерения;

11. Определите необходимое время измерения фона и радиоактивного источника. Для этого необходимо число импульсов, полученных по таблице Бэлла, разделить на соответствующие скорости счета фона и радиоактивного источника;

12. Произведите измерения скорости счета фона и радиоактивного источника за рассчитанные промежутки времени. Данные запишите.

13. Обработайте полученные результаты в следующем порядке:

- а) рассчитайте скорость счета фона N_{ϕ} ;
- б) рассчитайте скорость счета предложенного радиоактивного источника N ;
- в) найдите истинную скорость счета данного источника N_o . Окончательный ответ запишите в виде $N_o = (N - N_{\phi}) \pm m_o$;

14. Определите относительную ошибку измерения E в процентах;

15. Сравните полученную относительную ошибку с заданной и сделайте вывод о достижении заданной точности измерения.

Задание 4. Проверка правильности работы радиометра.

Последовательность выполнения работы:

1. Подготовьте радиометр к работе;
2. Проверьте правильность работы пересчетного блока;
3. Установите радиоактивный источник с таким расчетом, чтобы скорость счета составляла около 500 имп/мин (выбрать позицию);
4. Произведите 10 измерений числа импульсов по 0,5 минуте и занесите показания в табл. 8;

Таблица 8. Результаты измерений

Индекс измерения i	Число зарегистрированных импульсов (n)	Скорость счета (N_i)	Среднее арифметическое скорости счета \bar{N} , имп/мин	Абсолютная ошибка измерения $\Delta N_i = N_i - \bar{N}$, имп/мин	Квадрат отклонения ΔN_i^2
1	2	3	4	5	6
2					
...					
10					

$$n = 10 \qquad \sum_{i=1}^{10} N_i \qquad \sum_{i=1}^{10} \Delta N_i^2$$

= \qquad \qquad \qquad =

5. Обработайте результаты измерений в следующем порядке:

а) определите скорость счета $N_i = n_i/t_i$ и запишите в третью

колонку табл. 8. Найдите сумму $\sum_{i=1}^{10} N_i$ и занесите в ту же колонку;

б) определите среднее арифметическое \bar{N} по формуле (1) и занесите в четвертую колонку табл. 8;

в) определите абсолютные ошибки отдельных измерений ΔN_i , полученные значения занесите в пятую колонку табл. 8;

г) определите значения квадратов отклонений ΔN_i^2 и занесите в шестую колонку табл. 8. Найдите сумму квадратов отклонений $\sum_{i=1}^{10} N_i^2$ и тоже занесите в ту же колонку;

д) определите среднюю квадратичную ошибку отдельного измерения σ ;

е) проверьте, все ли измеренные значения принадлежат к данному ряду;

ж) определите квадратичную ошибку результата m ;

з) определите относительную квадратичную ошибку результата измерений E_m по формуле

$$E_m = \frac{m}{N} \cdot 100\%;$$

- и) определите статистическую ошибку средней скорости счета $D_{\bar{N}}$;
- к) определите относительную статистическую ошибку результата;
6. Сравните полученные величины E_m и $\sigma_{\bar{N}}$ и сделайте вывод о стабильности работы аппаратуры;
7. Проведите 10 измерений числа импульсов по 3 минуты и занесите показания в таблицу, аналогичную табл. 8;
8. Произведите обработку результатов согласно пункту 5;
9. Повторите пункт 6;
10. Сравните значения относительных ошибок измерений $\sigma_{\bar{N}}$, рассчитанных при первом и втором измерениях. Объясните, почему с увеличением времени отдельного измерения $\sigma_{\bar{N}}$ уменьшается.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается статистический характер закона радиоактивного распада?
2. Дайте определение погрешности (ошибки) измерений.
3. Назовите типы погрешностей измерений.
4. Приведите примеры грубых ошибок.
5. Что называется систематической ошибкой измерений?
7. Как возникают методические и инструментальные погрешности измерений?
8. Как устранить методические погрешности измерений?
9. Как устранить инструментальные погрешности измерений?
10. Что называется случайными ошибками измерений?
11. Чем определяется возникновение погрешностей или ошибок измерений при регистрации активности радиоактивных образцов?
12. Как рассчитывается среднее арифметическое?
13. Что называют абсолютной ошибкой отдельного измерения?
14. Что показывает абсолютная ошибка отдельного измерения?
15. Что называется средней абсолютной ошибкой результата измерений?
16. Как рассчитать среднюю абсолютную ошибку результата измерений?
17. Что называется средней относительной ошибкой результата измерений?

18. Что определяет наиболее вероятное значение измеряемой величины: среднее арифметическое или погрешность измерения?
19. Дайте определение дисперсии.
20. Как определить среднее квадратичное отклонение?
21. Что называется средней квадратичной ошибкой результата измерений? Чем она отличается от средней квадратичной ошибки отдельного измерения?
22. Как правильно записать истинное значение измеряемой величины?
23. Начертите и объясните кривую распределения Гаусса.
24. Почему измеренные значения, которые превышают 3σ необходимо исключать при обработке результатов?
25. Для чего вводят вероятную ошибку результата измерений?
26. Что называется стандартным отклонением?
27. В каком случае определяют среднюю квадратичную ошибку результата измерений?
28. В каком случае определяют стандартное отклонение?
29. В каком случае вычисляют вероятную ошибку измерения?
30. Как, используя таблицу Бэлла и учитывая заданную точность измерения, выбрать необходимое время измерения?
31. Почему при увеличении времени измерения, если регистрирующая аппаратура работает исправно, точность измерения улучшается?
32. Зависит ли точность измерения от активности радиоактивного образца?
33. Какие погрешности измерения учитываются при радиометрических анализах? Ответ поясните.

Лабораторная работа №4. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ ГАЗОРАЗРЯДНОГО СЧЕТЧИКА ГЕЙГЕРА

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

Счетчики Гейгера-Мюллера – это газоразрядные детекторы частиц, предназначенные для регистрации различных видов ионизирующего излучения. Их действие основано на возникновении в счетчике самостоятельного газового разряда при попадании заряженной частицы в его рабочий объем. Самостоятельным газовым разрядом называют электрический разряд в газе, сохраняющийся после прекращения дей-

ствия внешнего ионизатора, несамостоятельным – существующий только под действием внешнего источника ионизации. Промышленно выпускается два вида счетчиков Гейгера – цилиндрические и торцовые.

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

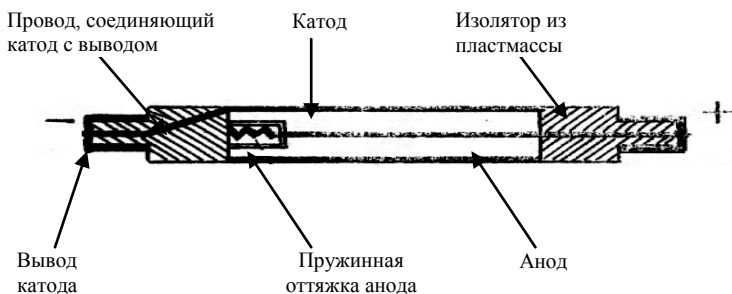


Рис.27. Цилиндрический счетчик Гейгера–Мюллера.

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

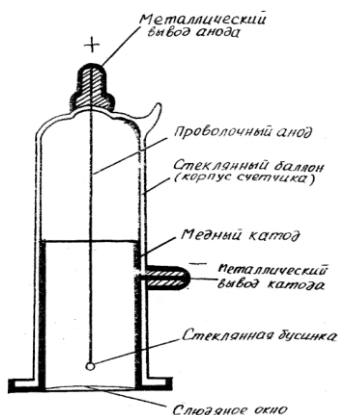


Рис.28. Торцовый счетчик Гейгера–Мюллера.

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

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

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

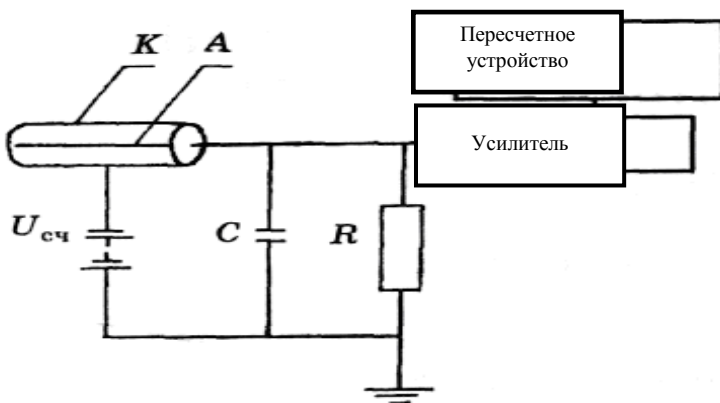


Рис.29. Электрическая схема включения счетчика Гейгера-Мюллера. К-катод; А-анод; R-резистор нагрузки счетчика; C- входная емкость усилителя; $U_{сч}$ - источник питания счетчика.

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

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

Таким образом, попадание в счетчик ионизирующей частицы (электрона, позитрона, альфа-частицы, гамма-кванта, нейтрона и т.д.) с энергией, достаточной для образования хотя бы одной электронно-

ионной пары, способно вызвать появление целой лавины электронов и положительных ионов.

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

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

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

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

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

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

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

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

Длительность самостоятельного газового разряда в несамогасящемся счетчике $\sim 10^{-6}$ с. После его гашения положительные ионы дрейфуют к катоду и нейтрализуются на нем. В течение $\tau \approx 10^{-2}$ с (τ – время разрядки емкости C счетчика через сопротивление R) напряжение на счетчике восстанавливается. Время восстановления напряжения называют "мертвым временем" счетчика. Все это время счетчик оказывается практически неработоспособным, нечувствительным к проходящим через его объем ионизирующим частицам. Счетчик с «мертвым временем» $\tau \approx 10^{-2}$ с способен за секунду среагировать примерно на 100 частиц.

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

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

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

электронов и таким образом устраняет условия для образования новых электронно-ионных лавин.

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

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

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

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

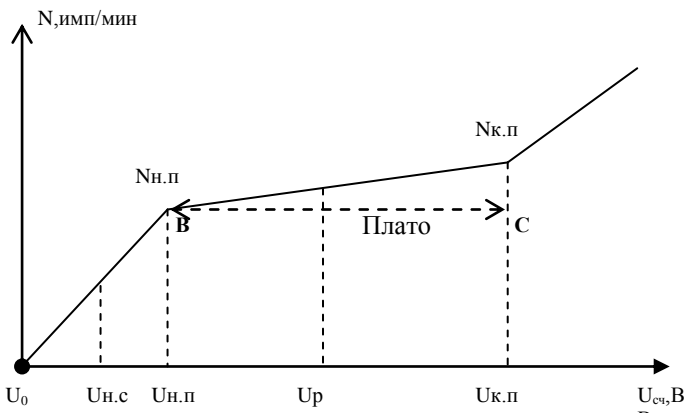


Рис.30. Счетная характеристика счетчика Гейгера–Мюллера. $U_{н.с}$ –напряжение начала счета; $U_{н.п}$ –напряжение начала плато; $U_{к.п}$ –напряжение конца плато; $U_{р}$ –рабочее напряжение счетчика.

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

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

Участок **BC** (рис.30) счетной характеристики, соответствующий этой области, называется плато и представляет собой ее рабочую часть. Протяженность плато у счетчиков не менее 100 В. Скорость счета импульсов в его пределах изменяется не более чем на 3–5%. У некоторых счетчиков плато имеет незначительный наклон. Наклон плато Δ принято выражать относительным приращением числа импульсов, приходящимся на каждые 100 вольт плато характеристики:

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

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

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

$U_{к.п}$ – напряжение конца плато;

$U_{н.п}$ – напряжение начала плато.

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

Амплитуда импульса от счетчика Гейгера - Мюллера может достигать нескольких десятков или даже сот вольт. С такими импульсами можно работать без всякого усиления. Дело в том, что амплитуда импульса в счетчике Гейгера-Мюллера определяется только свойствами

самого счетчика и параметрами электрической цепи и совершенно не зависит ни от вида, ни от энергии первичной частицы.

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

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

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

$$l = U_{к.п} - U_{н.п}.$$

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

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

Рабочее напряжение U_p рассчитывается по следующим формулам:

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

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

Изготовление счетчиков. В качестве материала для цилиндра счетчика (катода) может быть использован любой металл. Но, как оказалось, не все металлы для этой цели одинаково пригодны. Прежде всего они различаются склонностью вызывать послеразряды, в этом отношении важна высокая работа выхода материала катода. С этой точки зрения катоды из щелочных металлов можно применять лишь в осо-

бых случаях. Наиболее часто используют катоды из меди, реже из магния, серебра или алюминия.

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

Если нужно изготовить катоды с особенно высокой работой выхода, рекомендуется обработать медный катод таким образом, чтобы на его поверхности образовался равномерный слой окиси. Этого можно добиться, если тщательно очищенную предварительно медную трубку погрузить на несколько секунд в хромовую смесь (250 г хромовой кислоты и 75 см³ концентрированной серной кислоты на 1 л). Поверхность трубки покрывается матово-красным слоем Cu_2O . После этого ее тщательно промывают дистиллированной водой и чистым спиртом. Медную поверхность можно также окислить до CuO , если трубку нагревать в потоке окиси азота до тех пор, пока на ней не образуется темный слой окиси.

Алюминиевые катоды. В ряде случаев с алюминиевыми поверхностями были получены плохие результаты. Причину этого следует искать в том, что поверхность алюминия, так же как и магния, быстро окисляется. Слои окиси алюминия и магния благоприятствуют возникновению послеразрядов. Из алюминия очень легко изготавливать трубки. Поскольку простая полировка алюминиевой поверхности не обеспечивает надежной работы счетчика, ее полезно омеднить или посеребрить электролитически или вакуумным напылением. На хорошем токарном станке можно изготовить алюминиевые трубки с толщиной стенки 0,1 мм при диаметре от 10 до 20 мм. Для механической прочности полезно оставить ребра жесткости шириной 1–2 мм.

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

серебряных катодов, но они также могут приводить к послеразрядным эффектам.

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

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

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

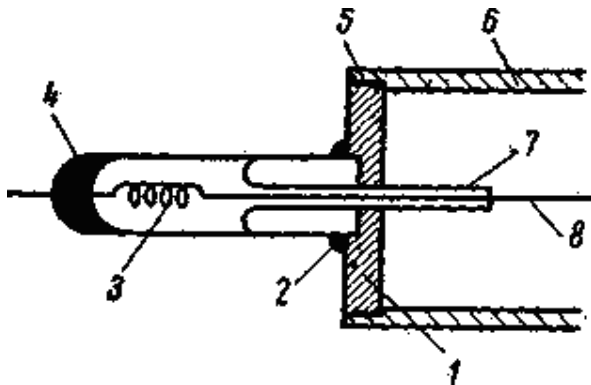


Рис. 31. Ввод счетчика: 1—металлическая шайба; 2 — уплотнение; 3 — пружина для натягивания нити; 4—спай стекла с металлом; 5—место пайки; 6— металлическая трубка (медная); 7 — тонкая стеклянная трубка; 8—нить счетчика.

В счетчиках, которые должны работать при малых напряжениях или при высоких давлениях, можно применять еще более тонкую проволоку. При использовании нитей большего диаметра, например 0,3

мм, получается неблагоприятная форма поля вблизи нити. Перед наполнением счетчика вольфрамовую нить рекомендуется прогреть до бледно-красного цвета. Вместо вольфрамовой проволоки можно применять проволоку из стали, никеля или других подобных материалов.

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

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

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

Алюминиевая фольга толщиной 10 мк (приблизительно 3 мг/см²) достаточно устойчива, чтобы выдержать при диаметре 6—8 мм перепад давлений в 1 атм. Пластины слюды толщиной 2—3 мг/см² выдерживают разность давлений, близкую к 1 атм, при поверхности 1 см² или несколько большей, если края тщательно укреплены. В качестве клея рекомендуется аралдит и некоторые другие вещества, а также селен. Слюда легко заряжается электрически, что приводит к искажениям поля. Поэтому слюдяные пластины делают проводящими, напыляя на них слой металла или покрывая их графитом. Изготавливаются также специальные еще более тонкие окна, например из коллодиевых, нейлоновых или пластикатовых пленок

Подготовка счетчика к наполнению. Перед наполнением очень важно откачать счетчик до высокого вакуума. Необходимо также обезгазить стеклянные и металлические детали прогревом в вакууме. Особенно большое значение это имеет в счетчиках с чисто газовым напол-

нением. В обычных случаях достаточно откачивающая установка с механическим насосом или ртутный диффузионный насос с ловушкой.

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

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

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

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

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

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

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

Иногда водород под высоким давлением используют в пропорциональных счетчиках. Водород особенно удобен для регистрации быст-

рых нейтронов, которые при упругих соударениях передают энергию его ядрам. При этом чаще всего работают с малыми коэффициентами газового усиления (от 5 до 50, в зависимости от давления газа).

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

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

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

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

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

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

Аммиачные счетчики. Они также обладают неплохими характеристиками в пропорциональной и гейгеровской областях. Счетная область этих счетчиков сравнительно невелика, так как в аммиаке легко возникают отрицательные ионы. После 10^7 — 10^8 импульсов аммиачные счетчики становятся светочувствительными. Срок службы их довольно

велик, так как продукты диссоциации частично вновь соединяются в исходные молекулы. Постепенно образуются также азот и водород.

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

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

СО₂-счетчики. Трехатомные газы лишь в редких случаях обладают самогасящими свойствами. Применение углекислого газа представляет особый интерес ввиду того, что появляется возможность измерять C^{14} непосредственно в газовом наполнении и прежде всего при давлении в несколько атмосфер. Однако при соударениях ионов углекислого газа с металлической поверхностью катода возникают отрицательные ионы. Вследствие этого выгоднее использовать графитовые катоды. Этот эффект можно подавить также добавкой примесей пара (чаще всего CS₂). При небольших добавках CS₂ следует всегда применять гасящую схему. При 10—20% CS₂ счетная область может достигать 100—200 в. Подобные счетчики при атмосферном давлении можно также использовать в гейгеровской области. Напряжение счета лежит тогда в пределах 4500—5000 в.

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

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

При наполнении смесью ксенона, аргона, кислорода и азота с определенным соотношением компонент получают самогасящиеся счетчики, которые из-за отсутствия паров имеют очень большой срок службы. При этом необходимо точно выдерживать состав смеси, иначе могут возникнуть многочисленные послеразряды. В оптимальных условиях отдельные импульсы имеют практически одинаковую величину. При нормальном напряжении счета давление газа может быть близко к атмосферному. Хорошие результаты получаются, например, со смесью 15 мм рт. ст. Xe + 15 мм рт. ст. N₂ + 1 мм рт. ст. O₂ + 700 мм. рт. ст. Ar.

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

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

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

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

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

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

Если известно мертвое время детектора, определяющее временное разрешение всей установки, то исходя из каждой измеренной скорости счета. N можно вычислить истинную скорость счета N_0 , то есть число частиц, попавших за единичный интервал времени в чувствительный объем детектора, и таким образом ввести в результаты измерений поправку на просчеты.

Мертвое время счетчика Гейгера. Мертвым временем детектора t_M называется время полной нечувствительности после регистрации отдельной частицы, в течение которого детектор не может реагировать на появление внутри его объема новых частиц. Мертвое время отражает длительность процессов, происходящих в детекторе при одном акте регистрации. В пределах, мертвого времени детектор не способен к нормальной реакции на появление в рабочем объеме новой частицы. Другими словами, под t_M понимается то время, в течение которого в счетчике вообще невозможна вспышка самостоятельного разряда.

Вспомним принцип действия газоразрядного счетчика. При прохождении через счетчик заряженной частицы или попадании гамма-кванта между электродами (катодом и анодом) за счет ионизации возникают электроны и положительно заряженные ионы. Под действием высокой напряженности электрического поля электроны ускоряются, приобретая большую энергию, и производят вторичную ионизацию. Возникающие при этом вторичные электроны в свою очередь ионизируют новые атомы и т.д., в результате чего число электронов и ионов увеличивается лавинообразно. Электронная лавина, состоящая из электронов, обладающих малой массой, быстро движется к анодной

нити, достигает ее и разряжается за время 10^{-6} - 10^{-8} с. За это время положительные ионы, обладающие сравнительно большой массой, не успевают заметно переместиться к катоду. К моменту, когда электроны будут уже собраны, облако положительных ионов или пространственный положительный заряд будет еще близок к центральной нити (аноду). Этот пространственный заряд образует вокруг анода "чехол", который уменьшает напряженность электрического поля вблизи анода и тормозит образование повторной лавинной ионизации. На этом заканчивается активная стадия разряда в счетчике.

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

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

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

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

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

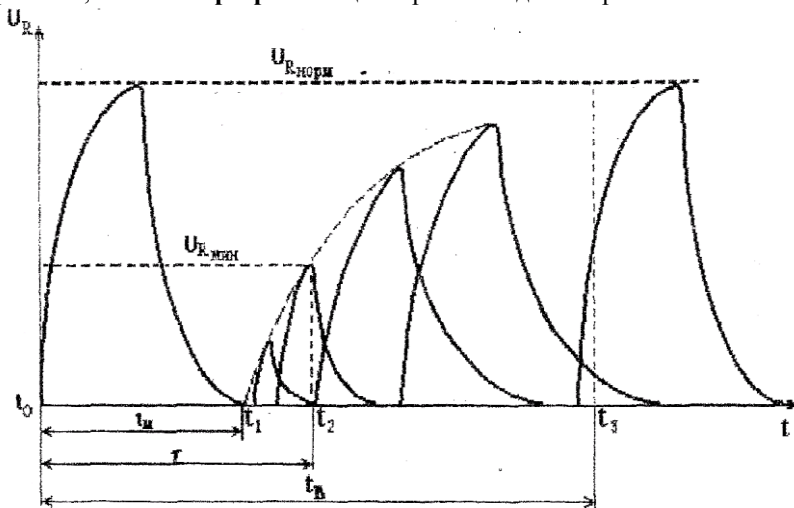


Рис.32. Осциллограмма изменения величины импульса напряжения в зависимости от момента его появления.

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

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

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

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

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

Поправка на мертвое время. Рассмотрим, как вводится поправка на мертвое время, если оно известно. Пусть N_0 – среднее число частиц, попавших в счетчик за 1 минуту, то есть «истинная» скорость счета; N_p – число частиц, зарегистрированных за минуту счетной установ-

кой; t_M - мертвое время счетчика (в минутах), которое принимается постоянным.

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

$$N_0 = N_p + N = N_p + N_0 \cdot N_p \cdot t_M.$$

Отсюда истинная скорость счета:

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

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

Из формулы следует, что относительное число просчетов будет равно:

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

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

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

где, e – основание натурального логарифма.

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

величина (1-1,5%), как правило, не превосходит статистической ошибки измерения скорости счета.

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

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

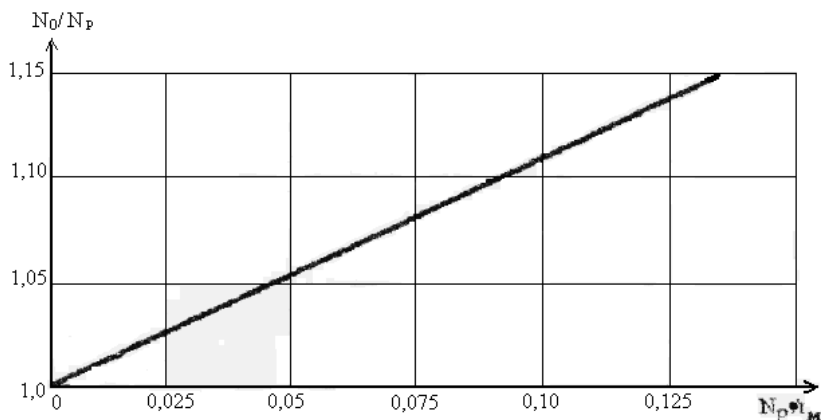


Рис. 33. Поправка на мертвое время

После измерений строят график, откладывая по оси абсцисс сумму скоростей счета отдельных источников N_0 , например $(N_1+N_2+N_3)$, а по

оси ординат – соответствующую скорость счета N этих же препаратов, измеренных вместе, то есть N_{123} (рис. 34).

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

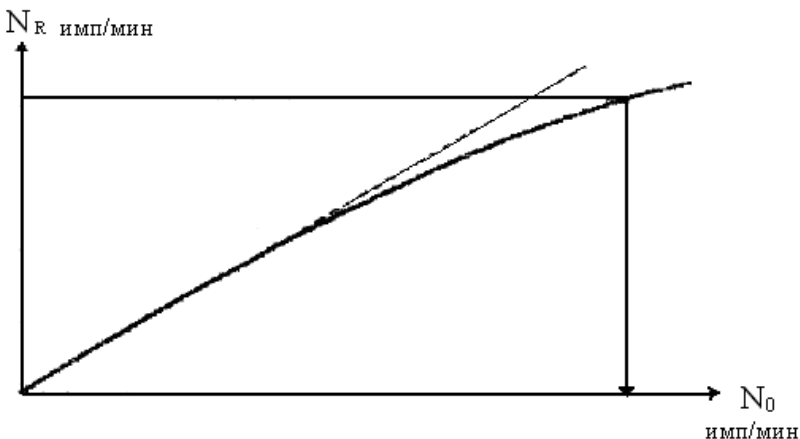


Рис. 34. Определение истинной скорости счета N_0 опытным путем.

Место падения перпендикуляра соответствует истинной скорости счета N_0 .

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

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

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

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

Вероятность регистрации может быть нормирована по-разному:

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

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

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

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

Светосила L – это отношение числа зарегистрированных сигналов к числу частиц, испущенных источником. Светосила, как это следует из определения, существенно зависит от взаимного расположения детектора и источника излучений, поэтому светосила скорее характеризует измерительное устройство в целом, чем сам детектор. В дальней-

шем, говоря о светосиле, будем всегда иметь в виду светосилу измерительного устройства.

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

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

Для развития разряда в счетчике достаточно образования одной пары ионов. Если частица создает в среднем n_0 пар ионов, то вероятность не создать ни одной пары ионов в счетчике равна (по закону Пуассона) e^{-n_0} , и, следовательно, эффективность регистрации заряженных частиц в самогасящемся счетчике $\epsilon_d = (1 - e^{-n_0})$. Для регистрации заряженных частиц счетчики должны иметь или тонкие стенки, или специальные тонкостенные окна, чтобы заряженные частицы могли проникать внутрь счетчика. Так, для регистрации α -частиц радиоактивного распада толщина окна счетчика не должна превышать 2-4 мг/см². Для регистрации β -частиц можно использовать счетчики с более толстыми стенками. Так, в счетчик с толщиной окна 30 мг/см² проникает около 70% β -частиц, образующихся при распаде ³²P, и только 0,03% β -частиц, образующихся при распаде ¹⁴C.

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

Очевидно, подавляющее число электронов рождается в стенках счетчика. В зависимости от толщины катода счетчика и энергии γ -

кванта будет меняться число электронов, попадающих в чувствительный объем счетчика. Чем толще катод и чем ниже энергия γ -кванта, тем меньше электронов попадет в счетчик. Точное вычисление эффективности счетчика к γ -квантам представляет сложную задачу.

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

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

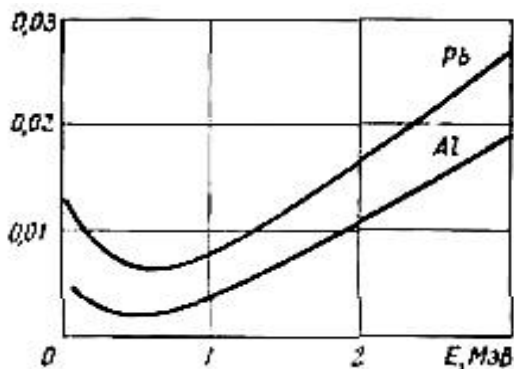


Рис.35. Зависимость эффективности регистрации γ -квантов от их энергии.

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

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

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

Можно оценить эффективность регистрации частиц с минимальной ионизирующей способностью, исходя из следующих соображений. Частица, проходя в газе, наполняющем счетчик, путь « l », образует в среднем v_0pl пар ионов, где v_0 — первичная удельная ионизация. Нетрудно рассчитать вероятность того, что при среднем числе пар ионов v_0pl частица не образует в счетчике ни одной пары ионов. С этой целью представим себе, что весь путь « l » разбит на большое число малых интервалов Δl . Тогда вероятность того, что частица образует пару ионов на малом пути Δl , будет равна произведению $v_0p\Delta l$ (интервал « Δl » выбирается настолько малым, чтобы вероятностью образования на пути « Δl » двух пар ионов можно было пренебречь); вероятность же того, что на пути « Δl » не будет образовано ни одной пары ионов, будет равна разности $(1 - v_0p\Delta l)$.

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

Таблица 9. Значения первичной удельной ионизации газов

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

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

Поскольку эффективность регистрации зависит от длины пути, проходимого частицей в счетчике, точный расчет эффективности « η » потребовал бы учета углового распределения регистрируемых частиц.

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

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

Отсюда следует, что схема совпадений должна иметь некоторое конечное время разрешения, которое хотя и не связано, в принципе, с

временем разрешения используемых детекторов, не может быть сделано сколь угодно малым: при попытке свести время разрешения схемы совпадений к величине, меньшей времени возможного запаздывания импульсов, эффективность регистрации совпадений может стать существенно меньше 100 % и даже упасть до нуля.

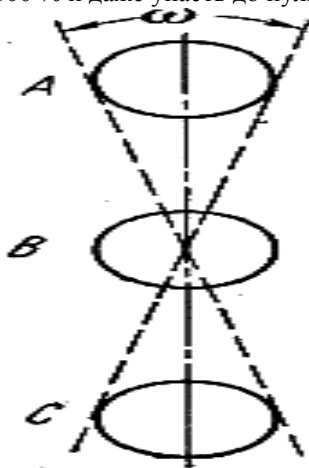


Рис.36. К понятию эффективности регистрации.

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

Опыт показывает, что эффективность регистрации релятивистских частиц счетчиками Гейгера средних размеров, наполненными таким газом, как аргон, до давления 100-200 мм рт.ст., действительно близка к 100%. При использовании одиночных счетчиков просчеты в несколько процентов обычно либо несущественны, либо учитываются с

той или иной степенью точности. При применении счетчиков Гейгера в схемах совпадений, особенно многократных, когда эффективность регистрации τ входит в расчеты в степени кратности совпадений, даже небольшие просчеты частиц в отдельных счетчиках могут заметно исказить результаты измерений. И наконец, совсем малые отклонения эффективности регистрации от 100% могут оказаться решающими при постановке эксперимента, в которых используется метод антисовпадений, когда с помощью специальной электронной схемы регистрируются импульсы от одного детектора (или нескольких детекторов, срабатывающих одновременно) при отсутствии в этот момент импульсов от другого детектора. В этом случае хотя и малая, но конечная вероятность, просчетов частиц в детекторе, включенном на антисовпадения, может имитировать факт отсутствия частицы в детекторе и привести тем самым к грубому искажению экспериментальных результатов.

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

Из газов, используемых при наполнении счетчиков, наибольшей способностью захватывать свободные электроны обладают галоиды, применяемые в галогенных счетчиках (Cl_2 , Br_2) в качестве гасящей примеси к основному газу (неону). Вероятность захвата электронов в галогенных счетчиках, однако, невелика ввиду малого парциального давления примеси. Возможность образования отрицательных ионов следует учесть и при наполнении счетчиков водородом или воздухом (в последнем случае из-за электроотрицательных свойств молекул O_2).

В счетчиках, наполненных инертными газами и смесью инертных газов с парами органических соединений, захват электронов молекулами газа практически не имеет места.

Эффективность для гамма-лучей. Как известно, если на поглотитель толщины x падает по нормали к его поверхности поток гамма-квантов интенсивности J_0 , то интенсивность потока, прошедшего через поглотитель (J), будет равна $J(x) = J_0 e^{-\mu x}$, где μ , – коэффициент поглощения, зависящий как от энергии гамма-квантов, так и от природы поглотителя. Толщину поглотителя x принято выражать в г /см², тогда коэффициент μ имеет размерность см² /г. Если толщина x выражена в см, μ выражают в см⁻¹. Таким образом, если счетчик Гейгера рассматривать как поглотитель толщины x , то эффективность регистрации гамма-квантов счетчиком не может превышать величины:

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

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

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

При переводе в линейные меры пробеги электронов средних энергий (~1 Мэв) измеряются, особенно в тяжелых металлах, долями мил-

лиметра. Поэтому и толщина стенок катода счетчика, выбираемая в соответствии с длинами пробега электронов, составляет обычно не более 0,5-1 мм. С другой стороны, коэффициент поглощения μ , в области средних энергий гамма-квантов также невелик и составляет 0,05—0,1 см²/г. Отсюда следует, что произведение ρx , определяющее относительное количество поглощаемых γ -квантов, всегда мало по сравнению с единицей. Для латунного счетчика, например, с толщиной стенки 0,5 мм ($x = 0,43$ г/см², что отвечает пробегу электронов с энергией около 1 Мэв) при энергии гамма-квантов $h\nu = 1$ Мэв ($\mu = 0,06$ см²/г) произведение μx составляет всего 0,025. В этом случае можно считать, что при прохождении потока гамма-лучей через счетчик интенсивность потока убывает в соответствии с выражением $J(x) = J_0(1 - \mu x)$. Тогда доля поглощенных гамма-квантов не превышает произведения μx . Последняя величина и определяет собой верхний предел для эффективности регистрации гамма-квантов счетчиком Гейгера: $\eta < \mu x$.

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

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

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

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

Задание: 1. Определение пригодности счетчика Гейгера к работе.

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

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

Выполнение работы.

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

8. Постепенно повышая напряжение каждый раз на 50 В, произвести 6 измерений. Результаты занести в таблицу 10, рассчитать скорость счета N .

Таблица 10. Результаты измерений.

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

9. Выключить установку.

10. По полученным результатам на миллиметровой бумаге построить счетную характеристику.

11. По счетной характеристике определить напряжение начала счета $U_{н.с.}$, напряжение начала плато $U_{н.п.}$ и напряжение конца плато $U_{к.п.}$.

12. По формулам, приведенным выше, рассчитать наклон и длину плато. Сделать вывод об исправности счетчика и пригодности к работе.

13. Определить рабочее напряжение U_p счетчика.

Контрольные вопросы

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

Задание 2. Определение мертвого времени счетчика Гейгера-Мюллера методом двух источников.

Для определения мертвого времени счетчика необходимо на некотором расстоянии от счетчика поместить источник бета- или гамма-

излучения и зарегистрировать скорость счета. Пусть скорость счета от этого источника и фона равна N_1 импульсов в минуту, Затем устанавливается второй источник излучения так, чтобы скорость счета N_{12} от двух источников вместе с фоном была примерно в два раза больше N_1 . После регистрации скорости счета от двух источников вместе первый источник убирается и регистрируется скорость счета от второго источника и фона N_2 . В результате просчетов получим, что $N_{12} < N_1 + N_2$, однако по условиям эксперимента $N_{12} = N_1 + N_2$. Используя предыдущую формулу, получим:

$$N_{01} = N_1 / (1 - N_1 \cdot t_M), \quad N_{02} = N_2 / (1 - N_2 \cdot t_M), \quad N_{012} = N_{12} / (1 - N_{12} \cdot t_M),$$
где N_{01} - истинное число частиц, попадающих в счетчик за 1 минуту от 1-го источника; N_{02} - истинное число частиц, попадающих в счетчик за 1 минуту от 2-го источника; N_{012} - истинное число частиц, попадающих в счетчик за 1 минуту от 1-го и 2-го источников вместе.

Так как $N_{12} = N_1 + N_2$, то:

$$N_{12} / (1 - N_{12} \cdot t_M) = N_1 / (1 - N_1 \cdot t_M) + N_2 / (1 - N_2 \cdot t_M).$$

Если $N_p \cdot t_M \ll 1$, что выполняется обычно при $N_p < 30000$ имп/мин, то, решая последнее уравнение относительно t_M и пренебрегая членами, содержащими квадрат малой величины $N \cdot t_M$, получим:

$$t_M = N_1 + N_2 - N_{12} / 2 \cdot N_1 \cdot N_2.$$

Поскольку в сумму $N_1 + N_2$ входит фон счетчика дважды, а член N_{12} включает в себя фон один раз, то необходимо произвести вычитание фона в числителе. Окончательно получим формулу:

$$t_M = N_1 + N_2 - N_{12} - N_{\phi} / 2 \cdot N_1 \cdot N_2.$$

Обычно перед началом измерений определяют время, в течение которого следует производить каждое из трех измерений, чтобы получить t_M с желаемой статистической точностью. Это время равно:

$$t = 3000 / N_1 \cdot (N_1 \cdot t_M \cdot E)^2,$$

где: N_1 - скорость счета от первого источника; E - требуемая точность определения мертвого времени в процентах; t_M - ожидаемое мертвое время в минутах.

Приборы и материалы: 1. Радиометр ПП-8. 2. Источник бета-излучения (Sr-90+Y-90). 3. Торцовый или цилиндрический счетчик Гейгера. 4. Калькулятор.

Выполнение работы:

1. Включите и подготовьте радиометр к работе;
2. Проверьте правильность работы пересчетного блока;
3. Установите в 1-е гнездо плексигласовой подставки 1-й источник,

во 2-е гнездо устанавливается "холостая" фишка. При этом следует пользоваться пинцетом и следить за тем, чтобы обе фишки были полностью утоплены в гнезда;

4. Помещая подставку с источником на разные позиции столика, подбирается такая позиция, чтобы скорость счета составляла приблизительно 1200-10000 имп/мин. Устанавливается подставка на выбранную позицию;

5. Измеряется число импульсов от 1-го источника в течение 15 минут. Результат измерения записывается в таблицу (табл. 11); Достается из гнезда подставки "холостая" фишка и помещается на ее место 2-й источник (до отказа). Устанавливается подставка на выбранную ранее позицию и измеряется общее число импульсов от 1 -го и 2-го источников в течение 15 минут. Результат измерения записывается в таблицу 11;

6. Рассчитывается скорость счета от 1-го и 2-го источников вместе и полученное значение записывается в таблицу 11;

7. Не трогая 2-го источника, достается из гнезда 1-й источник и помещается вместо него в гнездо "холостая" фишка. Устанавливается подставка на выбранную позицию и измеряется число импульсов от 2-го источника в течение 15 минут. Результат измерения записывается в таблицу 11;

8. Рассчитывается скорость счета от 2-го источника и полученное значение записывается в таблицу 11;

9. Достается 2-й источник из гнезда, подставку помещают на выбранную позицию и измеряют фон в течение 10 минут. Результат измерения фона записывают в таблицу 11;

10. Рассчитывают скорость счета фона и полученное значение записывают в таблицу 11;

11. Используя формулу, приведенную выше, рассчитывают мертвое время счетчика.

Таблица 11. Результаты измерений

Число зарегистрированных импульсов	Номер источника	Время измерения, мин	Скорость счета N, имп/мин
	1		
	1+2		
	2		
	фон		

Задание 3. Введение поправки на мертвое время счетчика Гейгера.

Приборы и материалы:

Последовательность выполнения работы:

1. Включите и подготовьте радиометр к работе;
2. Проверьте правильность работы пересчетного блока;
3. Изменяя расстояние от источника до счетчика, измерьте активность источника Sr-90–Y-90 при скоростях счета порядка 1000 имп/мин, 2000 имп/мин, 3000 имп/мин и 4000 имп/мин (если это возможно) в течение 5 минут с каждой позиции. Результаты измерений запишите в таблицу (табл. 12);
4. Рассчитайте скорость счета N_i каждого измерения по формуле $N_i = n_i/t$. Результаты расчетов запишите в таблицу 12;

Т а б л и ц а 12. Результаты измерений и расчетов.

Номер измерения	Время измерения t, мин	Число зарег. имп. n_i , имп.	Скорость счета N_i , имп/мин	Истинная скорость счета N_o , имп/мин	Учет фона $N_o - N_{\phi}$	Число просчетов E, %
1	5					
2	5					
3	5					
4	5					
фон	5					

5. Измерьте фон в течение 5 минут. Результат измерения запишите в таблицу 12;

6. Рассчитайте скорость счета N_{ϕ} , по формуле $N_{\phi} = n_{\phi}/t_{\phi}$. Полученный результат запишите в таблицу 12;

7. Определите истинную скорость счета N_o для каждого измерения. Полученные значения запишите в таблицу 12;

П р и м е ч а н и е: при обработке результатов измерений следует сначала вводить поправку на мертвое время, а затем вычитать фон.

8. Из полученных результатов N_o вычтите скорость счета фона N_{ϕ} . Полученные значения запишите в таблицу 12.

9. Определите для каждого полученного значения $N_o - N_{\phi}$ относительное число просчетов по формуле (значение мертвого времени t_m , возьмите из предыдущего задания:

$$E = N_p \cdot t_m / (1 - N_p \cdot t_m)$$

10. Результаты расчетов E умножьте на 100% и запишите в таблицу 12. Сделайте вывод о необходимости введения поправки на мертвое время при данной скорости счета, исходя из относительной ошибки E (числа просчетов).

Контрольные вопросы

1. Какой интервал времени называют временным разрешением?
2. Чем определяется временное разрешение?
3. Дайте определение мертвого времени детектора.
4. От чего зависит мертвое время детектора?
5. Дайте определение времени восстановления.
6. Чем отличается мертвое время от времени восстановления?
7. Чем отличается мертвое время от разрешающего времени детектора?
- В. Чем отличается время восстановления от разрешающего времени детектора?
9. От каких параметров зависит разрешающее время детектора?
10. Для чего вводится поправка на мертвое время?
11. Как вводится поправка на мертвое время?
12. При каких скоростях счета нет смысла вводить поправку на мертвое время? Объясните почему?
13. Объясните принцип определения мертвого времени детектора методом двух источников.

Лабораторная работа №5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИОАКТИВНОСТИ ПРЕПАРАТА ОТНОСИТЕЛЬНЫМ МЕТОДОМ

Всегда, когда это только возможно, прибегают к **относительным** измерениям, при которых показания детектора при работе с исследуемым источником « a_x » сравниваются с показаниями « a_3 » от некоторого эталонного источника, активность которого « A_3 » заранее известна. Если это сравнение можно выполнить так, чтобы значения коэффициентов « ε » в обоих случаях были заведомо одинаковыми, то из соотношений:

$$a_x = \varepsilon A_x; \quad a_3 = \varepsilon A_3,$$

откуда следует, что:

$$A_x = a_x A_\beta / a_\beta,$$

и, таким образом, неизвестную активность « A_x » можно определить по непосредственно измеряемым при эксперименте показаниям детектора « a_x » и « a_β » и заранее известной величине « A_β ». Под « a_x » и « a_β » часто используют скорости счета соответственно N_x и N_β .

Способы регистрации α - и β -частиц во многом аналогичны. Однако существенные различия в поведении этих частиц при их прохождении через вещество накладывают некоторые особенности на конструкцию детекторов. На рисунке 37 приведена схема детекторного блока бета-радиометра.

С одной стороны, значительно большие пробеги β -частиц позволяют изготавливать детекторы с гораздо более толстыми стенками. С другой стороны, сильное рассеяние β -частиц и меньшая ионизирующая способность затрудняют их регистрацию. Основное преимущество относительного метода это то, что нет необходимости вводить различные поправки. Главное условие измерений: **известный и неизвестный источники должны иметь одинаковые характеристики.**

Приготовление источников является важным этапом при измерении активности проб по альфа-бета-излучению. От правильного выбора источника во многом зависят трудоемкость и точность измерения активности. При относительном методе всегда стараются использовать толстослойные источники.

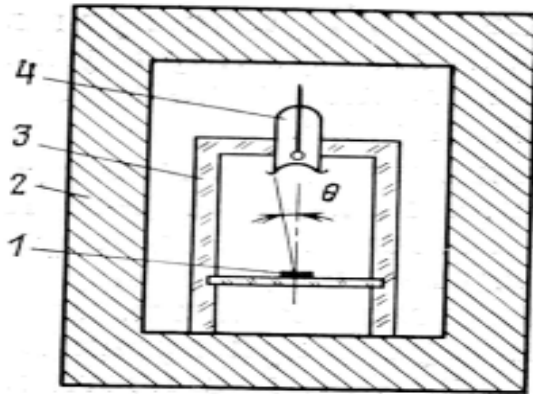


Рис. 37. Устройство детекторного блока бета-радиометра,
1—источник β - частиц; 2—свинцовая защита;
3—стойка из плексигласа; 4— торцевой β -счетчик.

Задание 1. Определение активности неизвестного препарата методом сравнения с эталонным источником и эффективности счега установки.

В работе используется бета-источник Sr-90 – Y-90 испускающий бета-частицы с максимальными энергиями 0,54 МэВ и 2,26 МэВ соответственно. Схема распада показана на рис. 38. Регистрация бета-излучения производится с помощью торцевого счетчика типа СИ-3Б.

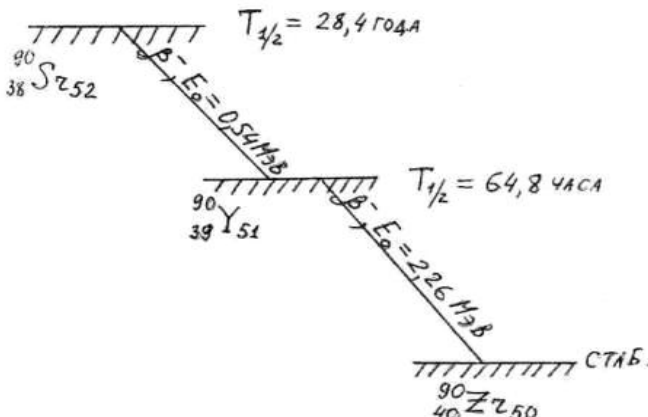


Рис.38. Схема распада стронций-90 + итрий-90

Выполнение работы: 1. Включить накальные цепи радиометра ПП-8. Дать ему прогреться в течение 5-10 минут.

2. Измерить фон счетчика в течение 10 мин и вычислить скорость счега фона N_{ϕ} (имп/мин):

$$N_{\phi} = n_{\phi} / t_{\phi}$$

3. Открыть дверцу свинцового домика и установить эталонный препарат в паз стойки. Закрыть дверцу. В течение 10 мин измерить число импульсов и вычислить скорость счега эталонного препарата N_s :

$$N_s = n_s / t_s$$

4. Вместо эталона поставить в то же положение бета-препарат, мало отличающийся по активности от эталона. В течение 10 мин измерить число импульсов и рассчитать скорость счега от неизвестного препарата N_x :

$$N_x = n_x / t_x$$

5. Вычтешь скорость счета фона N_{ϕ} из скоростей счета эталона $N_{\text{э}}$ и неизвестного препарата N_x .

6. Зная активность эталона, вычислить активность неизвестного препарата по формуле:

$$A_x = a_x A_{\text{э}} / a_{\text{э}}$$

8. Вычислить коэффициент эффективности счета установки, зная активность эталона и скорость счета от эталонного источника. Эффективность счета – это отношение скорости счета от источника к числу распадов атомных яде, происходящих в источнике в единицу времени (абсолютной активности):

$$\eta = N_0 / A.$$

Таким образом, число η показывает, какая часть полученных в результате радиоактивного распада частиц зарегистрирована счетчиком. Эта величина постоянная, безразмерная, не зависящая ни от A , ни от N_0 , а от большого числа факторов, обусловленных условиями измерения.

Лабораторная работа №6. ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ФАКТОРА НА РЕГИСТРАЦИЮ БЕТА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Как нам уже известно, методы измерения активности радионуклидов могут быть относительными и абсолютными. При относительных измерениях сравниваются между собой скорости счета для серии образцов одного и того же радионуклида. К категории относительных измерений относится так же сравнение измеряемого образца со стандартным (эталонным) образцом того же самого радионуклида, абсолютная активность которого заранее известна. Результаты относительных измерений активности очень часто выражаются в импульсах в минуту. Практически это удобно, хотя неявно подразумевает какие-то вполне определенные условия измерения – конкретный счетчик, данный тип излучения, конкретное расстояние от источника до счетчика и т.д. Несмотря на это, большинство измерений активности радионуклидов производится с помощью относительного метода, который оказывается вполне достаточным для решения целого ряда научных и практических задач.

Методы определения активности, основанные на подсчете полного числа распадающихся ядер, носят название абсолютных методов. В этом случае активность радиоактивного образца определяется непо-

средственно в абсолютных единицах – кюри, милликюри, микрокюри. Абсолютные измерения активности производят при помощи специальных так называемых 4 π -счетчиков, внутри которых помещается исследуемый радиоактивный образец. Это позволяет регистрировать излучение, испускаемое во всех направлениях, т.е. в пределах полного телесного угла 4 π (360°), и дает возможность исключить введение поправок на геометрию, поглощение и обратное рассеяние бета-излучения. Наряду с этим абсолютную активность (преимущественно бета-излучающих радионуклидов) часто определяют при помощи торцовых или цилиндрических счетчиков с фиксированной геометрией. В этом случае необходимо уметь правильно учитывать роль ряда факторов и вносить в результаты измерений соответствующие поправки. При всяких измерениях со счетчиками существенное влияние оказывают следующие факторы:

- 1) мертвое время счетчика;
- 2) фон;
- 3) воспроизводимость показаний;
- 4) геометрический фактор (величина относительного телесного угла);
- 5) эффективность счетчика;
- 6) поглощение бета-излучения в воздухе и стенках счетчика;
- 7) самопоглощение и саморассеяние бета-излучения в образце;
- 8) обратное рассеяние бета-излучения от подложки образца;
- 9) схема распада данного радионуклида;
- 10) статистические и другие ошибки измерений.

При абсолютных измерениях точный учет влияния всех перечисленных факторов совершенно необходим. Относительные измерения обычно требуют учета только первых трех поправок и вычисления статистических ошибок. Однако это справедливо лишь при условиях, обеспечивающих строгое постоянство действия других факторов при измерениях активности всех сравниваемых образцов. Например, если проводятся относительные измерения активности двух радиоактивных образцов различной толщины, то без учета самопоглощения бета-излучения в образцах результаты сравнивать нельзя. Если изменится расстояние от образцов до счетчика, то необходимо вводить поправку на геометрический фактор. Поэтому изучение влияния каждого из 10 указанных факторов на результаты измерений тесно связано с требованием стандартизации условий относительных измерений. Если она в силу тех или иных причин нарушается, то необходимо вносить соответствующие поправки. Более подробно вопросы о

влиянии всех упомянутых факторов на результаты относительных и абсолютных измерений, в том числе случаи, когда некоторыми из них можно пренебречь, будут рассмотрены в соответствующих работах.

В данной работе мы рассмотрим подробнее роль геометрических условий при измерении активности бета-излучающих радиоактивных образцов с помощью торцовых и цилиндрических счетчиков.

При измерении числа бета-частиц, испускаемых каким-либо радиоактивным образцом, прежде всего следует иметь в виду, что в подавляющем большинстве случаев в счетчик попадает (соответственно регистрируется прибором) только часть излучения, испускаемого исследуемым радиоактивным образцом. Связано это с тем, что излучение одинаково испускается образцом (источником) во всех направлениях, т.е. изотропно во все стороны пространства. А по направлению к чувствительному объему счетчика вылетает лишь часть бета-излучения. Эта часть излучения заключена в пределах некоторого телесного угла α , под которым чувствительный объем счетчика "виден" из центра радиоактивного образца. Очевидно, что этот телесный угол и, следовательно, доля бета-излучения, регистрируемая счетчиком, зависят от радиуса окна счетчика r и расстояния от образца до чувствительного объема счетчика h (рис. 39).

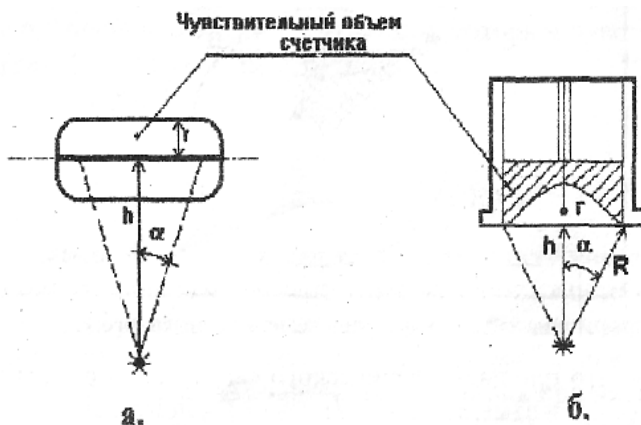


Рис. 39. Схема, поясняющая учет геометрического фактора: а – цилиндрический счетчик, б – торцовый счетчик.

Найдем величину телесного угла для торцового счетчика и точечного источника, расположенного на продолжении оси счетчика на рас-

стоянии h от нижней границы его чувствительного объема. Под точечным обычно понимается источник, поперечные размеры которого много меньше диаметра окна счетчика и расстояния до счетчика. Необходимо учитывать, что чувствительный объем счетчика начинается на некотором расстоянии за окном торцового счетчика, которое определяется положением и размером стеклянной бусинки на нити счетчика. Точное определение нижней границы чувствительного объема затруднительно. Ориентировочно можно считать, что она проходит несколько выше (на 1 мм) верхнего края бусинки.

Телесным углом называют часть пространства, заключенную внутри конической поверхности (воронки). Величину телесного угла с вершиной в точке O определяют как отношение площади, вырезаемой телесным углом на поверхности шара, описанного произвольным радиусом из центра O , к квадрату радиуса этого шара (рис.40):

$$\Omega = S_{ABCD} / R^2.$$

Поэтому телесный угол счетчика с вершиной в центре источника будет равен

$$\Omega = S / R^2,$$

где S - площадь сферического сегмента, отсекаемого на сфере радиуса R нижней границей чувствительного объема счетчика;

R - образующая конуса, равная длине пути крайних бета-частиц, попадающих из источника в чувствительный объем счетчика. $R^2 = h^2 + r^2$, откуда $R = \sqrt{h^2 + r^2}$ (рис.39б).

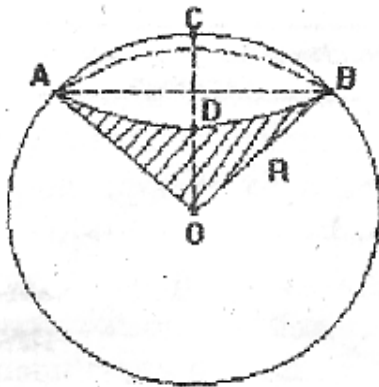


Рис.40. К определению величины телесного угла.

Зная, что площадь сферического сегмента определяется как $S=2\pi R(R-h)$, и заменяя R на $\sqrt{h^2 + r^2}$, получим

$$\Omega = \frac{S}{R^2} = \frac{2\pi R(R-h)}{R^2} = 2\pi \frac{R-h}{R} = 2\pi \left(1 - \frac{h}{R}\right) = 2\pi \left(1 - \frac{h}{\sqrt{h^2 + r^2}}\right), \quad (1)$$

где h - расстояние от источника до чувствительного объема счетчика,
 r - радиус окна счетчика.

Геометрический фактор (величина относительного телесного угла) определяет, какая доля от общего числа N_0 частиц, испускаемых источником изотропно по всем направлениям, направлена в чувствительный объем счетчика, то есть:

$$\omega = N/N_0, \quad (\omega < 1), \quad (2)$$

где N - число частиц, летящих в чувствительный объем счетчика.

Это соотношение учитывает только геометрические условия, игнорируя действие других факторов. С другой стороны, геометрический фактор равен отношению телесного угла Ω к полному телесному углу 4π , в котором распространяется излучение источника. Таким образом, $\omega = \Omega/4\pi$, учтем формулу (1) и для торцового счетчика получим

$$\omega = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{h}{\sqrt{h^2 + r^2}}\right). \quad (3)$$

По определению косинуса некоторого угла в прямоугольном треугольнике это есть отношение прилежащего катета к гипотенузе (см. рис.40), то есть $\cos\alpha = h/R = h/\sqrt{h^2 + r^2}$.

$$\text{Тогда } \omega = 0,5(1 - \cos\alpha), \quad (4)$$

где α - половина апертуры угла, под которым чувствительный объем счетчика "виден" из источника.

Преобразовав формулу (3), получим

$$\omega = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + (h^2 + r^2)}}\right). \quad (5)$$

Как видно из данной формулы, величина геометрического фактора ω увеличивается с увеличением радиуса r окна счетчика и уменьшением расстояния h от образца до чувствительного объема счетчика. Значения геометрического фактора ω для различных соотношений h/r в случае точечного источника приведены в табл. 13.

Таблица 13. Геометрический фактор для торцового счетчика, ω

h/r	ω	h/r	ω	h/r	ω	h/r	ω
0,05	0,475	0,50	0,275	1,6	0,076	5,0	0,0097
0,10	0,450	0,60	0,245	1,8	0,063	6,0	0,0068
0,15	0,425	0,70	0,215	2,0	0,053	7,0	0,00505
0,20	0,400	0,80	0,190	2,5	0,037	8,0	0,00385
0,25	0,375	0,90	0,165	3,0	0,0255	9,0	0,00305
0,30	0,355	1,00	0,146	3,5	0,0195	10,0	0,0025
0,35	0,335	1,2	0,116	4,0	0,015		
0,40	0,315	1,4	0,093	4,5	0,012		

Укажем, что в случае цилиндрического счетчика для достаточно малого источника (предполагается, что размеры источника меньше радиуса катода счетчика), расположенного на расстоянии h от оси счетчика (см.рис.39), геометрический фактор вычисляется по формуле:

$$\omega = \frac{1}{180} \arcsin \frac{r}{h}, \quad (6)$$

где r - внутренний радиус катода;

h - расстояние от источника до (нити) оси счетчика;

\arcsin - выражается в градусах, тогда ω получается в долях полного телесного угла.

Если на близком расстоянии от окна счетчика поставить круглую диафрагму, диаметр которой меньше его диаметра, то геометрический фактор по-прежнему будет выражаться формулой (3), но r будет соответствовать радиусу отверстия диафрагмы, а h – расстоянию от источника до верхней плоскости диафрагмы (рис. 41).

Диафрагмы изготавливают обычно из алюминия или латуни толщиной не менее слоя полного поглощения бета-частиц исследуемого радионуклида. Края диафрагмы делают скошенными по направлению крайних лучей от источника. Применение диафрагм позволяет точнее фиксировать относительный телесный угол, особенно если неизвестно точное положение чувствительного (эффективного) объема счетчика, Одновременно улучшается воспроизводимость показаний прибора.

При измерениях высокой точности следует учитывать, что телесный угол счетчика частично экранируется бусинкой на конце нити.

При относительных измерениях активности бета-излучающих образцов последние помещают по возможности на одном и том же расстоянии от счетчика.

Но иногда приходится изменять расстояние, чтобы подобрать оптимальную скорость счета. Кроме того, нельзя гарантировать отсутствие смещений по вертикали центров образцов, что может быть связано с различной толщиной подставки, чашечки и т.п. Ошибки, обусловленные некоторым различием во взаимном расположении образца и счетчика, резко возрастают по мере приближения образца к счетчику.

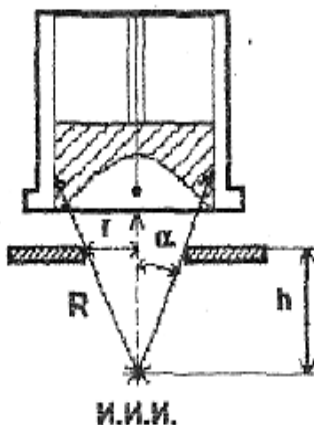


Рис. 41. К определению геометрического фактора при помощи диафрагмы.

Одновременно сильнее сказывается и неравномерность распределения активности в образцах. Поэтому при относительных измерениях рекомендуется помещать образцы по возможности дальше от счетчика. Но при этом необходимо учитывать, что при увеличении расстояния возрастает поглощение и рассеяние бета-излучения в воздухе, и из-за уменьшения величины телесного угла падает скорость счета.

Если размеры образца таковы, что он не может рассматриваться как точечный источник, то значения геометрического фактора будут отличаться от рассчитанных по формуле (3). Это особенно сказывается при расстояниях $h \approx (0,5 \dots 0,7) \cdot r$. При $h > 2r$ поперечные размеры образца не так сильно влияют на величину телесного угла. В этом случае рекомендуется измерять образцы, диаметр которых не превышает радиуса

окна счетчика. При этом с точностью до 2% можно пользоваться значениями, соответствующими точечному источнику.

Исходя из вышеизложенного, следует заключить: если при относительных измерениях сравниваются скорости счета двух или нескольких образцов, измеренные на различных расстояниях от окошка счетчика, необходимо для каждого из образцов определить геометрический фактор и ввести соответствующую поправку в результаты измерений.

При абсолютных измерениях активности бета-излучателей методом торцового счетчика с фиксированной геометрией (телесный угол фиксируется диафрагмой с калиброванным отверстием) поправка на геометрический фактор является необходимой и значительной. Погрешность в определении при этом методе составляет 1-2%. Для определения числа частиц N_0 , испускаемых источником в единицу времени в полный телесный угол 4π , нужно измеренную скорость счета N разделить на геометрический фактор по формуле (2). Этот расчет весьма приближенно дает число частиц, испускаемых источником в единицу времени, так как не учитывается поглощение и рассеяние излучения в воздухе и окошке счетчика, обратное отражение от подложки, самопоглощение в образце и т.д. Влияние этих факторов будет рассмотрено в других работах.

Задание 1. Определение и учет геометрического фактора при регистрации бета-излучения радиоактивных образцов.

Приборы и материалы:

1. Радиометр ПП-8;
2. Стронциево-иттриевые источники;
3. Алюминиевые диафрагмы с отверстиями разного диаметра;
4. Линейка, миллиметровая бумага;
5. Калькулятор.

Выполнение работы:

1. Включите и подготовьте радиометр к работе;
2. Проверьте правильность работы пересчетного блока;
3. Измерьте фон счетчика в течение 5 минут;
4. Определите скорость счета фона N_{ϕ} по формуле $N_{\phi} = n_{\phi} / t_{\phi}$;
5. Установите радиоактивный источник на 5-ю позицию столика (отсчет позиций сверху вниз);

6. Измерьте активность источника в течение 5 минут. Результат измерения занесите в таблицу 14;

Таблица 14. Результаты измерений.

Номер позиции	Расстояние h , мм	Время измерения t , мин	Количество зарегистрированных имп., n	Скорость счета $N=n/t$, имп/мин	Скорость счета без фона, N_0 имп/мин	r/h	Геометрический фактор, ω	$N_{пр}$, имп/мин
5		5						
8		5						
11		5						
14		5						
17		5						
20		5						

7. Рассчитайте скорость счета N и скорость счета без фона $N_0=N-N_{ф}$. Результаты расчетов запишите в табл. 14;

8. Определите расстояние h от источника до окна счетчика в мм и найдите отношение r/h с точностью до 4-го знака. Полученные результаты запишите в табл. 14;

Указание: радиус окна счетчика r не более 10 мм; расстояние между соседними позициями составляет 5 мм. Учтите, что расстояние от окна счетчика до первой позиции составляет 10,5 мм;

9. Определите геометрический фактор по формуле (5). Результат вычислений занесите в табл. 14;

Примечание: при определении геометрического фактора необходимо промежуточные вычисления производить с точностью до 4-го знака после запятой. В таблицу записывают значения с точностью до 3-го знака;

10. Пользуясь значением геометрического фактора ω и соответствующей ему скорости счета N_0 , определите число частиц $N_{пр}$, испускаемых источником в 1 минуту в полный телесный угол 4π . При этом используют соотношение $N_{пр}=N_0/\omega$. Полученный результат занесите в табл. 14;

11. Повторите пункты 6-10, устанавливая источник последовательно на 8-ю, 11-ю, 14-ю, 17-ю и 20-ю позиции;

Указание: определенные шесть значений $N_{пр}$ должны совпадать между собой, так как во всех случаях источником излучения служит

один и тот же образец. На самом деле может наблюдаться значительный разброс в значениях $N_{пр}$, который обусловлен неточностью в определении геометрического фактора ω , а главным образом – игнорированием других факторов, неодинаково влияющих на скорость счета при различных геометрических условиях.

Найдите среднее значение \bar{N} и среднюю квадратичную ошибку m по формуле

$$m = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N - \bar{N})^2}{n(n-1)}},$$

где n – число проведенных измерений.

Окончательный результат запишите в виде $N_{пр} = \bar{N} + m$ имп/мин;

12. Оцените точность измерения по формуле $E = m / \bar{N} \cdot 100\%$;

13. Определите абсолютную активность источника в микрокюри ($1 \text{ мкКи} = 3,7 \cdot 10^4 \text{ расп/с}$), пользуясь соотношением:

$$\bar{A} = \frac{\bar{N}}{3,7 \cdot 10^4 \cdot 60} = \frac{\bar{N}}{2,22 \cdot 10^6}.$$

Пересчитайте активность в системную единицу.

Следует обратить внимание на то, что в данном случае производится лишь весьма приближенная оценка абсолютной активности источника, так как совершенно не производится учет взаимодействия бета-излучения с веществом, которое может существенным образом повлиять на результаты измерений. Поэтому рассчитанное значение активности может не совпадать с указанным на источнике;

14. Постройте график зависимости геометрического фактора ω от расстояния h , используя данные табл. 14. По оси ординат (вертикальная ось) отложите значение геометрического фактора ω . По оси абсцисс (горизонтальная ось) отложите расстояние h в мм;

15. Проанализируйте построенный график: что происходит с величиной геометрического фактора ω при уменьшении (увеличении) расстояния h ? Запишите вывод.

Задание 2. Оценка абсолютной активности радиоактивного источника методом торцового счетчика с фиксированной геометрией.

Выполнение работы:

1. Повторите пункты 1-4 задания 1;

2. На вторую позицию столика (отсчет позиций идет сверху вниз) поместите алюминиевую диафрагму с большим отверстием. Радиоактивный источник установите на шестую позицию столика;

3. Измерьте в течение 5 минут активность источника. Рассчитайте скорость счета N в имп/мин. Результаты измерений занесите в табл. 15;

4. Определите скорость счета без фона N_0 . Результат запишите в табл. 15;

5. Определите расстояние от источника до верхней плоскости диафрагмы h . Толщина диафрагмы – 1 мм. Расстояние между соседними позициями – 5 мм. Результат запишите в табл. 15;

6. Найдите отношение g/h . Учтите, что g – радиус отверстия диафрагмы. Результат вычислений занесите в табл. 15;

7. Определите геометрический фактор по формуле (5). Результат вычислений занесите в табл. 15;

8. Пользуясь значением геометрического фактора ω и соответствующей ему скорости счета N_0 , определите число частиц $N_{пр}$, испускаемых источником в 1 минуту в полный телесный угол 4π . При этом используют соотношение $N_{пр}=N_0/\omega$. Полученный результат занесите в табл. 15;

9. Не меняя диафрагму, установите источник на 10-ю позицию столика и повторите пункты 3-8;

10. Не меняя диафрагму, установите источник на 14-ю позицию столика и повторите пункты 3-8;

Таблица 15. Результаты измерений

Радиус диафрагмы r , мм	Расстояние h , мм	g/h	ω	Время измерения t , мин	n , имп.	Скор, счета $N=n/t$	Скорость счета без фона $N_0=N-N_{ф}$, имп/мин.	$N_{пр}=N_0/\omega$
4				5				
4				5				
4				5				
2				5				
2				5				
2				5				

11. Замените диафрагму с большим отверстием на диафрагму с меньшим отверстием. Установите источник на 6-ю позицию столика;

12. Повторите пункты 3-8;
13. Не меняя диафрагму, установите источник на 10-ю позицию столика и повторите пункты 3-8;
14. Не меняя диафрагму, установите источник на 14-ю позицию столика и повторите пункты 3-8;
15. Оцените точность измерения по формуле $E = m / \bar{N} \cdot 100\%$;
16. Определите абсолютную активность источника в микроюри (1мкКи – $3,7 \cdot 10^4$ расп/с), пользуясь соотношением:

$$\bar{A} = \frac{\bar{N}}{3,7 \cdot 10^4 \cdot 60} = \frac{\bar{N}}{2,22 \cdot 10^6}.$$

17. Постройте график зависимости геометрического фактора ω от расстояния h , используя данные табл. 15. По оси ординат (вертикальная ось) отложите значение геометрического фактора ω . По оси абсцисс (горизонтальная ось) отложите расстояние h в мм;

18. Сравните полученные значения $N_{пр}$ для диафрагм разных диаметров, но для одного и того же расстояния h (используйте данные табл. 15). Сделайте вывод о том, как влияет уменьшение (увеличение) радиуса g диафрагмы на величину геометрического фактора ω ;

19. Если в обоих, заданиях вам раздавался источник одной и той же активности, то сравните, в каком случае (без диафрагмы или методом с фиксированной геометрией) точность результатов измерений выше. Объясните почему?

Контрольные вопросы

1. Какие методы измерений вы знаете?
2. Определите, какие измерения являются относительными?
3. Какие методы измерения являются абсолютными?
4. В чем сущность метода с фиксированной геометрией?
5. Какие факторы оказывают существенное влияние при любых измерениях бета-излучающих источников (образцов)?
6. Учет каких факторов необходим при абсолютных и относительных измерениях?
7. Дайте понятие телесного угла.
8. Как определить величину телесного угла Ω ?
9. Дайте определение геометрического фактора ω .
10. Чем отличается геометрический фактор ω от телесного угла Ω ?

11. Как зависит геометрический фактор ω от расстояния h между источником и чувствительным объемом счетчика?
12. Как зависит геометрический фактор ω от радиуса r окна счетчика (радиуса отверстия диафрагмы)?
13. В каком случае применяют диафрагмы?
14. В каких случаях нельзя использовать формулу (5) для расчета геометрического фактора ω ?
15. Как учесть геометрический фактор ω при определении числа частиц, испускаемых источником (образцом) в единицу времени в полный телесный угол?
16. При расчете геометрического фактора ω для цилиндрического счетчика что обозначают r и h ?
17. При использовании метода с фиксированной геометрией, как определяют r и h ?
18. Можно ли принять измеренную абсолютную активность радиоактивного источника за истинную? Ответ поясните.

Лабораторная работа №7.
УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ
РАДИОМЕТРА КРВП - ЗАБ

Радиометр КРВП-ЗАБ представляет собой установку счета импульсов с блоками детектирования альфа- и бета-излучения, а также блоком обработки, с помощью которого на специальную катионообменную и анионообменную ленту происходит осаждение бета-активных катионов и анионов и осаждение полония-210 на медную фольгу. Общий вид радиометра КРВП-ЗАБ показан на рисунке 42.

Радиометр позволяет измерять суммарную активность проб вещества.

Измерение альфа-бета-активности воды и пищевых продуктов основано на измерении с помощью пересчетного устройства и секундомера числа импульсов, поступающих с блока-детектирования за определенное время.

В состав радиометр КРВП-ЗАБ входят следующие блоки:

1. Блок обработки.

2. Блок детектирования бета-излучения для измерения бета-активности воды и пищевых продуктов, заключенный в свинцовый домик.

3. Блок детектирования альфа-излучения для измерения альфа-активности воды и пищевых продуктов, заключенный в светозащитный кожух (входит только в КРВП-ЗАБ).

4. Пересчетный блок, который включает в себя следующие каскады: дискриминатор; усилитель; формирующее устройство; пересчетную декаду; узел проверки; блок питания, секундомер.

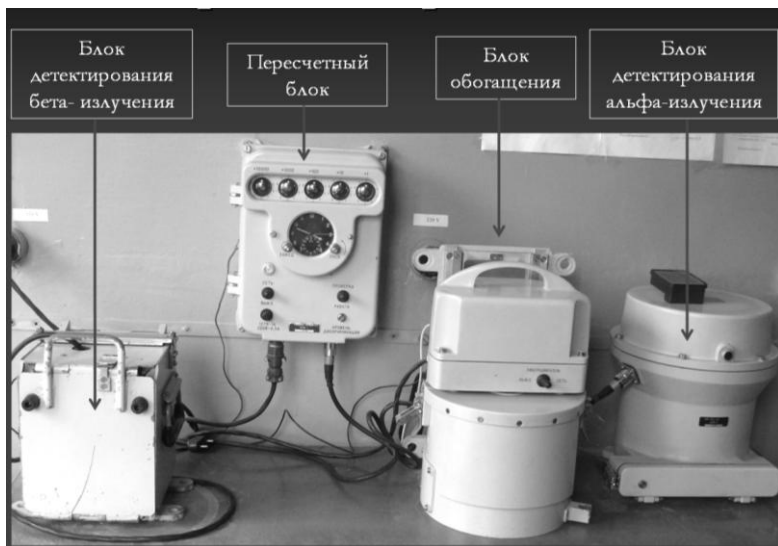


Рис. 42. Общий вид радиометра КРВП-ЗАБ.

Блок детектирования бета-излучения со свинцовым домиком. Блок детектирования бета-излучения смонтирован в плоском пластмассовом корпусе. Схема блока детектирования расположена на монтажной плате, установленной в средней части корпуса. В блоке детектирования имеется крышка, обеспечивающая смену счетчиков и доступ к элементам схемы. Со стороны рабочей поверхности счетчика отверстие крышки защищено триацетатной пленкой толщиной 10 мкм ($\sim 1,3 \text{ мг/см}^2$).

Блок детектирования помещается на специальном держателе в защитный домик. Домик является разборным. Передняя стойка откидывается, открывая доступ внутрь домика. К верхней стенке домика с внутренней стороны прикреплен блок детектирования. К боковым

стенкам домика прикреплена рамка с направляющими для установки кюветы с водой или продуктами питания, или кассеты с фильтром.

Присоединение блока детектирования к пересчетному блоку осуществляется посредством кабеля. Чтобы уменьшить влияние гамма-фона на результаты измерения низких уровней бета-активности воды и пищевых продуктов, блок детектирования помещен в свинцовый домик с толщиной защиты 30 мм. Внутренние стенки домика изготовлены из трехмиллиметрового оргстекла.

Детектором бета-излучения является галогенный счетчик типа СБТ-10А. Тонкое слюдяное окно (плотность слюды $5 \pm 0,5$ мг/см²) с площадью 35 см² позволяет регистрировать бета-излучение с энергией от 0,1 МэВ и выше. Импульсы отрицательной полярности, длительностью около 10-15 мкс и амплитудой около двух вольт, возникающие под действием бета-частиц и гамма-квантов на нагрузочном резисторе счетчика поступают через конденсатор на вход пересчетного блока. Питание счетчика осуществляется стабилизированным напряжением + 390 В.

Блок детектирования альфа-излучения. Блок детектирования альфа-излучения состоит из фотоэлектронного умножителя, диска из органического стекла с нанесенным на него светосоставом ФС-4, эмиттерного повторителя, блокинг-генератора, формирующего импульсы, и высоковольтного блока питания.

Светосостав типа ФС-4 изготовлен на основе сцинтиллятора ZnS (Ag). Альфа-частица, попадая в ZnS (Ag), вызывает в последнем вспышку (сцинтилляцию) света. Кванты света выбивают из фотокатода электроны, умножаемые электрическим полем динодов, что вызывает на аноде ФЭУ отрицательный импульс тока.

Для согласования выходного сопротивления нагрузки фотоэлектронного умножителя с входным сопротивлением блокинг-генератора служит составной эмиттерный повторитель. Входное сопротивление эмиттерного повторителя 47 кОм, выходное сопротивление 15 Ом.

Коэффициент передачи эмиттерного повторителя порядка 0,9. С выхода эмиттерного повторителя импульсы отрицательной полярности поступают на вход блокинг-генератора. Амплитуда запускающего импульса (0,5В) блокинг-генератора выбрана с таким расчетом, чтобы отсечь уровень шумов фотоэлектронного умножителя, что обеспечивает довольно малый фон блока детектирования альфа-излучения (около 1 имп/мин), сохраняя при этом достаточно высокую эффектив-

ность регистрации альфа-частиц: 60–70% от контрольного альфа-источника Рн-239.

Выходной отрицательный импульс с блокинг-генератора амплитудой 5В и длительностью 7мкс подается через кабель на пересчетную схему радиометра КРВП-ЗАБ.

Принципиальная схема и конструкция блока детектирования позволяет применять его с другими пересчетными схемами в случае согласования распайки выходных разъемов пересчетных схем с распайкой входного разъема блока детектирования альфа-излучения. Питание фотоэлектронного умножителя осуществляется от вмонтированного в блок детектирования альфа-излучения высоковольтного выпрямителя. На первичную обмотку трансформатора с пересчетного блока подается переменное напряжение 6,3 В. Снимаемое со вторичной обмотки трансформатора напряжение подается на выпрямитель. Выпрямитель собран на селеновых выпрямителях по схеме учетверения напряжения со стабилизатором. Ток нагрузки фотоэлектронного умножителя 70-90 мкА.

Блок пересчетный. Пересчетный блок состоит из литого металлического корпус и шасси, на котором смонтированы все узлы пересчетной установки.

Шасси пересчетного блока скрепляется с крышкой корпуса при помощи двух шарнирных осей и двух невыпадающих винтов. Уплотнение корпуса с крышкой достигается с применением резиновой прокладки между крышкой и корпусом. Корпус прибора выполнен из сплава АЛ9 и окрашен краской цвета слоновой кости. Для удобства настройки, регулировки и ремонта шасси прибора при отвертывании двух винтов на шарнирах свободно откидывается из корпуса, обеспечивая доступ к любому элементу пересчетной схемы.

На лицевой панели расположены все органы управления пересчетной установки: выключатель питающей сети, тумблер рода работ (работа с блоком детектирования или проверка), ручка-уровень дискриминации (под шлиц). Кроме того, на лицевой панели установлены часы 59ЧП с кнопкой ПУСК и ручкой ЗАВОД, под колпачком установлен предохранитель. Для подсчета количеств зарегистрированных импульсов на лицевую панель выведены декатроны. Номерная шкала декатронов дает возможность отсчитывать количество импульсов при остановке счета.

В крышке корпуса расположены два разъема для подключения кабеля блока детектирования и кабеля питающей сети. Внутри корпуса

расположено шасси, на котором смонтированы все узлы пересчетной установки: дискриминатор с усилителем, формирующий каскад, пять каскадов пересчетных декад на декатронах, узел стабилизированного питания установки.

Пересчетная схема включает в себя 5 пересчетных декад на декатронах ОГ-4 и обеспечивает предельный объем счета 10^5 импульсов с непосредственной визуальной индикацией числа зарегистрированных импульсов.

Для определения средней скорости счета статистически распределенных во времени импульсов пересчетный блок включает в себя часы 59ЧП, синхронно связанные с пуском и остановкой пересчетной схемы.

Все питание пересчетной схемы и блоков детектирования осуществляется от блока питания, расположенного в пульте прибора.

В приборе предусмотрена возможность проверки работоспособности пересчетной схемы с помощью переменного напряжения частотой 100 Гц, полученного путем преобразования из напряжения сети 50 Гц двухполупериодным выпрямителем.

Метод с обогащением. Метод с обогащением служит для получения обогащенных проб из воды и пищевых продуктов при измерении малых альфа и бета-активностей. При измерении малых удельных бета-активностей воды ($1 \cdot 10^{-10}$ – $1 \cdot 10^{-8}$) Ки/л применяется метод предварительного обогащения с использованием катионо- и анионообменных фильтров, придаваемых к радиометру. Для этого резервуар блока обработки фильтров, в котором закреплены катионо- и анионообменные фильтры в специальных кассетах, заполняется контролируемой водой.

Катионо- и анионообменные фильтры обрабатываются в контролируемой воде в течение 15 минут, а затем подсушиваются фильтровальной бумагой. Активность обработанного и подсушенного фильтра измеряется с помощью блока детектирования бета-излучения и пересчетного блока.

Чувствительность радиометра за счет применения катионо- и анионообменных фильтров увеличивается, и при этом обеспечивается измерение удельной бета-активности воды с концентрацией от $1 \cdot 10^{-10}$ до $1 \cdot 10^{-8}$ Ки/л.

Измерение малых удельных альфа-активностей ведется по принципу осаждения микроколичеств полония-210 на медную фольгу. Процесс осаждения ведется при температуре (70–90) °С при интенсивном перемешивании в течение 20 минут в солянокислой (6%) среде. Блок

обработки для осаждения полония-210 применяется как для воды, так и пищевых продуктов в диапазоне концентраций от $1 \cdot 10^{-11}$ до $1 \cdot 10^{-8}$ Ки/л.

Блок обработки служит для получения обогащенных проб из воды и пищевых продуктов при измерении малых альфа и бета-активностей. При измерении малых удельных бета-активностей воды (10^{-10} - 10^{-8}) Ки/л применяется метод предварительного обогащения с использованием катионо- и анионообменных фильтров, придаваемых к радиометру. Для этого резервуар блока обработки фильтров, в котором закреплены катионо- и анионообменные фильтры в специальных кассетах, заполняется контролируемой водой.

Катионо- и анионообменные фильтры обрабатываются в контролируемой воде в течение 15 минут, а затем подсушиваются фильтровальной бумагой. Активность обработанного и подсушенного фильтра измеряется с помощью блока детектирования бета-излучения и пересчетного блока.

Чувствительность радиометра за счет применения катионо- и анионообменных фильтров увеличивается, и при этом обеспечивается измерение удельной бета-активности воды с концентрацией $1 \cdot 10^{-10}$ до $1 \cdot 10^{-8}$ Ки/л.

Измерение малых удельных альфа-активностей ведется по принципу осаждения микроколичеств полония-210 на медную фольгу. Процесс осаждения ведется при температуре (70–90)° при интенсивном перемешивании в течение 20 минут в солянокислой (6%) среде. Блок обработки для осаждения полония-210 при меняется как для воды, так и пищевых продуктов в диапазон концентраций от $1 \cdot 10^{-11}$ до $1 \cdot 10^{-8}$ Ки/л.

В состав блока обработки КРВП-ЗАБ входят электродвигатель и электронагревательный элемент, необходимые для перемешивания и подогрева пробы. Электрическое питание блоков обработки осуществляется от сети переменного тока. Блоки обработки выпускаются в различных модификациях, определяемых различными напряжениями питающей сети. Блок обработки состоит из отлитых из сплава АЛ9 основания и корпуса с крышками, в которых размещен резервуар для контролируемого продукта, привод электродвигателя и электронагревательный элемент. Электронагревательный элемент закреплен в нижней части корпуса на специальной подставке с теплоизоляционными прокладками из асбестового картона. На электронагревательный элемент устанавливается съемный стальной резервуар, покрытый фторопластовой эмалью. Резервуар имеет откидную ручку, которая фиксируется на

наружной стенке корпуса. На внутренней стенке резервуара имеются две риски, показывающие уровень заливки контролируемого продукта: нижняя – для альфа; верхняя – для бета.

При **альфа-обогащении** – медная фольга устанавливается в горизонтальном положении в специальный зажим, который закреплен на держателе.

При **бета-обогащении** держатель из нержавеющей стали имеет кронштейн с винтом, что дает возможность установить кассету с фильтром в вертикальном положении.

Резервуар имеет крышку, которая предохраняет от расплескивания продукта при переноске. Сверху резервуар прижат крышкой блока, облицованной по внутренней полости листовым фторопластом. Крышка блока плотно закрывает резервуар с помощью двух замков. На крышке блока расположены привод электродвигателя, элементы включения электродвигателя, держатель с вставкой плавкой ВП2Б. Ось привода через фторопластовую втулку в крышке вводится в объем резервуара. На оси привода установлена крыльчатка. Корпус привода закрыт крышкой, которая крепится к нему четырьмя невыпадающими винтами. Для удобства работы с блоком обработки, извлечения держателей и резервуара для слива проб крышка резервуара с закрепленным на ней электродвигателем поднимается вверх. Фиксация крышки в горизонтальном положении обеспечивается упорами.

На передней части блока расположены два тумблера: СЕТЬ—ВЫКЛ и СЕТЬ—ВЫКЛ (Электродвигатель). Тумблер СЕТЬ—ВЫКЛ с надписью ЭН-1 служит для включения электронагревательного элемента, тумблер СЕТЬ—ВЫКЛ с надписью ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ — для включения электродвигателя.

Прибор при монтаже обязательно заземлять. Клемма заземления расположена на боковой стенке корпуса пересчетного блока.

Задание 1. Измерение активности проб прямым методом.

Чистую кювету поместить в свинцовый домик на верхнюю полку держателя, под рабочее окно детектора (вырез кюветы должен входить в ограничитель детектора);

– нажатием кнопки секундомера **ПУСК** включить пересчетную схему и определить скорость счета от фона (N_{ϕ} имп/мин);

– в кювету после измерения фона насыпать приготовленную пробу пищевых продуктов, тщательно по внутренней кромке кюветы разровнять пробу;

– кювету с пробой поместить в свинцовый домик на верхнюю полку держателя, под рабочее окно детектора;

– нажатием кнопки секундомера ПУСК, включить пересчетную схему и определить суммарную N_1 —скорость счета (имп/мин) от пробы продуктов и фона.

Определить скорость счета (N_0 имп/мин) от пробы продуктов, вычитая из суммарных показаний радиометра показания фона:

$$N_0 = N_1 - N_{\text{ф}}$$

Определить удельную активность пробы по формуле:

$$A_{\text{уд}} = 2 \cdot A_{\text{гр}},$$

где $A_{\text{гр}}$ – удельная бета-активность определенная с помощью градуировочного графика (прилож. 4).

Продолжительность измерения проб продуктов с различной удельной активностью ориентировочно можно выбрать из таблицы 16.

Таблица 16. Данные для выбора времени измерения активности.

Удельная активность, Ки/л	Время измерения, мин	Относительная ошибка, %
$1 \cdot 10^{-10}$	15	30
$5 \cdot 10^{-9}$	3	3
$5 \cdot 10^{-8}$	1	1

Задание 2. Измерение активности методом с предварительным обогащением.

Порядок измерения фона:

– закрепить катионообменный (анионообменный) фильтр в кассете;
– кассету с фильтром поместить в свинцовый домик на нижнюю полку держателя, под рабочее окно детектора, закрыть свинцовый домик;

– нажатием кнопки секундомера ПУСК включить пересчетный прибор и определить скорость счета фона ($N_{\text{ф}}$ имп/мин):

– извлечь кассету с фильтром.

Порядок обработки фильтра:

– открыв замки крепления верхней крышки, открыть резервуар блока обработки;

– закрепить кассету с фильтром;

– резервуар заполнить исследуемой водой в количестве 2,5 л;

– закрыть резервуар и включить электродвигатель;

– по истечении 15 мин. выключить электродвигатель, открыть резервуар и снять кассету с обработанным фильтром;

– положить кассету между сложенными вчетверо кусками фильтровальной бумаги и слегка прижать их руками, что должно привести к сушке фильтра.

– после замера воды с удельной активностью резервуар обработать дезактивирующим раствором № 3 (или СФ-3К) и промыть чистой водой.

Порядок измерения обработанного фильтра:

– поместить кассету с обработанным фильтром в свинцовый домик на нижнюю полку держателя, под рабочее окно детектора (при этом выпуклая сторона кассеты должна быть обращена к детектору);

– нажатием кнопки секундомера ПУСК включить пересчетную схему и произвести измерение, определив суммарную скорость счета от обработанного фильтра и фона (N_1 имп/мин).

– определить скорость счета от фильтра вычитая из суммарных показаний показания фона:

$$N_0 = N_1 - N_{\text{ф}}$$

– определить удельную активность пробы по формуле:

$$A_{\text{уд}} = 1.4 \cdot A_{\text{гр}}$$

где, $A_{\text{гр}}$ – удельная бета-активность определенная с помощью градуировочного графика (прилож. 4).

Продолжительность измерения проб продуктов с различной удельной активностью ориентировочно можно выбрать из таблицы 16.

Проверка радиометра КРВП–ЗАБ. Проверка радиометра должна проводиться методом образцового источника. Метод проверки по образцовому источнику заключается в том, что сравнивают значение внешнего излучения в частицах в секунду в угле 2π , создаваемое образцовым источником с показаниями поверяемого радиометра.

При проверке должно быть установлено:

а) соответствие показаний поверяемого радиометра действительным значениям измеряемой величины;

б) погрешность измерений.

Задание 3. Проверка блока бета-излучения.

1. Подключить блок детектирования бета-излучения. Поставить переключатель РАБОТА—ПРОВЕРКА в положение РАБОТА.

2. Включить пересчетный блок и прогреть в течение 5 минут.

3. Включить нажатием кнопки ПУСК секундомер и пересчетный блок для определения числа импульсов, регистрируемых радиометром от собственного фона, который не должен превышать 130 имп./мин. Время измерения должно быть не менее 10 минут.

4. Остановить нажатием кнопки ПУСК секундомер и пересчетную схему и определить число импульсов в секунду от собственного фона.

5. Перевести повторным нажатием кнопки ПУСК секундомер и пересчетную схему в исходное состояние.

6. Поместить под рабочее окно блока детектирования бета-излучения на верхние направляющие бета-источник, включить нажатием кнопки ПУСК пересчетную схему и секундомер, определить суммарное число импульсов от собственного фона и бета-источника. Время измерения должно быть не менее 10 минут.

7. Определить скорость счета только от бета-источника, для чего от суммарного числа импульсов в секунду от собственного фона и бета-источника вычесть число импульсов в секунду от собственного фона.

8. Основная погрешность измерения по твердому бета-источнику определяется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{nA - N}{nA} 100\%$$

где n_0 – число импульсов, приходящееся на одну частицу внешнего излучения; для бета-источника с изотопами стронций-90 + иттрий-90 $n_0 = 0,48 \pm 0,1$ имп/част, (точная величина указывается в формуляре для каждого блока детектирования бета-излучения);

A – внешнее излучение бета-источника в угле 2π в част/с;

N – скорость счета, зарегистрированная радиометром при измерении внешнего излучения бета-источника, имп/с.

Величина основной погрешности не должна превышать $\pm 20\%$.

Задание 4. Проверка блока альфа-радиометра.

Отсоединить блок детектирования бета-излучения и подсоединить к пересчетному блоку блок детектирования альфа-излучения.

1. Открыть окно блока детектирования альфа-излучения. Поместить чистый диск медной фольги в мелкую часть кюветы блока детектирования альфа-излучения и переместить ее в рабочее положение.

2. Закрыть окно блока детектирования альфа-излучения крышкой, при этом должна загореться сигнальная лампочка.

3. Включить нажатием кнопки ПУСК секундомер и пересчетную схему и произвести измерение собственного фона. Время измерения должно быть не менее 10 минут.

В радиоактивно чистом окружающем воздухе собственный фон блока детектирования альфа-излучения не должен превышать 2-3 имп/мин.

4. Поместить альфа-источник на место фольги, включить нажатием кнопки ПУСК секундомер и пересчетную схему и определить число импульсов от альфа-источника. Время измерения должно быть не менее 5 минут.

5. Основная погрешность измерения по твердому альфа-источнику определяется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{nA - N}{nA} 100\%$$

где n_0 – число импульсов, приходящееся на одну частицу внешнего излучения; для альфа-источника с изотопом Pu-239 $n_0 = 0,70 \pm 0,18$ имп/част. (точная величина указывается в формуляре для каждого блока детектирования альфа-излучения);

A – внешнее излучение альфа-источника в угле 2л в част/с;

N – скорость счета, зарегистрированная радиометром при измерении внешнего излучения альфа-источника, в имп/с.

Величина основной погрешности не должна превышать $\pm 25\%$.

6. Сделайте вывод о пригодности прибора к работе.

Лабораторная работа №8.

САМОПОГЛОЩЕНИЕ БЕТА-ИЗЛУЧЕНИЯ В ОБРАЗЦЕ

При измерении активности радиоактивных образцов, имеющих значительную толщину, происходит поглощение излучения в самом образце. Особенно важно учитывать это поглощение при регистрации бета-излучения, так как бета-частицы обладают энергиями, лежащими в интервале от нуля до определенного максимального значения. Частицы с малой энергией будут поглощены уже сравнительно тонкими слоями вещества данного образца и не достигнут чувствительного объема счетчика. Поэтому при измерении активности радиоактивных образцов, испускающих бета-излучение, а также при сравнении скоростей счета бета-излучающих образцов, имеющих разную толщину или содержащих различные радионуклиды, приходится вводить поправку на ослабление бета-излучения в толще самого образца.

Эффект **самопоглощения** (самоослабления) заключается в том, что некоторое количество испускаемых радионуклидами бета-частиц поглощается и рассеивается в веществе самого образца, не доходя до его поверхности. Поэтому регистрируемая счетчиком в пределах данного телесного угла Ω скорость счета N будет занижена по сравнению с той скоростью счета N_0 , которая регистрировалась, если бы отсутствовало самопоглощение в образце (при прочих равных условиях измерения).

Рассмотрим следующий пример. Пусть имеется несколько радиоактивных образцов, одинаковых по площади, но различных по толщине d ($\text{г}/\text{см}^2$); кроме того, допустим, что радионуклиды в образцах распределены равномерно, а удельная активность всех образцов (число распадов в единицу времени на 1г вещества) одна и та же, то есть $a_m = A/m = \text{const}$.

Предположим, что наши образцы разбиты на слои одинаковой толщины, каждый из которых испускает в сторону счетчика 300 бета-частиц (изображено тремя стрелками). На рисунке 43 изображены 6 таких образцов, каждый из которых условно разбит на слои одинаковой толщины. Из первого и второго слоев (образец 1 и 2) счетчика достигают все частицы: для образца 1 – 300 частиц; для образца 2 – 600 частиц (изображено шестью стрелками). По мере увеличения толщины образца частицы, испускаемые радионуклидами, начинают поглощаться. Из третьего слоя (образец 3) через образец проходит лишь 200 частиц, а всего счетчика достигает 800 бета-частиц вместо 900 (изображено восемью стрелками).

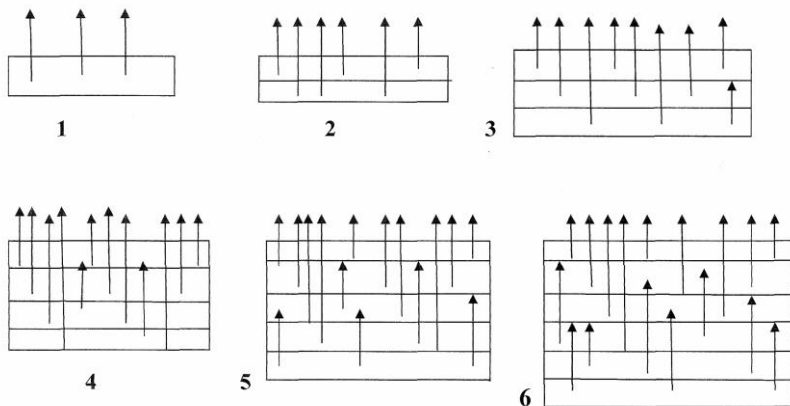


Рис.43. Схема поглощения излучения в толще самого образца.

Из четвертого слоя (образец 4) поверхности образца достигает только 200 частиц, а всего 1000 вместо 1200 (изображено десятью стрелками). Из пятого, шестого и последующих слоев (образцы 5 и 6) ни одна частица не выходит из образца и, соответственно, не попадает на счетчик, который регистрирует для 5-го и 6-го образцов те же 1000 частиц (изображено десятью стрелками), что и для 4-го образца.

Дальнейшее увеличение толщины образца за счет увеличения новых слоев не меняет картины – скорость счета N остается постоянной и определяется лишь активностью верхних слоев, суммарная толщина которых соответствует величине максимального пробега R_{\max} бета-частиц данного радионуклида. Это объясняется тем, что в относительно тонких слоях образца поглощается преимущественно та часть бета-частиц, которая имеет малую энергию. По мере увеличения толщины образца бета-частицы с большей энергией, взаимодействуя с веществом, теряют возможность выйти из образца и, наконец, при достаточно большой толщине даже частицы, обладающие максимальной энергией E_{\max} , не могут преодолеть толщину образца, так как величина их пробега R_{\max} меньше или сравнима с толщиной данного образца. При $d \approx R_{\max}$ наступает "насыщение" скорости счета N : при дальнейшем увеличении толщины образца будет регистрироваться одна и та же скорость счета N .

Насыщенным слоем для бета-излучения называют слой радиоактивного образца, при дальнейшем увеличении толщины которого не происходит увеличение потока бета-частиц (или скорости счета N). Практически толщина насыщенного слоя $d_{\text{нас}}$ равна максимальной величине пробега R_{\max} бета-частиц в данном веществе.

На рисунке 44 графически изображена зависимость скорости счета N от толщины образцов d . На оси абсцисс (горизонтальная ось) в условном масштабе отложены толщины образцов d в г/см^2 , а на оси ординат (вертикальная ось) – соответствующие скорости счета N в имп/мин.

В отсутствие самопоглощения бета-излучения зависимость между скоростью счета N (или активностью) и толщиной образца d должна быть выражена прямой, так как общая активность пропорциональна толщине радиоактивного образца. На самом деле измеренная скорость счета N (активность), начиная с некоторой толщины будет меньше ожидаемой, и эта разница будет увеличиваться с ростом толщины образца (рис.43, образец 1). Если мы обратимся к рис. 44, то заметим, что

измеренная скорость счета N для третьего образца меньше, чем теоретически ожидаемая.

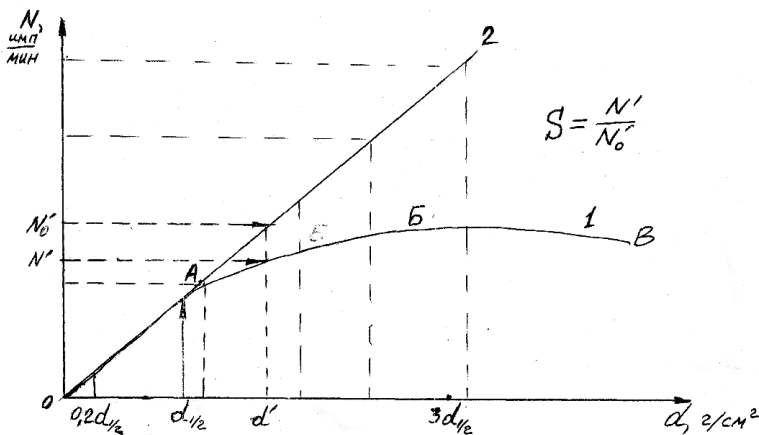


Рис. 44. Кривая самопоглощения бета-излучения.

Для четвертого и пятого образцов эта величины будут еще в большей степени отличаться от теоретически ожидаемых. Наблюдается, что в дальнейшем скорость счета N не меняется, как бы ни была велика толщина образца. При этом измеряется излучение только верхних слоев. Отклонение полученной кривой от теоретически ожидаемой прямой указывает на наличие эффекта самопоглощения.

Необходимо отметить, что ослабление бета-излучения в веществе радиоактивного образца является сложной комбинацией эффектов самопоглощения и саморассеяния. Кривая самопоглощения 1 учитывает не только истинное поглощение бета-частиц в веществе образца в результате полной потери ими своей энергии, но и их рассеяние в веществе образца, приводящее к изменению потока частиц в данном телесном угле счетчика.

Поправка на самопоглощение. Для учета эффекта самопоглощения вводят коэффициент самопоглощения S . **Коэффициент самопоглощения S** – это отношение скорости счета образца данной толщины d к скорости счета непоглощающего образца. Если обозначить соответствующие скорости счета после введения поправок на мертвое время и фон через N и N_0 , то коэффициент самопоглощения равен

$$S = N/N_0. \quad (1)$$

По экспериментальному графику, аналогичному рис. 44, для любой толщины образца d можно найти значение коэффициента S как отношение ординат соответствующих точек на кривой 1 и прямой 2. Если величина коэффициента самопоглощения S в идентичных условиях опыта известна, то ее вводят в результаты конкретного измерения скорости счета образца по формуле

$$N_0 = N/S. \quad (2)$$

Величина коэффициента самопоглощения кроме толщины образца зависит также от атомного номера вещества образца и максимальной энергии бета-частиц. Точный вид зависимости коэффициента S от указанных факторов пока не установлен, поэтому учет самопоглощения при измерении активности образцов (в тех случаях, когда это необходимо делать) должен быть проведен путем опытного определения коэффициента S для каждого изучаемого радионуклида в отдельности, причем именно в том веществе (соединении), с которым предполагается работать, так как образцы, подлежащие исследованию, могут быть в виде как кристаллического осадка, так и пористой массы, а иногда и жидкости.

Экспериментальное определение коэффициента самопоглощения производится способом, аналогичным рассмотренному выше. Берутся радиоактивные образцы разной толщины, но имеющие одну и ту же удельную активность. При этом необходимо соблюдать условие, чтобы все образцы имели одинаковую площадь и равномерное распределение радионуклидов в образце. Зависимость измеренной скорости счета от толщины образца в этом случае изобразится графически кривой. Истинной скорости счета на том же графике будет соответствовать прямая линия, проходящая через начало координат, поскольку скорость счета образцов с одинаковой удельной активностью пропорциональна толщине образца. Поэтому к полученной кривой самопоглощения необходимо провести касательную в начале координат (то есть к начальной части экспериментальной кривой), по которой будет определяться N_0 – истинная скорость счета для каждой толщины образца. Отношение ординат экспериментальной кривой и касательной прямой будет давать величину коэффициента самопоглощения S , определяемую по формуле (1).

Данный метод определения коэффициента S , а затем и введения поправки на самопоглощение, определяемой по формуле (2), довольно

прост, но является весьма приближенным. Из-за рассеяния бета-частиц в образце форма кривой самопоглощения становится сложной, и практически затруднительно точно определить направление касательной, так как касательная на участке ОА (рис.2) оказывается в то же время и секущей. Это связано с тем, что при толщине образцов $d \approx (3-10\%) \cdot R_{\max}$ кривая 1 идет несколько выше прямой 2 (на рисунке это не показано), что соответствует увеличению скорости счета N по сравнению с истинным значением ($N > N_0$). Этот эффект объясняется фокусирующим действием вещества образца, то есть рассеянием бета-частиц, приводящим к увеличению числа частиц, направленных в сторону счетчика. При увеличении толщины образца эффект самопоглощения перекрывает эффект саморассеяния – кривая идет ниже прямой,

Следовательно, достоверность графического определения коэффициента S ограничивается трудностями проведения касательной к кривой самопоглощения. Поэтому данный метод нельзя применять, если необходимо более точно определить поправку на самопоглощение.

В этом случае пользуются следующим способом. Изготавливают серию образцов **одинаковой** общей активности, но различной толщины. Таким образом, удельная активность ($a_m = A/m$) образцов в этом случае является величиной переменной. Это достигается, например, путем подмешивания неактивного вещества – носителя – к образцам одинаковой активности. Проводят ряд измерений, начиная с самого тонкого образца, вводят поправки на мертвое время и фон. Результаты измерений изображают в виде графика (рис.45). По оси абсцисс – (горизонтальная ось) откладывается толщина образца d ($\text{г}/\text{см}^2$), а по оси ординат (вертикальная ось) – соответствующие значения скорости счета N (имп/мин). Вследствие влияния различных взаимно компенсирующихся факторов получающаяся кривая имеет почти линейный вид и может быть с достаточной степенью точности экстраполирована (продолжена) на нулевую толщину образца ($d=0$). Пересечение экстраполированной кривой с осью ординат даст скорость счета N_0 , соответствующую случаю полного отсутствия эффекта самопоглощения.

Далее на основе полученных данных и найденной скорости счета N_0 строится кривая зависимости коэффициента самопоглощения S (отношение измеренной скорости счета N к истинной скорости счета N_0) от толщины образцов d . По такому графику (рис. 46) непосредственно определяется поправка на самопоглощение, что более точно, чем в первом методе, особенно при наличии образцов большой удельной активности.

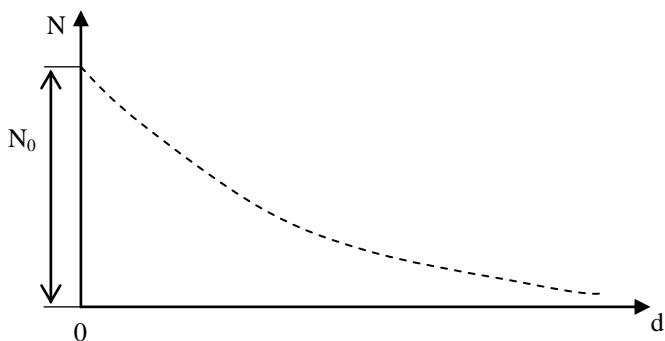


Рис. 45. Зависимость d от N .

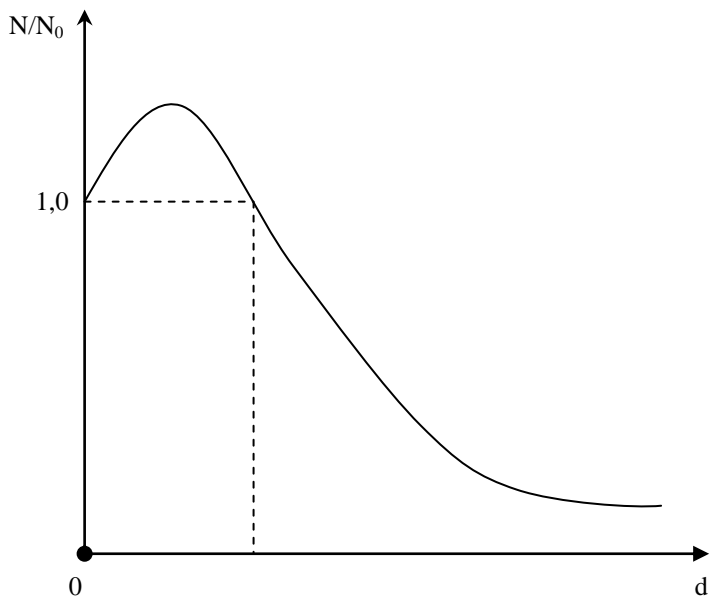


Рис. 46. Зависимость коэффициента самопоглощения S от толщины образца d .

Преимущества рассмотренного метода особенно проявляются для образцов толщиной $d \approx 3-10\% \cdot R_{\max}$ (рис. 45, участок OA). Полученная кривая в этой области имеет отчетливо выраженный максимум, обусловленный рассеянием бета-частиц в веществе образца и увеличени-

ем тем самым числа частиц, направленных в сторону счетчика. Этот эффект был замаскирован в ранее рассмотренном методе, что создавало неопределенность и уменьшало точность определения поправки в данном интервале толщин.

Введение поправки на самопоглощение в зависимости от толщины образца. По толщине радиоактивные образцы делят на **тонкослойные, средние (промежуточные) и толстослойные (бесконечно толстые)**.

Толстослойным образцом называется образец такой толщины, дальнейшее увеличение которой не приводит к увеличению выхода бета-частиц, поступающих из нижних слоев этого образца. Экспериментально установлено, что практически рост выхода бета-частиц прекращается при толщине слоя, равной утроенному значению слоя половинного ослабления вещества образца, то есть $d=3 \cdot d_{1/2}$.

Слоем половинного ослабления $d_{1/2}$ называют слой вещества, ослабляющий бета-излучение вдвое.

Тонкослойные образцы должны иметь возможно меньшую толщину которая ориентировочно лежит в пределах $0 < d < d_{1/2}$. Образцами **промежуточной толщины** принято называть такие образцы, толщина которых лежит в пределах между тонко- и толстослойными образцами.

Если обратиться к рис.44, то кривую самопоглощения можно разбить на 3 участка: ОА, АВ и ВВ. Соответствующие этим участкам образцы называют тонкими, промежуточными и толстыми.

Участок ОА характерен для тонких образцов, то есть $0 < d < d_{1/2}$. Поправку на самопоглощение для тонких образцов вводят описанными выше экспериментальными методами. При работе с очень тонкими образцами, для которых толщина составляет $0 < d < 0,2 \cdot d_{1/2}$, как правило, поправку вводить не нужно ($S=1$), так как эффекты рассеяния и самопоглощения на таких толщинах сказываются очень слабо. Однако, если требуется высокая точность ($< 1\%$), то пренебрегать самопоглощением можно лишь при толщине $d=0,01 \cdot d_{1/2}$.

Участок АВ кривой самопоглощения обычно более протяженный, чем показано на рис.44. Эта часть кривой отвечает самопоглощению в промежуточных образцах, толщина которых находится в широком интервале $d_{1/2} < d < 3 \cdot d_{1/2}$ (можно встретить $d_{1/2} < d < R_{\max}$, так как $3 \cdot d_{1/2} \approx R_{\max}$). Поправку на самопоглощение для промежуточных образцов можно также найти по графику вышеуказанными методами. Достоверность графического определения коэффициента S и в этом

случае ограничивается трудностями при проведении касательной к кривой самопоглощения.

Значение поправки на самопоглощение в интервале АБ можно получить и теоретически, если исходить из экспоненциального закона поглощения бета-частиц в веществе. Эта формула (вывод ее не приводится) имеет вид

$$S = \frac{N}{N_0} = \frac{1 - e^{-\mu d}}{\mu d}, \quad (3)$$

где μ – массовый коэффициент ослабления бета-излучения в веществе, $\text{см}^2/\text{г}$;

d – толщина образца, $\text{г}/\text{см}^2$.

Если учесть, что $\mu = 0,693/d_{1/2}$, то формулу (3) можно записать в виде

$$S = \frac{d_{1/2}}{0,693 \cdot d} \left(1 - 2^{-\frac{d}{d_{1/2}}} \right), \quad (4)$$

где $d_{1/2}$ – слой половинного ослабления для бета-излучения данной энергии, $\text{г}/\text{см}^2$;

d – толщина образца, $\text{г}/\text{см}^2$.

При $(d/d_{1/2}) > 4$ можно пренебречь вторым членом, стоящим в скобках, так как он в этом случае стремится к нулю. Тогда выражение (4) для коэффициента поглощения S упрощается и имеет вид

$$S = \frac{d_{1/2}}{0,693 \cdot d}. \quad (5)$$

Величина $d_{1/2}$, входящая в формулу (4) или (5), должна определяться экспериментально в процессе измерения скорости счета (активности) исследуемого образца. Необходимость измерения $d_{1/2}$ для каждого образца обусловлена тем, что слой половинного ослабления зависит от энергии бета-частиц, а следовательно, и от "возраста" радиоактивного образца. Полагая эффективный атомный номер алюминиевого фильтра (тонкой пластины) примерно равен эффективному атомному номеру вещества, образца, величину $d_{1/2}$ можно определить по данным двух измерений, одно из которых произведено с фильтром, другое – без фильтра.

Скорость счета от образца с фильтром N_ϕ и скорость счета от образца без фильтра N связаны между собой соотношением

$$N_\phi = N \cdot e^{-\mu_\phi d_\phi},$$

где μ_ϕ - массовый коэффициент ослабления фильтра, $\text{см}^2/\text{г}$;
 d_ϕ - толщина фильтра, $\text{г}/\text{см}^2$.

Учитывая связь $\mu_\phi = 0,693/d_{1/2}$.

$$N_\phi = N \cdot e^{-0,693d_\phi / d_{1/2}},$$

откуда

$$\frac{N_\phi}{N} = e^{-0,693d_\phi / d_{1/2}} \quad \text{или} \quad \frac{N}{N_\phi} = e^{0,693d_\phi / d_{1/2}}.$$

Произведя логарифмирование этого выражения, получим:

$$\ln \frac{N}{N_\phi} = 0,693 \frac{d_\phi}{d_{1/2}}, \quad \text{откуда} \quad d_{1/2} = \frac{0,693}{\ln(N/N_\phi)}. \quad (6)$$

Если использовать это соотношение, то формула (5) примет вид:

$$S = \frac{d_\phi}{d \cdot \ln(N/N_\phi)}. \quad (7)$$

Однако формулы (3), (4) и (7) не учитывают рассеяние бета-излучения в образце и могут внести погрешность в определение активности до 10-20% за счет неучета саморассеяния. Экспериментальные исследования показывают, что изменение потока бета-частиц за счет эффектов самопоглощения и саморассеяния в веществе образца в телесном угле, меньшем 2π , не подчиняется экспоненциальной зависимости. Это особенно проявляется для образцов толщиной $d > 3 \cdot d_{1/2}$ и объясняется возрастающим влиянием многократного рассеяния бета-частиц. Если для тонкослойных образцов бета-излучение можно считать изотропным (равномерно распределенным по всем уг-

лам вылета), то по мере увеличения толщины активного слоя изотропное распределение частиц нарушается в сторону роста числа бета-частиц, вылетающих по направлениям, близким к нормали (перпендикуляр) на поверхность образца. Поэтому фактическая поправка на самопоглощение в образце зависит от телесного угла (геометрического фактора ω), в пределах которого бега-частицы попадают в чувствительный объем счетчика.

Для образцов толщиной $d \geq (2 \div 3) \cdot d_{1/2}$ анизотропия бета-излучения приводит к тому, что коэффициент S отличается от величины, рассчитанной по формуле (4), и определяется выражением

$$S = \xi \cdot \frac{d_{1/2}}{0,693 \cdot d} \left(1 - 2^{-\frac{d}{d_{1/2}}} \right), \quad (8)$$

$$\text{где } \xi = 1 + 0,8 \cdot \cos(\alpha/2). \quad (9)$$

Здесь $\xi \geq 1$ – коэффициент саморассеяния (поправка на саморассеяние), то есть дополнительный множитель, учитывающий влияние не изотропного распределения бета-частиц на скорость счета; $\alpha/2$ – половинная апертура торцового счетчика (рис. 5). Формула (9) справедлива (с ошибкой 10%) при условии $d \geq 3 \cdot d_{1/2}$ и для образцов, радиус которых не превышает половины радиуса окна торцового счетчика. Если вспомнить (работа "Влияние геометрического фактора на регистрацию бета-излучения), что геометрический фактор K для торцового счетчика связан с углом $\alpha/2$ формулой $\omega = 0,5 \cdot (1 - \cos(\alpha/2))$, то получим $\omega = 0,5 - 0,5 \cdot \cos(\alpha/2)$, откуда $\cos(\alpha/2) = 1 - 2 \cdot \omega$. Тогда, подставляя в формулу (9), имеем:

$$\xi = 1 + 0,8 \cdot (1 - 2 \cdot \omega) = 1,8 - 1,6 \cdot \omega, \quad (10)$$

причем $0 \leq \omega \leq 0,05$. Из формулы (10) следует, что чем меньше геометрический фактор ω , тем больше коэффициент саморассеяния ξ , то есть относительно больше частиц попадает в счетчик по сравнению с тонким образцом, для которого $\xi = 1$.

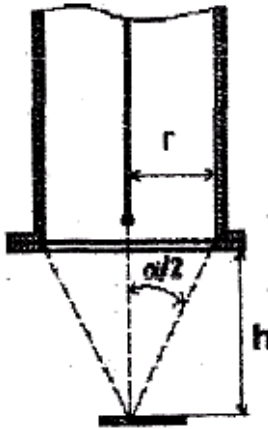


Рис. 47. Поправка на саморассеяние.

Для предельного случая, когда образец помещают вплотную к окну счетчика (телесный угол $\Omega=2 \cdot \pi$ и $\omega=0,5$), получим $\xi=1$ и, следовательно, учитывается только коэффициент самопоглощения S . Это и понятно: в условиях "2 π -геометрии" независимо от углового распределения бета-частиц, выходящих из поверхности образца в верхнюю полусферу, все они попадут в эффективный телесный угол счетчика. Если же образец толщиной $d \geq (2 \div 3) \cdot d_{1/2}$ находится на большом расстоянии h от окна счетчика, то геометрический фактор очень мал ($\omega \rightarrow 0$) и, следовательно, $\xi=1,8$, то есть коэффициент самопоглощения ($S \cdot \xi=1,8 \cdot S$) будет почти вдвое превышать величину, рассчитанную по формуле (4).

В табл. 17 приведены значения фактора саморассеяния ξ в зависимости от отношения h/r , где h – расстояние от образца до границы чувствительного объема счетчика, а r – радиус окна счетчика (рис. 47).

Т а б л и ц а 17. Коэффициент саморассеяния ξ

h/r	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,5	2,0	3,0	7,0
ξ	1,16	1,30	1,40	1,50	1,57	1,67	1,71	1,76	1,80

В табл. 18 даны рассчитанные по формуле (4) значения фактора самопоглощения в зависимости от отношения $d/d_{1/2}$.

Т а б л и ц а 18. Коэффициент самопоглощения S

d/d _{1/2}	S	d/d _{1/2}	S	d/d _{1/2}	S	d/d _{1/2}	S
0,01	0,995	0,20	0,935	2,0	0,540	7,0	0,205
0,02	0,992	0,30	0,903	2,5	0,476	7,5	0,192
0,03	0,989	0,40	0,874	3,0	0,421	8,0	0,180
0,04	0,986	0,50	0,845	3,5	0,376	8,5	0,169
0,05	0,982	0,60	0,818	4,0	0,339	9,0	0,159
0,06	0,979	0,70	0,793	4,5	0,307	9,5	0,151
0,07	0,976	0,80	0,768	5,0	0,281	10,0	0,143
0,08	0,973	0,90	0,744	5,5	0,257	12,0	0,120
0,09	0,970	1,00	0,721	6,0	0,237	14,0	0,103
0,10	0,966	1,50	0,621	6,5	0,220	15 и более	d _{1/2} / 0,693

Таким образом, если требуется определить действительную поправку S на самопоглощение с учетом саморассеяния для некоторого образца толщиной $d \geq (2 \div 3) \cdot d_{1/2}$, следует воспользоваться формулой (8), подставив в нее значение ξ , рассчитанное по формуле (10). Скорость счета N_0 в этом случае находится по формуле (2). Либо необходимо взять из таблиц 17 и 18 значения коэффициентов саморассеяния E, и самопоглощения S для конкретных условий измерения. В итоге - с учетом самопоглощения и исправлением на саморассеяние бета-излучения, скорость счета будет равна

$$N_0 = \frac{N}{S \cdot \xi}. \quad (11)$$

Отметим, что для получения на практике более точных результатов следует отдать предпочтение экспериментальному методу определения поправки на самопоглощение с учетом саморассеяния для образцов промежуточной толщины.

Участок БВ кривой самоослабления называют участком "**насыщения**". Здесь скорость счета N не зависит от толщины образца **d** и является постоянной величиной $N = \text{const}$. Этот участок характерен для $d \geq R_{\text{max}}$ ($d \geq 3 \cdot d_{1/2}$) – "**бесконечно толстых**" образцов. Факт "насыщения" объясняется тем, что счетчик не регистрирует бета-частицы из слоев образца, лежащих на глубинах больше, чем R_{max} . Практически уже при $d \approx 0,75 \cdot R_{\text{max}}$ скорость счета достигает "насыщения".

Методом "бесконечно толстых" образцов можно с успехом пользоваться при **относительных измерениях активности**. Пусть два однородных толстослойных образца толщиной d_1 и d_2 (г/см^2) и одинаковой площадью S (см^2) имеют удельные активности a_1 и a_2 (Бк/г) и дают скорости счета соответственно N_1 и N_2 . Очевидно, что эти скорости счета определяются активностью одинаковых "насыщенных" слоев ($d \approx R_{\text{max}}$) того и другого образцов. Поскольку эти слои имеют одну и ту же массу t , то скорости счета пропорциональны удельной активности сравниваемых образцов:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{a_1}{a_2}.$$

И, наоборот, удельные активности толстослойных образцов относятся как соответствующие скорости счета, измеренные в идентичных условиях:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Для определения удельной активности толстослойного образца, а на практике часто применяют метод сравнения с эталонным толстослойным образцом, удельная активность которого $a_{\text{эт}}$ заранее известна и их энергетические спектры бета-излучения совпадают. Измерения соответствующих скоростей счета N и $N_{\text{эт}}$ проводят в одинаковых условиях и на одном и том же счетчике. Удельную активность находят по соотношению:

$$a = a_{\text{эт}} \cdot \frac{N_1}{N_{\text{эт}}}.$$

При этом площадь образцов S должна быть одинаковой, а толщина d и, следовательно, масса m образца и эталона могут быть различными, лишь бы соблюдалось условие $d \geq R_{\text{max}}$.

Метод "бесконечно толстых" образцов позволяет определить и соотношение **активностей** сравниваемых образцов. Так как активность образца $A = a \cdot m = a \cdot d \cdot S$, то получим

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{a_1 \cdot d_1 \cdot S}{a_2 \cdot d_2 \cdot S} = \frac{N_1 \cdot d_1}{N_2 \cdot d_2}. \quad (12)$$

Следовательно, если оба образца имеют одинаковую толщину, то их активности относятся как соответствующие скорости счета и, наоборот, при одинаковых скоростях счета активности образцов относятся как их толщины.

Метод "бесконечно толстых" образцов чрезвычайно прост и поэтому часто применяется при сравнительных (относительных) измерениях активности проб.

Итак, в зависимости от толщины образцов необходимо использовать тот или иной метод введения поправки на самопоглощение.

Обычно рекомендуется» вести работу либо с очень тонкими образцами ($d < 0,2 \cdot d_{1/2}$), для которых можно пренебречь эффектами самопоглощения, либо с образцами, толщина которых является "бесконечно большой" ($d > R_{\max}$).

Если по условиям опыта образцы имеют промежуточную толщину ($d_{1/2} < d < R_{\max}$), то поправка определяется формулой (3) или (7), либо путем предварительного эксперимента и построения графика самопоглощения.

Поправка на самопоглощение особенно существенна для радионуклидов, испускающих **мягкое** бета-излучение. Например, для ^{14}C ($d_{1/2} = 2,7 \text{ мг/см}^2$) при $d = 0,2 \cdot d_{1/2} = 0,54 \text{ мг/см}^2$ отношение N_0/N составляет по данным конкретного опыта $-1,06$, а при $d = 4 \text{ мг/см}^2$ $N_0/N = 1,58$. Если же по условию опыта требуется, чтобы самопоглощение не превосходило 1% от скорости счета, то в случае ^{14}C толщина образца не должна превышать 25 мкг/см^2 ($d \approx 0,01 \cdot d_{1/2}$), т.е. образцы должны быть практически "невесомыми".

Для жесткого бета-излучения, например ^{32}P , поправку на самопоглощение можно не принимать во внимание вплоть до толщин образцов порядка $10\text{-}20 \text{ мг/см}^2$, допуская при этом ошибку в 4-6%. При $d = 1 \text{ мг/см}^2$ поправка составляет менее 1% от скорости счета. Изготовление таких образцов на практике не представляет труда.

Отсюда ясно, что для жесткого бета-излучения удобнее пользоваться методом "очень тонких образцов", в то время как метод "бесконечно толстых образцов" находит применение для радионуклидов, обладающих бета-излучением малой энергии.

И, наконец, поправку на самопоглощение вообще не нужно вводить в случае одинаковой толщины (г/см^2) всех измеряемых образцов, если

речь идет о сравнении их активностей (относительные измерения). Это, однако, относится к образцам, содержащим один и тот же радионуклид и измеряемым в тождественных условиях. Форма кривой самопоглощения зависит от конкретных условий измерения: взаимного расположения образца и счетчика, материала подложки и т.д., и нарушение стандартизации условий в течение измерений всей серии образцов влечет за собой различие в величине самопоглощения.

Особо важным является учет поправки на самопоглощение при относительных измерениях активности образцов, содержащих различные радионуклиды, например ^{90}Sr и ^{45}Ca , ^{32}P и ^{137}Cs и т.п. Игнорирование эффекта самопоглощения в этих случаях приводит к ошибочным результатам.

Рассмотрим несколько конкретных примеров.

Пример 1. Необходимо ли учитывать поправки на самопоглощение при относительных измерениях активности двух образцов ^{32}P , представляющих собой осадки массой 40 мг и 60 мг, равномерно распределенные на чашечках диаметром 2 см. Для бета-излучения ^{32}P принять $d_{1/2}=115 \text{ мг/см}^2$.

Решение. Площадь образцов $S=\pi \cdot r^2=3,14 \text{ см}^2$. Толщина (поверхностная плотность) образцов $d=m/S$, поэтому $d_1=40/3,14=12,7 \text{ мг/см}^2$ и $d_2=60/3,14=19,1 \text{ мг/см}^2$. Получили, что $d_1 < 0,2 \cdot d_{1/2}$ и $d_2 < 0,2 \cdot d_{1/2}$, следовательно, оба образца являются "очень тонкими" и поправку на самопоглощение вводить не нужно ($S=1$).

Пример 2. Пусть сравниваются активности двух образцов, один из которых содержит радионуклид ^{33}S , а другой – ^{32}P . Оба образца представляют собой осадки по 0,1 г, равномерно распределенные по площади 5 см^2 . Найти отношение активностей данных образцов, если скорости счета составляют: $N(^{33}\text{S})=200$, $N(^{32}\text{P})=500$ имп/мин. Учтеть, что для ^{35}S : $d_{1/2} = 3 \text{ мг/см}^2$, $R_{\text{max}}=21 \text{ мг/см}^2$, $\mu=0,230 \text{ см}^2/\text{мг}$; для ^{32}P : $d_{1/2}=115 \text{ мг/см}^2$, $R_{\text{max}} = 780 \text{ мг/см}^2$, $\mu = 0,006 \text{ см}^2/\text{мг}$.

Решение. Для обоих образцов $d = 100/5=20 \text{ мг/см}^2$. В случае ^{35}S ($3 < d < 21$) образец промежуточный, и необходимо вводить поправку по формуле:

$$N_0 = \frac{N}{S} = 200 \cdot \frac{\mu d}{1 - e^{-\mu d}} = 200 \cdot \frac{4,6}{0,99} = 930 \text{ имп/мин.}$$

Для бета-излучения ^{32}P образец является очень тонким ($d < 0,2 \cdot d_{1/2}$) и поправку можно не учитывать (с погрешностью $\sim 6\%$). Таким образом, отношение активностей (скоростей счета) составляет:

$$\frac{N_0(^{35}S)}{N_0(^{32}P)} = \frac{930}{500} = 1,86.$$

Без учета самопоглощения это отношение было бы равно 0,4, что могло привести, например, к ошибочному выводу о степени поступления серы и фосфора в исследуемые объекты.

Пример 3. Имеются два образца, содержащие ^{45}Ca ($d_{1/2}=5,5$ мг/см², $\mu = 0,13$ см²/мг, $R_{\max} = 57$ мг/см²). Образцы представляют собой срезы костной ткани площадью 2,5 см² и массой $m_1=300$ мг и $m_2=1200$ мг. Определить относительное содержание ^{45}Ca в пробах, если: а) $N_1=N_2$; б) $N_1=6000$ имп/мин, $N_2=500$ имп/мин.

Решение. Оба образца являются "бесконечно толстыми", так как $d_{1/2}=m_1/S=300/2,5=120$ мг/см² и $d_2=m_2/S=500/2,5=480$ мг/см², и, следовательно, выполняется условие $d > R_{\max}$. В этом случае можно произвести сравнение активностей образцов соотношением (12). Для условия а):

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{N_1 \cdot d_1}{N_2 \cdot d_2} = 1 \cdot \frac{120}{480} = \frac{1}{4}.$$

Для условия б):

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{N_1 \cdot d_1}{N_2 \cdot d_2} = \frac{6000 \cdot 120}{500 \cdot 480} = 3.$$

Пример 4. Исследуемый образец почвы, содержащий ^{32}P , в виде сухой навески массой $m=361$ мг помещен на алюминиевую чашечку диаметром 1 см ($S=0,785$ см²). Образец находится на расстоянии $h=2,5$ см от чувствительного объема торцового счетчика СИЗБ с радиусом окна $r=1,25$ см. Скорость счета образца составляет $N=1000$ имп/мин. Найти истинную скорость счета N_0 . Для ^{32}P принять $d_{1/2}=115$ мг/см² и $R_{\max}=780$ г/см².

Решение. Прежде всего определим толщину образца $d=m/S=361/0,785=460$ мг/см². Выполняется условие $d_{1/2}<d<R_{\max}$ и образец является промежуточным. При отсутствии экспериментального графика самопоглощения можно поправку определить аналитически. Так как образец относится к промежуточным, то необходимо учитывать поправку на саморасеяние ξ . Исходя из того, что $h/r = 2$, по табл.

1 находим $\xi=1,71$. По таблице 2, учитывая отношение $d/d_{1/2}=460/115=4$, находим $S=0,339$. Подставляя найденные значения в формулу (11), имеем:

$$N_0 = \frac{1000}{0,39 \cdot 1,71} = 1724 \text{ имп/мин.}$$

Задание 1. Определение зависимости между толщиной образца и количеством регистрируемых бета-частиц и поправки на самопоглощение в зависимости от толщины образца.

Приборы и материалы:

1. Радиометр КРВП-3АБ;
2. Соль хлористого калия;
3. Набор листов фильтровальной бумаги, пропитанных радиоактивным раствором одинаковой активности;
4. Миллиметровая бумага, линейка;
5. Плексигласовый трамбователь, стеклянная воронка, фарфоровая чашка, фильтровальная бумага;
6. Торсионные или аналитические весы;
7. Калькулятор.

Выполнение работы:

1. Включите и подготовьте радиометр к работе;
2. Проверьте правильность работы пересчетного блока;
3. Измерьте фон счетчика в течение 10 минут;
4. Определите скорость счета фона N_{ϕ} по формуле: $N_{\phi}=n_{\phi}/t_{\phi}$;
5. отвесьте 10 г хлористого калия и всю навеску высыпьте в кювету (если работа производится с кюветами малого диаметра, навеску в кювету пересыпайте с помощью воронки). Аккуратным постукиванием равномерно распределите навеску по дну кюветы;
6. Установите кювету с навеской на верхнюю позицию и измерьте скорость счета в течение 10-20 минут. Число зарегистрированных импульсов n запишите в табл. 19.

Замечание: Время отдельного измерения определяется статистической точностью регистрируемого числа импульсов, которая для данной работы не должна быть ниже 1%, то есть $n>10000$ имп;

7. Рассчитайте толщину образца d как отношение массы навески m к площади дна кюветы S , то есть $d=m/S$ в г/см^2 . Полученные значения с точностью до трех знаков после запятой запишите в табл. 19;

Примечание. Площадь дна круглой кюветы определяется по формуле $S=\pi r^2$. Для кюветы, используемой при радиометрических измерениях на КРВП-3АБ, диаметр составляет 8,7 см и $S=59,42 \text{ см}^2$.

8. Рассчитайте скорость счета $N=n/t$, введите поправку на мертвое время счетчика (если это необходимо). Результаты расчетов запишите в табл. 19;

9. Определите скорость счета образца без фона $N_{об}=N-N_{ф}$. Полученный результат запишите в табл. 19;

Таблица 19. Самопоглощение бета-излучения ^{40}K в образцах КС1 разной толщины d при постоянной удельной активности.

Суммарная масса образца m , г	Суммарная толщина образца d , г/см ²	Время измерения t , мин	Кол-во зарегистрированных импульсов n	Скорость счета N , имп/мин	Скорость счета без фона $N_{об}$, имп/мин
10					
20					
...					
...					

10. Отвесьте навеску 10 г хлористого калия и досыпьте ее в ту же кювету, равномерно распределяя по дну;

11. Повторите пункты 6-9. Начиная с третьей навески, образец после разравнивания следует аккуратно уплотнить трамбователем для уменьшения ошибки, вносимой изменением геометрического фактора. Воронку и трамбователь после употребления каждый раз необходимо помещать в фарфоровую чашку. Измерения необходимо проводить до тех пор, пока число регистрируемых импульсов не перестанет увеличиваться (примерно 7 измерений). Измерения с повторяющимися в пределах ошибок результатами свидетельствуют о достижении слоя насыщения;

12. Постройте график зависимости скорости счета $N_{об}$ от суммарной толщины образца d . По оси ординат (вертикальная ось) отложите скорость счета $N_{об}$ в имп/мин, по оси абсцисс – суммарную толщину d в г/см². Масштаб выберите сами, исходя из полученных результатов. Кривая самопоглощения проводится так, чтобы усреднить имеющийся разброс точек;

13. Проведите касательную к кривой самопоглощения. Определите слой половинного ослабления $d_{1/2}$ образца.

14. Пользуясь полученными графиками, определите истинную скорость счета N_0 (в отсутствие самопоглощения) для образцов толщиной 250 мг/см^2 и 500 мг/см^2 (или для образцов других толщин, указанных преподавателем);

15. Используя формулу (1), определите коэффициент самопоглощения $S_{\text{экс.}}$;

16. На основании полученной кривой самопоглощения сделайте вывод о том, при какой толщине образцы, содержащие ^{40}K , будут являться толстослойными.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается эффект самопоглощения бета-излучения в веществе?

2. Дайте определение насыщенного слоя для бета-излучения.

3. Как соотносятся толщина насыщенного слоя и максимальная величина пробега бета-частиц в данном веществе?

4. Что называется коэффициентом самопоглощения?

5. Как определить по кривой самопоглощения величину коэффициента самопоглощения?

6. Поясните, чем отличается эффект самопоглощения от эффекта саморассеяния?

7. Какие экспериментальные методы определения коэффициента самопоглощения вы знаете?

8. Как называются радиоактивные образцы в зависимости от их толщины?

9. Что называется слоем половинного ослабления бета-излучения в веществе?

10. Какие радиоактивные образцы являются толстослойными?

11. Какие радиоактивные образцы относятся к тонкослойным?

12. Кагаче радиоактивные образцы относятся к очень тонким?

13. Какие радиоактивные образцы являются промежуточными?

14. При толщине каких радиоактивных образцов и в каких случаях не вводится поправка на самопоглощение?

15. Можно ли рассчитать поправку на самопоглощение теоретически? Если да, приведите формулу.

16. Как определить экспериментально слой половинного ослабления с помощью фильтра?

17. В каком случае учитывается и коэффициент саморассеяния?

18. Какой метод используется при относительных измерениях активности радиоактивных образцов?
19. Какой метод измерения активности используется в зависимости от вида бета-излучения (для мягкого и для жесткого бета-излучения)?
20. Как изготовить тонкослойный образец?
21. Как изготовить толстослойный образец?

ЛИТЕРАТУРА

О с н о в н а я

1. Альфа-, бета- и гамма- спектроскопия. Под. ред. К. Зигмана. Перев. с англ. Вып. 1. М., Атомиздат, 1968.
2. Альфа-, бета- и гамма- спектроскопия. Под. ред. К. Зигмана. Перев. с англ. Вып. 2. М., Атомиздат, 1968.
3. Абрамов А.И. и др. Основы экспериментальных методов ядерной физики: Учеб. пособие для вузов./А.И. Абрамов, Ю.А. Казанский, Е.С. Матусевич. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 488 с.: ил.
4. Бударков В. А. и др. Радиобиологический справочник / В.А. Бударков, В.А. Киршин, А.Е. Антоненко. – Мн.: Ураджай, 1992. – 336 с.: ил.
5. В.И. Калашникова, М.С. Козодаева. Экспериментальные методы ядерной физики. Под редакцией М.С. Козодаева. Издательство «Наука», главная редакция физико-математической литературы. – Москва 1966.
6. В. Бочкарев, и Кеирим-Маркус, М. Львова, Я. Пруслин. Измерение активности источников бета- и гамма- излучений. Издательство академии наук СССР, Москва 1953.
7. Измерение активности нуклидов. Караваяев Ф.М. М., Издательство стандартов, 1972.
8. Лабораторный практикум по экспериментальным методам ядерной физики: Учеб. пособие для вузов/ В.В. Аверкиев, Н.Н. Беглядов, Т.А. Горюн и др. , под ред. К.Г. Финогонова. М.: Энергоатом издат, 1986. 432 с.: ил.
9. Макаров. В.И. Блоки детектирования ионизирующих излучений. Под. ред. Е. А. Левандовского. М., Атомиздат, 1972, с. 72, с иллост.
10. Максимов М.Т., Оджагов Г.О. Радиоактивные загрязнения и их измерение: Учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 304 с.: ил.
11. Медведев М.Н. Сцинтилляционные детекторы. М., Атомиздат, 1977, 136 с.
12. Низкофононая радиометрия /А.К. Лаврухина, В.А. Алексеев, В.Д. Горин, А.И. Ивлиев. – М.: Наука, 1992. – 259 с.
13. Основы сельскохозяйственной радиологии / Б.С. Пристер, Н.А. Лошилов, О.Ф. Немец, В.А. Поярков. – К.: Урожай, 1988. – 256 с.: ил.
14. Радиометрия / В.И. Баранов. Издание второе, исправленное. Издательство академии наук СССР. – Москва, 1956.
- Рачинский В.В. курс основ атомной техники в сельском хозяйстве: Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Атомиздат, 384 с.
15. Руководство по методам контроля за радиоактивностью окружающей среды / Под. ред. И.А. Соболева, Е.Н. Беляева. – М.: Медицина, 2002. – 432 с.: ил.
17. Счетчики излучений / Э. Фюнфен, Г. Нейерт. Государственное издательство литературы в области атомной науки и техники. - Москва, 1961.
18. Техника измерения радиоактивных излучений / В. Кмент, А. Кун. Издательство «Наука». – Москва, 1964.

Д о п о л н и т е л ь н а я

19. Гамма-радиометр РКГ – 01; МКС - АТ1325; МКС – АТ1320. Руководство по эксплуатации. Минск, 2007.
20. Гамма- спектрометрия цезия-137.
21. Комплекс спектрометрии внутреннего излучения человека «СКРИНЕР».
22. КРВП – 3АБ. Техническое описание и инструкция по эксплуатации.
23. Методы и средства измерения стронция-90.
24. Методика экспрессного измерения объемной активности радона-222 в воде с помощью радиометра радона типа РРА.
25. Методика определения радионуклида (радона-222) в помещениях зданий и на строительных площадках МВИ.МН 1111-99.
26. Радиоактивные индикаторы в химии. Основы метода.
27. Радиоизотопы в почвоведении. Ф.А. Тихомиров.
28. Радиометр РКГ-01 «Алиот». Паспорт, Мн.: 1991.
29. Радон, учебно-методическое пособие. Лобан Д.И., Тушин Н.Н. Минск, 1997.
30. Радиационная безопасность. Г.А. Чернуха, Горки, 2005.
31. Научно-информационный журнал по радиационной безопасности. АНРИ, М.: 1994 – 2004.

Таблица значений функции Лапласа

z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$
0,00	0,0000	0,36	0,1406	0,72	0,2642	1,08	0,3599
0,01	0,0040	0,37	0,1443	0,73	0,2673	1,09	0,3621
0,02	0,0080	0,38	0,1480	0,74	0,2703	1,1	0,3643
0,03	0,0120	0,39	0,1517	0,75	0,2734	1,11	0,3665
0,04	0,0160	0,4	0,1554	0,76	0,2764	1,12	0,3686
0,05	0,0199	0,41	0,1591	0,77	0,2794	1,13	0,3708
0,06	0,0239	0,42	0,1628	0,78	0,2821	1,14	0,3729
0,07	0,0279	0,43	0,1664	0,79	0,2852	1,15	0,3749
0,08	0,0319	0,44	0,1700	0,80	0,2881	1,16	0,3770
0,09	0,0359	0,45	0,1736	0,81	0,2910	1,17	0,3790
0,08	0,0398	0,46	0,1772	0,82	0,2939	1,18	0,3810
0,11	0,0438	0,47	0,1808	0,83	0,2967	1,19	0,3830
0,12	0,0478	0,48	0,1844	0,84	0,2995	1,20	0,3849
0,13	0,0527	0,49	0,1879	0,85	0,3023	1,21	0,3869
0,14	0,0557	0,50	0,1915	0,86	0,3051	1,22	0,3883
0,15	0,0596	0,51	0,1950	0,87	0,3078	1,23	0,3907
0,16	0,0636	0,52	0,1985	0,88	0,3106	1,24	0,3925
0,17	0,0675	0,53	0,2019	0,89	0,3133	1,25'	0,3944
0,18	0,0714	0,54	0,2054	0,90	0,3159	1,26	0,3962
0,19	0,0753	0,55	0,2088	0,91	0,3186	1,27	0,3980
0,2	0,0793	0,56	0,2123	0,92	0,3212	1,28	0,3997
0,21	0,0832	0,57	0,2157	0,93	0,3238	1,29	0,4015
0,22	0,0871	0,58	0,2190	0,94	0,3264	1,30	0,4032
0,23	0,0910	0,59	0,2224	0,95	0,3289	1,31	0,4049
0,24	0,0948	0,60	0,2257	0,96	0,3315	1,32	0,4066
0,25	0,0987	0,61	0,2291	0,97	0,3340	1,33	0,4082
0,26	0,1026	0,62	0,2324	0,98	0,3365	1,34	0,4099
0,27	0,1064	0,63	0,2357	0,99	0,3389	1,35	0,4115
0,28	0,1103	0,64	0,2389	1,00	0,3413	1,36	0,4131
0,29	0,1141	0,65	0,2422	1,01	0,3438	1,37	0,4147
0,30	0,1179	0,66	0,2454	1,02	0,3461	1,38	0,4162
0,31	0,1217	0,67	0,2486	1,03	0,3485	1,39	0,4177
0,32	0,1255	0,68	0,2517	1,04	0,3508	1,40	0,4192
0,33	0,1293	0,69	0,2549	1,05	0,3531	1,41	0,4207
0,34	0,1331	0,70	0,2580	1,06	0,3554	1,42	0,4222
0,35	0,1368	0,71	0,2611	1,07	0,3577	1,43	0,4236
1,44	0,4251	1,73	0,4582	2,04	0,4793	2,62	0,4956
1,45	0,4265	1,74	0,4591	2,06	0,4803	2,64	0,4959
1,46	0,4279	1,75	0,4599	2,08	0,4812	2,66	0,4961
1,47	0,4292	1,76	0,4608	2,10	0,4821	2,68	0,4963
1,48	0,4306	1,77	0,4616	2,12	0,4830	2,70	0,4965

Продолжение

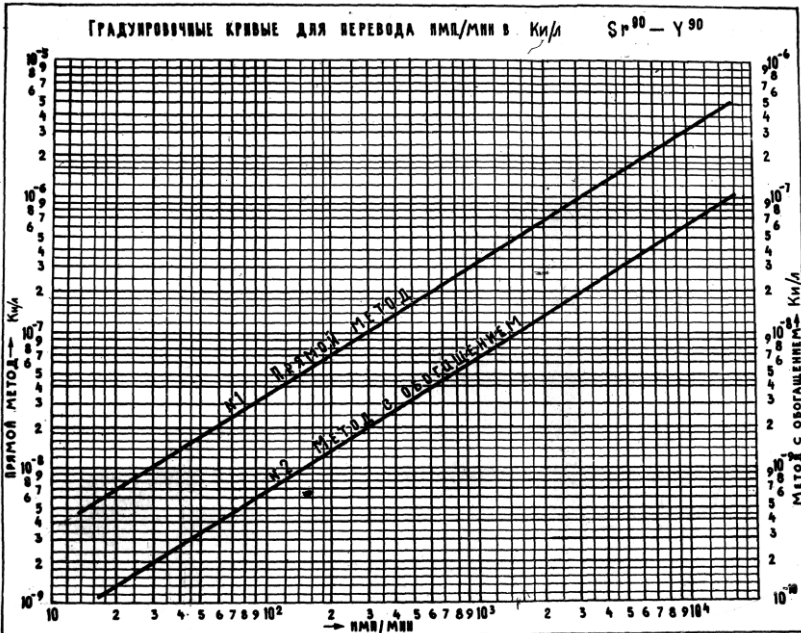
z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$	z	$\Phi(z)$
1,49	0,4319	1,78	0,4625	2,14	0,4838	2,72	0,4967
1,50	0,4332	1,79	0,4633	2,16	0,4846	2,74	0,4969
1,51	0,4345	1,80	0,4641	2,18	0,4854	2,76	0,4971
1,52	0,4352	1,81	0,4649	2,20	0,4861	2,78	0,4973
1,53	0,4370	1,82	0,4656	2,22	0,4868	2,80	0,4974
1,54	0,4382	1,83	0,4664	2,24	0,4875	2,82	0,4976
1,55	0,4394	1,84	0,4671	2,26	0,4881	2,84	0,4977
1,56	0,4406	1,85	0,4678	2,28	0,4887	2,86	0,4979
1,57	0,4418	1,86	0,4686	2,30	0,4893	2,88	0,4980
1,58	0,4429	1,87	0,4693	2,32	0,4898	2,90	0,4981
1,59	0,4441	1,88	0,4699	2,34	0,4904	2,92	0,4982
1,60	0,4452	1,89	0,4706	2,36	0,4909	2,94	0,4984
1,61	0,4463	1,90	0,4713	2,38	0,4913	2,96	0,4985
1,62	0,4474	1,91	0,4719	2,40	0,4918	2,98	0,4986
1,63	0,4484	1,92	0,4726	2,42	0,4922	3,00	0,49865
1,64	0,4495	1,93	0,4732	2,44	0,4927	3,20	0,49931
1,65	0,4505	1,94	0,4738	2,46	0,4931	3,40	0,49966
1,66	0,4515	1,95	0,4744	2,48	0,4934	3,60	0,499841
1,67	0,4525	1,96	0,4750	2,50	0,4938	3,80	0,499928
1,68	0,4535	1,97	0,4756	2,52	0,4941	4,00	0,499968
1,69	0,4545	1,98	0,4761	2,54	0,4945	4,50	0,499997
1,70	0,4554	1,99	0,4767	2,56	0,4948	5,00	0,499998
1,71	0,4564	2,00	0,4772	2,58	0,4951		
1,72	0,4573	2,02	0,4783	2,60	0,4953		

Критические точки $\chi^2_{кр}$

Число степеней свободы	Уровень значимости					
	0,01	0,025	0,05	0,95	0,975	0,99
1	6,6	5,0	3,8	0,0039	0,00098	0,00016
2	9,2	7,4	6,0	0,103	0,051	0,020
3	11,3	9,4	7,8	0,352	0,216	0,115
4	13,3	11,1	9,5	0,711	0,484	0,297
5	15,1	12,8	11,1	1,15	0,831	0,554
6	16,8	14,4	12,6	1,64	1,24	0,872
7	18,5	16,0	14,1	2,17	1,69	1,24
8	20,1	17,5	15,5	2,73	2,18	1,65
9	21,7	19,0	16,9	3,33	2,70	2,09
10	23,2	20,5	18,3	3,94	3,25	2,56
11	24,7	21,9	19,7	4,57	3,82	3,05
12	26,2	23,3	21,0	5,23	4,40	3,57
13	27,7	24,7	22,4	5,89	5,01	4,11
14	29,1	26,1	23,7	6,57	5,63	4,66
15	30,6	27,5	25,0	7,26	6,26	5,23
16	32,0	28,8	26,3	7,96	6,91	5,81
17	33,4	30,2	27,6	8,67	7,56	6,41
18	34,8	31,5	28,9	9,39	8,23	7,01
19	36,2	32,9	30,1	10,1	8,91	7,63
20	37,6	34,2	31,4	10,9	9,59	8,26
21	38,9	35,5	32,7	11,6	10,3	8,90
22	40,3	36,8	33,9	12,3	11,0	9,54
23	41,6	38,1	35,2	13,1	11,7	10,2
24	43,0	39,4	36,4	13,8	12,4	10,9
25	44,3	40,6	37,7	14,6	13,1	11,5
26	45,6	41,9	38,9	15,4	13,8	12,2
27	47,0	43,2	40,1	16,2	14,6	12,9
28	48,3	44,5	41,3	16,9	15,3	13,6
29	49,6	45,7	42,6	17,7	16,0	14,3
30	50,9	47,0	43,8	18,5	16,8	15,0

Определение числа импульсов, обеспечивающего заданную относительную точность счета (таблица Бэлла)

K	1%		2%		3%		5%		10%	
	Необходимое число импульсов при подсчете									
	n_{ϕ}	n	n_{ϕ}	n	n_{ϕ}	n	n_{ϕ}	n	n_{ϕ}	n
1,3	240000	350000	60000	90000	27000	40000	9500	14000	2400	3500
1,5	89000	163500	22000	41000	10000	18000	3600	6500	900	1600
1,7	47000	105000	12000	26000	5000	12000	2000	4000	470	1000
2,0	24000	68000	6000	17000	2700	7600	1000	2700	240	710
3,0	11500	46000	3000	11000	1300	5100	450	1800	115	450
5,0	2000	23000	500	5700	200	2600	80	900	20	230
10,0	500	16000	130	4000	60	1800	20	650	5	160
20,0	150	13000	40	3300	20	1500	6	540	(1,5)	130
50,0	34	11900	9	3000	4	1300	(1,3)	480	(0,34)	120
100,0	11	11200	(3)	2800	-	1200	(0,4)	450	-	112
	(0)	10000		2500	-	1100		400	-	100



СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Физические основы радиометрии	5
1.1. Условные обозначения радиометрических приборов.	5
1.2. Устройство и принцип работы радиометрических приборов	5
1.3. Источники высокого напряжения детекторных блоков.	34
1.4. Факторы, влияющие на качество работы электронной аппаратуры.	36
1.5. Фон радиометрической установки.	40
1.6. Минимально детектируемая активность.	42
2. Задания для выполнения лабораторных работ	48
Лабораторная работа №1. Устройство и принцип работы радиометра ПП–8	48
Задание 1. Измерение и регулировка уровня дискриминации пересчетной установки ПСТ-100.	53
Лабораторная работа №2. Изучение статистического характера закона радиоактивного распада	54
Лабораторная работа №3. Статистическая обработка результатов радиометрических измерений	66
Задание 1. Определение скорости счета данного радиоактивного образца и расчет средней квадратичной ошибки результата измерения.	74
Задание 2. Определение скорости счета данного радиоактивного образца при длительном измерении.	77
Задание 3. Измерение скорости счета при определении активности данного радиоактивного образца с заданной статистической точностью.	77
Задание 4. Проверка правильности работы радиометра.	78
Лабораторная работа №4. Устройство и принцип работы газоразрядного счетчика Гейгера	81
Задание: 1. Определение пригодности счетчика Гейгера к работе.	113
Задание 2. Определение мертвого времени счетчика Гейгера-Миуллера методом двух источников.	114
Задание 3. Введение поправки на мертвое время счетчика Гейгера.	117
Лабораторная работа №5. Определение радиоактивности препарата относительным методом	118
Задание 1. Определение активности неизвестного препарата методом сравнения с эталонным источником и эффективности счета установки.	120
Лабораторная работа №6. Влияние геометрического фактора на регистрацию бета-излучения	121
Задание 1. Определение и учет геометрического фактора при регистрации бета-излучения радиоактивных образцов.	128
Задание 2. Оценка абсолютной активности радиоактивного источника методом торцового счетчика с фиксированной геометрией.	130
Лабораторная работа №7. Устройство и принцип работы радиометра КРВП - ЗАБ	133
Задание 1. Измерение активности проб прямым методом.	139
Задание 2. Измерение активности методом с предварительным обогащением	140
Задание 3. Проверка блока бета-излучения.	141
Задание 4. Проверка блока альфа–радиометра.	142
Лабораторная работа №8. Самопоглощение бета-излучения в образце	143
Задание 1. Определение зависимости между толщиной образца и количеством регистрируемых бета-частиц и поправки на самопоглощение в зависимости от толщины образца.	160
Литература	163
Приложения	165

Учебно-методическое издание

Юрий Николаевич Бушуев
Юрий Викторович Азаренко

**ПРАКТИКУМ РАДИОМЕТРИЯ И ДОЗИМЕТРИЯ. РАДИОМЕТРИЯ
ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ**
Часть 1.

Редактор Е.Г. Бутова
Техн. редактор Н.К. Шапрунова
Корректор А.М.Павлова

ЛИ №348 от 09.06.2004. Подписано в печать
Формат 60 x 84¹/₁₆. Бумага для множительных аппаратов.
Печать ризографическая. Гарнитура “Таймс”.
Усл. печ. л. . Уч.-изд.л. .

Тираж экз. Заказ Цена руб.

Редакционно-издательский отдел БГСХА
213407, г. Горки Могилевской обл., ул. Студенческая, 2
Отпечатано в отделе издания учебно-методической литературы, ризографии
и художественно-оформительской деятельности БГСХА
г. Горки, ул. Мичурина, 5