КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АЛЬ-ФАРАБИ

Зарипова Ю.А.

РАДИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Сборник лекций для студентов по направлению подготовки
«Физические и химические науки»

Алматы

СОДЕРЖАНИЕ

Лекция 1. Источники ионизирующих излучений.

Лекция 2. Основы ядерной физики.

Лекция 3. Радиоактивность.

Лекция 4. Ядерные реакции.

Лекция 5. Взаимодействие радиоактивного излучения с веществом.

Лекция 6. Физические основы дозиметрии.

Лекция 7. Методы измерения ионизирующих излучений.

Лекция 8. Стандарты и нормативные документы в области радиационного контроля.

Лекция 9. Принцип работы радиометрических приборов радиационного контроля.

Лекция 10. Принцип работы спектрометрических приборов радиационного контроля.

Лекция 11. Радиационный мониторинг.

Лекция 7. ***Методы измерения ионизирующих излучений*****.**

Цель лекции: сформировать у обучающихся понимание принципов контроля внешнего облучения и освоить методы измерения и регистрации ионизирующего излучения с использованием различных типов детекторов.

Введение: Воздействие ионизирующего излучения на человека можно разделить на внутреннее и внешнее. В данной лекции рассматриваются вопросы, связанные с контролем внешнего облучения. Контроль внешнего облучения включает измерение:

- уровней радиации в рабочих помещениях и вокруг них;
- уровней излучения вблизи радиационного оборудования и контейнеров с источниками;
- эквивалентных доз, получаемых сотрудниками, работающими с источниками излучения.

Радиационный контроль (мониторинг) проводится для того, чтобы:

- Определение существующих уровней излучения в рабочих помещениях и окружающей среде;
- Подтверждение эффективности действующих мер радиационной защиты и контроля источников излучения;
- Выявление повышенных уровней радиации, требующих принятия корректирующих мер;
- Сопоставление и подтверждение данных других измерений, например, в рамках регуляторных проверок;
- Проведение расследований в случае радиационных инцидентов или отклонений от нормальных условий;
- Выполнение требований лицензии и нормативных документов;
- Оценка доз облучения персонала и проведение эпидемиологических исследований, связанных с воздействием ионизирующего излучения.

Для проведения радиационного контроля применяются спектрорадиометрические приборы. Все используемые приборы должны быть откалиброваны в соответствии с физическими величинами, применяемыми в радиационной защите.

Основная часть:

Для измерения уровней радиации и доз облучения используются различные типы детекторов. Каждый из них основан на собственном принципе регистрации и имеет свои области применения. Основные типы детекторов включают:

- **Газоразрядные детекторы**, к которым относятся:
  - **Ионизационные камеры –** применяются для точного измерения доз и мощности дозы, особенно при калибровке;

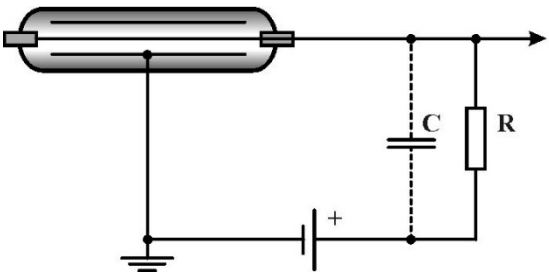


Рис. Принципиальная схема включения газового ионизационного детектора

- **Счётчики пропорционального типа –** используются для регистрации слабых потоков частиц и различения типов излучения;
- **Счётчики Гейгера–Мюллера** – применяются для обнаружения присутствия ионизирующего излучения, обладают высокой чувствительностью, но не дают информации о его энергии. Данное устройство предназначено для регистрации количества частиц, проходящих через его объем. Его работа основана на явлении ионизации газа, происходящей под воздействием различных типов ионизирующего излучения. Конструктивно счётчик представляет собой герметичную стеклянную трубку, внутри которой расположен катод в виде тонкого металлического цилиндра. Вдоль оси трубки натянута анодная проволока. Для нормальной работы прибора подается электрическое напряжение величиной порядка нескольких сотен вольт.

Счётчик подключается к измерительной (регистрационной) схеме. На корпус прибора подаётся отрицательный потенциал, а на анодную нить – положительный. Последовательно с ним включается резистор с сопротивлением порядка нескольких мегом. С этого резистора сигнал через разделительный конденсатор, ёмкость которого составляет несколько тысяч микрофарад, поступает на вход устройства, регистрирующего количество импульсов.

Внутренний объём счётчика заполнен газовой смесью при атмосферном или слегка пониженном давлении. В нормальных условиях газ выступает хорошим диэлектриком, поэтому при отсутствии ионизирующего излучения ток во внешней цепи не возникает.

Когда внутрь счётчика попадает ионизирующая частица, она вызывает образование пары ионов – положительного иона и электрона. Под действием электрического поля эти заряженные частицы начинают двигаться к соответствующим электродам. Однако длина свободного пробега электрона значительно превышает длину пробега положительного иона, что делает электрон более эффективным возбудителем ионизации.

Ускоряясь в электрическом поле, электроны приобретают кинетическую энергию, достаточную для ионизации атомов газа при столкновениях. Это приводит к появлению новых электронов и ионов – процессу, называемому ударной ионизацией. В результате возникает лавинообразное увеличение числа зарядов, или ионная лавина.

Вторичные электроны, образовавшиеся в процессе ударной ионизации, также ускоряются полем и вызывают дальнейшие акты ионизации. Таким образом, даже единичное ионизирующее событие вызывает резкое увеличение проводимости газа. Через резистор протекает импульсный ток, на нём появляется скачок напряжения, который через конденсатор поступает на вход пересчётного устройства.

После появления импульса потенциал анода снижается, электрическое поле внутри счётчика ослабевает, и энергия электронов становится недостаточной для поддержания лавинного процесса. Это приводит к прекращению газового усиления и завершению регистрации одного импульса. Чтобы предотвратить развитие самостоятельного разряда после регистрации частицы, в счётчике применяют внутреннее гашение. Для этого в газовую смесь вводят пары многоатомных веществ, например этилового спирта, которые способствуют более быстрому восстановлению исходного состояния газа. Иногда для этих же целей используют внешнее гашение, реализуемое при помощи специальных электронных схем. Основные характеристики счётчика: мертвое время; разрешающее время; время восстановления; счетная характеристика.

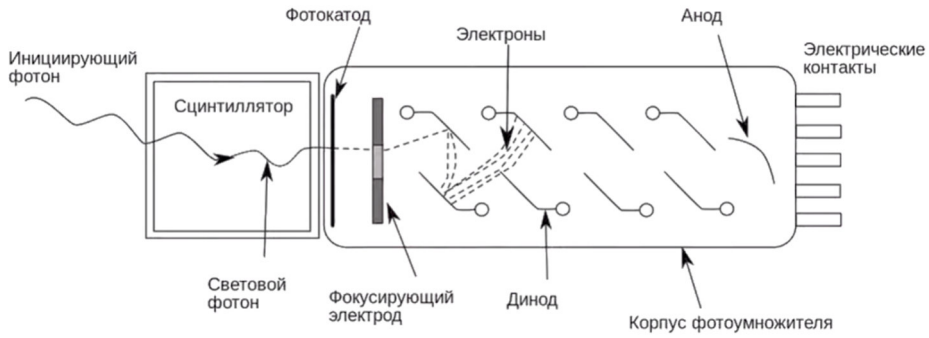
- **Сцинтилляционные детекторы –** основаны на регистрации вспышек света, возникающих при взаимодействии излучения со сцинтиллятором; широко используются для спектрометрии и мониторинга. Когда α-частицы попадают на вещества, способные к флуоресценции, они вызывают короткие световые вспышки – сцинтилляции. Было установлено, что каждая α-частица, взаимодействуя с таким веществом, порождает одну световую вспышку. Это свойство можно использовать для регистрации и подсчёта частиц. Однако визуальное наблюдение и подсчёт вспышек «на глаз» оказывается крайне трудоёмким и неудобным.

В конце 1940-х годов были разработаны сцинтилляционные счётчики частиц, которые позволили автоматизировать процесс регистрации. Основным элементом такого счётчика является сцинтиллятор – вещество, способное преобразовывать энергию ионизирующего излучения в световую вспышку. В качестве сцинтилляторов используют как твёрдые, так и жидкие вещества. Среди твёрдых распространены кристаллы йодистого натрия и калия, антрацен, нафталин и другие органические соединения. В жидких системах нередко применяют раствор трифенила в ксилоле.

Когда заряжённая частица с достаточной энергией попадает в материал сцинтиллятора, в нём возникает короткая вспышка света. Излучение этой вспышки направляется на фотокатод фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), с которого выбиваются электроны. Эти электроны проходят через несколько каскадов усиления внутри ФЭУ, в результате чего на выходе формируется электрический импульс. Полученный импульс поступает на усилитель, где его амплитуда увеличивается, а затем сигнал передаётся на регистрирующее устройство – например, осциллограф или счётчик импульсов. Использование осциллографа позволяет не только зафиксировать количество зарегистрированных частиц, но и определить интенсивность (амплитуду) отдельных импульсов, которая пропорциональна энергии каждой частицы. Таким образом, сцинтилляционные счётчики дают возможность измерять не только число попавших частиц, но и распределение их по энергиям.

Чтобы максимальное количество света, возникающего при сцинтилляции, достигало фотокатода фотоэлектронного умножителя, между сцинтиллятором и ФЭУ размещают светопровод. Светопровод представляет собой цилиндрический стержень, изготовленный из прозрачного материала с высоким коэффициентом преломления, чаще всего из органического стекла – люцита. Свет, возникающий в сцинтилляторе, распространяется по такому стержню за счёт

явления полного внутреннего отражения, что обеспечивает эффективную передачу излучения к фотокатоду без значительных потерь.



- **Полупроводниковые (твердотельные) детекторы** – обеспечивают высокую точность измерений и энергоразрешающую способность, применяются в дозиметрии, спектрометрии и радиационном мониторинге. Газонаполненные детекторы, несмотря на простоту конструкции, имеют ряд существенных ограничений. Во-первых, из-за низкой плотности газа энергия, теряемая частицей при прохождении через объём детектора, невелика. Это снижает чувствительность прибора к высокоэнергичным и слабо ионизирующим частицам. Во-вторых, для образования одной пары электрон–ион в газовой среде требуется сравнительно большая энергия – порядка 30-40 эВ. Из-за этого возрастает разброс (флуктуации) числа возникающих зарядов, что приводит к ухудшению энергетического разрешения детектора. Этих недостатков лишены твёрдотельные (полупроводниковые) детекторы, которые сегодня получили широкое распространение. В качестве активной среды в них используются кристаллы кремния (плотность 2,3 г/см³) и германия (плотность 5,3 г/см³). В полупроводниковом детекторе создаётся специальная чувствительная область, свободная от носителей заряда. Когда заряжённая частица попадает в эту область, она ионизирует атомы, в результате чего в зоне проводимости появляются электроны, а в валентной зоне – дырки. Под действием напряжения, поданного на электроды, нанесённые на поверхность кристалла, электроны и дырки начинают двигаться, формируя импульс тока. Для эффективного сбора всех образованных зарядов к детектору прикладывается напряжение величиной до нескольких киловольт. Энергия, необходимая для образования одной пары электрон-дырка, значительно меньше, чем в газовых детекторах: в кремнии она составляет около 3,62 эВ при температуре 300 K и 3,72 эВ при 80 K; в германии – около 2,95 эВ при 80 K. Благодаря этому полупроводниковые детекторы обладают значительно лучшим энергетическим разрешением, чем газонаполненные устройства (например, ионизационные камеры или пропорциональные счётчики), и могут использоваться как спектрометры. Временное разрешение лучших полупроводниковых детекторов составляет 10^{-8}-10^{-9} с, что делает их одними из самых точных приборов для спектрометрии ионизирующего излучения.

Заключение:

Контроль внешнего облучения является важнейшей составляющей системы радиационной безопасности. Его основная цель – обеспечение защиты персонала и населения от воздействия

ионизирующего излучения за счёт своевременного выявления и оценки радиационных уровней в рабочих помещениях, на объектах и в окружающей среде.

Радиационный мониторинг позволяет не только определить текущие уровни излучения, но и подтвердить эффективность действующих мер защиты, выявить отклонения от нормативных показателей и предпринять корректирующие действия при необходимости. Кроме того, результаты радиационного контроля используются для оценки доз облучения персонала, соблюдения требований лицензирования и проведения научных исследований.

Для измерения параметров внешнего облучения применяются различные типы детекторов, выбор которых зависит от поставленных задач. Газоразрядные детекторы (ионизационные камеры, счётчики пропорционального типа, счётчики Гейгера–Мюллера) обеспечивают надёжную регистрацию ионизирующих частиц и широко используются в практической дозиметрии. Сцинтилляционные детекторы, основанные на регистрации световых вспышек, позволяют определять не только количество, но и энергию частиц, что делает их незаменимыми в спектрометрии. Полупроводниковые детекторы, отличающиеся высокой точностью и энергоразрешающей способностью, применяются в современных системах радиационного контроля и научных исследованиях.

Таким образом, комплексное использование различных типов детекторов обеспечивает достоверный контроль внешнего облучения, что является основой эффективной радиационной защиты и безопасной работы с источниками ионизирующего излучения.

Контрольные вопросы:

1) Чем отличаются счётчики пропорционального типа от счётчиков Гейгера–Мюллера?
2) Объясните процесс возникновения ионной лавины в газоразрядных детекторах.
3) На каком физическом явлении основана работа сцинтилляционного детектора?
4) Почему полупроводниковые детекторы обладают более высоким энергетическим разрешением по сравнению с газоразрядными?
5) Какова роль калибровки измерительных приборов в обеспечении достоверности радиационного контроля?

Список использованных источников:

1. Групен К. Детекторы элементарных частиц: пер. с англ. – Новосибирск: Сибирский хронограф, 1999. – 407 с.

2. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика. – Санкт-Петербург: Лань, 2020. – 384 с.

3. Green D. The Physics of Particle Detectors. – Cambridge University Press. – 2000. – 376 p.

4. Григорьев В.А., Пенионжкевич Ю.Э., Вахтель В.М. Современные детекторы ядерных излучений. – Воронеж: ВГУ, 2019. – 180 с.

5. Kleinknecht K. Detectors for Particle Radiation // Cambridge University Press. – 1999. – 260 p.