

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
"Оренбургский государственный университет"

Кафедра безопасности жизнедеятельности

И.В.Ефремов, Е.Л.Горшенина, В.А.Солопова

МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ И РАСЧЕТ ЗАЩИТЫ ОТ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Оренбургский государственный университет» в качестве методических указаний для студентов, обучающихся по программам высшего профессионального образования по направлению подготовки 280700.62 Техносферная безопасность

Оренбург
2013

УДК 621.039.58(076)
ББК 31.4н.я7
Е 92

Рецензент - кандидат технических наук, доцент О.В. Чекмарева

Е 92 Ефремов, И.В.
Методы регистрации и расчет защиты от ионизирующих излучений: методические указания / И.В.Ефремов, Е.Л. Горшенина, В.А. Солопова; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург : ОГУ, 2013. – 78 с.

В методических указаниях рассмотрены физические основы методов регистрации ионизирующих излучений, единицы измерения активности и величины, характеризующие поля ионизирующего излучения. Приведены расчеты защиты по кратности ослабления различных доз излучения и защиты от γ -излучения. Даны задания для самостоятельной работы.

Методические указания предназначены для студентов всех видов и форм обучения, включая бакалавров, изучающих курс безопасности жизнедеятельности, и могут быть использованы для курсового проектирования.

УДК 621.039.58(076)
ББК 31.4н.я7

© Ефремов И.В.,
Горшенина Е.Л.,
Солопова В.А., 2013
© ОГУ, 2013

Содержание

1	Методы регистрации ионизирующих излучений.....	4
1.1	Физические основы регистрации и принципы построения детекторов излучения.....	4
1.2	Ионизационный метод.....	4
1.3	Люминесцентный метод.....	27
1.4	Сцинтилляционный метод.....	31
1.5	Трековый метод.....	40
1.6	Активационный метод.....	41
1.7	Калориметрический метод.....	42
1.8	Химический метод.....	44
2	Защита от ионизирующих излучений	46
2.1	Единицы измерения активности и величины, характеризующие поля ионизирующего излучения.....	46
2.2	Расчет защиты по кратности ослабления экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы и по заданной активности	60
2.3	Примеры решения задач по расчету защиты от γ -излучения.....	60
3	Задания для самостоятельной работы	67
4	Вопросы для самоконтроля.....	69
	Список использованных источников	70
	Приложение А Значения дозовых коэффициентов.....	71
	Приложение Б Толщина защиты	73
	Приложение В Варианты для решения задач по теме «Защита от ионизирующих излучений».....	78

1 Методы регистрации ионизирующих излучений

1.1 Физические основы регистрации и принципы построения детекторов излучения

Взаимодействие ионизирующих излучений с различными веществами приводит к разнообразным изменениям их физических и химических свойств. Эти изменения берутся за основу при разработке методов регистрации ионизирующих излучений. Основная часть любого детектора — чувствительный объем, в котором энергия ионизирующего излучения в процессе взаимодействия с веществом преобразуется в определенный вид сигнала. Вещество, представляющее собой чувствительный объем, может быть газом, жидкостью, твердым телом, что и дает соответствующие названия детекторам: газовые, жидкостные, твердотельные.

В зависимости от характера взаимодействия ионизирующего излучения с веществом различают следующие методы его регистрации: ионизационные, сцинтилляционные, полупроводниковые, люминесцентные, фото-эмульсионные, химические, калориметрические и др. Рассмотрим более подробно основные из этих методов [1].

1.2 Ионизационный метод

Одним из наиболее широко используемых методов регистрации ионизирующих излучений является ионизационный метод. Под действием любого ионизирующего излучения в веществе (газе) из нейтральных атомов или молекул образуются ионы — частицы, несущие положительные или отрицательные электрические заряды. Положительные ионы возникают в результате отрыва от атома, молекулы или группы молекул одного или нескольких внешних электронов. Такие электроны в зависимости от рода газа либо остаются свободными, либо присоединяются к нейтральным частицам газа, образуя отрицательные ионы.

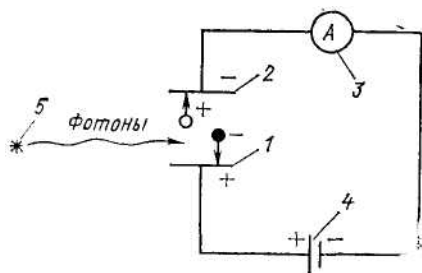
В обычных условиях образовавшиеся ионы существуют недолго, они рекомбинируют, т. е. вновь соединяются в нейтральные атомы и молекулы.

Наиболее подвижны ионы в газе. В электрическом поле они довольно быстро перемещаются к соответствующим электродам, вследствие чего рекомбинация незначительна. В отсутствие источника излучения проводимость газа настолько мала, что практически ею можно пренебречь.

Для измерений во всех случаях применяют ионизационные камеры или счетчик и регистрирующую схему, содержащую чувствительный прибор.

1.2.1 Ионизационная камера

Ионизационная камера, представленная на рисунке 1, представляет собой конденсатор, состоящий из электродов 1 и 2, между которыми находится газ. Электрическое поле между электродами создается от внешнего источника.



1,2 – электроды; 3 – измерительный прибор; 4 – источник тока;

5 – радиоактивный источник

Рисунок 1 – Ионизационная камера

В отсутствие радиоактивного источника ионизация в камере не происходит и прибор, служащий для измерения тока, показывает нуль. Под действием ионизирующего излучения в газе камеры возникают положительные и отрицательные ионы. Под действием электрического поля на хаотическое движение ионов накладывается движение дрейфа: отрицательные ионы движутся к положительно заряженному электроду, положительные — к отрицательно

заряженному электроду. В цепи возникает ток, который регистрируется измерительным прибором.

На рисунке 2 отображен график вольт-амперной характеристики ионизационной камеры.

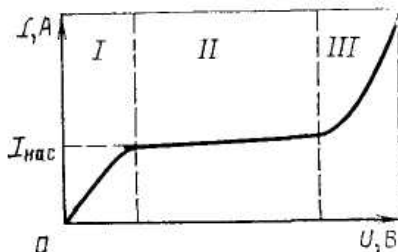


Рисунок 2 – Вольт-амперная характеристика ионизационной камеры

Если приложенную к цепи разность потенциалов постепенно увеличивать, начиная с нуля, при постоянной интенсивности излучения, то оказывается, что ток в цепи вначале увеличивается пропорционально приложенной разности потенциалов (рисунок 2, область I), а затем его увеличение замедляется до тех пор, пока он не становится постоянным по величине, несмотря на увеличение разности потенциалов (область II). При очень больших разностях потенциалов ток снова возрастает, пока не наступит пробой (область III).

Полученную зависимость ионизационного тока от напряжения называют вольт-амперной характеристикой ионизационной камеры. Физические явления, происходящие в ионизационной камере, можно объяснить следующим образом.

Ионизационный ток определяется суммарным электрическим зарядом ионов, достигших соответствующих электродов в течение 1 секунды. В слабом электрическом поле (область I) только часть образовавшихся ионов может попасть на электроды. Большая же часть ионов с разными знаками рекомбинирует друг с другом, т.е. заряды их нейтрализуются, прежде чем они достигают электродов.

В более сильном электрическом поле (область II) скорость движения ионов возрастает, а вероятность рекомбинации уменьшается до нуля и все ионы, образующиеся в газе, попадают на электроды. При этом ионизационный ток возрастает и достигает значения насыщения. Ионизационные камеры обычно

работают в режиме тока насыщения. По току насыщения можно определить интенсивность излучения и активность радиоактивного вещества.

Ионизационные камеры в зависимости от назначения можно разделить на две группы:

- импульсные, предназначенные для измерения числа частиц и их энергии регистрацией импульсов тока, возникающих в камере при прохождении через нее заряженных частиц;

- интегрирующие, предназначенные для измерения ионизационного тока, возникающего при прохождении через камеру потока частиц за некоторый, но не слишком малый, интервал времени.

Основное различие между импульсными и интегрирующими ионизационными камерами состоит в разном значении постоянной времени RC-контура, в состав которого входят камера и радиометрическое устройство.

1.2.2 Газовые счетчики

Газовый счетчик представляет собой детектор (по конструкции аналогичный ионизационной камере), предназначенный для регистрации отдельных ядерных частиц. В отличие от ионизационных камер в газовых счетчиках для усиления ионизационного тока используется газовый разряд [2].

Благодаря высокой чувствительности счетчик реагирует на каждую ионизирующую частицу, возникающую внутри объема газа или проникающую в него из стенки счетчика.

В зависимости от характера используемого газового разряда счетчики можно разделить на два типа: пропорциональные счетчики (с несамостоятельным разрядом); счетчики Гейгера - Мюллера (с самостоятельным разрядом).

Для выяснения качественного различия этих счетчиков рассмотрим зависимость величины импульса от напряжения, представленную на рисунке 3.

В отличие от вольт-амперной характеристики ионизационной камеры (см. рисунок 2) в данной зависимости по оси ординат откладывается величина импульсов, полученных от различных ионизирующих частиц, проходящих через

счетчик. Величину импульса можно исследовать, например, с помощью катодного осциллографа.

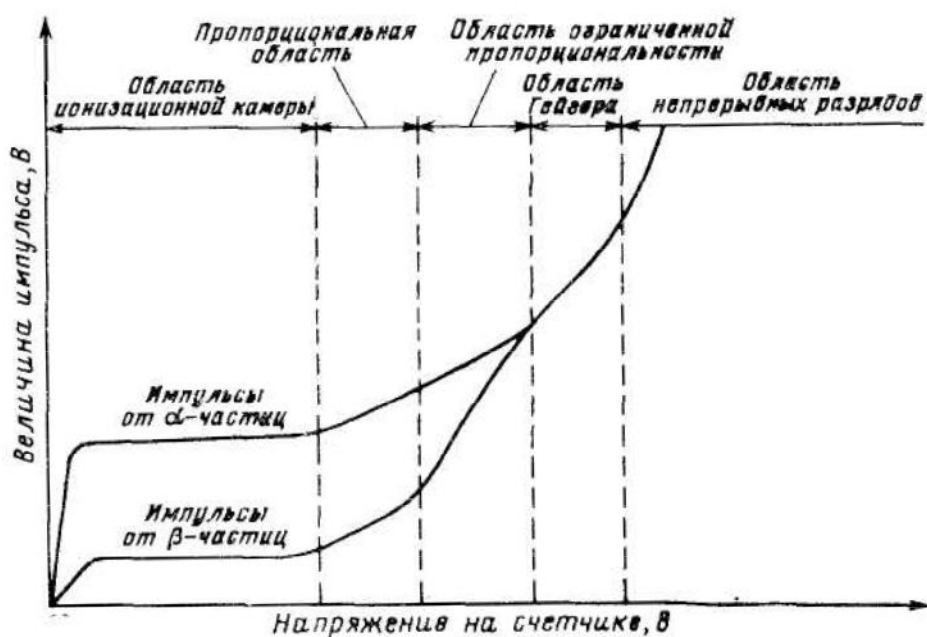


Рисунок 3 – Зависимость величины импульса от напряжения

Проведем сравнение двух импульсов с различной линейной плотностью ионообразования, например от прохождения через объем счетчика α- и β-частиц.

При небольшой разности потенциалов на электродах счетчик работает в режиме ионизационной камеры, т. е. величина импульсов в некотором интервале напряжений не зависит от разности потенциалов, а определяется только количеством ионов, которые образуются в газовом объеме счетчика ионизирующей частицей.

Иначе говоря, в области тока насыщения, пока не происходит ударной ионизации, амплитуда импульса сохраняет постоянное значение; она строго пропорциональна начальной ионизации (от α-частиц импульс больше, чем от β-частиц), а, следовательно, и энергии, оставленной частицей в счетчике.

При дальнейшем увеличении разности потенциалов на электродах счетчика величина импульса возрастает, так как при этом вторичные электроны в усиливающемся электрическом поле приобретают достаточную кинетическую

энергию, чтобы произвести ударную ионизацию нейтральных молекул газа на пути своего свободного пробега. В то же время вновь образующиеся электроны ускоряются электрическим полем и ионизируют новые молекулы. При этом получается лавинный разряд, который прекращается, как только образующиеся электроны и ионы достигнут соответствующих электродов счетчика (несамостоятельный разряд).

Увеличение ионизационного тока с использованием самостоятельного разряда называется газовым усилением, а отношение числа ионов, образовавшихся в результате газового усиления и достигших электродов n_2 , к первоначальному числу ионов n_1 , образованных ионизирующей частицей, называется коэффициентом газового усиления f . Для области ионизационной камеры $f=1$.

Из сравнения величин двух импульсов в пропорциональной области следует, что они строго пропорциональны начальной ионизации. Очевидно, в этой области коэффициент газового усиления одинаков для импульсов разной величины, т. е. он не зависит от первоначального числа ионов, образованных частицей. Этот коэффициент изменяется в пропорциональной области от единицы в начале и до 1000 в конце области.

Счетчики, в которых амплитуда импульсов пропорциональна потерянной энергии частиц в газовом объеме, называются пропорциональными.

Пропорциональный счетчик можно рассматривать как наперстковую камеру, удовлетворяющую условиям Грея (линейные размеры объема счетчика малы, стенки имеют достаточную толщину). Однако чувствительность счетчика по сравнению с наперстковой камерой будет в f раз больше.

Если продолжать увеличивать напряжение на счетчике, то коэффициент газового усиления очень сильно возрастает по абсолютной величине и будет зависеть от начальной ионизации. Эта область напряжений называется областью ограниченной пропорциональности. До конца этой области происходит сближение кривых с разной начальной ионизацией. Чем больше начальная ионизация, тем меньше коэффициент газового усиления и тем медленнее он растет с увеличением разности потенциалов.

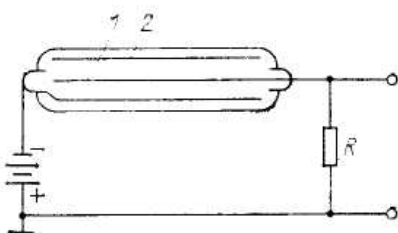
За областью ограниченной пропорциональности следует область Гейгера, в которой величина импульсов совершенно не зависит от начальной ионизации; все импульсы при заданном напряжении независимо от рода ионизирующих частиц имеют одинаковую величину. Каждый вторичный электрон, возникший в объеме счетчика, вызывает вспышку самостоятельного разряда.

Счетчики, работающие в области самостоятельного разряда (гейгеровская область), называются счетчиками Гейгера - Мюллера.

Если продолжать повышать напряжение, наступает область непрерывного (самопроизвольного) разряда, который уже не вызывается ионизацией. В этом случае счетчик не пригоден для измерения и может выйти из строя вследствие пробоя.

В зависимости от рода газа, заполняющего счетчики Гейгера - Мюллера, их подразделяют на самогасящиеся, в которых разряд прекращается под действием внутренних причин за время порядка 10^{-7} секунд с момента возникновения, и несамогасящиеся, в которых возникший разряд горит до тех пор, пока не прекратится от внешнего воздействия. В настоящее время больше используют самогасящиеся счетчики.

Рассмотрим механизм разряда в несамогасящихся счетчиках. Счетчик, представленный на рисунке 4, состоит из емкости, заряженной до потенциала источника питания.



1 – катод; 2 – анод; R – высокоомный резистр

Рисунок 4 – Несамогасящийся счетчик

Предположим, что в какой-то точке счетчика произошла ионизация за счет вторичного электрона, выбитого из катода счетчика 2. Вновь образующиеся электроны будут двигаться к аноду (центральному электроду—нити) счетчика 1,

которого они достигнут за весьма короткий промежуток времени — порядка 10^{-7} – 10^{-8} секунд, а малоподвижные положительно заряженные ионы направляются к катоду (цилиндрической части) счетчика.

Практически за время движения электронов положительные ионы остаются на месте, образуя вокруг нити плотный чехол, сильно уменьшающий напряженность электрического поля вблизи нити.

Положительные ионы, попадающие на катод счетчика, нейтрализуются, выбивая электроны с поверхности металла. При этом получающиеся нейтральные атомы газа находятся в возбужденном состоянии и излучают фотоны, которые с поверхности катода могут вырвать дополнительные электроны — родоначальники новых лавин, если напряженность поля вокруг нити приняла первоначальное значение. Дополнительные электроны с катода могут быть вырваны и в процессе первичной ионизации, так как часть атомов газа будет находиться в возбужденном состоянии, излучая фотоны, которые могут вызвать образование лавин.

В результате описанных процессов разряд в счетчике становится непрерывным. Он может продолжаться до тех пор, пока напряжение на аноде не будет понижено высокоомным резистором, включенным последовательно со счетчиком.

Интенсивное образование разряда в счетчике уменьшает напряженность электрического поля между электродами до такой величины, при которой дальнейшее образование разряда становится невозможным.

Наличие высокоомного резистора в схеме включения счетчика обеспечивает медленное восстановление разности потенциалов. Очередной разряд в счетчике может произойти только после восстановления необходимого напряжения на электродах счетчика.

Несамогасящиеся счетчики наполняют одним из одноатомных газов (аргоном, неоном и др.).

Самогасящиеся счетчики, кроме одноатомного газа, наполняются некоторым количеством паров одного из многоатомных органических соединений (этиловый спирт, этилен, изопентан и др.). Потенциал ионизации многоатомного газа должен

быть ниже потенциала ионизации основного газа. Такой состав наполнителя счетчика обуславливает автоматическое гашение разряда без какого-либо внешнего вмешательства.

Наибольшее распространение получили самогасящиеся счетчики, наполненные смесью аргона (потенциал ионизации 15,7 В) при давлении 17 кПа и паров этилового спирта (потенциал ионизации 11,3 В). В таком счетчике прекращение возникшего разряда под действием вторичных электронов, выбитых с катода счетчика, достигается вследствие диссоциации многоатомных молекул спирта, которые поглощают γ -излучение как от возбуждения атомов аргона, препятствуя тем самым возникновению фотопоглощения на катоде, так и от нейтрализации положительных ионов аргона на катоде счетчика.

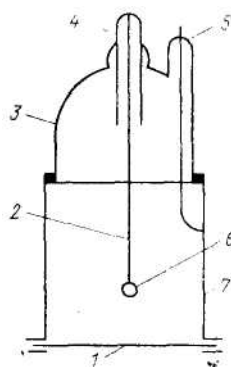
В последние годы начали применять гейгеровские счетчики с наполнением гасящей смесью инертных газов — неона с примесью аргона и одного из галогенов — хлора или брома (до 0,5 %), потенциалы ионизации которых (13,2 В и 12,8 В) ниже потенциалов ионизации неона (21,5 В) и аргона (15,7 В).

Объяснить гасящее действие галогенов, очевидно, можно следующим образом. Под действием ионизирующих частиц, поступающих в счетчик, атомы неона находятся в возбужденном состоянии. При переходе атомов неона в основное состояние энергия, излучаемая ими, затрачивается больше на ионизацию галогена и меньше на ионизацию аргона. Положительные ионы аргона нейтрализуются, приобретая электроны, при столкновении с ионами и молекулами галогена. Небольшое рабочее напряжение (от 300 до 400 В) на электродах счетчика приводит к уменьшению вероятности вырывания электронов (являющихся источниками новых лавин ионов) из катода при подходе к нему положительных ионов. При рекомбинации на катоде молекулы галогенов диссоциируют на атомы, которые через некоторое время вновь образуют молекулы.

В результате всех процессов состав смеси не изменяется, и галогенные счетчики обладают неограниченным сроком службы. Кроме того, такие счетчики имеют небольшое рабочее напряжение от 300 до 400 В (для обычных счетчиков необходимое напряжение составляет от 700 до 1600 В), не боятся перегрузок,

имеют сравнительно высокую скорость счета (до $2 \cdot 10^3$ имп/с). К недостаткам галогенных счетчиков следует отнести значительный наклон плато (более 5 % на 100 В) и длительное время развития разряда (примерно на два порядка выше, чем у высоковольтных счетчиков). Из-за химического действия галогенов для изготовления счетчиков применяют определенные материалы. Катод изготавливают из нержавеющей стали, тантала или углерода, а анод — из вольфрама.

Для регистрации низкоэнергетического излучения β -частиц с энергией от 0,05 до 0,3 МэВ (иногда и α -частиц) предназначен торцевой счетчик, представленный на рисунке 5.



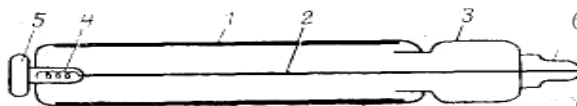
1 – пластина из слюды; 2 – вольфрамовая нить; 3 – корпус; 4,5 – контакты; 6 – защитное устройство; 7 – катод

Рисунок 5 – Торцевой счетчик

Особенность конструкции торцевого счетчика — окно в торце счетчика, закрытое пластиной из слюды толщиной 0,01 мм или нейлона, через которое β -частицы входят внутрь счетчика, теряя незначительную долю энергии в окне счетчика. Анодом счетчика служит вольфрамовая нить. Один конец нити закреплен в стеклянном корпусе счетчика, а на другом, свободном конце нити напаян стеклянный шарик (защитное устройство), предназначенный для предотвращения искажения электрического поля на конце нити. Цилиндрическая стенка счетчика, выполненная из металла, служит катодом. Токовводами являются контакты 4 и 5.

Для регистрации β -частиц более высоких энергий от 0,3 до 0,4 МэВ и выше применяют цилиндрический счетчик, представленный на рисунке 6, катод которых

выполнен из тонкой алюминиевой фольги (толщиной 0,1 мм), а анод — из вольфрамовой нити, крепящейся на стеклянных изоляторах. Выводами для электродов служат контакты 5 и 6. β -частицы с энергией 0,2 МэВ полностью поглощаются стенками счетчика, поэтому он непригоден для их подсчета.



1 – катод; 2 – анод; 3,4 – изоляторы; 5,6 – контакты

Рисунок 6 – Цилиндрический счетчик

Торцевые и цилиндрические счетчики наполняются гасящими газами и работают в области Гейгера.

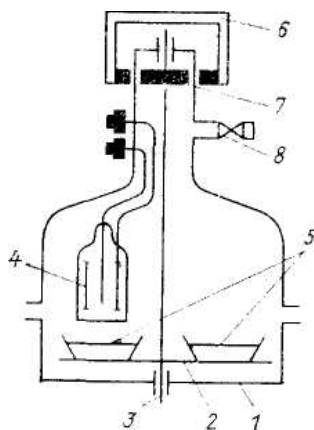
Эффективность описанных счетчиков для β -частиц около 100 %. **Эффективностью счетчика** называется выраженное в процентах отношение числа регистрируемых частиц к числу всех частиц, прошедших через поверхности катода счетчика.

Как известно, эффективность счетчика для фотонов зависит от материала, из которого сделаны стенки счетчика, их толщины и энергии фотонов. Изготовить универсальный гамма-счетчик с максимальной эффективностью для всех энергий практически невозможно, так как сам механизм взаимодействия фотонов с материалом стенок зависит от энергии γ -излучения. Если изготовить два счетчика — один со стенками из тяжелого материала (свинца), другой — из легкого (алюминия), то у первого счетчика коэффициент поглощения энергии будет значительно выше, чем у второго (даже при условии, если алюминиевые стенки будут во столько раз толще, во сколько раз алюминий легче свинца). Поэтому при измерении низкоэнергетического γ -излучения (соответствующего фотопоглощению с коэффициентом поглощения, пропорциональным Z^3) более эффективным был бы свинцовый счетчик, а не алюминиевый. При измерении высокоэнергетического

γ -излучения (соответствующего некогерентному рассеянию с коэффициентом поглощения, почти не зависящим от Z) материал стенок влияет на эффективность счетчика незначительно.

Для регистрации α -частиц используют пропорциональные счетчики и импульсные ионизационные камеры. Счетчик с самостоятельным разрядом, у которого величина импульса не зависит от начальной ионизации, использовать трудно, так как он наравне с импульсами, создаваемыми α -частицами, регистрирует и фон, что вносит погрешность в измерения.

Для счета α -частиц применяют торцевой цилиндрический пропорциональный счетчик. Иногда источник α -частиц помещают внутри рабочего объема. Примером такой конструкции служит счетчик «вакуум-эксикатор», представленный на рисунке 7, предназначенный для счета α -частиц и низкоэнергетического β -излучения твердых препаратов.



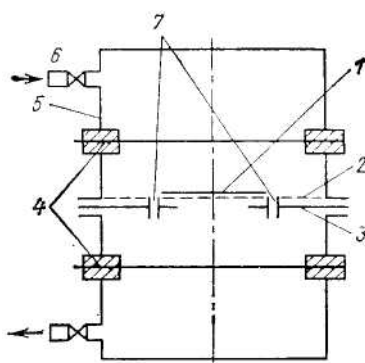
1 – корпус; 2 – диск-подставка; 3 – ось; 4- счетчик; 5 – исследуемые образцы; 6 – магнит; 7 – металлический диск; 8 - кран

Рисунок 7 – Счетчик вакуум-эксикатор

В корпусе расположены диск, укрепленный на вертикально вращающейся оси, и счетчик. В гнезде диска ставят исследуемые образцы. Диск с осью может перемещаться с помощью наружного магнита, приводящего в движение малый металлический диск, находящийся на верхнем конце оси. Вращая диск, можно подвести под счетчик один из помещенных препаратов. Из вакуум-эксикатора

вначале откачивают воздух через кран, а затем заполняют его газовой смесью до определенного давления. Недостатком такого счетчика является чрезмерный расход заполняющей газовой смеси.

Для абсолютного измерения числа α - и β -частиц (с эффективностью 100 %) от данного радиоактивного препарата применяют счетчик с геометрией 4π , представленный на рисунке 8.



1 – радиоактивное вещество; 2 – пленка; 3 – металлическая вставка;
4 – анод; 5 – катод; 6 – штуцер; 7 – отверстия для ввода газа

Рисунок 8 – Счетчик с геометрией 4π

В этих счетчиках радиоактивное вещество наносят на тонкую пленку, натянутую на отверстие металлической вставки. Вставку помещают внутрь счетчика таким образом, чтобы препарат находился в центре объема. В нижней и верхней частях счетчика натянуты вольфрамовые нити (анод), изолированные от металлического корпуса (катода). Аноды соединяют вместе и включают на вход усилителя, а катод заземляют. Счетчик через штуцер и отверстия вставки заполняют метаном с избыточным давлением примерно от 0,4 до 0,7 кПа.

Пропорциональные счетчики применяют также и для регистрации нейтронов. В этом случае их заполняют BF_3 . Для регистрации α -частиц используют искровые счетчики, анодом которых является металлическая нить, расположенная параллельно плоскости катода на расстоянии от 1,5 до 2 мм. Иногда искровые счетчики изготовляют в виде плоскопараллельных пластин, размещенных в газовой среде.

Газовой средой счетчика является воздух при атмосферном давлении. Напряжение питания от 2,5 до 6 кВ. При таком напряжении между электродами всегда протекает постоянный ток коронного разряда.

Если между электродами счетчика проскакивает α -частица, обладающая большой линейной плотностью ионообразования, на участке ее прохождения образуется искровой разряд. При прохождении через счетчик β - или γ -излучений искрового разряда не образуется вследствие малой ионизирующей способности этого вида излучения.

Для предотвращения перехода искрового разряда в дуговой разряд в цепь счетчика включают высокоомный резистор. Амплитуда на выходе искрового счетчика составляет несколько сот вольт. Продолжительность разряда 10^{-10} секунд (на несколько порядков меньше, чем счетчиков Гейгера — Мюллера). Рабочий участок счетной характеристики имеет протяженность от 2,5 до 6 кВ. Максимальная эффективность регистрации α -частиц наблюдается при нормальном падении их по отношению к плоскости катода. Для увеличения чувствительного объема над плоскостью катода счетчика натягивается несколько параллельных нитей. Расстояние между нитями выбирается от 3 до 4 мм, чтобы исключить искажение конфигурации электрического поля отдельных нитей.

Некоторые неудобства в использовании пропорциональных счетчиков состоят в том, что для работы с ними требуется дополнительная электронная аппаратура, регистрирующие схемы с широким диапазоном чувствительности, стабилизаторы высокого напряжения и другая аппаратура.

Рассмотрим счетную характеристику счетчика Гейгера - Мюллера, представленную на рисунке 9.

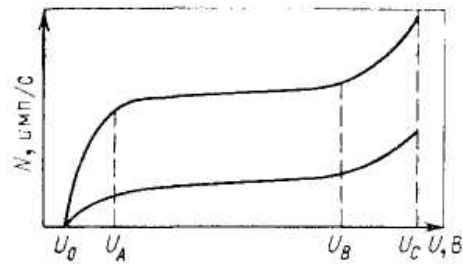


Рисунок 9 – Счетная характеристика счетчика Гейгера – Мюллера

Счетная характеристика представляет собой зависимость скорости счета импульсов N , определяемых счетчиком, от приложенной к нему разности потенциалов U . При определенном значении напряжения U_0 , называемом **потенциалом зажигания**, в счетчике возникает разряд и счетчик начинает считать импульсы. С увеличением напряжения до значения U_A число импульсов возрастает довольно быстро. На участке напряжения $U_0—U_A$ не каждая частица, попавшая в счетчик, вызывает вспышку самостоятельного разряда, который еще зависит от числа первоначально образовавшихся ионов. При напряжении U_A счетчик регистрирует уже все частицы, которые образуют в его объеме. С дальнейшим увеличением разности потенциалов в интервале $U_A—U_B$ значение скорости счета от напряжения почти не изменяется. Этот участок характеристики счетчика, являющийся рабочим участком, носит название **плато счетчика**. Плато счетчика по отношению к оси абсцисс имеет наклон (до 5 % на 100 В). Однако практически можно считать, что все импульсы имеют одну и ту же величину. Наклон плато обусловлен частично возрастанием чувствительного объема счетчика, частично счетом ложных импульсов, т. е. импульсов, появляющихся в отсутствие ионизирующего излучения, число которых увеличивается с ростом напряжения. Наклон плато также зависит от конструктивных особенностей счетчика, от рода, чистоты и давления наполняющего газа. У счетчиков, не бывших в употреблении, плато имеет длину от 100 до 300 В. По мере выработки многоатомного газа наклон плато увеличивается, а его длина сокращается.

При напряжении U_C , большем U_B , скорость счета опять возрастает, но уже не за счет увеличения чувствительности, а вследствие появления самопроизвольных разрядов. Участок характеристики, находящийся за пределами напряжения U_B , является нерабочим, так как число самопроизвольных разрядов для этих напряжений неопределенно и меняется с изменением интенсивности источника излучения и времени. Обычно, если счетчик работает в области негаснущего разряда, он быстро выходит из строя (сгорает).

Нижняя кривая на рисунке 9 является характеристикой счетчика, снятой в отсутствие источника излучения, и обусловлена фоном. Фон определяется в основном космическим излучением, радиоактивностью земли, радиоактивными загрязнениями воздуха и предметов, окружающих счетчик.

1.2.3 Полупроводниковые счетчики

Поиски более совершенных счетчиков привели к созданию полупроводниковых детекторов (ППД), из которых наиболее широко используются германиевые и кремниевые счетчики. Принцип их действия подобен принципу действия ионизационных камер. Электрическое поле создается в среде с низкой проводимостью. При проникновении заряженной частицы в эту среду происходят соударения и образуются либо пары ионов, либо электронно-дырочные пары (если это твердая камера — полупроводниковый детектор). В идеальном случае заряды должны разделяться электрическим полем и собираться на границах, производя электрический импульс, который можно усилить и записать.

Известно, что электроны в атоме занимают определенные энергетические уровни. Энергетические уровни электронов каждой оболочки атома в совокупности составляют разрешенные зоны. Между разрешенными зонами отдельных оболочек располагаются запрещенные зоны, на которых электроны находиться не могут.

В кристаллах, образующихся в результате сближения большого количества отдельных атомов, происходит смещение энергетических уровней, причем оно больше для внешних (валентных) электронов, чем для внутренних, обладающих большей энергией связи с ядром. В результате каждый электрон в кристалле имеет

определенный энергетический уровень, отличающийся от уровня, занимаемого электроном в изолированном атоме. Отдельные энергетические уровни в кристалле, незначительно отличающиеся друг от друга, сливаются в непрерывные разрешенные энергетические зоны, разделенные запрещенными зонами. Для перемещения электрона из одной разрешенной зоны в другую необходимо сообщить ему определенную энергию, чтобы он мог преодолеть запрещенную зону.

Энергетические свойства кристалла зависят от структуры энергетических зон и степени заполнения их электронами. Энергетические уровни внешних валентных электронов образуют заполненную валентную зону, в которой электроны находятся в связанном состоянии. Для удаления электрона из этой зоны на более высокий энергетический уровень (в свободное состояние или зону проводимости) необходимо сообщить ему определенную энергию. Зона проводимости расположена выше валентной зоны и отделена от нее запрещенной зоной. В металлах запрещенная зона отсутствует, поэтому электроны свободно переходят из валентной зоны в зону проводимости под действием слабого электрического поля. Если зона проводимости отделена от валентной зоны широкой запрещенной областью, электроны не могут попасть в зону проводимости. Электрическая проводимость такого вещества ничтожно мала. Вещества, имеющие запрещенную зону шириной от 1 до 2 эВ, принято называть **полупроводниками**, шириной более 2 эВ — **диэлектриками**.

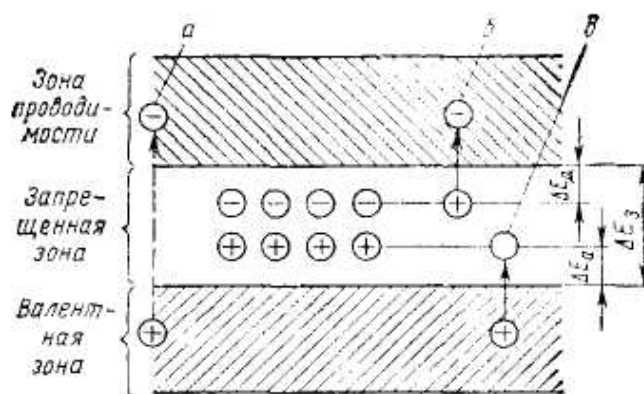
Для теоретического рассмотрения совокупность электронов не полностью занятой валентной зоны удобно дополнить совокупностью квазичастиц - дырок, имеющих положительный заряд. Число дырок равно числу свободных энергетических уровней. При приложении к полупроводнику внешнего электрического поля носители тока могут перемещаться. Например, электроны могут переходить из валентной зоны в зону проводимости. Такая проводимость носит название **собственной проводимости**. Концентрация носителей тока электронов n_i и дырок p_i одинакова ($p_i = n_i$) и при заданной температуре зависит только от ширины запрещенной зоны ΔE_z и массы носителей. При $t = 20^\circ\text{C}$ у

кремния $\Delta E_3 = 1,11$ эВ, $n_i = 1,5 \cdot 10^{10}$, $p_i = 2 \cdot 10^5$ Ом·см; у германия $\Delta E_3 = 0,72$ эВ, $n_i = 2 \cdot 10^{13}$, $p_i = 47$ Ом·см.

Кроме собственной проводимости, существует **примесная проводимость**, получаемая при введении в кристаллическую решетку полупроводника других атомов. Введение посторонних атомов приводит к созданию дополнительных энергетических уровней, называемых **донорными** и **акцепторными** (E_D и E_A). Эти уровни располагаются в запрещенной энергетической зоне полупроводника.

При введении в кристаллическую решетку полупроводников (кремния или германия) пятивалентных атомов (мышьяка, сурьмы и др.) происходит замещение четырехвалентных атомов полупроводника пятивалентными атомами. Примесные атомы, отдающие электроны, называются **донорными примесями**.

Донорные примесные уровни всегда располагаются в запрещенной зоне вблизи края зоны проводимости, как показано на рисунке 10. Так как энергия ΔE_D , необходимая для освобождения электрона атома донорной примеси, во много раз меньше ширины запрещенной зоны, т. е. меньше энергии возбуждения собственной проводимости ΔE_3 , то в зону проводимости поступают в большем количестве электроны от донорных примесей и в меньшем — от собственных электронов полупроводника.



а – электрон, оторванный от атома; *б* – донорная примесь; *в* - акцепторная зона

Рисунок 10 – Энергетические зоны кристалла

Таким образом, при введении в полупроводник донорных примесей в запрещенной зоне под действием внешних источников образуются положительные ионы примеси, а в зоне проводимости — свободные электроны. Поэтому проводимость в полупроводнике, осуществляемую главным образом электронами, называют **электронной проводимостью**.

Для получения акцепторных энергетических уровней в кристаллическую решетку полупроводника вводят акцепторные примеси. Атомы акцептора могут замещать в кристаллической решетке атомы полупроводника. При этом для образования связей с одним из атомов кристалла не хватает одного электрона, поэтому между двумя атомами образуется дырка.

Электрон, находящийся в валентной зоне кристалла, может перейти к атому примеси для образования исходной структуры связи. При этом атом акцептора превратится в отрицательный ион, а в валентной зоне возникнет незаполненная связь — дырка, которая будет заполняться электронами другого атома валентной области. В результате произойдет перемещение дырок от атома к атому внутри кристалла со скоростью, меньшей скорости движения электронов.

Акцепторные уровни энергии ΔE_a располагаются в нижней части запрещенной зоны вблизи валентной зоны (см. рисунок 10). Поэтому для перехода электрона из валентной зоны на уровень акцептора требуется незначительная энергия.

Таким образом, электроны из валентной зоны переходят на акцепторные уровни, а в валентной зоне возникают дырки — носители положительного заряда. Проводимость, определяемая движением дырок, называется **дырочной проводимостью**.

В связи с наличием двух видов проводимостей существуют и два вида полупроводников: с дырочной проводимостью (р-типа) и с электронной проводимостью (n-типа). В каждом из полупроводников имеются в незначительном количестве носители тока (не основные) противоположного знака.

Переходя в n-область, дырки накапливаются вблизи границы двух областей, происходит рост положительного потенциала. Накапливание электронов по другую сторону границы в р-области приводит к росту отрицательного потенциала. В

некоторый момент времени диффузия носителей прекращается и на границе n- и p-областей возникает слой, образованный пространственным зарядом дырок в n-области и электронов в p-области. В p-область могут проникать дырки из n-области, где они являются неосновными носителями.

Итак, в p-области вблизи ее границы с n-областью скапливаются отрицательные заряды, вследствие чего происходит обеднение основными носителями - дырками, а в n-области (вблизи границы с p-областью) скапливаются положительные заряды, в результате чего происходит обеднение электронами n-области. Обедненная основными носителями область называется запиорным слоем, или **потенциальным барьером**.

Если на (p-n)-переход подключить обратное внешнее электрическое напряжение, т. е. к p-области минус, а к n-области плюс (инверсионное включение), то сопротивление (p-n)-перехода еще больше возрастает, так как приложенное напряжение будет способствовать удалению зарядов друг от друга. При этом в кристалле устанавливается постоянное распределение поля. Поэтому падение приложенного напряжения происходит в основном на обедненном слое. В результате обедненную носителями область можно рассматривать как твердую ионизационную камеру.

Основные характеристики полупроводникового детектора: ширина обедненной области (слоя), от которой зависят чувствительный объем и время собирания носителей; удельное сопротивление полупроводника (p-n)-перехода; емкость обедненной области; обратный ток, определяющий уровень шумов.

Ионизирующая частица, поступающая в обедненную область счетчика, в результате неупругих столкновений с электронами отдает им свою энергию и образует пары электрон -дырка. В среднем на образование одной пары независимо от вида излучения и его энергии расходуется в кремнии $\omega = (3,5 \pm 0,7)$ эВ, а в германии $\omega = (2,94 \pm 0,15)$ эВ.

В зависимости от параметров и технологии изготовления полупроводниковые электронно-дырочные детекторы делятся на поверхностно-барьерные Au-Si и

диффузионные с (p-n)- и (n-p)-переходами соответственно и диффузионно-дрейфовые (p-i-n)-типа.

Поверхностно-барьерные детекторы изготавливают таким образом, чтобы вблизи поверхности кристалла из кремния или германия сформировался (n-p)- или (p-n) -переход. Это осуществляют двумя основными способами. Во-первых, используют поверхностную диффузию вещества одного типа внутрь кристалла из материала другого типа, например диффузию фосфора в кристаллы кремния p-типа. Во-вторых, можно использовать химические свойства поверхности кремния или германия. Поверхностный слой этих элементов легко окисляется и ведет себя как электронный акцептор (p-слой). Электрический контакт с поверхностным слоем осуществляют с помощью тонкого слоя металла, обычно золота, который наносят на поверхность кристалла испарением в вакууме. Такие золото-кремниевые и золото-германиевые счетчики широко применяют для регистрации и спектрометрии тяжелых заряженных частиц и нейтронов. Схема включения золото-кремниевого детектора представлена на рисунке 11.

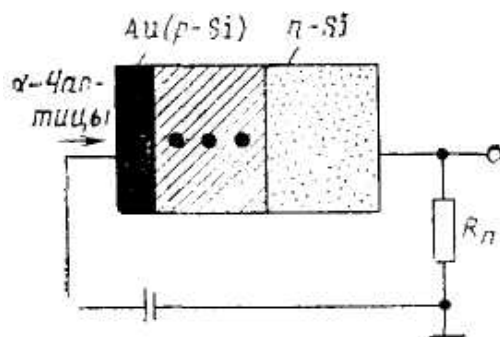
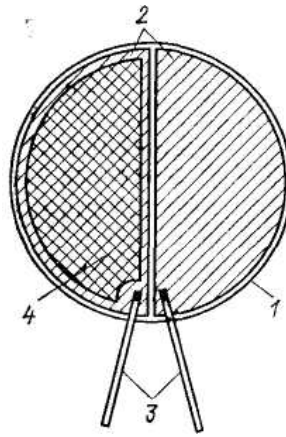


Рисунок 11 – Схема включения золото-кремниевого детектора

Поверхностно-барьерные кремниевые счетчики служат для регистрации быстрых и медленных нейтронов. Такой счетчик, представленный на рисунке 12, состоит из кремниевого диска с нанесенными на него двумя полукруговыми дисками золота, к которым прикреплены контакты.



1 – кремниевый диск; 2 – золотые диски; 3 контакты; 4 – полиэтиленовая пленка

Рисунок 12 – Поверхностно-барьерный кремниевый счетчик

Таким образом, две половинки представляют собой два счетчика, которые должны давать одинаковые показания при снятии фона. На одну из половинок наносят слой полиэтиленовой пленки, служащей источником протонов отдачи при облучении счетчика быстрыми нейтронами. При включении такого счетчика по дифференциальной схеме можно определить число протонов отдачи.

Для дозиметрии применяют счетчик быстрых нейтронов, созданный на основе радиационных повреждений кремниевого (p-n) - перехода. Быстрый нейтрон может создать в кристалле до 10 смещений на 1 см пути. С увеличением числа смещений увеличивается и сопротивление кремния. По измеренному сопротивлению можно определить плотность потока быстрых нейтронов или поглощенную дозу в диапазоне от 10 до 1000 сГр.

Диффузионно-дрейфовые детекторы (p-i-n) -типа с p-проводимостью изготавливают из кремния или германия. При работе таких детекторов (рисунок 13) используется сначала диффузия, а затем дрейф ионов лития вглубь кристалла при температуре 400 °С, при обратном смещении в несколько сот вольт. Атомы располагаются в кристалле в междоузлиях и поэтому имеют очень большой коэффициент диффузии. Под действием электрического поля ионы лития проникают глубоко в кремний или германий и компенсируют акцепторы.

Образуется кристалл с компенсированной плотностью примесей, имеющий только собственную проводимость (область с i -проводимостью) и высокое удельное сопротивление ($\rho = 25 \cdot 10^4$ Ом·см при комнатной температуре).

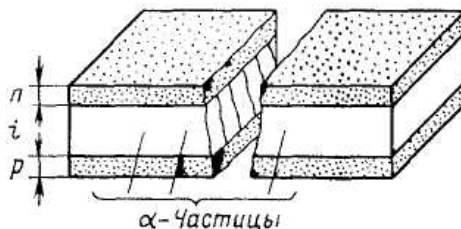


Рисунок 13 – Схема планарного диффузионно-дрейфового детектора

Диффузионно-дрейфовые детекторы отличаются от детекторов поверхностно-барьерных и диффузионных. Они обладают хорошей стабильностью в работе, имеют высокую чувствительность.

Полупроводниковыми детекторами в сочетании с усилителями с низким уровнем шумов можно измерять плотности потоков тяжелых частиц, электронов и γ -излучения.

Для регистрации β - и γ -излучений обычно используют кремниевые детекторы диффузионного и диффузионно-дрейфового типа. По сравнению с поверхностно-барьерными они имеют следующие преимущества: более широкий чувствительный слой, меньшее напряжение питания и более слабую зависимость амплитуды импульсов от последнего, отсутствие контактных шумов. При соответствующей градуировке их можно использовать в качестве дозиметров.

Полупроводниковые детекторы обладают такими ценными качествами, как высокое энергетическое разрешение, достаточно хорошая эффективность регистрации излучения, линейность характеристик в широкой области энергий для различных видов ионизирующего излучения, компактность, простота в изготовлении и обращении. Кроме того, они не требуют высоковольтных источников питания. Кремниевые детекторы нечувствительны к магнитным полям.

Литиево-дрейфовые германиевые детекторы изготавливают с большим чувствительным объемом, достигающим 100 см^3 . Детекторы этого типа используют в спектрометрии γ -излучения, где они успешно конкурируют со сцинтилляционными спектрометрами, так как отличаются высоким разрешением и чувствительностью. Литиево-дрейфовые германиевые детекторы хранят и эксплуатируют при температуре жидкого азота. Детекторы помещают в специальные криогенные вакуумные камеры — криостаты, в которых поддерживают давление порядка 10^{-2} Па. Криостаты сочленяют с сосудами Дьюара, содержащими жидкий азот. Измерения проводят при температуре $T \approx 77 \text{ К}$.

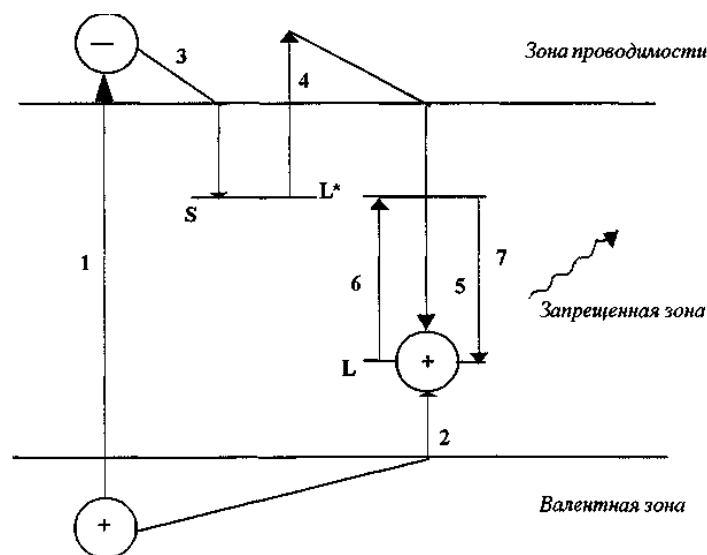
Гамма-спектрометры с германиево-литиевыми детекторами находят все более широкое применение в ядерной энергетике, так как с их помощью по изменению интенсивности γ -линий можно, например, следить за выгоранием твэлов и содержанием радиоактивных веществ в теплоносителе. Непрерывное наблюдение и автоматический контроль за работой ядерного реактора обеспечивают его бесперебойную работу и радиационную безопасность.

1.3 Люминесцентный метод

Сущность метода заключается в том, что в некоторых веществах (люминофорах) образованные под действием ионизирующего излучения носители заряда (электроны и дырки) локализуются в центрах захвата, благодаря чему происходит накопление поглощенной энергии, которая может быть затем освобождена при дополнительном внешнем воздействии (возбуждении) [3].

Чаще всего дополнительным возбуждением может быть либо освещение люминофора светом определенного спектра, либо его нагрев (фотолюминесценция и термолюминесценция).

Рассмотрим механизм термолюминесценции, представленный на рисунке 14.



- 1 – переход электрона из валентной зоны в зону проводимости;
- 2 – захват дырки центром люминесценции;
- 3 – захват электрона ловушкой;
- 4 – освобождение электронов при нагреве кристалла;
- 5 – рекомбинация электронов с дырками в центрах люминесценции;
- 6 – возбуждение центра люминесценции;
- 7 – излучательный переход в основное состояние

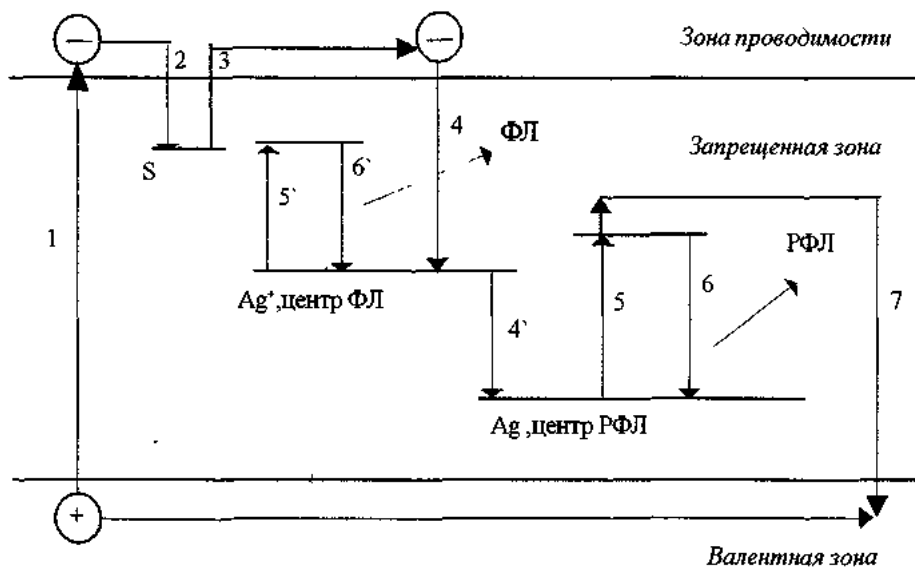
Рисунок 14 - Механизм термолюминесценции

Электрон, поглощая энергию ионизирующего излучения, переходит из валентной зоны в зону проводимости. Образующаяся дырка переходит в запрещенную зону и создает центр люминесценции. Если в запрещенной зоне имеется электронная ловушка, обусловленная дефектом кристалла или введением примесей, то она захватывает электрон и электрон переходит в метастабильное состояние. Внешнее воздействие сообщает электрону дополнительную энергию и он вновь переходит в зону проводимости, после чего рекомбинирует с дыркой (центром люминесценции). Центр люминесценции переходит в возбужденное состояние, которое снимается излучением светового фотона.

В дальнейшем световые вспышки переводятся в электрический сигнал по механизму, аналогичному рассмотренному ранее (в сцинтилляционном методе — токовый режим).

Интенсивность люминесценции пропорциональна дозе облучения люминофора. Кривая высвечивания, как правило, имеет несколько максимумов, зависящих от количества энергетических уровней, на которых располагаются ловушки, т.к. выход электронов из различных энергетических уровней происходит при различной энергии, переданной внешним воздействием.

Механизм радиофотолюминесценции несколько иной (рисунок 15).



1 – переход электрона из валентной зоны в зону проводимости под действием ионизирующего излучения;

2 – захват электрона ловушкой;

3 – термический переход электрона в зону проводимости;

4,4' – захват электрона центром фотолюминесценции с последующим превращением центра фотолюминесценции в центр радиофотолюминесценции;

5,5' – возбуждение центров РФЛ (ФЛ) коротковолновым излучением;

6,6' – излучательный переход центров РФЛ(ФЛ) в основное состояние;

7 – рекомбинация электрона с дыркой

Рисунок 15 – Механизм радиофотолюминесценции (РФЛ) и фотолюминесценции (ФЛ)

При фотолюминесценции в качестве люминофоров используется NaI, LiF, NaCl фосфатные стекла и т.п., активированные серебром (Ag). Серебро образует в люминофоре центры радиофотолюминесценции, которые люминесцируют под действием света. Под действием излучения электрон переходит в зону проводимости и захватывается электронной ловушкой. В результате нагрева электрон выходит в зону проводимости и захватывается центром фотолюминесценции, переводя его в центр радиофотолюминесценции. Центр радиофотолюминесценции люминесцирует под действием света с длиной волны, отличной от той, которая вызывает фотолюминесценцию.

Интенсивность радиофотолюминесценции линейно зависит от дозы в диапазоне примерно 10 Гр.

У фотолюминесцентных детекторов (ФЛД) существует эффект нарастания интенсивности люминесценции после прекращения облучения (эффект накопления или «созревания»). В связи с этим чувствительность ФЛД необходимо относить к определенному моменту времени после облучения. Время наступления максимума свечения для ФЛД содержащих серебро, например, определяется концентрацией серебра и температурой, при которой хранится ФЛД в период от облучения до измерения.

Максимальная люминесценция (по интенсивности) наблюдается при содержании серебра от 1 % до 2 %, однако при этом время наступления максимума больше. На практике содержание серебра составляет от 3 % до 5 %. Качество ФЛД тем выше, чем быстрее наступает максимальная люминесценция и чем дольше она сохраняется на этом уровне без заметного затухания. Некоторые типы ФЛД сохраняют информацию о дозе в пределах $\pm 10\%$ в течение нескольких лет, начиная с 2 часов после облучения.

При больших дозах (порядка $10 - 10^4$ Гр) вместо люминесценции можно использовать эффект потемнения ФЛД, так как при таких дозах из-за появления большого количества центров люминесценции они окрашиваются.

Центры люминесценции в ФЛД не разрушаются в процессе измерения. Они только возбуждаются и люминесцируют. Процесс измерения может проводиться

многократно в качестве термолюминесцентных детекторов (ТЛД) используют CaF_2 , LiF , CaSO_4 , Al_2O_3 .

В отличие от фотолюминесценции в ТЛД центры люминесценции разрушаются в процессе измерения. Для повторного использования ТЛД отжигают при высокой температуре около $400\text{ }^\circ\text{C}$, чтобы полностью избавиться от прежних центров люминесценции. ТЛД по сравнению с ФЛД имеют больший линейный диапазон измерения дозы, однако измерения можно проводить только 1 раз, а кроме того, для некоторых ТЛД многократность использования ограничена из-за снижения чувствительности детекторов вследствие укрупнения зерен детектора после отжигов.

1.4 Сцинтилляционный метод

Название данного метода указывает, что в его основу положено явление сцинтилляции. Некоторые вещества (сцинтилляторы) обладают той особенностью, что процесс прохождения через них ионизирующих излучений сопровождается слабыми световыми вспышками, которые могут быть обнаружены и измерены аппаратурой, обладающей высокой светочувствительностью [2,3].

Физическая основа сцинтилляционного метода — возбуждение и ионизация атомов и молекул вещества при прохождении через него заряженных частиц. Через определенное время они переходят в основное состояние, испуская световое излучение, спектр которого зависит от структуры энергетических уровней атомов и молекул вещества. Вспышка света может произойти и при прохождении через сцинтиллятор косвенно ионизирующего излучения за счет вторичных частиц. При прохождении фотонов это электроны отдачи и фотоэлектроны, а при прохождении нейтронов это ядра отдачи или заряженные частицы, появившиеся в результате (n , α)-, (n,p)-реакций и т.д.

Рассмотрим механизм высвечивания неорганического сцинтиллятора. Свечение связано с существованием центров люминесценции, обусловленных наличием каких-либо примесей. Для объяснения протекающих процессов

воспользуемся зонной моделью энергетических уровней электронов в кристалле. Электроны в изолированных атомах могут иметь лишь некоторые дискретные значения энергии. В результате существования химических связей между атомами в кристалле, каждый энергетический уровень электрона расщепляется в непрерывный набор разрешенных уровней, называемый зоной. Совокупность разрешенных энергетических уровней для свободных электронов называется зоной проводимости, а для электронов, которые участвуют в образовании валентных связей между атомами кристалла, — валентной зоной. Для перевода электрона из связанного состояния в валентной зоне в свободное состояние, в зоне проводимости необходимо передать ему энергию, равную энергии валентной связи. Эта энергия определяет ширину запрещенной зоны, разделяющей зону валентных уровней и зону проводимости. Запрещенная зона не содержит электронных энергетических уровней, если в кристалле отсутствуют примеси и дефекты структуры.

Под воздействием ионизирующего излучения происходит переход электрона из «валентной зоны» в «зону проводимости». Дырка, или вакансия, которая образуется при этом, переходит из «валентной зоны» в «запрещенную зону» на уровень L и становится центром высвечивания (люминесценции). Электрон притягивается избыточным положительным зарядом и рекомбинирует с дыркой. Центр люминесценции переходит в возбужденное состояние, которое снимается излучением светового фотона.

Высвечивание органических сцинтилляторов объясняется внутримолекулярными процессами возбуждения одной из химических связей с последующим снятием возбуждения излучением светового фотона.

Сцинтилляторы характеризуются следующими параметрами:

- сцинтилляционной конверсионной эффективностью;
- световым выходом;
- временем высвечивания;
- прозрачностью к собственному излучению.

Конверсионная эффективность η_k - отношение энергии световых фотонов E_ϕ к энергии заряженной частицы E_n , поглощенной в сцинтилляторе (та часть

поглощенной в сцинтилляторе энергии ионизирующего излучения, которая преобразовалась в энергию световой вспышки.

Различают органические и неорганические сцинтилляторы. Органические сцинтилляторы представляют собой монокристаллы некоторых органических соединений - антрацена, стильбена, нафталина, толана. Содержание водорода в органических сцинтилляторах позволяет использовать их для регистрации быстрых нейтронов. Антрацен обладает наибольшей конверсионной эффективностью ($\eta_k \sim 0,04$) среди всех органических кристаллов, но очень чувствителен к резким изменениям температуры, которые приводят к потере сцинтилляционных свойств.

Более устойчивым монокристаллом является стильбен, который широко используется для регистрации быстрых нейтронов. Стильбен удобен при использовании в аппаратуре разделения при регистрации частиц разных типов. Он обладает очень малым временем высвечивания быстрой компоненты ($\tau \sim 6 \cdot 10^{-9}$ с) и относительно высокой конверсионной эффективностью ($\eta_k \sim 0,02$).

При детектировании тяжелых частиц, органические сцинтилляторы имеют низкий и нелинейный (в зависимости от энергии) световой выход.

Существуют также жидкие и пластические органические сцинтилляторы. В сцинтиллирующих пластмассах некоторые органические вещества образуют твердые растворы в полистироле (например, терфенил в полистироле $C_{18}H_{14}$). Пластмассовые органические сцинтилляторы состоят из растворителя, активаторов и сместителя спектра. Высокая прозрачность материалов позволяет изготовить детекторы больших размеров. Пластмассовые сцинтилляторы хорошо обрабатываются механически. Конверсионная эффективность пластмассовых сцинтилляторов от 0,05 до 0,5 относительно антрацена, время высвечивания $(2-8) \cdot 10^{-9}$ секунд. При понижении температуры люминесцентные свойства пластмассовых сцинтилляторов улучшаются.

Жидкие сцинтилляторы являются растворами некоторых органических веществ, например паратерфенила, в органических растворителях — толуоле, ксилоле и др. Жидкие органические сцинтилляторы подразделяются на двухкомпонентные (раствор и активатор) и многокомпонентные (раствор, активатор

и сместитель спектра). Световой выход у жидких сцинтилляторов меньше, чем у органических кристаллов. Он составляет от 0,04 до 0,4 относительно светового выхода антрацена; конверсионная эффективность относительно антрацена та же, что и у пластиковых сцинтилляторов, время высвечивания меньше, чем у антрацена и составляет 10^{-9} секунд. Жидкие сцинтилляторы позволяют изготавливать детекторы больших размеров, имеют хорошую прозрачность, просты и дешевы, пригодны для регистрации всех видов излучений в геометрии 4π. Для регистрации тепловых нейтронов в раствор вводят соединения бора, кадмия, гадолиния и др.

Жидкие и пластмассовые сцинтилляторы имеют ряд существенных достоинств возможно приготовление сцинтилляторов очень большого объема, введение в них радиоактивных веществ, что особенно ценно при измерениях мягких β-излучателей (H^3 , C^{14} , S^{35}).

Неорганические сцинтилляторы, применяемые для детектирования и спектрометрии ионизирующего излучения, можно разделить на три группы:

- сульфиды (ZnS , активированные серебром или медью; CdS , активированные серебром);
- галогениды щелочных металлов (NaI , CsI , LiI , активированные таллием; CaI_2 , LiI , активированные европием, CsF — неактивированный);
- вольфраматы ($CaWO_4$, $CdWO_4$).

При выращивании кристаллов в большинство из них вводятся специальные примеси (активаторы), которые увеличивают плотность центров люминесценции. В таблице 1 даны характеристики некоторых неорганических кристаллических сцинтилляторов.

Таблица 1 - Характеристики некоторых неорганических сцинтилляторов

Материал	Длина волны при максимуме испускания, нм	Постоянная спада, мкс	Плотность, г/см ³	Гигроскопичность	Сцинтилляционная эффективность, %
NaI(Tl)	410	0,23	3,67	да	100
CsI(Na)	420	0,63	4,51	да	85
CsI(Tl)	565	1,00	4,51	нет	45
⁶ LiI(Eu)	470- 485	1,40	4,08	да	35
CaF ₂ (Eu)	435	0,94	3,19	нет	50
BaF ₂	325	0,63	4.88	нет	20
CsF	390	0,005	4,64	да	3-5
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂	480	0,30	7,13	нет	12
ZnWO ₄	480	5,0	7,87	нет	26
CdWO ₄	540	5,0	7,90	нет	40

В настоящее время в большинстве сцинтилляционных счетчиков используется йодистый натрий, активированный таллием. Химическая формула записывается как NaI(Tl). Добавки таллия позволяют увеличить световыход кристаллов при комнатной температуре. Когда при потерях энергии фотонов образуются фотоэлектроны, комптоновские электроны и электронно-позитронные пары, то в фосфоре они преобразуются в световую вспышку с длительностью около четверти микросекунды. Световые фотоны находятся в голубой области оптического спектра (длина волны около 4100 ангстрем или 410 нанометров). Из-за малого времени формирования вспышки счетчик может работать при больших скоростях счета. Интенсивность световой вспышки прямо пропорциональна энергии, потерянной фотоном в кристалле. Кристаллы NaI(Tl) почти исключительно используются для

регистрации гамма-излучения. Основная причина — его гигроскопичность. Кристалл поглощает влагу из окружающего пространства. Незащищенный кристалл NaI, оставленный на неделю без соответственной упаковки, разрушится, превратившись в мелкий порошок. Это означает, что кристалл должен быть всегда в герметичной упаковке, предотвращающей его контакт с содержащим влагу окружающим воздухом. Преимущественно кристаллы упаковываются в алюминиевый стакан, покрытый изнутри светоотражающим составом. Кристалл NaI(Tl) плотно помещается в стакан и закрывается стеклянным или кварцевым окном. Металлический контейнер эффективно защищает кристалл от попадания в него α - или β -частиц.

Для того, чтобы получить сцинтилляционный детектор, упакованный кристалл соединяется оптически с входным окном фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) — электронного прибора, преобразующего слабые световые вспышки в большой электрический сигнал. Световые фотоны из сцинтиллятора через светопровод попадают во входное окно ФЭУ. Внутренняя поверхность входного окна, покрыта материалом, который испускает электроны при попадании в него световых фотонов, называется фотокатодом. Электроны из фотокатода через фокусирующую диафрагму притягиваются к металлическим элементам, называемым динодами, благодаря приложенной снаружи разности потенциалов. Каждый ускоренный электрон, тормозясь в диноде, выбивает из него несколько вторичных электронов, которые благодаря специальной геометрии динода направляются на последующий динод.

Поток электронов собирается на последнем диноде, называемом анодом. Питание ФЭУ осуществляется с помощью источника стабилизированного высокого напряжения с делителем. В цепь анода включается сопротивление нагрузки, на котором формируется импульс напряжения. Количественной характеристикой процесса умножения электронов является коэффициент вторичной электронной эмиссии, который определяется как отношение числа выбитых из динода электронов к числу электронов падающих на его поверхность. Он зависит от

материала и состояния поверхности динода, от энергии и угла падения электронов и может принимать значение от 5 до 10.

Главное преимущество сцинтилляционных счетчиков перед газонаполненными является их значительно большая эффективность при регистрации гамма-излучения. Это связано с двумя факторами: плотностью и атомным номером вещества чувствительной области детектора. Плотность кристалла $\text{NaI} = 3,7 \text{ г/см}^3$, в то время как плотность газов находится вблизи $0,001 \text{ г/см}^3$. Таким образом, на пути гамма-излучения оказывается в несколько тысяч раз больше атомов, что сильно увеличивает вероятность взаимодействия.

В счетном режиме каждая сцинтилляционная вспышка вызывает один импульс тока в анодной цепи ФЭУ. Если размеры сцинтиллятора больше пробега электронов, то практически каждый электрон, созданный первичным излучением в сцинтилляторе, создает вспышку, которая вызывает электрический импульс. Таким образом, скорость счета импульсов $n_{\text{сч}}$ если не точно равна числу электронов, освобождающихся в единицу времени в объеме сцинтиллятора, то пропорциональна этому числу.

Для сцинтиллятора NaI(Tl) при энергии фотонов 1 МэВ, $d_{\text{сч}} = 1 \text{ см}$, $\epsilon_{\text{сч}} = 1 \%$ коэффициент вторичной электронной эмиссии равен 5,5. Это свидетельствует о том, что чувствительность по мощности дозы сцинтилляционного счетчика в несколько раз превосходит чувствительность газоразрядного счетчика. Очевидно, что значительная энергетическая зависимость чувствительности сцинтилляционных счетчиков требует особой осторожности при их использовании в дозиметрии.

Сцинтилляционные счетчики применяются для регистрации заряженных частиц, γ -излучения, быстрых и медленных нейтронов. Сцинтилляторы ZnS , активированные серебром или медью, применяют в виде монокристаллического порошка с толщиной слоя от 25 до 50 мг/см^2 (из-за низкой прозрачности для собственного излучения) для регистрации тяжелых частиц, обладающих малым пробегом в кристалле. Конверсионная эффективность сернистого цинка очень высока и достигает 28 % при возбуждении α -частицами. Сцинтиллятор CdS(Ag)

может быть выращен в виде небольшого полупрозрачного монокристалла. Применяют его для регистрации α -частиц.

Для исследования γ -излучения лучшим щелочно-галогидным сцинтиллятором является NaI(Tl) из-за большого фото-выхода. Световой выход сцинтиллятора NaI(Tl) линейно зависит от энергии β -частиц, протонов и дейтронов, а для α -частиц эта зависимость нелинейна. Световой выход уменьшается с увеличением плотности ионизации. Йодистый цезий по своим сцинтиллирующим свойствам аналогичен йодистому натрию. Зависимость световых выхода органических сцинтилляторов (антрацен, стильбен) от энергии тяжелых заряженных частиц (протонов, дейтронов и α -частиц) нелинейная.

Сцинтилляторы CaWO_4 и CdWO_4 используют в виде мелких кристаллов (из-за сложности выращивания монокристаллов) для регистрации тяжелых частиц.

Монокристаллы LiI, LiI(Tl) применяют для регистрации нейтронного излучения.

Содержание водорода в органических сцинтилляторах позволяет использовать их для регистрации быстрых нейтронов. Особенно широко для этой цели применяется стильбен.

С целью практического удобства для регистрации нейтронов используют датчики, которые позволяют одним детектором регистрировать нейтроны всех энергий от тепловых до быстрых в единицах эквивалентной дозы.

Такой датчик состоит из водородсодержащего замедлителя (как правило плексиглас) оптимальных размеров, в центре которого расположен детектор тепловых нейтронов (сернистый цинк с добавкой солей бора или лития), а на поверхности — сцинтиллятор быстрых нейтронов. Сцинтилляции от быстрых нейтронов передаются по светопроводу к фотокатоду ФЭУ.

Промежуточные нейтроны после замедления регистрируются детектором тепловых нейтронов, тепловые — непосредственно.

Наряду с традиционными детекторными сборками типа сцинтиллятор — ФЭУ (С-ФЭУ) для регистрации ионизирующих излучений применяются сцинтиэлектронные детекторы излучений (СЭЛДИ) нового поколения типа

сцинтиллятор — фотодиод (С-ФД). Детектор С-ФД по сравнению с конструкцией С-ФЭУ имеет существенно более широкую область применения что обусловлено следующими эксплуатационными преимуществами:

- широкий динамический диапазон (10^8 - 10^{12}), т.е возможность регистрации мощности дозы излучений от уровней ниже фонового (1 мкбэр/ч) до 10^4 - 10^6 бэр/ч;
- энергетический диапазон не менее 10^3 (10 кэВ - 10 МэВ);
- миниатюрность (объем от 0,5 до 2 см³), простота конструкции, надежность эксплуатации;
- высокая стабильность и воспроизводимость характеристик.

Отмеченные преимущества обеспечили применение детекторов СЭЛДИ в дефектоскопических системах, использующих принцип компьютерной томографии, в приборах контроля багажа и ручной клади, для регистрации мощности дозы излучения медицинских рентгенодиагностических аппаратов. Параметры сцинтилляторов, применяемых в СЭЛДИ, представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Параметры сцинтилляторов

Параметры	Сцинтилляторы			
	ZnSe	CWO	BGO	GSO
Световой выход с ФД относительно CsI (Tl), %	120 - 150	30-40	6,0 - 7,5	30 - 40
Время высвечивания, мкс	30-50	5-9	0,28-0,35	0,05
Эффективный атомный номер	33	66	74	58,60
Плотность, г/см ³	5,42	7,9	7,13	6,71
Максимум излучения, мкм	0,64	0,49	0,48	0,43
Энергетическое разрешение по Cs- 137, %	14-15	10-12	13-18	8-10
Радиационная длина, мм	28	10,6	10,5-11,2	13
Толщина 90%-го поглощения γ -излучения 150 кэВ, мм	14	3,0-3,5	2,30-2,44	6

При применении сцинтилляционных детекторов в гамма-спектроскопии на аноде ФЭУ формируется импульс напряжения, амплитуда которого пропорциональна интенсивности световой вспышки, попавшей на фотокатод, а значит и энергии, потерянной в кристалле фотоном.

Так как амплитуда выходного импульса пропорциональна энергии гамма-излучения, то сцинтилляционные детекторы можно использовать для гамма-спектроскопии. В этом процессе импульсы от ФЭУ сортируются по амплитуде прибором, называемым многоканальным амплитудным анализатором импульсов. Накопленная информация о количестве импульсов каждой амплитуды затем выводится на дисплей или распечатывается в виде амплитудного спектра.

Энергия гамма-линии может быть измерена по положению фотопика. Этот пик так назван в связи с реакцией, приведшей к его образованию. Калибровка энергетической шкалы производится по измерениям спектров известных источников. Энергетическое разрешение определяется как отношение ширины пика на полувысоте к энергии, выраженное в процентах. Разрешение сцинтилляторов с кристаллом NaI обычно равно 7 – 9 % при энергии гамма-излучения 662 КэВ (^{137}Cs). Это важный параметр гамма-спектрометра, так как он определяет насколько близко по энергии две гамма-линии могут быть отчетливо зарегистрированы как два отдельных пика вместо одного широкого пика. Энергетическое разрешение очень важно, когда регистрируется излучение неизвестного излучателя. К сожалению, энергетическое разрешение сцинтилляционных детекторов с NaI(Tl) недостаточно для многих применений в радиационной защите.

1.5 Трековый метод

Тяжелые заряженные частицы вызывают повреждения в твердых веществах с большим электрическим сопротивлением (в изоляторах) вдоль траектории движения. В местах повреждения вещество обладает повышенной растворимостью и при химическом травлении удаление вещества из зон повреждения идет более

интенсивно, чем из неповрежденных областей, в результате в местах пролета заряженных частиц проявляются видимые под микроскопом треки [1,2].

В некоторых веществах видимые треки оставляют только осколки деления, а α -частицы и легкие ядра отдачи не могут быть зарегистрированы. В более чувствительных веществах (в веществах, в которых для повреждений требуется меньшие энергетические потери заряженной частицы) треки от α -частиц становятся видимыми, и их легко отличить от треков, образованных осколками деления. Последнее обстоятельство делает возможным применение этого метода для нейтронной дозиметрии.

Разновидностью трекового метода регистрации нейтронов является использование детекторов на основе перегретой жидкости. Такие детекторы представляют собой равномерно распределенные в полиакриламиде капли фреона, который при комнатной температуре находится в перегретом состоянии. При облучении нейтронами в каплях образуются пузырьки газа, число которых пропорционально дозе облучения.

1.6 Активационный метод

Суть метода состоит в том, что под действием нейтронов в нерадиоактивных веществах могут образоваться радиоактивные ядра. т.е. нерадиоактивные вещества приобретают наведенную активность (активируются). Наведенная активность зависит от плотности потока нейтронов и энергии [1].

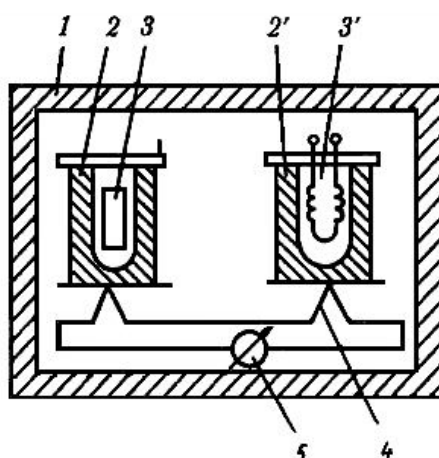
Активационный метод удобен тем, что позволяет определить большую (аварийную) дозу и спектр нейтронов в присутствии интенсивного γ -излучения, а при известном спектре нейтронов — эквивалентную дозу.

Для ядерно-энергетических установок приходится учитывать три группы нейтронов: быстрые, промежуточные и тепловые. Спектр быстрых нейтронов деления хорошо известен, сечения активации для пороговых детекторов (детекторов, которые активируются, начиная с какой-то определенной пороговой энергии нейтронов) не зависят от спектра нейтронов.

1.7 Калориметрический метод

Энергия ядерного излучения, поглощенного веществом, превращается в тепло. Количество тепла зависит от интенсивности излучения, размеров и состава тела. Пусть на поверхность тела издается интенсивность излучения I , а каждая частица теряет в теле долю энергии η . Для заряженного излучения значение η близко к единице, однако для γ -квантов оно может значительно отличаться от единицы [3].

Следовательно, теплу Q , соответствует определенное значение интенсивности I . Пропорциональность величин Q и I используют при измерении дозы получения. По выделяющемуся теплу определяют активность препаратов. Тепло Q можно измерить калориметром. В зависимости от назначения и принципов измерения тепла Q калориметры различаются по конструкции. Одним из калориметров, представленным на рисунке 16, определяют α - и β -активности препаратов.



1 - корпус; 2,2' - калориметрические цилиндры; 3 - источник излучения; 3' - нагревательная катушка; 4 - термопара; 5 - гальванометр

Рисунок 16 – Схема калориметра

Он состоит из двух калориметрических цилиндров, заключенных в герметичный металлический корпус. В одном из цилиндров помещена проволочная катушка, служащая для градуировки калориметра. В дно каждого цилиндра вмонтированы термопары, включенные в электрическую цепь с гальванометром. Во

второй калориметрический цилиндр опускают исследуемый препарат с известной энергией распада. Калориметр помещают в термостат, поддерживающий постоянную температуру корпуса. Перед началом измерения калориметр градуируют. Для этого через проволочную катушку пропускают электрический ток. Мощность катушки расходуется на повышение температуры калориметрических цилиндров и теплоотдачу с поверхности калориметра в термостат. Так как мощность катушки постоянна, то с течением времени температуры калориметрических цилиндров с катушкой и без катушки станут равными соответственно t_1 и t_2 , а вся мощность катушки будет утекать в термостат. Из этого условия находят связь между мощностью катушки Q , внешней поверхностью калориметра S и разностью температур $\Delta t = t_1 - t_2$. По разности температур и показаниям гальванометра и градуируют калориметр. Затем в проградуированный калориметр опускают исследуемый препарат. Если в радиоактивном распаде испускаются только α -частицы, то тепловая мощность препарата пропорциональна энергии α -распада, так как все α -частицы поглощаются в калориметре. При измерении реактивности учитывают, что примерно $2/3$ энергии распада уносится нейтрально, а $1/3$ энергии распада поглощается в калориметре. Если же α - и β -распады сопровождаются испусканием γ -квантов, то делают поправку на поглощение γ -квантов в калориметре.

Результаты, полученные калориметрическим методом, зависят только от измеренного количества тепла. На них не влияют размеры и вес препарата, особенности взаимодействия ядерного излучения с веществом. Калориметрические методы незаменимы при изучении дозы сложного по составу излучения мощных ядерных реакторов. Найти точно дозу такого излучения другими методами весьма затруднительно.

Калориметрические методы детектирования ионизирующей радиации характеризуются низкой чувствительностью. Поэтому их применяют для измерения высоких активностей и доз излучения.

1.8 Химический метод

Химический метод дозиметрии основан на измерении числа молекул ионов, образующихся или претерпевших изменения при поглощении веществом излучения.

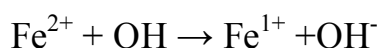
Число образующихся молекул или ионов (выход радиационно-химической реакции) пропорционально поглощенной дозе излучения [1,3].

Радиационно-химический выход вещества (G) можно разделить на четыре группы:

- 1) $G < 0,1$;
- 2) $0,1 < G < 20$;
- 3) $20 < G < 100$;
- 4) $G > 100$.

Высокий выход в веществах 3-й и 4-ой групп обусловлен, как правило, цепными химическими реакциями. Для целей дозиметрии наиболее пригодны вещества 2-й и 3-й групп, так как они имеют лучшую воспроизводимость результатов и меньше чувствительны к влиянию освещения, примесей и колебаний температуры.

Многие химические дозиметры представляют собой водные растворы некоторых веществ. Наиболее распространенной химической системой, применяемой при дозиметрии ионизирующих излучений является раствор соли FeSO_4 в разбавленной серной кислоте. В растворе в результате электролитической диссоциации присутствуют ионы двухвалентного железа Fe^{2+} . Под действием излучения происходит радиолиз воды (ионизация) с образованием свободных радикалов H , OH , и окислителей, которые окисляют двухвалентное железо до трехвалентного по реакциям:



Появление Fe^3 изменяет оптическую плотность раствора, которая измеряется

спектрофотометром (прибором для измерения поглощения видимого света в различных областях спектра).

Изменение оптической плотности зависит от числа образовавшихся в результате облучения и завершения всех реакций ионов трехвалентного железа и служит мерой поглощенной энергии.

Таким образом, по изменению оптической плотности раствора можно определить концентрацию продукта, образовавшегося в растворе под действием излучения. Зная концентрацию образованных ионов и радиационно-химический выход реакции их образования, можно легко вычислить поглощенную дозу облучения.

Например, для ферросульфатного дозиметра радиационно-химический выход составляет $15,6 \pm 0,5$.

Основным компонентом данного дозиметра является вода, и эффективный атомный номер по поглощению фотонного излучения для раствора близок к эффективному атомному номеру воды, а, следовательно, и живой ткани. Поэтому дозиметр практически не имеет хода с жесткостью в диапазоне энергий 100 кэВ - 2 МэВ. Погрешность измерения составляет не более 1 %.

В состав химических дозиметров тепловых нейтронов добавляют небольшое количество солей бора или лития. Для учета действия γ - фотонов одновременно с нейтронным дозиметром облучают аналогичный дозиметр без добавок бора и лития.

Известно некоторое количество различных веществ, которые в результате окислительных или восстановительных реакций, протекающих под действием ионизирующего излучения, меняют свою окраску. Если в раствор такого вещества добавить около 10 % желатина, а затем раствор охладить, то получится гель-студенистое вещество, сохраняющее свою форму. Если облученный гель разрезать на части, то можно получить пространственное распределение поглощенной дозы.

2 Защита от ионизирующих излучений

2.1 Единицы измерения активности и величины, характеризующие поля ионизирующего излучения

2.1.1 Единицы активности

Самопроизвольное ядерное превращение называют радиоактивным распадом. В результате радиоактивного распада каждую секунду распадается лишь некоторая часть общего числа атомных ядер радиоактивного элемента. Эта часть, характеризующая вероятность распада на одно ядро в единицу времени, называется постоянной распада λ . Она не зависит ни от химических, ни от физических условий и служит мерой неустойчивости ядер данного радиоактивного вещества. Например, из общего числа ядер радия только $1,38 \cdot 10^{-11}$ часть распадается каждую секунду. Если имеется 10^{13} ядер радия, то в одну секунду распадается 138 ядер, следовательно, величина $1,38 \cdot 10^{-11}$ [1/с] является постоянной распада радия.

Закон радиоактивного распада вещества определяется по формуле

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

где N - число нераспавшихся ядер данного элемента в момент времени t ;

N_0 - число нераспавшихся радиоактивных ядер в начальный момент времени, $t=0$;

λ - постоянная распада элемента [1/с].

Скорость радиоактивного распада характеризуются периодом полураспада вещества $T_{1/2}$, т.е. временем, в течение которого распадается половина первоначального количества ядер данного радионуклида.

Постоянная распада λ и период полураспада связаны соотношением

$$\lambda = \frac{0,693}{T_{1/2}}. \quad (2)$$

Активность радионуклида в источнике - отношение числа dN_0 спонтанных ядерных переходов из определенного ядерно-энергетического соотношения радионуклида, происходящих в данном его количестве за интервал времени dt , к интервалу времени

$$A = \frac{dN_0}{dt}. \quad (3)$$

Единицы измерения активности в системе СИ - Беккерель [Бк], внесистемная единица активности - Кюри [Ки]. Один Беккерель равен одному распаду в секунду (1Бк = 1расп/с). Один Кюри равен $3,7 \cdot 10^{10}$ распадов в секунду (1Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ расп/с). Соотношение между единицами измерения активности: $1\text{Бк} = 2,703 \cdot 10^{-11}$ Ки.

2.1.2 Единицы дозы излучения

На рисунке 17 дана схема образования поглощенной, экспозиционной и эквивалентной доз в поле смешанного непосредственно (излучение заряженных частиц) и косвенно (излучение фотонов и нейтронов) ионизирующего излучения. При взаимодействии ионизирующего излучения со средой, часть энергии фотонов будет являться потерянной излучением энергией, которая преобразуется в энергию, передающую веществу (кинетическую энергию освобожденных электронов, теряемую при их взаимодействии с веществом), и поглощенную веществом энергию излучения, характеризующую энергию теплового движения молекул данного вещества [4].



Рисунок 17 - Схема образования доз в поле излучения

Для определения меры поглощенной энергии любого вида излучения в среде принято понятие поглощенной дозы излучения (дозы излучения). Поглощенная доза излучения D определяется как отношение средней энергии dW , переданной

ионизирующим излучением веществу, в элементарном объеме, и массе dm вещества в этом объеме:

$$D = \frac{dW}{dm} . \quad (4)$$

За единицу поглощенной дозы излучения в СИ применяется Грей [Гр]. Один Грей равен поглощенной дозе ионизирующего излучения, при которой веществу массой 1 кг передается энергия ионизирующего излучения 1 Дж (1 Гр = 1 Дж/кг).

Внесистемная единица поглощенной дозы излучения - рад. Рад соответствует поглощению 100 эрг энергии любого вида ионизирующего излучения в 1 г облученного вещества. Соотношение между единицами имеет следующий вид:

$$1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}.$$

Излучения различного вида вызывают различные повреждения в биологической ткани. Для биологического воздействия различных видов ионизирующих излучений в задачах радиационной безопасности необходимо введение понятия эквивалентная доза.

Эквивалентная доза (H) определяется как произведение поглощенной дозы D на средний коэффициент качества (K) ионизирующего излучения в данном элементе объема биологической ткани стандартного состава

$$H = DK. \quad (5)$$

Эквивалентная доза излучения вводится для оценки радиационной опасности хронического облучения человека в поле различных ионизирующих излучений и определяется суммой произведений поглощенной дозы D_i n видов излучения и соответственного коэффициента качества излучения K_i :

$$H = \sum_{i=1}^n D_i K_i . \quad (6)$$

Для рентгеновского, γ -излучения, β -излучения $K=1$; для нейтронов с энергией ≤ 20 МэВ $K=3$; для нейтронов с энергией 0,1 - 10 МэВ и для протонов с энергией ≤ 10 МэВ $K=10$; для α -излучения с энергией ≤ 10 МэВ $K=20$; для тяжелых ядер отдачи $K=20$.

За единицу эквивалентной дозы в СИ применяется зиверт (Зв). Зиверт - такое количество энергии любого вида излучения, поглощенной в 1 кг биологической ткани, при котором наблюдается такой же биологический эффект, как и при поглощенной дозе в 1Гр образцового рентгеновского или γ -излучения.

Внесистемная единица эквивалентной дозы - бэр (биологический эквивалент рада) $1 \text{ бэр} = 10^{-2} \text{ Зв} = 1 \text{ сЗв}$.

При работе с источниками ионизирующих излучений облучение тела человека может быть неравномерным. Так, при попадании радионуклидов внутрь организма воздействию могут подвергаться отдельные органы и ткани. Иногда также требуется оценить ущерб, нанесенный здоровью человека в результате облучения различных органов и тканей, имеющих неодинаковую восприимчивость к радиационному повреждению. Поэтому в целях радиационной защиты вводится понятие эффективная эквивалентная доза облучения, которая определяется соотношением:

$$H_{эф} = \sum_i H_i W_i , \quad (7)$$

где H_i - среднее значение эквивалентной дозы облучения в i -м органе или ткани человека;

W_i - взвешивающий коэффициент, равный отношению ущерба облучения i -го органа или ткани человека к ущербу от равномерного облучения всего тела человека при одинаковых эквивалентных дозах облучения:

- для половых желез $W = 0,25$;

- для молочных желез $W = 0,15$;
- красный костный мозг $W = 0,03$;
- поверхности костных тканей $W = 0,03$;
- остальные ткани $W = 0,3$.

Экспозиционная доза X - отношение суммарного заряда dQ всех ионов одного знака, созданных в воздухе, когда все электроны и позитроны, освобожденные фотонами в элементарном объеме воздуха с массой dm , полностью остановились в воздухе, к массе dm воздуха в этом объеме

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (8)$$

Понятие экспозиционная доза установлено только для электромагнитного излучения с энергией от 1 кэВ до 3 МэВ. Единица экспозиционной дозы в СИ - кулон на кг (Кл/кг). Внесистемная единица экспозиционной дозы фотонного излучения - рентген (Р).

Рентген - единица экспозиционной дозы фотонного излучения, при прохождении которого через 0,001293 грамма (1 см^3) сухого атмосферного воздуха при нормальных условиях в результате завершения всех коммутационных процессов в воздухе создаются ионы, несущие одну электростатическую единицу количества электричества каждого знака. Соотношение между единицами:

$$- 1 \text{ Кл/кг} = 3,88 \cdot 10^3 \text{ Р};$$

$$- 1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}.$$

Экспозиционной дозе 1 Кл/кг соответствует поглощенная доза 33,8 Гр в воздухе или 37,2 Гр в биологической ткани; для внесистемных единиц 1 Р соответствует поглощенной дозе 0,873 рад в воздухе или 0,96 рад в биологической ткани.

Для определения воздействия на среду косвенно ионизирующего излучения вводится понятие кермы (kinetic energy released in material). Керма (K) - отношение суммы начальных кинетических энергий dE_k всех заряженных ионизирующих

частиц, образовавшихся под действием косвенно ионизирующего излучения в элементарном объеме вещества к массе dm вещества в этом объеме

$$K = \frac{dE_k}{dm}. \quad (9)$$

Единица измерения кермы совпадает с единицей измерения поглощенной дозы, т.е. в СИ - грей (Гр), внесистемная единица - рад.

Мощность поглощенной дозы D' (Гр/с , рад/с); мощность эквивалентной дозы H' (Зв/с, бэр/с); мощность экспозиционной дозы X' (Кл/кг*с, Р/с); мощность кермы K' (Гр/с, рад/с) - отношение приращения соответствующей дозы за интервал времени dt к этому интервалу:

$$D' = \frac{dD}{dt}; H' = \frac{dH}{dt}; X' = \frac{dX}{dt}; K' = \frac{dK}{dt}. \quad (10)$$

2.1.3 Гамма – постоянная. Керма – постоянная

Мощность дозы, создаваемая γ - излучением на единицу активности, зависит от схемы распада, т.е. количество фотонов, приходящихся на один распад, энергии фотонов и активности радионуклида. Мощность дозы γ - излучением единичной активности можно всегда определить, если известна γ -постоянная, характеризующая данный радионуклид.

Гамма - постоянную рассчитывают по экспозиционной дозе. Различают дифференциальную и полную γ -постоянную.

Дифференциальная γ -постоянная Π относится к определенной моноэнергетической линии гамма- спектра радионуклида.

Полная γ -постоянная (или гамма - постоянная) Γ данного радионуклида численно равна мощности экспозиционной дозы (Р/ч), создаваемой фотонами всех

спектральных линий точечного изотропного γ - источника активностью в 1 мКи на расстоянии 1 см без начальной фильтрации.

Единица измерения γ -постоянной во внесистемных единицах выражается в $(P \cdot \text{см}^2)/(\text{ч} \cdot \text{мКи})$. Гамма - постоянные большинства радионуклидов определены расчетом. На основании этих расчетов составлена таблица 3.

Таблица 3 – Значение периода полураспада, гамма-постоянных для некоторых радионуклидов

Нуклид	$T_{1/2}$	$\Gamma, (P \cdot \text{см}^2)/(\text{ч} \cdot \text{мКи})$	$\Gamma_{\text{СИ}}, (\text{аГр} \cdot \text{м}^2 / \text{с} \cdot \text{Бк})$
Na^{22}	2,602 года	11,85	78,02
Fe^{59}	45,1 сут	6,177	40,67
Co^{57}	270,9 сут	0,553	3,64
Co^{60}	5,272 года	12,85	84,63
Kr^{85}	10,71 года	1,29	8,49
I^{131}	8,04 сут	2,156	14,20
I^{133}	20,8 ч	3,36	22,06
Cs^{134}	2,062 года	8,724	57,44
$\text{Cs}^{137} + \text{Ba}^{137}$	30,174 года (2,552 мин)	3,242	21,33
Ra^{226}	1620 лет	9,031	59,45

В соответствии с определением:

$$X' = \Gamma \frac{A}{r^2} \quad (11)$$

или

$$X = \Gamma \frac{At}{r^2}, \quad (12)$$

где Γ - гамма-постоянная $(P \cdot \text{см}^2)/(\text{ч} \cdot \text{мКи})$;

X' - мощность экспозиционной дозы, P/ч;

r – расстояние, см;

A – активность, мКи.

Гамма-постоянную в единицах СИ удобно определять через поглощенную дозу в воздухе так как она справедлива для всех видов ионизирующего излучения и единица ее измерения имеет простое целочисленное соотношение с внесистемной единицей (1Гр=100 рад.). В системе СИ гамма-постоянную определяют следующим образом: гамма- постоянной радионуклида называют мощность поглощенной дозы в воздухе, создаваемой γ -излучением точечного радионуклидного источника активностью $A = 1$ Бк на расстоянии $r = 1$ м от него без начальной фильтрации.

Соотношение между гамма постоянными:

$$\Gamma_{СИ} \left(\frac{a\Gamma p \cdot m^2}{c \cdot Bk} \right) = 6,555 \cdot \Gamma \left(\frac{P \cdot cm^2}{MKu} \right)$$

Если известна активность A , (Бк) точечного источника, то мощность поглощенной дозы в воздухе $D' \left(\frac{a\Gamma p}{c} \right)$, на расстоянии r , (м) от него можно рассчитать по формуле

$$D' = \frac{A\Gamma_{СИ}}{r^2}. \quad (13)$$

Для перехода от мощности поглощенной дозы в воздухе D' , (аГр/с), к мощности эквивалентной дозы H' , (аЗв / с), можно для γ -излучения использовать следующее соотношение:

$$H' = 1,09 \cdot D' = 1,09(A\Gamma_{СИ} / r^2). \quad (14)$$

Керма постоянной Γ_{δ} , (Гр·м²)/(с·Бк), называется отношение мощности, воздушной кермы K_{δ} заданного порогового значения δ от точечного изотропно-

излучающего источника радионуклида, находящегося в вакууме на расстоянии L от источника, умноженный на квадрат этого расстояния, и активности A источника:

$$\Gamma_{\delta} = \frac{K_{\delta} \cdot L^2}{A}. \quad (15)$$

2.1.4 Радиевый гамма-эквивалент. Керма-эквивалент

Ионизационное действие γ -излучения любых радиоактивных препаратов оценивают сравнением с радиевым эталонным источником при одинаковых условиях измерения. Так появилась величина, называемая гамма-эквивалентом (радиевый гамма-эквивалент), которая измеряется в миллиграмм-эквивалентах радия (мг.эkv Ra). Гамма-эквивалент — нестандартизированная, но широко используемая в практике величина [5,6].

Экспериментально установлено, что точечный источник Ra активностью 1нКи, находящийся в равновесии со всеми продуктами распада, с фильтром из платины толщиной 0,5 мм создает на расстоянии 1см мощность экспозиционной дозы, равную 8,4 Р/ч. Значение гамма-постоянной принимается за эталон для сравнения мощности дозы от источников γ -излучения, имеющих различные гамма-постоянные.

Миллиграм-эквивалент радия (мг.эkv Ra) — единица гамма-эквивалента радиоактивного препарата, γ -излучение которого при данной фильтрации и тождественных условиях измерения создает такую же мощность экспозиционной дозы как и γ -излучение одного миллиграмма государственного эталона радия в равновесии с основными дочерними продуктами распада при платиновом фильтре толщиной 0,5 мм.

Если источник γ -излучения активностью $A=1$ нКи (при отсутствии фильтрации) создает мощность экспозиционной дозы, равную 8,4 Р/ч (т.е. $\Gamma = 8,4 \text{ (Р}\cdot\text{см}^2)/(\text{ч}\cdot\text{мКи})$), на расстоянии 1см от точечного источника, гамма-эквивалент M будет равен 1 мг. эkv Ra

$$M = \frac{\Gamma \cdot A}{8,4} . \quad (16)$$

Соотношение между мощностью экспозиционной дозы излучения X' [мР/ч], и гамма эквивалентам H , мг.экв Ra, точечного источника, на расстоянии r , см, может быть выражена следующим образом:

$$X' = \frac{M \cdot 8,4 \cdot 10^3}{r^2} . \quad (17)$$

Связь между активностью A , мКи, и мощностью экспозиционной дозы может быть представлена формулой

$$X' = \frac{A \cdot \Gamma \cdot 10^3}{r^2} . \quad (18)$$

Гамма-эквивалент M , мг.экв Ra, радионуклидного источника активностью A , Бк, может быть рассчитан с использованием гамма-постоянной $\Gamma_{СИ}$ по формуле

$$M = \frac{A \cdot \Gamma_{СИ}}{3,7 \cdot 10^7 \cdot 55,3} , \quad (19)$$

где $3,7 \cdot 10^7$ - активность в беккерелях источника с гамма-эквивалентом 1мг.экв Ra (1мг радия соответствует $3,7 \cdot 10^7$ Бк);

55,3 (аГр·м²/с·Бк) гамма-постоянная радия в равновесии с основными дочерними продуктами распада после платинового фильтра толщиной 0,5 мм.

Тогда мощность поглощенной дозы в воздухе D' , (аГр/с), точечного источника с гамма-эквивалентом M , мг.экв Ra на расстоянии r , м, от него рассчитывается по формуле

$$D' = \frac{3,7 \cdot 10^7 M \cdot 55,3}{r^2}. \quad (20)$$

Керма-эквивалентом источника K_e , ($\text{Гр} \cdot \text{м}^2/\text{с}$), называется мощность воздушной кермы K_δ фотонного излучения с энергией фотонов больше заданного порогового значения δ точечного изотропно-излучающего источника, находящегося в вакууме, на расстоянии L от источника, умноженная на квадрат этого расстояния по формуле

$$K_e = K' \cdot L^2. \quad (21)$$

2.1.5 Допустимые уровни ионизирующего излучения

Основным нормативным документом, регламентирующим уровни воздействия ионизирующих излучений в России является НРБ – 99/09 (Нормы радиационной безопасности) [7]. Требования по обеспечению радиационной безопасности регламентируются «Основными санитарными правилами обеспечения радиационной безопасности» ОСПОРБ - 99.

Естественный фон облучения человека обусловлен внешним и внутренним облучением. Внешнее облучение - воздействие на организм ионизирующих излучений от внешних источников. Внутреннее облучение вследствие воздействия на организм ионизирующих излучений радионуклидов, находящихся внутри организма.

НРБ – 99/09 устанавливает следующие категории облучаемых лиц:

- персонал (группы А и Б);
- все население, включая лиц из персонала, вне сферы и условий их производственной деятельности.

Для категорий облучаемых лиц устанавливаются три класса нормативов:

- основные пределы доз (ПД), приведенные в таблице 4;
- допустимые уровни монофакторного воздействия (для одного радионуклида, пути поступления или одного вида внешнего облучения), являющиеся производными от основных пределов доз: пределы годового поступления (ПГП),

допустимые среднегодовые объемные активности (ДОВА), среднегодовые удельные активности (ДУА) и другие;

- контрольные уровни (дозы, уровни, активности, плотности потоков и др.).

Их значения должны учитывать достигнутый в организации уровень радиационной безопасности и обеспечивать условия, при которых радиационное воздействие будет ниже допустимого.

Таблица 4 - Основные пределы доз

Нормируемые величины*	Пределы доз	
	Персонал (группа А)**	Население
Эффективная доза	20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год	1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год
Эквивалентная доза за год в хрусталике глаза*** коже**** кистях и стопах	150мЗв 500 мЗв 500 мЗв	15мЗв 50мЗв 50мЗв

* Допускается одновременное облучение до указанных пределов по всем нормируемым величинам.

** Основные пределы доз, как и все остальные допустимые уровни облучения персонала группы Б равны 1/4 значений для персонала группы А.

*** Относится к дозе на глубине 300 мг/см²

**** Относится к среднему по площади в 1 см² значению в базальном слое кожи толщиной 5 мг/м² под покровным слоем толщиной 5 мг/см². На ладонях толщина покровного слоя - 40 мг/см². Указанным пределом допускается облучение всей кожи человека при условии, что в пределах усредненного облучения любого 1 см² площади кожи этот предел не будет превышен. Предел дозы при облучении кожи лица обеспечивает непревышение предела дозы на хрусталик от бета - частиц.

Основные пределы доз облучения не включают в себя дозы от природного и медицинского облучения, а также дозы вследствие радиационных аварий. На эти виды облучения устанавливаются специальные ограничения.

Эффективная доза для персонала не должна превышать за период трудовой деятельности (50 лет) - 1000 мЗв, а для населения за период жизни (70 лет) - 70 мЗв. Начало периодов введено с 1 января 2000 года.

При одновременном воздействии на человека источников внешнего и внутреннего облучения годовая эффективная доза не должна превышать пределов доз, установленных в таблице 4.

В стандартных условиях монофакторного поступления радионуклидов, годовое поступление радионуклидов через органы дыхания и среднегодовая объемная активность их во вдыхаемом воздухе не должны превышать числовых значений предела годового поступления (ПГП) и допустимой среднегодовой объемной активности (ДОА), приведенных в приложении Б, где пределы доз взяты равными 20 мЗв в год для персонала и 1 мЗв в год для населения.

В условиях нестандартного поступления радионуклидов величины ПГП и ДОА устанавливаются методическими указаниями федерального органа госсанэпиднадзора.

Для персонала группы А значения ПГП и ДОА дочерних продуктов изотопов радона (^{222}Rn и ^{220}Rn); ^{218}Po (RaA); ^{214}Pb (RaB); ^{214}Bi (RaC); ^{212}Pb (ThB); ^{212}Bi (ThC) в единицах эквивалентной равновесной активности составляют:

$$\text{ПГП: } 0,10 \text{ П}_{\text{RaA}} + 0,52 \text{ П}_{\text{RaB}} + 0,38 \text{ П}_{\text{RaC}} = 3,0 \text{ МБк}$$

$$0,91 \text{ П}_{\text{ThB}} + 0,09 \text{ П}_{\text{ThC}} = 0,68 \text{ МБк}$$

$$\text{ДОА: } 0,10 \text{ А}_{\text{RaA}} + 0,52 \text{ А}_{\text{RaB}} + 0,38 \text{ А}_{\text{RaC}} = 1200 \text{ Бк/м}^3$$

$$0,91 \text{ А}_{\text{ThB}} + 0,09 \text{ А}_{\text{ThC}} = 270 \text{ Бк/м}^3,$$

где П_i и А_i - годовые поступления и среднегодовые объемные активности в зоне дыхания соответствующих дочерних продуктов изотопов радона.

Для женщин в возрасте до 45 лет, работающих с источниками излучения, вводятся дополнительные ограничения: эквивалентная доза на поверхности нижней части области живота не должна превышать 1 мЗв в месяц, а поступление радионуклидов в организм за год не должно быть более 1/20 предела годового поступления для персонала. В этих условиях эквивалентная доза облучения плода за 2 месяца невыявленной беременности не превысит 1 мЗв.

Администрация предприятия обязана перевести беременную женщину на работу, не связанную с источниками ионизирующего излучения, со дня ее информации о факте беременности, на период беременности и грудного вскармливания ребенка.

Для студентов и учащихся старше 16 лет, проходящих профессиональное обучение с использованием источников излучения, годовые дозы не должны превышать значений, установленных для персонала группы Б.

2.2 Расчет защиты по кратности ослабления экспозиционной дозы, мощности экспозиционной дозы и по заданной активности

Обозначим : κ — кратность ослабления γ -излучения, которая представляет собой отношение измеренной или рассчитанной экспозиционной дозы X (мощность экспозиционной дозы X') без защиты и предельно допустимой экспозиционной дозе $X_{\text{ПДДа}}$ ($X_{\text{ДМДа}}$) в той же точке за защитным экраном толщиной x [5]

$$\kappa(E\gamma) = \frac{X}{X_{\text{ПДДа}}} = \frac{X'}{X_{\text{ДМДа}}} \quad (22)$$

2.3 Примеры решения задач по расчету защиты от γ -излучения

2.3.1 Мощность экспозиционной дозы, измеренная дозиметром от точечного изотропного источника γ -излучения C_0^{60} ($E_\gamma = 1,25$ МэВ) на рабочем месте равна $X=77,2$ мкР/с. Определить толщину свинцовой защиты $X_{\text{рв}}$, если продолжительность работы источников для лиц категории А составляет $t=64$ (для 6-дневной рабочей недели) [8].

2.3.1.1 Решение (внесистемные единицы)

Допустимая мощность дозы ДМД за неделю для лиц категории А определяется как (ПДД принимается для I гр критических органов):

$$X'_{\text{ДМДa}} = \frac{\text{ПДД}}{48} = 0,1 \text{ бэр/нед.}$$

Тогда ДМД за сутки при времени работы t часов в сутки:

$$X'_{\text{ДМДa}} = \frac{X'_{\text{ДМДa}}(\text{нед})}{6 \cdot t \cdot 3600} = \frac{4,63}{t},$$

где 6 – число рабочих дней в неделе;

3600 – число секунд в одном часе;

$$X'_{\text{ДМДa}} = \frac{4,63}{t} = \frac{4,63}{6} = 0,772 \text{ (мкР/ч).}$$

Необходимая кратность ослабления:

$$\kappa = \frac{X'}{X'_{\text{ДМДa}}} = \frac{77,2}{0,771} = 100.$$

Из приложения В, зная энергию γ -излучения $E_\gamma = 1,25 \text{ МэВ}$ и $\kappa = 100$ определяем толщину $X_{\text{рв}} = 8,45 \text{ см}$ свинца.

2.3.1.2 Решение (в единицах СИ)

$1\text{Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$, тогда

$$X'_{\text{ДМДa}} = \frac{4,63 \cdot 2,58 \cdot 10^{-4}}{6} = 2 \cdot 10^{-4}, \text{ мкКл/(кг}\cdot\text{с)};$$

$$X' = 77,2 \cdot 2,58 \cdot 10^{-4} = 2 \cdot 10^{-2}, \text{ Кл/(кг}\cdot\text{с)};$$

$$k = \frac{2 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 10^{-4}} = 100;$$

$$X_{Pb} = 84,5 \cdot 10^{-3}.$$

2.3.2 Имеется гамма-установка терапевтическая, содержащая точечный изотропный источник Co^{60} , гамма-эквивалент которого равен 50 г-экв Ra ($E_{\gamma} = 1,25$ МэВ). При подготовке установки к работе источник выводится в рабочее положение по незащищенному шлангу. Рассчитать необходимую толщину бетонной стенки x_b , отделяющий пульт управления оператора от установки, если $r = 2$ м. Защита должна обеспечить предельно допустимые уровни облучения для персонала при 6-часовом рабочем дне. При проектировании учесть двукратный запас $n=2$.

2.3.2.1 Решение (внесистемные единицы)

Определяем активность источника по формуле (16):

$$A = \frac{8,4 \cdot M}{\Gamma} = \frac{8,4 \cdot 50 \cdot 10^3}{12,9} = 3256 \cdot 10^3, \text{ мКи};$$

$$\Gamma = 12,9 \text{ ((Р}\cdot\text{см}^2)/(\text{ч}\cdot\text{мКи})) \text{ (по таблице 3)}.$$

Определяем мощность экспозиционной дозы от незащищенного источника на расстоянии 2 м.

$$X' = \frac{8,4M \cdot 10^6}{r^2 \cdot 10^4 \cdot 3600} = 2916 \text{ (мкР/с)}.$$

Допустимая мощность экспозиционной дозы при $t = 6$ ч составляет:

$$X'_{\text{ДМДд}} = \frac{4,63}{t} = 0,772 \text{ (мкР/с)}.$$

Определяем кратность ослабления с учетом двукратного запаса $n=2$:

$$\kappa = \frac{X' \cdot n}{X'_{\text{ДМДа}}} = \frac{2916 \cdot n}{0,772} = 7554.$$

Толщину защиты (бетонной) определим, используя приложение В. При $\kappa = 7554$ и $E_\gamma = 1,25$ МэВ, $x_6 = 3,5$ см.

2.3.2.2 Решение (в единицах СИ)

Выразим все необходимые величины в единицах СИ:

$$A = 32,56 \cdot 10^3 \text{ мКи} = 32,56 \cdot 10^3 \cdot 3,7 \cdot 10^7 = 120,47 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$$

Определяем для Co^{60} $\Gamma_{\text{СИ}}$ по формуле

$$\Gamma_{\text{СИ}} = 0,1939 \text{ Г},$$

где Γ определяется по таблице 3 для Co_0^{60} . Имеем:

$$\Gamma_{\text{СИ}} = 2,5 \cdot 10^{-18} \text{ (Кл} \cdot \text{м}^2 \text{)/(кг} \cdot \text{с} \cdot \text{Бк)}.$$

Определяем мощность экспозиционной дозы:

$$X' = \frac{A \cdot \Gamma_{\text{СИ}}}{r^2} = \frac{120,47 \cdot 10^{10} \cdot 2,5 \cdot 10^{-18}}{4} = 75,29 \cdot 10^{-8} \text{ (Кл/кг} \cdot \text{с)}.$$

Допустимая мощность экспозиционной дозы при $t = 6$ ч составляет

$$X'_{\text{ДМДа}} = 0,772 \cdot 2,58 \cdot 10^{-10} = 1,99 \cdot 10^{-10} \text{ (Кл/кг} \cdot \text{с)}.$$

Тогда:

$$\kappa = \frac{X' \cdot n}{X'_{\text{ДМДА}}} = \frac{75,29 \cdot 10^{-8} \cdot 2}{1,99 \cdot 10^{-10}} = 7567$$

При $\kappa = 7567$ и $E_{\gamma} = 1,25$ МэВ; $x_6 = 93,5 \cdot 10^{-2}$ м.

2.3.3 Точечный изотропный источник Co^{60} транспортируется в течение двух суток. Активность источника $A = 5,4$ Ки. Определить толщину свинцового контейнера, учитывая что расстояние от экспедитора до источника $r = 2$ м.

2.3.3.1 Решение (внесистемные единицы)

Определим экспозиционную дозу за 1 сутки по формуле:

$$X = \frac{A \cdot \Gamma \cdot t}{r^2} = \frac{5,4 \cdot 10^3 \cdot 12,9 \cdot 24}{4 \cdot 10^4} = 41,8 \text{ Р.}$$

$$\text{Кратность ослабления } \kappa = \frac{41,8}{0,0167} = 2500.$$

По таблице приложения В для $\kappa = 2500$ и $E_{\gamma} = 1,25$ МэВ определяем $x_{\text{РВ}} = 137$ мм.

2.3.3.2 Решение (в единицах СИ)

Определяем экспозиционную дозу за 1 сутки. Выразим все необходимые для расчета величины в единицах СИ: $A = 5,4$; $K_{\text{л}} = 5,4 \cdot 3,7 \cdot 10^{10} = 19,98 \cdot 10^{-18}$ Кл·м²/кг·с·Бк.

$$X = \frac{A \cdot \Gamma \cdot t}{r^2} = \frac{19,98 \cdot 10^{10} \cdot 25 \cdot 10^{-18} \cdot 86400}{4} = 10,79 \cdot 10^{-3}, \text{ Кл/кг.}$$

Предельно-допустимая экспозиционная доза за 1 сутки равна:

$$X_{\text{ПДДа}} = 0,0167 \cdot 2,58 \cdot 10^{-4} = 4,31 \cdot 10^{-6}, \text{ Кл/кг.}$$

Кратность ослабления:

$$\kappa = \frac{10,79 \cdot 10^{-3}}{4,31 \cdot 10^{-6}} = 2500.$$

Отсюда при $\kappa = 2500$; $E_\gamma = 1,25$ МэВ, $x_{РБ} = 137 \cdot 10^{-3}$ м.

2.3.4 Свинцовая защита (толщина $X = 1,5$ см) рассчитана для работы с точечным изотропным источником Cs^{137} ($E_\gamma = 0,7$ МэВ) в течение $t = 0,5$ ч с соблюдением предельной допустимой дозы. Какую толщину свинцовой защиты следует добавить, чтобы обеспечить работу в течение $t = 10$ ч?

2.3.4.1 Решение

Дополнительная кратность ослабления составляет $\kappa = \frac{t''}{t'} = \frac{10}{0,5} = 20$, что соответствует дополнительной толщине свинцовой защиты $\Delta x_{РБ} = 3,25$ см (таблица приложения Б). Тогда полная толщина свинцовой защиты будет равна $x_{РБ} = 4,75$ см.

2.3.5 Оператору при работе со смесью радиоактивных продуктов деления с эффективной энергией $E_{эф} = 1.5$ МэВ пришлось изменить расстояние с r до $r'' = 1$ м.

Какой толщины должен быть свинцовый экран, если при работе на расстоянии 5 м соблюдалась предельно допустимая экспозиционная доза. Предусмотреть двукратный запас. Источник считать точечным.

2.3.5.1 Решение

Определить кратность ослабления $\kappa = \frac{t''}{t'} = \frac{r'^2}{r''^2} = 25$ κ , с учетом двукратного запаса $\kappa' = \kappa \cdot 2 = 50$, тогда толщина свинцового экрана $X = 8,2$ см (согласно приложению Б).

2.3.6 Для градуировки дозиметра применяется точечный изотропный радионуклид Co^{60} активностью $A = 50$ мКи. Определить время работы при 6-дневной рабочей неделе без защиты, чтобы обеспечить предельно допустимую

эквивалентную дозу для персонала категории А. Расстояние от источника до оператора $r = 2$ м. Ослаблением и рассеянием γ -излучения в воздухе пренебречь.

2.3.6.1 Решение (внесистемные единицы)

Определить время работы с учетом формулы (14):

$$H' = H \cdot t = 1,09 \cdot D = 1,09 \frac{A \cdot \Gamma \cdot t}{r^2} = \frac{H_{\text{ПДДа}}}{6},$$

$$t = \frac{H_{\text{ПДДа}} \cdot r^2}{6 \cdot 1,09 \cdot 50 \cdot 12,9} = 0,9484 = 1 \text{ ч.}$$

2.3.6.2 Решение (в единицах СИ)

Выразим все необходимые для расчетов величины в единицах СИ.

$$A = 50 \text{ нКч} = 50 \cdot 3,7 \cdot 10^7 = 185 \cdot 10^7, \text{ Бк};$$

$$\Gamma_{\text{СИ}} = 84,63 \left(\frac{\text{аГр} \cdot \text{м}^2}{\text{с} \cdot \text{Бк}} \right) = 8,4 \cdot 10^{-17} \frac{\text{Гр} \cdot \text{м}^2}{\text{с} \cdot \text{Бк}};$$

$$H_{\text{ПДДа}} = 10^{-3} \text{ Зв.}$$

Определим время работы по формуле:

$$t = \frac{H_{\text{ПДДа}} \cdot r^2}{6 \cdot 1,09 \cdot A \cdot \Gamma} = \frac{10^{-3} \cdot 4}{6 \cdot 1,09 \cdot 185 \cdot 10^7 \cdot 8,463 \cdot 10^{-17}} = 0,3906 \cdot 10^4 \text{ с} = 1 \text{ ч.}$$

3 Задания для самостоятельной работы

3.1 Толщина свинцовой защиты x_{Pb} , мм. Продолжительность работы персонала категории А составляет 4 часа. Определить мощность экспозиционной дозы X' на рабочем месте от точечного изотропного источника γ -излучения Co^{60} ($E_\gamma = 1.25 \text{ МэВ}$).

3.2 Медицинская терапевтическая установка использует источник Co^{60} гамма-эквивалент которого равен Γ , г.экв радия ($E_\gamma = 1,25 \text{ МэВ}$). Толщина бетонной защиты, отделяющей пульт управления оператора от источника равна x_b , см. На каком расстоянии r от источника защита обеспечит предельно допустимые уровни облучения для персонала при 6-часовом рабочем дне? При расчете учесть двукратный запас $n=2$.

3.3 Транспортируется источник Co^{60} активностью A , Ки. Толщина свинцового контейнера x_{Pb} равна 10 мм. Расстояние от источника до экспедитора r , м. Определить, в течение скольких суток транспортировки экспедитор получит предельно допустимую дозу для лиц категории А.

3.4 Свинцовая защита (толщина $X = 1,5$ см) рассчитана для работы с точечным изотропным источником Cs^{137} ($E_\gamma = 0,7 \text{ МэВ}$) в течение t' , ч с соблюдением предельно допустимой дозы. Какую толщину свинцовой защиты следует добавить, чтобы обеспечить работу в течение $t'' = 10$ ч ?

3.5 Для градуировки дозиметра используется источник Co^{60} . Оператор при 6-ти дневной рабочей неделе без защиты работает с источником в течение 1 ч. Расстояние от источника до оператора r , м. Ослаблением и рассеянием излучения пренебречь. Определить активность A источника.

3.6 Рассчитать защиту из свинца от γ -излучения точечного источника Co^{60} активностью A , мКи. Расстояние до рабочего места r , м. Время работы $t = 6$ ч в день.

3.7 Определить толщину защиты свинцового экрана при работе с точечным изотропным источником Cs^{137} ($E_\gamma = 0.7$ МэВ), гамма-эквивалент которого равен Γ , мг.экв радия, в течение 6 ч на расстоянии 1,5 м.

3.8 Толщина свинцовой защиты X , см. Время работы с источником излучения Co^{60} $t = 3$ ч в день. Расстояние от источника до рабочего места равно r , м. Определить активность источника из условия, что экспозиционная доза полученная оператором не должна превышать предельно допустимую дозу для лиц категории А.

3.9 Используется источник γ - излучения Co^{60} ($E_\gamma = 1.25$ МэВ). Толщина бетонной защиты X , см и обеспечивает предельно допустимые уровни для персонала группы А при 6-ти часовом рабочем дне, если оператор находится от источника на расстоянии r , м. Определить гамма-эквивалент источника. Учесть двукратный запас $n = 2$.

3.10 Источник Co^{60} активностью A , Ки транспортируется в течение 4 суток. Толщина свинцового контейнера 10 см. Определить расстояние от источника до экспедитора r , при условии получения оператором предельно допустимой дозы для лиц категории А.

4 Вопросы для самоконтроля

4.1 На каком физическом принципе основывается ионизационный метод регистрации ионизирующего излучения?

4.2 Механизм действия ионизационной камеры.

4.3 В чем заключается принцип действия газовых счетчиков для регистрации отдельных ядерных частиц?

4.4 Что такое эффективность счетчика?

4.5 Механизм действия полупроводниковых детекторов (ППД).

4.6 Что такое собственная проводимость кристалла?

4.7 Чем отличаются диффузионно-дрейфовые детекторы от поверхностно-барьерных детекторов?

4.8 На каком физическом принципе основывается люминесцентный метод регистрации ионизирующего излучения?

4.9 Сцинтилляционный метод регистрации ионизирующего излучения.

4.10 Сущность трекового и активационного методов регистрации.

4.11 Чем отличаются калориметрический и химический методы регистрации ионизирующего излучения?

4.12 Единицы измерения активности и доз излучения?

4.13 Что такое радиевый гамма-эквивалент и керма-эквивалент?

4.14 Какие существуют категории облучаемых лиц?

4.15 Что такое эквивалентная доза излучения?

4.16 Что такое экспозиционная доза?

Список использованных источников

- 1 Голубев, Б.П. Дозиметрия и защита от ионизирующих излучений / Б.П. Голубев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 72 с.
- 2 Голубев, Б.П. Дозиметрия и радиационная безопасность АЭС / Б.П.Голубев, В.Ф. Козлов, С.Н. Смирнов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 132 с.
- 3 Максимов, М.Т. Радиоактивные загрязнения и их измерение / М.Т. Максимов, Г.О. Оджагов. - М.: Энергоатомиздат, 1989. – 193 с.
- 4 Защита от ионизирующих излучений. / Н.Г.Гусев [и др.] – М.: Атомиздат, 1983. – 187 с.
- 5 Иванов, В.И. Сборник задач по дозиметрии и защите от ионизирующих излучений / В.И. Иванов., В.П. Машкович . – М.: Атомиздат,1980. – 156 с.
- 6 Мархоцкий, Я. Л. Основы радиационной безопасности населения [Электронный ресурс] : учебное пособие / Я.Л. Мархоцкий. – Электрон. текстовые дан. – Минск: Высшая школа, 2011. – Режим доступа: <http://www.biblioclub.ru/119766/>.
- 7 Санитарные правила и нормы СанПиН 2.6.1.2523-09 [Электронный ресурс]: Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). – Режим доступа: <http://allsnips.info/docs/56/56325/>.
- 8 Ефремов, И.В. Расчет защиты от источников ионизирующих излучений / И.В.Ефремов. – Оренбург, ГОУ ОГУ, 2000. – 33 с.

Приложение А (справочное)

Значения дозовых коэффициентов

Таблица А.1 - Значения дозовых коэффициентов, предела годового поступления с воздухом и допустимой среднегодовой объемной активности в воздухе отдельных радионуклидов для персонала

Радио- нуклид	Период полураспада, T _{1/2}	Тип соединения при ингаляции	Дозовый коэффици- ент $\epsilon_{\text{нас}}^{\text{возд}}$, Зв/Бк	Предел годового поступления $ППП_{\text{нас}}^{\text{возд}}$, Бк в год	Допустимая среднегодовая объемная активность, ДОА _{перс} , Бк/м ³
Fm-254	3,24 ч	П	5,6-08	3,6+05	1,4+02
Bk-245	4,94 сут	П	2,0-09	1,0+07	4,0+03
Co-60	5,27 лет	П	9,6-09	2,1+06	8,3+02
		М	2,9-08	6,9+05	2,8+02
Co-60m	0,174 ч	П	1,1-12	1,8+10	7,3+06
		М	1,3-12	1,5+10	6,2+06
Sr-90	29,1 лет	Б	2,4-08	8,3+05	3,3+02
		М	1,5-07	1,3+05	5,3+01
I-135	6,61 ч	Б	3,3-10	6,1+07	2,4+04
		Г1	9,2-10	2,2+07	8,7+03
		Г2	6,8-10	2,9+07	1,2+04
Cs-137	30,0 лет	Б	4,8-09	4,2+06	1,7+03
Hg-203	46,6 сут	Б	5,7-10	3,5+07	1,4+04
		Б	4,7-10	4,3+07	1,7+04
		П	2,3-09	8,7+06	3,5+03
		Г	7,0-09	2,9+06	1,1+03
Pb-210	22,3 лет	Б	8,9-07	2,2+04	9,0
Ra-226	1,60+03 лет	П	3,2-06	6,3+03	2,5

Таблица А.2 – Значения дозовых коэффициентов, пределов годового поступления с воздухом и пищей, допустимой объемной активности во вдыхаемом воздухе и уровни вмешательства при поступлении с водой отдельных радионуклидов для населения

Радионуклид РН	Период полураспада, T1/2	Поступление с воздухом				Поступление с водой и пищей					
		Критическая группа КГ	Дозовый коэффициент $\epsilon_{нас}^{возд}$, Зв/Бк	Предел годового поступления, $ППП_{нас}^{возд}$ Бк в год	Допустимая средняя объемная активность, $ДОА_{нас}$ Бк/м ³	Критическая группа КГ	Дозовый коэффициент, $\epsilon_{нас}^{пищ}$, Зв/Бк	Предел годового поступления, $ППП_{нас}^{пищ}$ Бк в год	Уровень вмешательства $УВ_{вода}$ Бк/кг		
C-14	5,73+3 лет		#5	2,5-9	4,0+5	5,5+1		#2	1,6-9	6,3+5	2,4+2
Sr-90	29,1 сут		#5	5,0-8	2,0+4	2,7		#5	8,0-8	1,3+4	5,0
I-124	4,18 сут		#2	4,5-8	2,2+4	1,2+1		#2	1,1-7	9,1+3	1,1+1
I-125	60,1 сут		#4	1,1-8	9,1+4	1,7+1		#2	5,7-8	1,8+4	9,3
I-126	13,0 сут		#2	8,3-8	1,2+4	6,3		#2	2,1-7	4,8+3	4,8
I-129	1,57+7 лет		#4	6,7-8	1,5+4	2,9		#4	1,9-7	5,3+3	1,3
I-131	8,04 сут		#2	7,2-8	1,4+4	7,3		#2	1,8-7	5,6+3	6,3
Cs-137	30,0 лет		#6	4,6-9	2,2+5	2,7+1		#6	1,3-8	7,7+4	1,1+1
Hg-203	46,6 сут	(11)	#2	3,7-9	2,7+5	1,4+2		#2	1,1-8	9,1+4	7,3+1
Pb-210	22,3 лет		#5	1,3-6	7,7+2	1,1-1		#2	3,6-6	2,8+2	2,0-1

Приложение Б (обязательное)

Толщина защиты

Таблица Б.1 - Толщина защиты из воды, см ($\rho = 1,0$ г/куб.см)

Кратность ослабления, R	Энергия фотонов, МэВ												
	0,1	0,145	0,2	0,279	0,3	0,4	0,412	0,5	0,6	0,622	0,7	0,8	
1,5	19	21	23	23	23	22	22	21	21	20	20	20	
2	21	24	27	28	28	28	28	28	27	27	27	27	
5	25	30	37	42	43	45	45	46	47	47	47	48	
8	27	33	41	47	49	52	52	54	54	54	54	56	
10	30	36	45	50	51	54	54	57	57	57	58	60	
20	33	40	50	58	60	64	64	68	69	70	71	72	
30	37	44	54	63	65	70	70	73	75	76	77	79	
40	38	46	57	66	69	74	74	77	80	81	82	84	
50	39	48	60	69	71	77	77	80	83	84	85	88	
60	40	49	62	71	74	79	79	83	86	87	88	91	
80	45	53	65	74	77	83	83	87	90	92	93	96	
100	46	55	67	77	80	86	86	89	93	95	96	100	
2*10 ²	48	58	73	84	87	94	95	99	103	105	107	111	
5*10 ²	52	65	83	94	97	104	105	110	115	118	120	124	
10 ³	58	71	89	102	105	113	114	119	125	129	131	136	
2*10 ³	63	76	95	108	112	120	121	128	134	138	140	146	
5*10 ³	68	82	102	117	121	131	132	140	146	150	153	160	
10 ⁴	74	89	109	125	129	139	140	148	155	159	162	169	
2*10 ⁴	80	94	114	131	135	147	148	157	165	169	172	180	
5*10 ⁴	82	98	121	139	144	157	158	168	177	182	185	193	
10 ⁵	88	104	126	145	150	164	163	176	185	190	194	203	
2*10 ⁵	90	108	133	152	157	172	173	184	194	199	203	213	
5*10 ⁵	97	115	140	160	166	182	184	195	205	212	216	226	
10 ⁶	102	120	146	166	172	189	191	203	213	220	224	234	
2*10 ⁶	110	128	153	173	179	185	197	211	221	228	232	242	
5*10 ⁶	120	136	160	181	187	205	207	221	234	242	247	258	
10 ⁷	129	145	167	187	193	212	214	229	242	250	256	269	
Кратность ослабления, R	Энергия фотонов, МэВ												
	0,9	1	1,25	1,5	1,75	2	2,2	2,75	3	4	6	8	10
1,5	20	20	19	19	19	20	20	21	21	22	23	25	25
2	28	28	28	28	29	30	31	33	34	35	39	41	41
5	49	50	52	54	56	59	61	65	67	71	83	89	93
8	57	58	62	66	68	72	74	79	81	89	105	113	120
10	61	62	66	70	74	78	80	85	88	97	115	124	131
20	74	76	82	87	91	96	99	107	111	125	144	159	170
30	81	83	89	94	100	105	109	118	122	139	162	178	190
40	87	89	95	101	106	112	116	126	131	149	173	192	204
50	90	93	99	106	112	118	122	133	138	156	184	204	217
60	93	96	102	109	116	123	127	139	144	162	191	213	226
80	99	102	110	116	123	130	134	147	153	171	204	225	240
100	103	105	114	120	128	134	139	153	159	180	211	235	251
2*10 ²	115	118	127	135	143	152	157	172	179	204	242	268	285
5*10 ²	129	133	145	155	164	173	180	199	207	236	278	310	330
10 ³	141	145	157	168	178	188	195	216	225	257	305	343	336
2*10 ³	152	156	170	182	193	204	212	235	245	280	330	372	398
5*10 ³	165	171	185	199	212	224	234	259	271	308	368	413	443
10 ⁴	177	183	198	213	227	241	251	278	290	330	393	444	477

Продолжение таблицы Б.1

Кратность ослабления, R	Энергия фотонов, МэВ												
	0,9	1	1,25	1,5	1,75	2	2,2	2,75	3	4	6	8	10
2*10 ⁴	187	194	211	227	243	258	270	298	311	354	420	475	511
5*10 ⁴	201	208	227	244	261	277	290	320	334	383	457	516	556
10 ⁵	211	220	240	259	276	294	306	339	353	404	484	547	590
2*10 ⁵	221	231	252	272	290	308	322	356	372	426	511	578	622
5*10 ⁵	236	246	268	289	310	329	343	389	397	454	543	616	665
10 ⁶	245	254	279	302	324	345	360	396	417	478	571	649	701
2*10 ⁶	252	262	287	310	334	357	373	412	435	498	597	677	733
5*10 ⁶	270	281	308	333	357	379	397	440	462	528	633	719	778
10 ⁷	280	292	318	345	370	393	411	458	480	549	650	748	810

Таблица Б. 2 – Толщина защиты из бетона, см ($\rho = 2,3$ г/куб. см)

Кратность ослабления, R	Энергия фотонов, МэВ												
	0,1	0,145	0,2	0,279	0,3	0,4	0,412	0,5	0,6	0,622	0,7	0,8	
1,5	2,6	3,5	4,7	6,0	6,3	7,5	7,6	8,2	8,2	8,2	8,2	8,3	
2	4,7	5,9	7,6	9,4	9,9	11,3	11,4	12,3	12,4	12,4	12,4	12,6	
5	5,6	7,9	11,0	14,6	15,5	18,8	19,1	21,1	21,8	22,1	22,3	22,6	
8	7,0	9,5	12,9	16,8	17,8	22,0	22,3	24,6	25,6	26,1	26,4	27,2	
10	8,2	10,9	14,6	18,6	19,7	23,7	23,9	25,8	26,8	27,3	27,6	28,4	
20	8,2	11,2	15,3	20,1	21,4	25,8	26,3	29,9	31,9	32,9	33,6	35,0	
30	8,5	11,8	16,4	21,5	22,8	27,8	28,3	32,9	34,8	35,8	36,4	37,8	
40	8,5	12,3	17,6	22,8	24,2	29,6	30,1	34,0	36,2	37,2	37,9	39,6	
50	9,9	13,2	18,8	23,8	25,1	30,8	31,3	35,0	37,6	38,8	39,4	41,2	
60	11,0	14,8	20,0	24,8	26,1	31,7	32,3	36,4	38,5	39,7	40,5	42,5	
80	11,5	15,2	20,4	26,2	27,7	33,6	34,2	38,7	41,1	42,3	43,0	44,8	
100	11,5	15,9	21,1	27,3	28,9	35,2	35,8	39,9	43,0	44,4	45,3	47,2	
2*10 ²	12,7	17,1	23,5	30,5	32,4	39,2	39,8	44,6	47,9	49,5	50,5	52,6	
5*10 ²	13,8	18,3	24,6	33,0	35,2	43,9	44,7	50,5	54,5	56,2	57,3	58,8	
10 ³	15,5	20,8	28,2	36,9	39,2	48,1	48,9	55,2	59,2	61,1	62,5	65,3	
2*10 ³	17,6	23,0	30,5	39,8	42,3	52,4	53,3	59,9	64,1	66,1	67,4	70,4	
5*10 ³	18,8	24,8	33,1	43,0	45,6	56,4	57,6	65,7	70,0	72,4	74,0	77,0	
10 ⁴	18,8	25,7	35,2	45,7	48,5	60,3	61,4	69,3	74,7	77,4	79,1	82,9	
2*10 ⁴	21,1	28,4	38,4	49,1	51,9	63,4	64,5	72,8	78,2	81,8	83,1	87,3	
5*10 ⁴	23,3	31,3	42,3	53,4	56,4	68,6	69,7	78,1	83,4	96,6	88,7	93,4	
10 ⁵	30,5	38,9	50,5	61,6	64,6	75,1	76,0	82,8	88,3	91,5	93,5	98,1	
2*10 ⁵	38,3	46,0	56,7	67,9	69,8	79,4	80,3	86,9	92,4	95,8	97,7	102,8	
5*10 ⁵	44,8	51,8	61,5	71,1	73,7	83,7	84,6	91,7	98,1	101,6	103,9	109,5	
10 ⁶	49,3	56,5	66,4	77,0	79,8	89,8	90,7	97,4	103,7	107,0	109,2	114,1	
2*10 ⁶	57,6	64,1	73,1	82,1	84,5	93,3	94,2	101,0	107,4	111,2	113,6	119,7	
5*10 ⁶	59,4	67,9	79,7	88,3	91,6	100,6	101,5	108,0	114,1	117,8	120,2	126,0	
10 ⁷	64,0	72,8	84,9	93,4	95,7	104,7	105,4	110,3	117,4	121,2	123,6	130,0	
Кратность ослабления, R	Энергия фотонов, МэВ												
	0,9	1	1,25	1,5	1,75	2	2,2	2,75	3	4	6	8	10
1,5	8,3	8,5	8,6	8,7	8,7	8,8	8,9	9,2	9,4	10,0	11,7	11,7	11,7
2	12,7	12,9	13,3	13,6	13,8	14,1	14,3	15,0	15,3	16,4	18,8	18,8	18,8
5	23,0	23,5	24,6	25,8	27,0	28,2	29,4	31,8	32,9	35,2	38,7	39,3	39,9
8	27,9	28,8	30,5	32,2	33,8	35,2	36,4	38,8	39,9	43,4	48,1	48,7	49,3
10	29,1	29,9	31,9	34,0	35,9	37,6	39,0	42,0	43,4	47,5	51,6	52,8	54,0
20	36,2	37,0	39,9	42,5	44,8	47,0	48,6	52,3	54,0	58,7	64,6	65,7	69,3
30	39,2	40,5	43,7	46,5	49,3	51,6	53,5	57,9	59,9	65,7	71,6	72,8	78,1
40	41,3	42,8	45,3	49,8	52,8	55,2	57,3	61,9	64,0	69,8	77,5	79,2	84,5

Продолжение таблицы Б.2

Кратность ослабления, R	Энергия фотонов, МэВ												
	0,9	1	1,25	1,5	1,75	2	2,2	2,75	3	4	6	8	10
50	42,8	44,6	48,5	52,1	55,2	58,1	60,1	64,8	66,9	72,8	81,6	83,9	89,8
60	44,1	45,8	50,1	54,0	57,5	60,5	62,7	67,6	69,8	74,0	85,1	88,0	93,9
80	46,5	48,1	52,4	56,4	59,9	63,4	65,7	71,4	74,0	81,0	90,4	93	100
100	48,8	50,5	54,5	58,3	62,2	65,7	68,6	74,7	77,5	84,5	95,1	98	105
2*10 ²	54,6	56,4	60,8	65,3	69,7	74,0	77,2	84,6	88,6	95,7	108	112	120
5*10 ²	62,5	64,6	69,8	74,8	79,8	84,5	88,5	97,1	101	110	124	129	139
10 ³	67,8	70,4	76,1	81,7	87,6	92,7	97,0	106	110	120	137	143	155
2*10 ³	73,2	75,7	82,2	88,5	94,6	100	104	115	120	132	150	156	168
5*10 ³	80,2	82,8	90,2	97,4	104	110	115	127	132	146	166	173	186
10 ⁴	86,1	89,2	97,2	104	111	118	124	137	143	156	179	187	201
2*10 ⁴	91,1	94,5	102	110	118	126	131	146	152	167	190	201	216
5*10 ⁴	97,9	102	111	120	128	136	142	159	164	181	206	218	233
10 ⁵	102	106	116	126	135	144	150	166	173	191	218	231	248
2*10 ⁵	108	112	125	135	145	153	160	171	173	201	231	245	263
5*10 ⁵	114	119	133	142	152	162	169	187	196	214	248	261	281
10 ⁶	119	124	140	149	160	171	178	193	205	225	260	274	295
2*10 ⁶	125	131	148	157	169	179	187	205	213	237	272	287	308
5*10 ⁶	127	133	154	165	178	189	197	218	227	250	287	302	327
10 ⁷	136	142	160	170	183	194	203	225	236	259	299	314	340

Таблица Б. 3 – Толщина защиты из железа, см ($\rho = 7,89$ г/куб.см)

Кратность ослабления, R	Энергия фотонов, МэВ											
	0,1	0,145	0,2	0,279	0,3	0,4	0,412	0,5	0,6	0,622	0,7	0,8
1,5	0,5	0,7	1,0	1,2	1,3	1,6	1,6	1,8	2,0	2,1	2,1	2,2
2	0,8	1,0	1,3	1,7	1,8	2,3	2,3	2,6	2,8	2,9	3,0	3,2
5	1,5	2,0	2,5	3,2	3,4	4,2	4,3	4,8	5,3	5,5	5,7	6,0
8	1,9	2,4	3,1	4,0	4,2	5,1	5,2	5,8	6,4	6,7	6,9	7,4
10	2,1	2,7	3,4	4,3	4,5	5,4	5,5	6,2	6,8	7,1	7,3	7,8
20	2,6	3,4	5,3	5,2	5,5	6,6	6,7	7,5	8,3	8,7	8,9	9,5
30	2,8	3,6	4,7	5,7	6,0	7,2	7,3	8,2	9,0	9,5	9,8	10,5
40	3,0	3,9	5,0	6,1	6,4	7,6	7,7	8,7	9,6	10,1	10,4	11,1
50	3,1	4,0	5,1	6,3	6,6	7,9	8,0	9,0	10,0	10,6	10,9	11,6
60	3,3	4,2	5,3	6,6	6,9	8,2	8,3	9,3	10,2	10,8	11,2	12,0
80	3,6	4,5	5,7	6,9	7,2	8,6	8,7	9,8	10,8	11,4	11,8	12,6
100	3,8	4,7	5,9	7,2	7,5	9,0	9,1	10,2	11,2	11,8	12,2	13,1
2*10 ²	4,1	5,2	6,5	8,0	8,4	10,1	10,3	11,6	12,7	13,4	13,8	14,7
5*10 ²	4,6	5,9	7,4	9,1	9,6	11,6	11,8	13,4	14,7	15,4	15,8	16,9
10 ³	5,0	6,4	8,0	10,0	10,5	12,7	12,9	14,7	16,2	17,0	17,5	18,6
2*10 ³	5,3	6,8	8,6	10,8	11,4	13,8	14,1	16,0	17,7	18,5	19,0	20,2
5*10 ³	6,7	8,3	10,2	12,4	13,0	15,5	15,8	17,6	19,2	20,1	20,7	22,1
10 ⁴	7,4	9,1	11,1	13,4	14,0	16,6	16,9	18,8	20,7	21,6	22,2	23,6
2*10 ⁴	7,8	9,6	11,7	14,3	15,0	17,7	18,0	20,0	22,0	23,0	23,6	25,2
5*10 ⁴	8,3	10,2	12,6	15,3	16,0	19,0	19,3	21,6	23,6	24,8	25,5	27,1
10 ⁵	8,5	10,6	13,1	16,1	16,9	20,0	20,3	22,7	25,0	26,2	26,9	28,6
2*10 ⁵	8,9	11,0	13,6	16,7	17,5	20,8	21,2	23,9	26,3	27,6	28,4	30,1
5*10 ⁵	9,3	11,6	14,3	17,6	18,5	22,1	22,5	25,5	27,9	29,3	30,1	32,0
10 ⁶	9,9	12,4	15,4	19,0	19,9	23,6	24,0	26,7	29,2	30,6	31,5	33,5
2*10 ⁶	10,1	12,7	15,8	19,5	20,5	24,5	24,9	27,8	30,5	32,0	32,9	35,0
5*10 ⁶	10,9	13,6	16,8	20,8	21,8	25,9	26,3	29,4	32,4	33,9	34,8	37,0
10 ⁷	11,6	14,3	17,7	21,7	22,8	27,0	27,4	30,5	33,5	35,1	36,1	38,4

Продолжение таблицы Б.3

Кратность ослабления, R	Энергия фотонов, МэВ												
	0,9	1	1,25	1,5	1,75	2	2,2	2,75	3	4	6	8	10
1,5	2,3	2,3	2,3	2,3	2,4	2,5	2,5	2,8	2,9	2,5	2,4	2,4	2,2
2	3,3	3,4	3,6	3,8	3,9	4,0	4,0	4,3	4,4	4,2	4,1	4,0	3,8
5	6,3	6,5	6,9	7,3	7,7	8,1	8,4	8,8	9,0	9,1	9,1	8,9	8,5
8	7,7	8,0	8,7	9,2	9,7	10,1	10,4	11,0	11,2	11,4	11,6	11,4	11,0
10	8,2	8,5	9,3	10,0	10,5	11,0	11,3	11,9	12,2	12,5	12,7	12,6	12,0
20	10,0	10,5	11,5	12,2	13,0	13,7	14,1	14,9	15,3	16,0	16,4	16,1	15,6
30	11,0	11,6	12,7	13,7	14,4	15,1	15,6	16,6	17,0	17,8	18,6	18,2	17,5
40	11,8	12,4	13,6	14,7	15,5	16,3	16,8	17,8	18,3	19,1	20,1	19,7	19,0
50	12,3	13,0	14,4	15,5	16,5	17,1	17,6	18,8	19,3	20,2	21,2	20,8	20,0
60	12,7	13,4	14,8	16,0	16,9	17,7	18,3	19,5	20,0	21,0	22,0	21,7	21,0
80	13,3	14,1	15,5	16,8	17,9	18,8	19,4	20,7	21,3	22,3	23,4	23,2	22,4
100	14,0	14,7	16,3	17,6	18,8	19,7	20,4	21,7	22,3	23,4	24,6	24,4	23,6
2*10 ²	15,6	16,4	18,2	19,7	21,0	22,2	23,0	24,5	25,2	26,6	27,8	27,8	27,0
5*10 ²	17,7	18,6	20,5	22,4	24,0	25,5	26,6	28,3	29,1	30,7	32,3	32,3	31,6
10 ³	19,5	20,4	22,5	24,6	26,4	28,0	29,1	31,0	31,9	33,7	35,6	35,6	35,2
2*10 ³	21,2	22,1	24,4	26,5	28,4	30,3	31,6	33,7	34,7	36,7	39,0	39,0	38,6
5*10 ³	23,3	24,4	27,5	29,4	31,5	33,4	34,7	37,1	38,2	40,3	43,2	43,2	42,9
10 ⁴	24,9	26,2	28,9	31,4	33,7	35,8	37,2	39,8	41,0	43,2	46,5	46,6	46,4
2*10 ⁴	26,5	27,8	30,9	33,6	36,0	38,1	39,5	42,4	43,8	46,0	49,6	50,0	49,8
5*10 ⁴	28,5	30,0	33,3	36,3	39,0	41,2	42,7	45,8	47,2	49,9	53,9	54,3	54,2
10 ⁵	30,3	31,8	35,1	38,2	40,9	43,5	45,1	48,5	50,0	53,0	57,2	57,8	57,7
2*10 ⁵	31,8	33,3	36,8	40,0	42,9	45,6	47,4	51,0	52,7	56,0	60,2	61,0	61,0
5*10 ⁵	33,8	35,5	39,2	42,6	45,9	48,8	50,4	54,3	56,1	60,0	64,4	65,3	65,1
10 ⁶	35,4	37,1	41,0	44,6	47,8	51,0	53,0	57,0	58,8	63,0	67,5	68,5	68,3
2*10 ⁶	36,9	38,7	42,8	46,5	50,0	53,0	55,5	59,6	61,5	66,0	70,6	71,7	71,6
5*10 ⁶	39,0	40,8	45,1	49,1	52,9	56,3	58,6	63,1	65,1	70,0	75,0	76,2	76,1
10 ⁷	40,5	42,4	46,9	51,5	55,0	58,6	61,2	65,7	67,8	72,8	78,0	79,4	79,3

Таблица Б. 4 – Толщина защиты из свинца, см ($\rho = 11,34$ г/куб.см)

Кратность ослабления, R	Энергия фотонов, МэВ											
	0,1	0,145	0,2	0,279	0,3	0,4	0,412	0,5	0,6	0,622	0,7	0,8
1,5	0,05	0,07	0,1	0,14	0,15	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,6
2	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,7	0,8	0,8	1,0
5	0,2	0,3	0,4	0,6	0,6	0,9	0,9	1,1	1,5	1,7	1,9	2,2
8	0,2	0,3	0,5	0,6	0,8	1,1	1,2	1,5	1,95	2,2	2,35	2,8
10	0,3	0,4	0,55	0,8	0,9	1,3	1,3	1,6	2,1	2,4	2,6	3,05
20	0,3	0,4	0,6	1,0	1,1	1,5	1,6	2,0	2,6	3,0	3,25	3,85
30	0,35	0,5	0,7	1,0	1,15	1,7	1,8	2,3	3,0	3,4	3,65	4,3
40	0,4	0,6	0,8	1,2	1,3	1,8	1,9	2,4	3,1	3,5	3,8	4,5
50	0,4	0,6	0,85	1,3	1,4	1,95	2,0	2,6	3,25	3,7	3,95	4,6
60	0,45	0,6	0,9	1,3	1,45	2,05	2,1	2,7	3,45	3,9	4,2	4,95
80	0,45	0,7	1,0	1,4	1,55	2,15	2,2	2,8	3,7	4,2	4,5	5,3
100	0,5	0,7	1,0	1,5	1,6	2,3	2,4	3,0	3,85	4,4	4,7	5,5
2*10 ²	0,6	0,8	1,25	1,8	1,9	2,6	2,7	3,4	4,4	4,9	5,3	6,3
5*10 ²	0,65	1,0	1,4	2,0	2,2	3,1	3,2	4,0	5,1	5,7	6,1	7,2
10 ³	0,7	1,0	1,5	2,2	2,4	3,3	3,4	4,4	5,7	6,5	6,95	8,1
2*10 ³	0,85	1,2	1,7	2,5	2,7	3,8	3,9	5,0	6,3	7,1	7,6	8,8
5*10 ³	0,9	1,3	1,9	2,8	3,0	4,2	4,4	5,5	7,0	7,9	8,5	9,9
10 ⁴	1,05	1,5	2,1	3,0	3,3	4,55	4,7	5,9	7,5	8,5	9,1	10,6

Продолжение таблицы Б.4

Кратность ослабления, R	Энергия фотонов, МэВ												
	0,1	0,145	0,2	0,279	0,3	0,4	0,412	0,5	0,6	0,622	0,7	0,8	
2*10 ⁴	1,1	1,6	2,2	3,2	3,5	4,85	5,0	6,3	8,0	9,0	9,7	11,3	
5*10 ⁴	1,15	1,65	2,35	3,4	3,7	5,2	5,4	6,9	8,7	9,8	10,5	12,3	
10 ⁵	1,15	1,7	2,4	3,5	3,8	5,4	5,6	7,2	9,2	10,4	11,1	13,0	
2*10 ⁵	1,3	1,8	2,6	3,8	4,1	5,7	5,9	7,6	9,6	10,8	11,6	13,6	
5*10 ⁵	1,4	2,0	2,8	4,1	4,4	6,1	6,3	8,2	10,2	11,5	12,3	14,4	
10 ⁶	1,45	2,1	3,0	4,3	4,7	6,5	6,8	8,7	10,9	12,2	13,1	15,3	
2*10 ⁶	1,55	2,2	3,2	4,6	5,0	7,0	7,2	9,1	11,5	13,0	14,0	16,3	
5*10 ⁶	1,65	2,3	3,3	4,9	5,3	7,3	7,6	9,6	12,1	13,7	14,7	17,2	
10 ⁷	1,7	2,4	3,4	5,00,15	5,4	7,6	7,9	10,1	12,6	14,2	15,2	17,8	
Кратность ослабления, R	Энергия фотонов, МэВ												
	0,9	1	1,25	1,5	1,75	2	2,2	2,75	3	4	6	8	10
1,5	0,7	0,8	0,95	1,1	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,2	1,0	0,9	0,9
2	1,15	1,3	1,5	1,7	1,85	2,0	2,0	2,1	2,1	2,0	1,6	1,5	1,35
5	2,5	2,8	3,4	3,8	4,1	4,3	4,4	4,5	4,6	4,5	3,8	3,3	3,0
8	3,2	3,5	4,2	4,8	5,25	5,5	5,7	5,8	5,9	5,8	5,0	4,3	3,8
10	3,5	3,8	4,5	5,1	5,6	5,9	6,1	6,4	6,5	6,4	5,5	4,9	4,2
20	4,4	4,9	5,8	6,6	7,2	7,6	7,8	8,2	8,3	8,2	7,1	6,3	5,6
30	4,95	5,5	6,5	7,3	8,0	8,5	8,8	9,1	9,3	9,2	8,0	7,2	6,3
40	5,2	5,8	6,85	7,8	8,6	9,1	9,4	9,8	10,0	9,9	8,7	7,8	6,8
50	5,3	6,0	7,2	8,2	9,0	9,6	10,0	10,4	10,6	10,5	9,2	8,3	7,3
60	5,6	6,3	7,5	8,6	9,5	10,1	10,4	10,8	11,0	10,9	9,7	8,7	7,7
80	6,0	6,7	8,0	9,2	10,1	10,7	11,1	11,5	11,7	11,6	10,4	9,4	8,2
100	6,3	7,0	8,45	9,65	10,6	11,3	11,7	12,0	12,2	12,1	10,9	9,9	8,7
2*10 ²	7,2	8,0	9,65	11,1	12,2	12,9	13,4	13,8	14,0	13,8	12,6	11,4	10,2
5*10 ²	8,2	9,2	11,3	12,9	14,2	15,0	15,4	15,9	16,3	16,1	14,9	13,3	11,9
10 ³	9,2	10,2	12,3	14,1	15,5	16,5	17,0	17,7	18,0	17,8	16,5	15,1	13,3
2*10 ³	10,0	11,1	13,5	15,4	16,8	17,9	18,5	19,3	19,7	19,5	18,1	16,6	14,8
5*10 ³	11,2	12,4	14,9	17,0	18,6	19,8	20,5	21,5	21,9	21,7	20,3	18,5	16,6
10 ⁴	12,0	13,3	16,1	18,3	20,1	21,3	22,1	23,1	23,5	23,4	22,0	20,1	18,0
2*10 ⁴	12,8	14,2	17,2	19,5	21,4	22,7	23,5	24,6	25,1	25,0	23,6	21,7	19,5
5*10 ⁴	14,0	15,6	18,8	21,4	23,3	24,7	25,5	26,7	27,3	27,2	25,8	23,7	21,5
10 ⁵	14,8	16,5	20,1	22,7	24,7	26,2	27,0	28,3	28,9	28,9	27,5	25,3	22,9
2*10 ⁵	15,5	17,4	21,3	24,1	26,1	27,6	28,5	29,9	30,5	30,5	29,2	26,9	24,3
5*10 ⁵	16,5	18,5	22,3	25,4	27,8	29,5	30,4	32,0	32,7	32,7	31,4	28,9	26,3
10 ⁶	17,5	19,5	23,5	26,8	29,2	31,0	32,0	33,6	34,3	34,4	33,0	30,4	27,7
2*10 ⁶	18,5	20,4	24,4	27,8	30,5	32,4	33,5	35,2	36,0	36,1	34,6	32,0	29,2
5*10 ⁶	19,5	21,6	26,2	29,7	32,3	34,3	35,5	37,2	38,1	38,3	36,8	34,0	31,1

Приложение В (обязательное)

Варианты для решения задач по теме «Защита от ионизирующих излучений»

Таблица В.1

№ варианта	Задачи														
	1	2		3		4	5	6		7	8		9		10
	$X_{р\beta}$, мм	Γ , Г·ЭКВ Ра	X_0 , см	A , Ки	r , м	t	r , м	A , мКи	r , м	Γ , мГ·ЭКВ Ра	X , см	r , м	X , см	r , м	A , Ки
1	4	30	80	3	1,5	0,5	1,5	10	1	30	3	2	85	1	2,5
2	0,5	3	50	1	0,5	0,2	0,5	1	0,5	10	0,5	1	50	0,5	0,5
3	1	5	60	2	1	1	1	10	1	20	1	2	70	2	2
4	2	10	70	3	2	1,5	2	5	1,5	30	2	3	80	1,5	1
5	6	20	80	4	1,5	0,8	2,5	20	2	40	3	1,5	90	1	4
6	7	50	90	5	2	1,2	0,8	15	0,8	50	4	2,5	100	0,5	3
7	9	40	100	6	1	0,6	1,2	3	1,5	30	5	3	120	0,8	3,5
8	3	35	45	7	0,5	0,8	1	8	2	20	1,5	2	150	1	2,5
9	10	30	70	8	1	1,3	1,5	15	0,8	10	2,5	1,5	90	1,2	1,5
10	5	20	80	9	2	1,5	2	10	1	15	3,5	1	80	2	4