

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

Принципы изготовления защиты от фотонного излучения. Характеристики защитных материалов

Цель: изучение основных принципов изготовления защиты от фотонного излучения, исследование свойств существующих защитных материалов и сравнение их между собой, вычисление значения мощности дозы фотонного излучения на основе спектра излучения источника

Взаимодействие фотонного излучения с веществом

При взаимодействии гамма-излучения с энергией $0,5 \leq E \leq 2,5$ МэВ с легкими веществами преобладает явление рассеяния. В результате рассеяния фотон, сталкиваясь с электроном, теряет часть своей энергии и изменяет направление движения.

Изменение энергии фотона с частотой ν_0 в случае комптоновского рассеяния может быть выражено следующей формулой:

$$h\nu' = \frac{h\nu_0}{1 + \frac{h\nu_0}{m_0c^2} \cdot (1 - \cos \theta)} \quad (1)$$

где ν' - частота рассеянного фотона; θ — угол между падающим и рассеянным фотонами.

Явление комптоновского рассеяния на электроне характеризуется коэффициентом σ_e .

Величина коэффициента рассеяния, рассчитанная на один атом, пропорциональна концентрации электронов в единице объема поглощающего вещества.

$$\sigma_a = \sigma_e \rho \cdot N_A Z \frac{1}{A} \quad (2)$$

где σ_e - коэффициент рассеяния, отнесенный к одному электрону; ρ - плотность поглощающего вещества; N_A - число Авогадро; Z - порядковый номер элемента, A - атомный вес.

Если известна величина коэффициента σ_a для свинца, которая приводится обычно в таблицах, то для любого элемента

$$\sigma_a = \sigma_{a_{pb}} \frac{\rho}{11,3} \cdot \frac{207,2}{A} \cdot \frac{Z}{82} \quad (3)$$

Для мягкого гамма-излучения преобладающим видом взаимодействия с тяжелыми веществами является фотоэффект, характеризующийся коэффициентом τ . В результате этого явления фотон полностью отдает свою

энергию электрону. Энергия фотона E_γ распределяется в соответствии с формулой

$$E_\gamma = I_0 + \frac{mv^2}{2} \quad (4.4)$$

где I_0 - энергия, затрачиваемая на вырывание электрона и электронной оболочки, $\frac{m \cdot v^2}{2}$ - кинетическая энергия электрона, если v меньше скорости света).

Коэффициент поглощения τ выражает долю квантов, поглощаемых на единице пути в веществе. Величина коэффициента поглощения пропорциональна числу атомов поглощающего вещества в 1 см^3 и, отнесенная к одному атому, выражается следующей формулой:

$$\tau_a = a \cdot \left(\frac{1}{hv} \right)^{2,8} \cdot Z^4 \text{ (см}^2\text{)} \quad (5)$$

где a - постоянная.

Полный коэффициент поглощения в данном веществе

$$\tau = \tau_a \frac{\rho \cdot N_A}{A} \quad (6)$$

Если известна величина коэффициента τ для свинца, то для любого элемента

$$\tau = \tau_{pb} \frac{\rho}{11,3} \frac{207,2}{A} \left(\frac{Z}{82} \right)^4 \quad (7)$$

Для фотонов с энергией, большей 1,02 МэВ, при взаимодействии с тяжелыми веществами может происходить образование пар электрон-позитрон. Это явление не имеет существенного значения для естественных радиоактивных элементов.

Численное значение коэффициента χ , характеризующего явление образования пар, отнесенное к одному атому, выражается формулой

$$\chi_a = bZ^2(hv - 2m_0c^2) \quad (8)$$

где b — постоянный коэффициент.

Величина коэффициента χ , выражающего долю квантов, поглощенных на единице длины пути, равна

$$\chi = \chi_a \cdot \frac{\rho \cdot N_A}{A} \quad (9)$$

Если известен коэффициент χ_{pb} свинца, то для получения χ в любом другом веществе можно пользоваться выражением

$$\chi = \chi_{pb} \cdot \frac{\rho}{11,3} \cdot \frac{207,2}{A} \left(\frac{Z}{82} \right)^2 \quad (10)$$

Массовый и линейный коэффициенты ослабления гамма-излучения

Ослабление гамма- излучения в целом характеризуется коэффициентом, учитывающим все три описанные выше явления, и происходит по экспоненциальному закону:

$$N = N_0 \exp(-\mu \cdot d) \quad (11)$$

где N — число фотонов после прохождения слоя поглотителя толщиной d ; N_0 — первоначальное число фотонов; μ — коэффициент ослабления гамма—излучения:

$$\mu = \sigma + \tau + \chi \quad (12)$$

Экспоненциальный закон поглощения достаточно хорошо соблюдается для узкого пучка лучей, выделенного с помощью диафрагмы.

Коэффициент μ возрастает с увеличением плотности вещества в большинстве случаев по линейному закону, поэтому имеет место соотношение

$$\frac{\mu}{\rho} \approx const \quad (13)$$

Различают линейный и массовый коэффициенты ослабления излучения. Массовый коэффициент ослабления получают из линейного коэффициента, деля его на плотность вещества, для которого вычисляется его значение. Массовый коэффициент ослабления обычно используется при описании свойств тонких образцов материалов, толщина которых обычно выражается в единицах массовой толщины ($\text{г}/\text{см}^2$).

Указанные выше зависимости справедливы в основном для узких пучков излучения, и не учитывают увеличения вклада в дозовую нагрузку рассеянного излучения, появляющегося при прохождении гамма излучения сквозь вещество. Учет данного явления дается посредством введения фактора накопления.

Дозиметрия гамма излучения

Гамма-излучение обладает наибольшей проникающей способностью по сравнению с альфа- и бета-излучениями. В воздухе γ -излучение может преодолевать значительные расстояния, не испытывая существенного поглощения. Ослабления γ -излучения можно достигнуть, применяя свинец, сталь, большие слои бетона и грунта. Большая проникающая способность γ -излучения делает его особенно опасным при внешнем облучении.

Линейная плотность ионизации, создаваемая γ -излучением, значительно меньше, чем при облучении α - и β -излучениями. На 1 см пути в воздухе γ -кванты создают только несколько пар ионов.

Защитные свойства часто характеризуются толщиной половинного поглощения, т. е. толщиной слоя, после прохождения которого интенсивность γ -излучения уменьшается вдвое. Связь коэффициента ослабления γ -излучения и слоя половинного ослабления $x^{1/2}$ выражается следующей формулой:

$$x^{1/2} = \ln 2 / \mu \approx 0.693 / \mu \quad (14)$$

Для оценки ионизирующего действия γ -излучения используется понятие ионизационной постоянной. Ионизационная постоянная радиоактивного нуклида определяется как мощность дозы, создаваемая нефльтрованным γ -излучением точечного источника активностью 1 мКи на расстоянии 1 см. Ионизационная постоянная для одной монохроматической линии определяется по формуле

$$K_{\gamma} = \frac{3600 \cdot 3,7 \cdot 10^7 (\tau + \sigma) h\nu}{4 \cdot \pi \cdot 7,1 \cdot 10^4} \frac{P \cdot \text{см}^2}{\text{мКи} \cdot \text{ч}} \quad (15)$$

где $h\nu$ – энергия кванта, МэВ, τ – коэффициент фотоэлектрического поглощения в воздухе, см^{-1} , σ – коэффициент поглощения при комптоновском рассеянии в воздухе (с учетом вторичного взаимодействия), см^{-1} . Постоянный множитель возник при переходе к единицам, используемым в дозиметрии (мКи, ч, P и МэВ).

В справочной литературе приводятся значения ионизационных постоянных для большинства известных и наиболее часто используемых источников ионизирующего излучения.

Для того, чтобы определить мощность дозы источника γ -излучения необходимо знать активность источника, расстояние между облучаемым объектом и источником, значение ионизационной постоянной для данного

нуклида и размеры источника. Мощность дозы от точечного источника γ -излучения вычисляется по формуле 16

$$P = \frac{K_{\gamma} \cdot A}{R^2} \quad (16)$$

где K_{γ} – ионизационная постоянная, $\text{P} \cdot \text{см}^2 / (\text{мКи} \cdot \text{ч})$; R – расстояние от точечного источника до объекта, A – активность источника в единицах мКи. При переходе к единицам мощности дозы Зв/ч нужно учесть, что $1 \text{ P} = 0,0088 \text{ Зв}$.

В случае широкого пучка имеется возможность попадания рассеянных гамма-квантов в детектор. Расчеты мощности дозы от широкого источника сложны. В настоящей работе используются источники небольших размеров и к ним применимо приближение точечного источника.

Существующие типы защитных материалов

Для эффективной защиты от гамма-излучения используются материалы с большим атомным номером и высокой плотностью. Этим критериям удовлетворяют: свинец, бетон, свинцовое стекло, сталь.

Применение свинца в качестве защиты против воздействия гамма-излучения ограничивается его низкой температурой плавления. Поэтому в горячих зонах используют дорогие металлы, например, вольфрам или тантал.

Для изготовления защитной одежды сотрудников, работающих в зоне действия источников излучения или радиоактивного заражения используются специальные материалы. Его основу составляет резина, пластик или каучук со специальным наполнителем из свинца и его соединений, либо из соединений других тяжелых металлов (олово, висмут).

В настоящее время, наиболее распространенным материалом, для изготовления защитной одежды сотрудников, является ткань Demron, разработанная в Германии. В данной работе проводится сравнение ослабляющих свойств различных образцов защитных материалов (на основе ткани Demron, а также на основе отечественной защитной ткани) между собой, а также по сравнению с металлическими защитными материалами (свинец).

Оценка защитных свойств того или иного материала производится на основании вычисления коэффициента ослабления мощности дозы источника ионизирующего излучения, помещенного за барьером из того или иного материала. Значение коэффициента ослабления мощности дозы вычисляется как отношение мощности дозы источника излучения без использования защиты к мощности дозы при использовании защитного экрана. При этом, значения мощностей доз вычисляются в соответствии с формулой 16 по измеренной интенсивности гамма-излучения источника. В данной работе измерение интенсивности излучения источника производится с помощью спектрометра гамма-излучения на основе особо чистого германия.

Описание экспериментальной базы

Для расчета значений мощности дозы излучения без использования защиты или же за тем или иным защитным материалом, необходимо иметь информацию о интенсивности гамма-излучения, испускаемого источником и проходящем через эту защиту. Данную информацию можно получить за счет анализа спектра излучения, получаемого с помощью спектрометра гамма-излучения.

Детектор, используемый в данной работе для получения спектров гамма-излучения, относится к полупроводниковым детекторам с *p-i-n* переходом из особо чистого германия (так называемые ОЧГ-детекторы).

Разработка детекторов большого объема из ОЧГ с концентрацией электрически активных атомов примесей менее 10^{10} см^{-3} является главным достижением за последние годы в технологии ППД. Если концентрация электрически активных примесей в полупроводнике мала, то при его охлаждении сопротивление проводника возрастает настолько, что становится возможным изготовление из него детекторов большого объема с *p-i-n*-переходом. При концентрации примесей в германии около 10^{10} см^{-3} и менее удастся создать обедненную носителями область в переходе шириной около 1 см. Основным преимуществом детекторов из о. ч. г. является то, что они могут храниться без охлаждения.

В настоящее время ППД из ОЧГ вытесняют литий-дрейфовые детекторы. Сдерживает их распространение сложная и дорогая технология получения особо чистого германия. Методы производства детекторов из ОЧГ подобны методам производства литий-дрейфовых детекторов, исключая стадию дрейфа.

При изготовлении детектора на внешнюю поверхность цилиндрического образца напыляют литий, который диффундирует в глубь образца на глубину

порядка 10^{-4} см. Слой лития является n^+ контактом, p^+ контакт создается имплантацией ионов-акцепторов (чаще бора) в стенки центрального отверстия. Радиус такого коаксиального детектора может составлять 2-3 см, высота –6-7 см. Изготавливаются и плоские ППД из ОЧГ. Толщина обедненной носителями области зависит от концентрации примесей в исходном монокристалле и приложенного напряжения смещения. Так, при смещении 600 В и концентрации атомов примесей 10^{10} см $^{-3}$ ширина обедненной зоны достигает 1 см. Максимальная концентрация атомов примесей в германии, при которой еще можно изготавливать детекторы без компенсации с шириной обедненной зоны 1 см, составляет $3 \cdot 10^{10}$ см $^{-3}$. ОЧГ-детекторы отличаются исключительно малым уровнем токов утечки (около 10^{-11} А). Поэтому энергетическое разрешение таких детекторов лучше, чем у *Ge(Li)*.

На рис.1. в качестве примера приведен аппаратурный спектр гамма – излучения, полученный с помощью коаксиального о. ч. г. детектора с энергетическим разрешением 1.9 кэВ по линии 1173 кэВ.

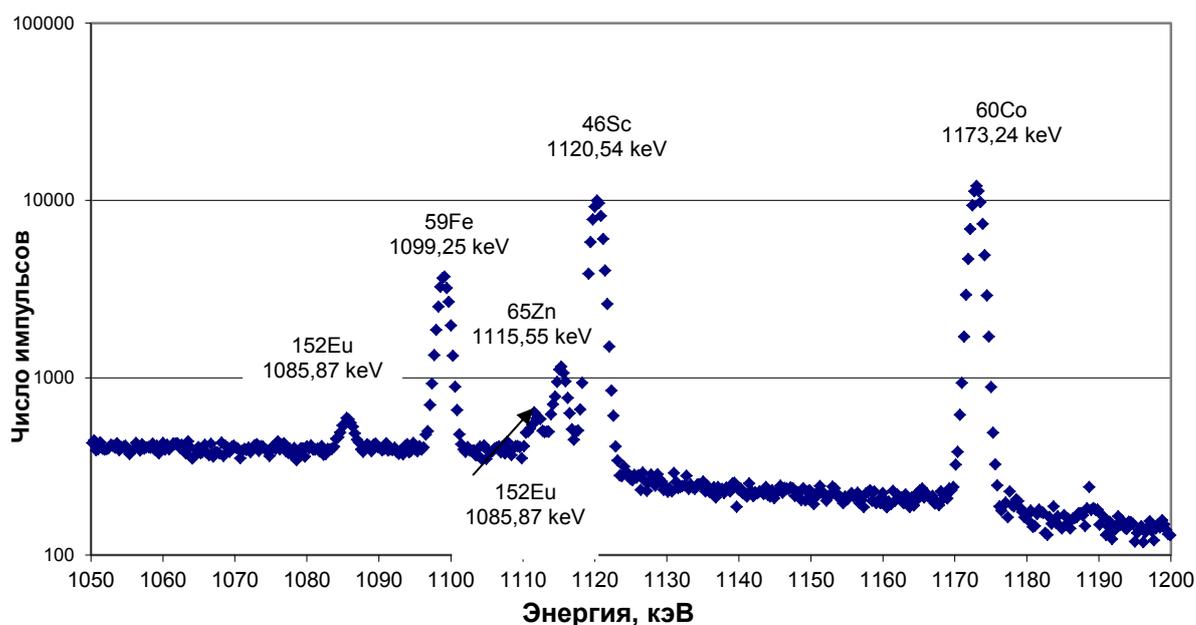


Рис. 1. Часть спектра наведенной активности образца горной породы, облученной тепловыми нейтронами в реакторе МИФИ при времени охлаждения 180 дней.

Общая схема гамма-спектрометра, на основе ОЧГ, приведена на рис.2.

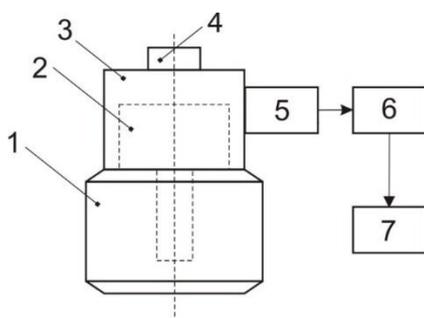


Рис.2. Общая схема и фотография гамма-спектрометра на основе ОЧГ-детектора.

1-сосуд Дьюара; 2-ОЧГ ППД; 3-криостат; 4-место установки исследуемых образцов; 5-предусилитель; 6- анализатор (специализированная плата SBS-50, вставляемая в ПК); 7-устройство ввода и вывода информации (ПК).

Чувствительная часть детектора (кристалл ОЧГ) расположен в верхней части корпуса детектора, и представляет собой вертикально ориентированный цилиндр диаметром 50,5 мм и высотой 31,3 мм. Расстояние от верхней плоскости кристалла ОЧГ до внутренней стенки корпуса детектора составляет 3 мм. Толщина стенки корпуса 1,27 мм (алюминий).

Питание детектора осуществляется с помощью источника высокого напряжения, встроенного в плату анализатора SBS-50, управляемого программным способом с персонального компьютера. Питание предусилителя детектора также осуществляется с помощью выхода на плате анализатора. Плата спектрометрического анализатора управляется с помощью программы набора и обработки спектров eSBS.

Кривая эффективности для данного детектора изучается в лабораторной работе №3 по курсу «Экспериментальные методы ядерной физики» на 2-ом семестре магистратуры. В данной работе необходимо также будет осуществляться получение кривой эффективности для данного детектора, которая впоследствии будет использоваться для расчета активности источника абсолютным методом. Полученные значения активностей понадобятся при расчете мощностей дозы в соответствии с формулой 16.

В качестве контрольного прибора для измерения степени сооблечения дозовой нагрузки защитными материалами в данной работе используется носимый комбинированный многофункциональный дозиметр-радиометр МКС-АТ1117М.

Данный прибор предназначен для измерения амбиентного эквивалента дозы и мощности амбиентного эквивалента дозы рентгеновского, гамма- и нейтронного излучения, поверхностной активности и плотности потока альфа- и бета-частиц с загрязненных поверхностей, а также плотности потока нейтронов.

В зависимости от выполняемых задач, прибор комплектуется выносными блоками детектирования различного назначения. В качестве элемента управления и индикации может использоваться блок обработки информации (БОИ/БОИ2), КПК или персональный компьютер.

Информация с блока детектирования по специальному кабелю поступает на блок обработки информации и индицируется на жидкокристаллическом индикаторе.

В БОИ и БОИ2 предусмотрена возможность записи и хранения в энергонезависимой памяти до 99 результатов измерений, а также передача их в персональный компьютер при помощи специального ПО.

Присутствует звуковая и визуальная сигнализация превышения пороговых уровней по дозе, мощности дозы, плотности потока, флюенса и поверхностной активности. Алгоритм работы обеспечивает непрерывность процесса измерения и статистическую обработку результатов в режиме реального времени. В блоки обработки БОИ и БОИ2 встроены узлы детектирования, позволяющие обеспечить измерение дозы и мощности дозы гамма-излучения в месте нахождения оператора.

Таблица 1. Характеристики блока обработки информации БОИ-2, включающего в себя газоразрядный детектор гамма-излучения.

| Детектор | газоразрядный счетчик |
|--|--|
| Диапазон измерения мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения | $1,0 \text{ мкЗв} \cdot \text{ч}^{-1} \div 10 \text{ мЗв} \cdot \text{ч}^{-1}$ |
| Диапазон измерения амбиентного эквивалента дозы | $1 \text{ мкЗв} \div 1 \text{ Зв}$ |
| Диапазон регистрируемых энергий гамма-излучения | $0,06 \div 3 \text{ МэВ}$ |
| Габаритные размеры, масса: | $200 \times 85 \times 36 \text{ мм}, 0,5 \text{ кг}$ |

В качестве образцов защитных материалов используются следующие объекты:

- Образец ткани Demron №103887, плотностью 1.77 г/см³;
- Образец ткани Demron №103888, плотность 2.59 г/см³;
- Образец материала, предоставленного ВНИИХТ-ом, плотность 7.36 г/см³;
- Свинцовые пластины, плотность 11.3 г/см³.

Материалы №103887(средняя толщина одного слоя $d = 850$ мкм), №103888 ($d = 600$ мкм) и материал ВНИИХТ-а ($d = 2500$ мкм) представлены в виде квадратов, со стороной 3 см; измерялась зависимость степени ослабления излучения от толщины слоя материала, измеряемой в единицах поверхностной плотности (г/см²). Данный выбор единиц измерения толщины обусловлен тем, что в работе исследовались материалы с разной плотностью, и при построении зависимости ослабляющих свойств от простой толщины образца мог образоваться сильный разброс значений толщины. Внешний вид образцов защитного материала представлен на рисунке 3.

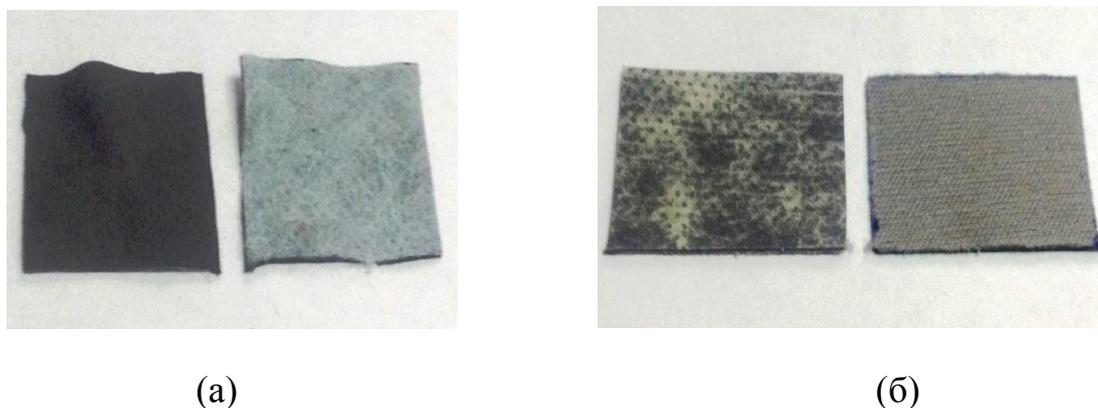


Рис.3. Внешний вид образцов защитного материала
а) №103888 б) №103887

Подготовка спектрометра к работе

Убедиться в надежности установки детектора с сосудом Дьюара (детектор установлен в сосуд без перекосов, сосуд устойчиво стоит на полу).

Проверить правильность и надежность подключения соединительных кабелей. Кабель с разъемом питания предусилителя детектора (RS-232) подключается к соответствующему гнезду на плате анализатора. Кабель с

разъемом для высокого напряжения (BNC HV) и сигнальный кабель (output 1, BNC) также подключаются к соответствующим разъемам на плате анализатора.

Включить персональный компьютер, дождаться загрузки рабочего стола. Запустить программу набора и обработки спектров eSBS. При запуске программы появится предложение подать высокое напряжение на детектор. Рабочее напряжение детектора ОЧГ составляет +1800 В. Установить время подъема напряжения не менее 5 минут и включить подачу напряжения на детектор.

Дальнейшая работа с детектором осуществляется в соответствии с руководством пользователя программы eSBS.

По завершении работы необходимо отключить высокое напряжение с детектора.

Порядок выполнения работы

ВНИМАНИЕ!!! Включение установки и размещение источников ионизирующего излучения осуществляются только в присутствии преподавателя

Общий порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с описанием экспериментальной установки.
2. Пройти проверку усвоения информации в виде устного опроса преподавателем.
3. Используя предложенное оборудование и различные образцы защитных материалов вычислить для каждого из образцов значение коэффициента ослабления мощности дозы фотонного излучения для нескольких источников гамма-излучения с различной энергией. Для этого провести набор спектров излучения источников, указанных в таблице (приведена в конце описания) в отсутствие защитных материалов и при их наличии. Перед проведением набора спектров необходимо осуществить энергетическую калибровку спектрометра с использованием источника излучения Ba^{133} . Калибровка производится в соответствии с описанием к программе eSBS. Данные, полученные при наборе спектров, занести в самостоятельно подготовленную таблицу.
4. Используя специализированный дозиметр-радиометр получить значения коэффициентов ослабления мощности дозы источников

гамма-излучения для тех же материалов по показаниям дозиметра. Полученные данные занести в самостоятельно подготовленную таблицу.

5. Сравнить значения коэффициентов ослабления мощности дозы для каждого материала в пределах исследуемого диапазона энергии гамма-излучения, использованного в работе. Результаты сравнения представить в виде графиков.
6. Для каждого значения энергии гамма-излучения, использовавшегося в работе, провести сравнение коэффициентов ослабления мощности дозы для всех исследованных защитных материалов. Результаты сравнения представить в виде графиков.
7. Повторить п.5 и п.6 для значений, полученных с использованием специализированного дозиметра радиометра.
8. *Дополнительное задание: на основании спектров рентгеновского излучения, полученных при облучении образцов защитных тканей потоком электронов источника ^{90}Sr - ^{90}Y , сделать предположения о свойствах наполнителя данной ткани (Z наполнителя ткани по характеристическим линиям в спектре).*

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов В.И. Курс дозиметрии, Учебник для вузов. — 3-е изд. перераб. и доп. — М: Атомиздат, 1978. -392 с.;
2. Б.П. Голубев Дозиметрия и защита от ионизирующих излучений 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат 1986. -462 с.;
3. Машкович В.П., Кудрявцева А.В. Защита от ионизирующих излучений. Справочник. М., Энергоатомиздат, 1995, 496 с.

Справочная информация:

Характеристики источников ионизирующего излучения, используемых в работе (приведены наиболее вероятные линии гамма-излучения, на практике возможно наличие большего числа линий энергий).

Набор ОСГИ №1

| Источник | A_0 , кБк | E_γ , кэВ | k , % | $T_{1/2}$, сут. | Дата паспортизации активности |
|-------------------|-------------|------------------|---------|------------------|-------------------------------------|
| ^{137}Cs | 113,5 | 661,660 | 85,1 | 11020 | 31.12.2001 г. |
| ^{60}Co | 99,66 | 1173,238 | 99,86 | 1925,5 | |
| | | 1332,502 | 99,98 | | |
| ^{133}Ba | 117 | 79,631 | 2,5 | 3862 | |
| | | 80,998 | 34,11 | | |
| | | 276,398 | 7,147 | | |
| | | 302,853 | 18,30 | | |
| | | 356,017 | 61,94 | | |