



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Белорусский национальный
технический университет**

Кафедра «Техническая физика»

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

**Методические указания
к выполнению лабораторной работы**

**Минск
БНТУ
2014**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Техническая физика»

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ
С ВЕЩЕСТВОМ

Методические указания
к выполнению лабораторной работы
по дисциплине «Защита от ионизирующих излучений»
для студентов специальности 1-43 01 08
«Паротурбинные установки атомных электрических станций»

Минск
БНТУ
2014

УДК 539.12.043(076.5) (075.8)

ББК 22.383я7

В40

С о с т а в и т е л ь
канд. физ.-мат. наук *С. М. Качан*

Р е ц е н з е н т ы :
М. А. Князев, П. Г. Кужир

В методических указаниях рассматриваются основные механизмы, ответственные за процесс передачи энергии косвенно ионизирующего гамма-излучения веществу: фотоэффект, эффект Комптона и образование электрон-позитронных пар. На единой теоретической базе излагаются методика оценки энергии неизвестных источников по поглощательной способности металлов, а также методика оценки линейного коэффициента ослабления и его зависимости от плотности и зарядового числа металлов с целью выбора эффективного материала защиты.

Методические указания рассчитаны на студентов специальности 1-43 01 08 «Паротурбинные установки атомных электрических станций» при освоении дисциплины «Защита от ионизирующих излучений».

© Белорусский национальный
технический университет, 2014

СОДЕРЖАНИЕ

СВОЙСТВА ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ	4
ПРОХОЖДЕНИЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО	6
МЕХАНИЗМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ.....	11
Фотоэффект	11
Эффект Комптона	13
Эффект образования электрон-позитронных пар	17
Полный коэффициент ослабления	19
МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛИНЕЙНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ОСЛАБЛЕНИЯ.....	21
ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ.....	23
Описание экспериментальной установки.....	23
Задание 1	25
Задание 2	29
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	31
ЛИТЕРАТУРА	33
ПРИЛОЖЕНИЯ	34

Цели работы:

1. Изучить основные механизмы взаимодействия и закон ослабления при прохождении гамма-излучения через вещество.
2. Измерить функцию пропускания гамма-излучения через поглотители из различных металлов. Получить зависимость линейного коэффициента ослабления от плотности и атомного номера материала поглотителя. Установить преимущественный механизм ослабления гамма-излучения для данного радионуклидного источника.
3. Определить энергию гамма-квантов неизвестного источника методом поглощения в свинце и алюминии и установить вид радиоактивного изотопа. Для полученных энергий сравнить эффективность защиты из свинца и алюминия путём расчёта толщин половинного ослабления.

Данная лабораторная работа рассчитана на 8 академических часов.

Краткие теоретические сведения

СВОЙСТВА ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Гамма-излучение представляет собой *коротковолновое электромагнитное излучение (длина волны $\lambda < 10^{-10}$ м), возникающее при разрядке возбужденных состояний ядер*. Возбужденное ядро образуется в результате радиоактивного распада или ядерной реакции, последующий переход в основное или менее возбужденное состояние ядра сопровождается излучением гамма-кванта. Помимо этого, гамма-излучение может возникать при распаде элементарных частиц, аннигиляции пар частица-античастица, торможении заряженных частиц в веществе и др.

При взаимодействии с веществом гамма-излучение проявляет чётко выраженные корпускулярные свойства, и его можно рассматривать как поток фотонов (*гамма-квантов*). Энергия гамма-квантов, образующихся в результате радиоактивных

распадов и ядерных реакций составляет от 10 кэВ до 10 МэВ. Таким образом, указанный диапазон является характерным для реакторного гамма-излучения.

В отличие от гамма-излучения, рентгеновское излучение, которое также имеет электромагнитную природу, возникает при изменениях в состоянии электронов атомной оболочки (т. е. при перестройке электронной структуры атома, а не структуры атомного ядра) и охватывает область меньших энергий (от 100 эВ до 250 кэВ).

Энергетический спектр гамма-излучения является линейчатым, что обусловлено дискретностью энергетических состояний атомных ядер. В различных схемах распада спектры могут быть разной степени сложности. Например, при β -распаде ^{137}Cs излучается одна гамма-линия, радионуклиды ^{60}Co и ^{22}Na дают две гамма-линии, а ^{152}Eu – 52 линии. На рисунке 1 в качестве примера приведены схемы распада ^{137}Cs и ^{60}Co .

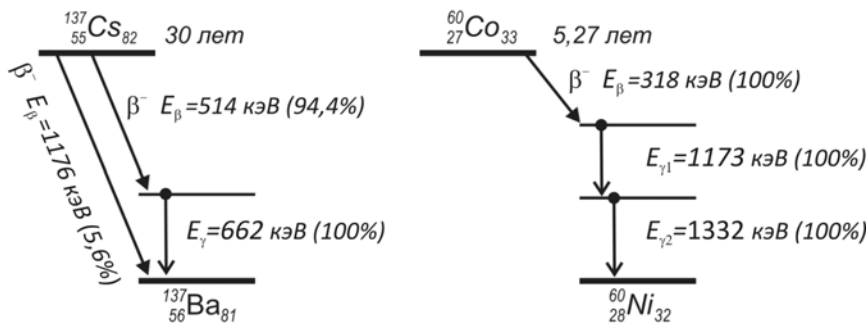


Рисунок 1 – Схемы распада ^{137}Cs и ^{60}Co

В большинстве случаев гамма-спектры радионуклидов содержат большое число монохроматических гамма-линий. Интенсивность и энергетический спектр гамма-излучения являются уникальными характеристиками радиоизотопа. Поскольку гамма-излучение сопровождает распад подавляющего большинства радионуклидов, знание спектров гамма-излучения даёт возможность идентифицировать состав и даже количественное со-

держание радиоактивных изотопов в материалах, и, в частности, определить степень выгорания ядерного топлива.

ПРОХОЖДЕНИЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

По своим свойствам гамма-лучи являются сильно проникающим излучением. В отличие от альфа- и бета-частиц, гамма-кванты обладают нулевой массой покоя, поэтому не могут замедляться в среде, а при прохождении сквозь вещество либо поглощаются целиком, либо рассеиваются с частичной потерей энергии. При этом поток гамма-излучения в целом теряет свою энергию и ослабляется.

Количественной характеристикой вероятности взаимодействия гамма-квантов с атомами поглотителя является *эффективное сечение взаимодействия* σ . Сечение численно равно *вероятности взаимодействия кванта на единице пути в веществе, содержащем один атом в единице объема* и имеет размерность площади (как правило, см^2 , но часто используется внесистемная единица барн, $1 \text{ барн} = 10^{-24} \text{ см}^2$).

При падении узкого монохроматического параллельного пучка гамма-излучения на поглотитель количество гамма-квантов dN , убывающих из пучка за счет поглощения или рассеяния, прямо пропорционально числу падающих гамма-квантов N . Вероятности взаимодействия с атомом для каждого из них σ и концентрации атомов n на рассматриваемом малом участке пути dx :

$$-dN = n\sigma N dx. \quad (1)$$

Таким образом, после интегрирования получаем *экспоненциальный закон ослабления* для узких пучков монохроматического гамма-излучения:

$$N = N_0 e^{-n\sigma x} = N_0 e^{-\mu x}, \quad (2)$$

где N – число оставшихся в пучке гамма-квантов.

Величина $\mu = n\sigma$ называется **линейным коэффициентом ослабления** и имеет размерность см^{-1} .

Физический смысл **линейного коэффициента ослабления** очевиден из уравнения (1): $\mu = \frac{-dN/N}{dx}$ – это **относительное ослабление гамма-излучения на единицу длины пути**.

Линейный коэффициент ослабления μ зависит от энергии гамма-квантов E_γ и химического состава вещества. Чем выше плотность ρ и больше атомный номер Z поглотителя, тем эффективнее он ослабляет гамма-излучение (например, свинец гораздо более эффективен в целях защиты, чем сталь или алюминий той же толщины).

В отличие от альфа- и бета-частиц, фотоны не имеют определённого пробега или тормозного пути в веществе. Однако величина обратная линейному коэффициенту ослабления $1/\mu$ имеет размерность длины и часто называется **средней длиной свободного пробега**.

Средняя длина свободного пробега $l = 1/\mu$ – это **среднее расстояние, которое проходит гамма-квант, прежде чем испытать взаимодействие, которое выведет его из пучка**.

Для характеристики проникающей способности гамма-излучения также вводят понятие **толщина половинного ослабления** $\Delta_{1/2}$ – **толщина поглотителя, ослабляющая поток гамма-излучения в 2 раза**. Из уравнения (2) получим:

$$\Delta_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}. \quad (3)$$

Линейный коэффициент ослабления μ зависит от плотности, а потому вещества одной химической природы в разных фазовых состояниях (например, лед, вода и пар) будут иметь разные μ даже для одной и той же энергии излучения E_γ . Поэтому удобным является введение нормированного на плотность **массового коэффициента ослабления**

$$\mu_m = \mu/\rho, \quad (4)$$

имеющего размерность площади на единицу массы, см²/г.

Массовый коэффициент ослабления можно записать через сечение реакции

$$\mu_m = \mu/\rho = \frac{n \cdot \sigma}{\rho} = \frac{1}{V} \cdot \frac{m N_A}{A} \cdot \frac{\sigma}{\rho} = \frac{N_A \cdot \sigma}{A}, \quad (5)$$

где A – атомная масса;

m – масса вещества объемом V ;

$N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ – число Авогадро.

Массовый коэффициент ослабления μ_m не зависит от плотности и чаще приводится в таблицах, поскольку количественно определяет вероятность взаимодействия гамма-квантов с конкретным химическим элементом, вне зависимости от фазового состояния вещества.

Если материал имеет сложный химический состав, то справедлива формула:

$$\mu_m = \sum_i \mu_{mi} \omega_i, \quad (6)$$

где ω_i – массовая доля i -го элемента;

μ_{mi} – его массовый коэффициент ослабления.

Используя массовый коэффициент ослабления можно переписать экспоненциальный закон ослабления узких монохроматических пучков гамма-излучения в следующем виде:

$$N = N_0 e^{-\frac{\mu}{\rho} \cdot \rho \cdot d} = N_0 e^{-\mu_m d}, \quad (7)$$

где $d = \rho \cdot d$ – так называемая **массовая толщина вещества**, г/см².

Отметим, что в случае, если гамма-кванты в узком пучке имеют *различные энергии*, тогда закон ослабления записывается через сумму экспонент, с учётом начального количества квантов N_{0i} , обладающих энергией $E_{\gamma i}$, и соответствующего им массового коэффициента ослабления в веществе μ_{mi} :

$$N = \sum_i N_{0i} \cdot e^{-\mu_{mi} \cdot d}. \quad (8)$$

Важно подчеркнуть, что закон ослабления, записанный в форме (2), (7), (8) справедлив только в том случае, если испытывавшие взаимодействие (рассеянные с потерей энергии) гамма-кванты не возвращаются в пучок и не изменяют его первоначальный энергетический спектр. Т. е. *энергия гамма-квантов распространяющегося пучка остаётся неизменной*. Это так называемое **«приближение узких пучков»**, и для его выполнения требуется, чтобы угол, под которым виден из детектора фильтр-поглотитель, был как можно меньше. Добиться такого эффекта можно, если ограничить ширину пучка размерами много меньше, чем средняя длина свободного пробега l гамма-квантов, и либо увеличивать расстояние между поглотителем и детектором (см. рисунок 2), либо уменьшать поперечный размер детектора. В первом случае побочно происходит уменьшение интенсивности пучка обратно пропорционально квадрату расстояния (закон обратных квадратов), во втором – возможно снижение эффективности регистрации детектора. В любом случае возрастает статистическая ошибка проводимых измерений.

Геометрию узких пучков трудно реализовать на практике. На практике распространение гамма-излучения через вещество чаще всего корректно описывает **«приближение широких пучков»**. В этом случае *детектор регистрирует не только не испытывавшие взаимодействия гамма-кванты, но и рассеянные (вторичные)*.

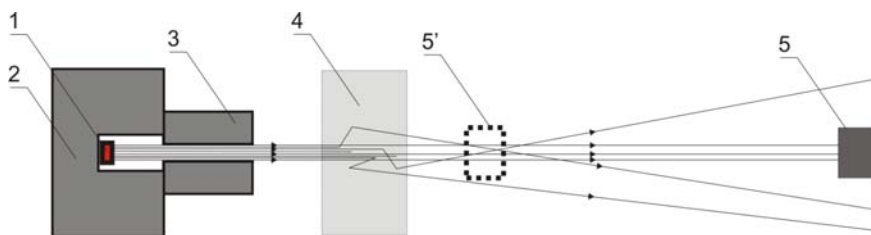


Рисунок 2 – Схема детектирования гамма-излучения после взаимодействия с веществом поглотителя:

- 1 – источник гамма-излучения; 2 – блок защиты; 3 – коллиматор;
 4 – поглотитель; 5 – детектор, регистрирующий узкий пучок;
 5' – детектор, регистрирующий широкий пучок

Увеличение числа детектируемых квантов за счет рассеянного излучения нужно учитывать, в частности, при определении коэффициента ослабления вещества, иначе будет получена завышенная оценка энергии падающих гамма-квантов.

В геометрии широких пучков закон ослабления принимает вид

$$N = B(E_\gamma, d, Z) \cdot N_0 e^{-\mu_m d} . \quad (9)$$

Здесь $B(E_\gamma, d, Z)$ – **фактор накопления**, т. е. безразмерный коэффициент, принимающий значения больше или равные 1, учитывающий вклад рассеянного излучения. Величина фактора накопления зависит от многих параметров. С одной стороны – от первоначальной энергии гамма-квантов, геометрии и углового распределения излучения источника, с другой – от толщины d , зарядового числа Z и геометрии поглотителя.

Таким образом, точный расчёт ослабления потока в геометрии широких пучков представляет собой сложную задачу. В геометрии узких пучков фактор накопления $B = 1$, и формула (9) переходит в формулу (7).

МЕХАНИЗМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

Высокая проникающая способность гамма-излучения обусловлена характером его взаимодействия с веществом. Для создания эффективной защиты, а также для понимания принципов регистрации гамма-излучения необходимо знать механизмы ослабления гамма-излучения веществом.

В диапазоне энергий реакторных гамма-квантов основными процессами, сопровождающими прохождение гамма-излучения через вещество, являются фотоэффект, эффект Комптона и образование электрон-позитронных пар.

Фотоэффект

Фотоэффект – это процесс полного поглощения гамма-кванта связанным электроном атомной оболочки, в результате которого электрон высвобождается с запасом кинетической энергии, равным разности энергии фотона E_γ и энергии связи электрона $E_{св}$ (рисунок 3):

$$E_e = E_\gamma - E_{св}. \quad (10)$$

На долю ядра приходится очень малая энергия отдачи, так как масса ядра намного больше массы электрона, поэтому в выражении (10) её можно не учитывать. Однако благодаря большой массе ядра ему передаётся большая часть импульса фотона. В отсутствие ядра, т. е. на свободных электронах, фотоэффект невозможен ввиду нарушения закона сохранения импульса.

Вероятность фотоэффекта зависит от энергии гамма-кванта и зарядового числа Z атома. Чем сильнее связь электрона с ядром, тем выше вероятность фотоэффекта. Поэтому если энергия фотона превышает энергию связи электрона на ближайшей к ядру K -оболочке, то с вероятностью свыше 80 %

фотопоглощение происходит именно сильно связанными электронами К-оболочки.

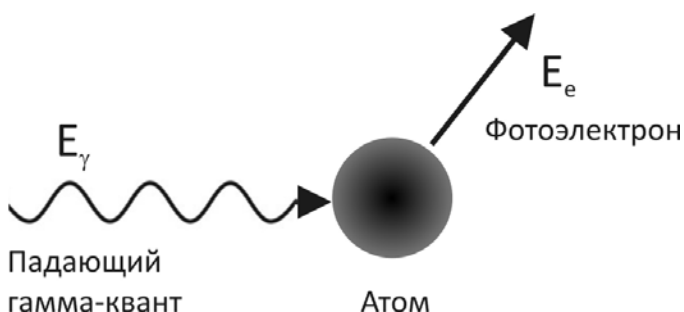


Рисунок 3 – Схематическое изображение фотоэффекта

Вакансия, которая образуется после вырывания электрона из оболочки, заполняется электроном с вышерасположенного уровня. При этом избыточная энергия «перепрыгнувшего» электрона либо излучится в виде рентгеновского кванта, либо будет передана электрону верхней оболочки с меньшей энергией связи, что заставит его покинуть атом (т. н. электроны Оже). Таким образом, фотоэффект сопровождается либо характеристическим рентгеновским излучением, либо испусканием Оже-электронов.

Так как вероятность обмена импульсом при фотоэффекте зависит от энергии связи электрона с ядром, то факторы, которые увеличивают энергию связи в конечном счете увеличивают вероятность фотоэффекта. Поэтому, чем больше зарядовое число Z вещества, тем выше вероятность фотоэффекта (возрастает сила кулоновского притяжения электронов к ядру). В то же время вероятность фотоэффекта быстро падает при увеличении энергии гамма кванта свыше энергии связи электронов на K -й оболочке (энергия связи становится пренебрежимо мала в сравнении с E_γ).

Приближённо зависимость эффективного сечения фотоэффекта $\sigma_{\text{ф}}$ от E_{γ} и Z описывается следующими зависимостями:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{\text{ф}} \sim \frac{Z^5}{E_{\gamma}^{3.5}}, \text{ при } E_{\gamma} > E_K \\ \sigma_{\text{ф}} \sim \frac{Z^5}{E_{\gamma}}, \text{ при } E_{\gamma} \gg E_K \end{array} \right. , \quad (11)$$

где E_K – энергия связи на K -й оболочке.

Таким образом, *фотоэффект наиболее значим для тяжёлых материалов, таких как свинец, уран, вольфрам, при низких энергиях гамма-квантов.*

Эффект Комптона

Эффект Комптона – это процесс рассеяния гамма-квантов на свободных электронах вещества и на электронах внешней оболочки атома, в результате которого часть энергии фотона E_{γ} передаётся электрону (и он покидает атом), а гамма-квант с уменьшенной энергией E'_{γ} меняет направление своего движения.

Поскольку энергия связи электрона на внешних оболочках пренебрежимо меньше энергии гамма-кванта, то эффект Комптона принято рассматривать как упругое¹ столкновение гамма-кванта со свободным электроном (рисунок 4).

Направления вылета комптоновского электрона отдачи и рассеянного гамма-кванта зависят только от количества энергии, переданной электрону. Уменьшение энергии гамма кванта зависит, таким образом, от угла его рассеяния θ (угол между направлением движения падающего и рассеянного гамма-кванта):

¹ Упругим рассеянием называется взаимодействие частиц, при котором сохраняется суммарная кинетическая энергия частиц до и после взаимодействия, а структура и внутреннее состояние частиц остаются неизменными.

$$E_{\gamma}' = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{E_{\gamma}}{m_e c^2} \cdot (1 - \cos \theta)}, \quad (12)$$

где $m_e c^2$ – энергия покоя электрона, равная 511 кэВ.

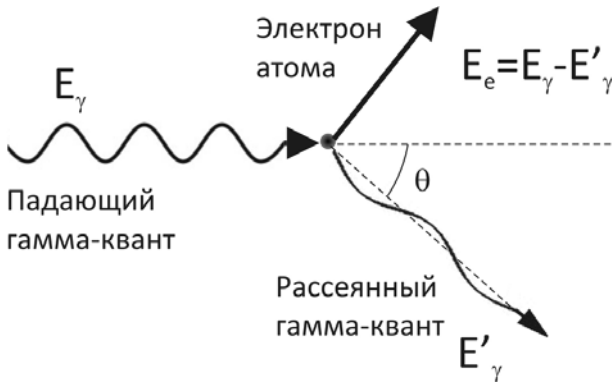


Рисунок 4 – Схематическое изображение эффекта Комптона

Энергия рассеянного кванта минимальна при лобовом столкновении ($\theta = 180^\circ$)

$$E'_{\gamma \min} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{2E_{\gamma}}{m_e c^2}} \quad (13)$$

и максимальна (практически равна энергии падающего гамма-кванта) при рассеянии на малые углы ($\theta \approx 0^\circ$).

Кинетическая энергия комптоновских электронов $E_e = E_{\gamma} - E'_{\gamma}$, выбитых моноэнергетическими квантами, изменяется в широких пределах:

$$0 < E_e < \frac{E_\gamma}{1 + \frac{m_e c^2}{2E_\gamma}}. \quad (14)$$

При прохождении через вещество пучка гамма-излучения ввиду большого количества взаимодействующих гамма-квантов энергетическое распределение электронов отдачи в указанных границах является фактически непрерывным.

Угол рассеяния электрона при возрастании его энергии E_e от нуля до максимума изменяется от 90° до 0° .

Поскольку в комптоновском рассеянии участвуют наименее связанные электроны, ядро оказывает слабое влияние на вероятность рассеяния на отдельном электроне. Однако, так как число электронов оболочки пропорционально Z , эффективное сечение Комптон-эффекта σ_K , характеризующее вероятность рассеяния на отдельном атоме, также растёт прямо пропорционально зарядовому числу. При этом вероятность Комптон-эффекта плавно уменьшается с ростом энергии гамма-кванта:

$$\sigma_K \sim \frac{Z}{E_\gamma}. \quad (15)$$

Вероятность комптоновского рассеяния пропорциональна электронной плотности, поэтому линейный коэффициент ослабления за счёт комптоновского рассеяния μ_K можно представить в виде

$$\mu_K = n\sigma_K = \frac{N_a}{V} \sigma_K = \frac{1}{V} \frac{m}{A} N_A \cdot \sigma_K \sim \rho \cdot \frac{Z}{A} \cdot N_A, \quad (16)$$

где N_a – число атомов в объёме V вещества.

Ввиду того, что отношение зарядового и массового чисел Z/A является константой практически для всех химических элемен-

тов кроме водорода и самых тяжёлых (принимая $\frac{Z}{A} \approx 0,4...0,5$), можно сделать вывод, что линейный коэффициент ослабления за счёт комптоновского рассеяния μ_K возрастает прямо пропорционально плотности вещества ρ . А в области средних и больших энергий, где зависимость от энергии очень слаба, μ_K зависит практически только от плотности вещества. Массовый же коэффициент ослабления за счёт комптоновского рассеяния μ_K/ρ будет пригоден при этом для любого поглотителя.

В большинстве поглотителей комптоновское рассеяние является основным первичным процессом взаимодействия для фотонов средних и высоких энергий, а при небольших Z – и для мягких гамма-квантов (фотоэффектом для легких материалов уже можно пренебречь).

Характер углового распределения рассеянных гамма-квантов влияет на количество фотонов, возвращающихся в падающий поток. При малых энергиях $E_\gamma \ll m_e c^2$ угловое распределение симметрично относительно перпендикуляра к направлению распространения гамма-кванта (характерное «дипольное» распределение). В релятивистской области $E_\gamma \gg m_e c^2$ угловое распределение резко вытянуто вперед (рисунок 5).

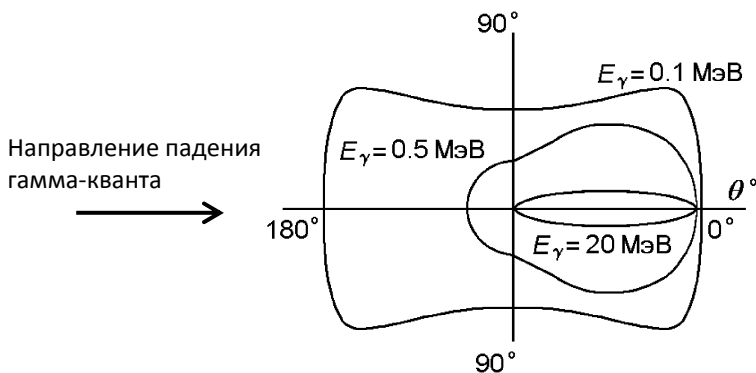


Рисунок 5 – Угловое распределение рассеянных гамма-квантов при Комптон-эффекте

Уже при $E_\gamma = 2,5$ МэВ гамма-кванты рассеиваются на угол не более чем 30° к направлению первоначального распространения, т. е. большая часть их возвращается в падающий поток. Тем самым геометрия эксперимента становится геометрией широких пучков.

Отметим, что с Комптон-эффектом связано не только рассеяние гамма-квантов, но также и их поглощение. Если гамма-источник со всех сторон окружить достаточно большими блоками из легкого вещества (например, алюминия), то за пределы блоков гамма-излучение уже не выйдет. Многократное комптоновское рассеяние в большом объеме вещества сопровождается потерей энергии гамма-квантом в каждом акте, и, в конечном счёте приводит к тому, что оставшийся низкоэнергетический квант поглощается в веществе. На явлении поглощения гамма-лучей при Комптон-эффекте основано устройство объёмной защиты из бетона, кирпича, и железа.

Эффект образования электрон-позитронных пар

Образование электрон-позитронных пар – это процесс взаимодействия высокоэнергетического гамма-кванта с электромагнитным полем ядер, приводящее к исчезновению кванта и образованию пары из электрона и позитрона: $\gamma \rightarrow e^- + e^+$.

Важно отметить, что наличие ядра является необходимым условием, так как процесс образования пар происходит лишь в кулоновском поле частицы, получающей часть энергии и импульса¹. Из-за нарушения закона сохранения импульса рождение пары невозможно в отсутствие третьего тела, т. е. в вакууме. Таким образом, ядро получает значительную часть импульса, а энергия отдачи ядра при этом пренебрежимо мала ввиду большой разницы в массе ядра и электрона.

¹ Иногда процесс происходит в поле электрона.

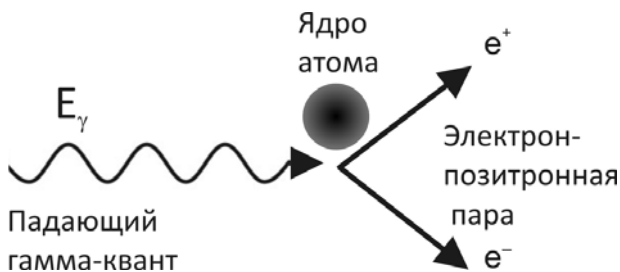


Рисунок 6 – Схематическое изображение эффекта образования электрон-позитронной пары

Взаимодействие имеет энергетический порог, равный удвоенной массе покоя электрона (1022 кэВ), поскольку это минимальная энергия, необходимая для образования электрона и позитрона. Если энергия гамма-кванта превышает порог, то избыток превращается в кинетическую энергию электрона и позитрона:

$$E_{e^-} = E_{e^+} = (E_\gamma - 1022) / 2 \text{ (кэВ)}.$$

Электрон и позитрон испускаются преимущественно в том же направлении, в котором двигался фотон, и быстро замедляются в поглотителе. Последующая аннигиляция потерявшего кинетическую энергию позитрона с каким-либо электроном вещества приводит к появлению двух квантов с энергией по 511 кэВ каждый. Образовавшиеся низкоэнергетические кванты в свою очередь могут взаимодействовать с веществом посредством фотоэффекта или Комpton-эффекта.

Вероятность образования пар $\sigma_{\text{п}}$ пропорциональна Z^2 и растёт с увеличением E_γ :

$$\sigma_{\text{п}} \sim Z^2 \ln E_\gamma. \quad (17)$$

В диапазоне $1,022 < E_\gamma < 2 \text{ МэВ}$ $\sigma_{\text{п}}$ во много раз меньше сечения комптоновского рассеяния. Но *при высоких значениях*

энергии гамма-квантов ($E_\gamma > 4-5 \text{ МэВ}$) образование электрон-позитронных пар становится основным механизмом поглощения, особенно для тяжёлых металлов, таких как свинец или уран. В свинце при энергии 2,0 МэВ образование пар составляет 50 % от всех взаимодействий, для углерода – при той же энергии гамма-квантов – около 4 %.

Необходимо отметить, что кроме вышеописанных трех механизмов взаимодействий γ -излучения с веществом существуют также ядерный фотоэффект, деление ядер и когерентное рассеяние на электронах. Эти процессы не играют заметной роли в ослаблении потока γ -квантов с энергией до нескольких мегаэлектронвольт.

В конечном итоге, *несмотря на многообразие процессов взаимодействия гамма-квантов, сечения всех этих взаимодействий сравнительно невелики, поэтому гамма-излучение слабо поглощается веществом.*

Полный коэффициент ослабления

Все три рассмотренные процесса взаимодействия вносят вклад в полный линейный (а значит и массовый) коэффициент ослабления μ . Так как каждый из процессов происходит независимо от других, μ можно представить как сумму из трёх слагаемых:

$$\mu = \mu_\phi + \mu_K + \mu_\pi, \quad (18)$$

где μ_ϕ , μ_K , μ_π – массовые коэффициенты ослабления, обусловленные соответственно фотоэффектом, комптоновским рассеянием, образованием электрон-позитронных пар.

Относительный вклад трех процессов взаимодействия зависит от энергии гамма-кванта и зарядового числа поглотителя. На рисунке 7 схематично показана роль различных процессов в формировании полного линейного коэффициента ослабления (пунктир).

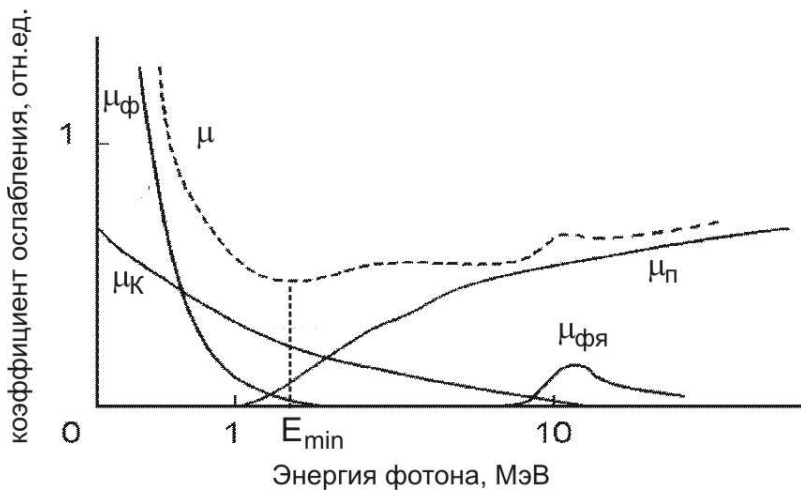


Рисунок 7 – Зависимость от энергии полного коэффициента ослабления μ и вклад его парциальных составляющих при взаимодействии гамма-излучения с веществом

Для каждого элемента всю область изменения энергии можно разбить на три части, в каждой из которых наиболее вероятен один из рассмотренных трёх основных процессов. В случае малых энергий фотоны в основном поглощаются за счет фотоэффекта, для средних энергий преобладает комптоновское рассеяние, для высоких энергий – процесс образования пар.

Главная особенность энергетической зависимости полного коэффициента ослабления – наличие минимума. Минимум связан с убыванием вероятности фотоэффекта и Комптон-эффекта на средних энергиях и ростом вероятности образования электрон-позитронных пар на больших энергиях. Энергия E_{\min} , при которой коэффициент ослабления достигает минимума уменьшается с ростом Z . Так, для азота $E_{\min} = 45$ МэВ, для алюминия – 21 МэВ, для железа – 8 МэВ, а для свинца – около 3 МэВ.

В области низких энергий для всех элементов, кроме водорода, возникает резкий подъем, который свидетельствует о том, что преобладающим процессом взаимодействия является фото-

эффект. Расположение этого подъема сильно зависит от зарядового числа Z . Так для алюминия подъем начинается вблизи 0,05 МэВ, для железа – вблизи 0,1 МэВ, для свинца – 0,5 МэВ.

В области энергий от 0,2 МэВ до 2 МэВ наблюдается снижение значений коэффициента ослабления, что определяет область, в которой доминирует комптоновское рассеяние. Значения массового коэффициента ослабления μ_m в этой области для материалов с $Z > 26$ (железо) практически идентичны. А в более узкой области от 1 до 2 МэВ значения μ_m одинаковы для всех элементов. При энергиях свыше 2 МэВ для тяжелых элементов становится существенным процесс образования пар. Однако для легких элементов преобладание этого эффекта отодвигается в сторону на порядок больших энергий – 10 МэВ для железа и 15 МэВ для алюминия.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛИНЕЙНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ОСЛАБЛЕНИЯ

Пусть $N_0 = N(0)$ – количество регистрируемых гамма-квантов за время экспозиции t в отсутствие поглотителя (т. е. при $x = 0$), а $N(x)$ – количество регистрируемых гамма-квантов за такой же интервал времени после их прохождения через слой поглотителя толщиной x . Обе величины должны быть скорректированы с учетом фона. Тогда из закона ослабления для узкого моноэнергетического пучка – формула (2) – можно получить соотношение

$$N(x) / N_0 = e^{-\mu x} . \quad (19)$$

Отношение $N(x) / N_0$ называют **функцией пропускания $T(x)$** . Из соотношения (19) получаем выражение для расчета массового коэффициента ослабления:

$$\mu = \frac{1}{x} \ln \frac{N_0}{N(x)} = - \frac{\ln T(x)}{x} . \quad (20)$$

Поскольку в логарифмическом масштабе функция пропускания представляет собой прямую, среднее значение линейного коэффициента ослабления можно оценить как тангенс угла наклона такой прямой, проведенной через экспериментальные точки: $\mu = \operatorname{tg}\varphi$ (см. рисунок 8, а). Обычно для определения значений $\operatorname{tg}\varphi$ применяют метод наименьших квадратов (МНК). Такой способ оценки значения μ дает намного меньшую погрешность, чем усреднение значений $\mu(x)$, полученных в результате расчета по формуле (8).

В случае, если спектр гамма-излучения содержит несколько линий, то результирующее число регистрируемых гамма-квантов в геометрии узкого параллельного пучка можно представить как

$$N = N_1 + N_2 + \dots = N_{01}e^{-\mu_1 x} + N_{02}e^{-\mu_2 x} + \dots \quad (21)$$

Типичная кривая ослабления для случая двух гамма-линий представлена на рисунке 8, б. Как видно, раскладывая экспериментальную кривую на две линейных зависимости, можно определить линейные коэффициенты ослабления μ_1 и μ_2 для каждой из гамма-линий.

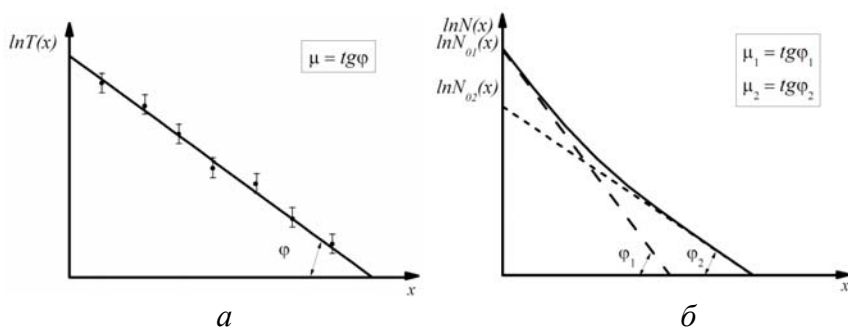


Рисунок 8 – Типичные зависимости:
 а – функции пропускания для одной гамма линии;
 б – функции ослабления для двух гамма-линий

Отметим, что в случае широкого пучка закон ослабления, строго говоря, уже нельзя выразить уравнением (2). В пучке будут встречаться многократно рассеянные гамма-кванты, имеющие меньшую энергию, чем падающие, и, соответственно, характеризуются другим значением μ .

Зная массовый коэффициент ослабления μ в данном веществе, по известной зависимости μ от E_γ для этого вещества можно определить энергию гамма-квантов E_γ . Так, например, в приложении 1 приведены линейные коэффициенты ослабления в зависимости от энергии источника для свинца и алюминия. Такой метод определения энергии гамма-квантов называется методом поглощения. И хотя он не претендует на большую точность, в некоторых случаях может быть полезен из-за простоты реализации.

Ход работы

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Описание экспериментальной установки

Регистрация гамма-излучения после взаимодействия с веществом поглотителя производится с помощью спектрометрического комплекса, представленного на рисунке 9. В состав комплекса входит сцинтилляционный неорганический детектор 1, свинцовый блок защиты детектора 2, базовый блок преобразования светового сигнала в электрический с последующим формированием и усилением 3, компьютер 4 и программа обработки спектрометрических данных «Spectrometer» 5. Схема взаимного расположения источника гамма-излучения, фильтра-поглотителя и детектора приведена на рисунке 10.

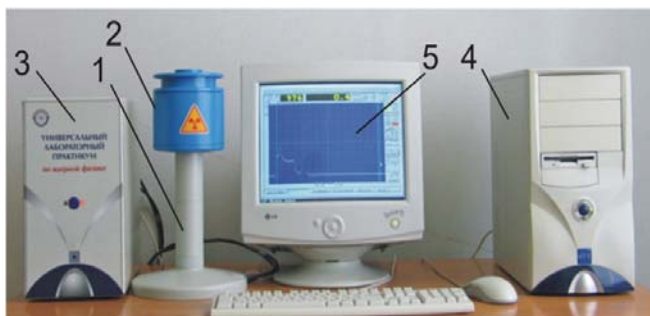


Рисунок 9 – Спектрометрический комплекс



Рисунок 10 – Геометрия эксперимента

В результате регистрации прошедшего через поглотитель излучения формируется амплитудный спектр сложной структуры, изображение которого дает программа «Spectrometer». Однако для целей данной лабораторной работы нет необходимости интерпретировать спектр, т. е. распределение количества зарегистрированных частиц по энергиям. Достаточно получить суммарное число зарегистрированных импульсов. Эта информация по истечении времени измерения указывается в поле «Integrate».

Загрузку программы «Spectrometer» необходимо выполнять после включения спектрометра. В противном случае не устанавливается связь между электронным блоком и компьютером.

Для того чтобы детектирование проводилось корректно, необходимо правильно выбрать рабочий режим спектрометра. Изменяя на панели «*Параметры*» напряжение питания фотоэлектронного умножителя детектора $U_{\text{ФЭУ}}$ и коэффициент усиления усилителя, нужно добиться, чтобы весь измеряемый спектр занимал первую половину экрана. При неправильном выборе режима работы спектрометра детектирование может происходить не во всем диапазоне энергий излучаемых источником частиц.

Предлагается следующий *ориентировочный режим работы*: установить напряжение питания детектора 60 %, коэффициент усиления – 1, порог шкалы (отсекающий шумы детектора) в 40 каналов. Задать время накопления спектра (время экспозиции). После чего нажать клавишу «*Применить*».

Для начала регистрации гамма-излучения поместите источник в углубление на крышке блока защиты детектора напротив коллимационного отверстия и запустите регистрацию, нажав кнопку «*Пуск*». Через заданное время набор прекратится. Принудительная остановка набора осуществляется кнопкой «*Стоп*». Перед следующим набором нажмите кнопку «*Сброс*».

При завершении регистрации, прежде чем выключить спектрометр необходимо снять высокое напряжение. Для этого установите напряжение питания детектора 0 % и нажмите клавишу «*Применить*».

ЗАДАНИЕ 1

Выполнение измерений

1. Включите компьютер, затем спектрометр. Запустите программу «Spectrometer». Установите рекомендуемый режим работы спектрометра. Выполните измерение фонового значения числа импульсов $N_{\text{ф}}$ (без источника) за время экспозиции $t = 100$ с. Повторите еще дважды. Рассчитайте среднее значение $\langle N_{\text{ф}} \rangle$ по трем измерениям.

2. Получите у преподавателя гамма-источник ^{137}Cs и установите его на крышке блока защиты. Проведите за время экспозиции измерение числа импульсов без поглотителя $N_{\text{иф}}$, запишите значение. Повторите измерение еще дважды. Рассчитайте среднее значение по трем измерениям. Получите истинное значение числа импульсов $\langle N_{\text{и}} \rangle$ от источника, вычитая из среднего значения $\langle N_{\text{иф}} \rangle$ фоновое число импульсов $\langle N_{\text{ф}} \rangle$:

$$\langle N_{\text{и}} \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_{\text{и}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (N_{\text{иф}}^i - \langle N_{\text{ф}} \rangle) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_{\text{иф}}^i - \langle N_{\text{ф}} \rangle.$$

Запишите полученные результаты в таблицы 1–4.

3. Введите между источником и детектором свинцовый поглотитель с минимальной толщиной (рисунок 10). Запишите значение числа импульсов за время экспозиции. Повторите измерение еще дважды. Рассчитайте среднее значение по трем измерениям, проведите корректировку на фон. Запишите результаты в таблицу.

4. Последовательно, в 5–7 приемов, увеличивайте толщину поглотителя до максимальной (x_{max} варьируется от 2 см для свинца до 4 см для алюминия, в соответствии с плотностью поглотителя), каждый раз выполняя операции по п. 3.

5. Смените поглотитель и сделайте для него аналогичные операции по пп. 3–4.

6. Заполните таблицы 1–4.

Таблица 1 – Свинцовый поглотитель

Толщина поглотителя x , мм	Число гамма-квантов $N_{\text{иф}}$				Число гамма-квантов от источника $\langle N_{\text{и}} \rangle$	$\Delta N_{\text{и}}$
	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	среднее		

Плотность свинца $\rho = 11,34 \text{ г/см}^3$, $Z = 82$.

Таблица 2 – Медный поглотитель

Толщина поглотителя x , мм	Число гамма-квантов $N_{и\phi}$				Число гамма-квантов от источника $\langle N_{и} \rangle$	$\Delta N_{и}$
	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	среднее		

Плотность меди $\rho = 8,92 \text{ г/см}^3$, $Z = 29$.

Таблица 3 – Железный поглотитель

Толщина поглотителя x , мм	Число гамма-квантов $N_{и\phi}$				Число гамма-квантов от источника $\langle N_{и} \rangle$	$\Delta N_{и}$
	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	среднее		

Плотность кадмия $\rho = 7,8 \text{ г/см}^3$, $Z = 26$.

Таблица 4 – Алюминиевый поглотитель

Толщина поглотителя x , мм	Число гамма-квантов $N_{и\phi}$				Число гамма-квантов от источника $\langle N_{и} \rangle$	$\Delta N_{и}$
	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	среднее		

Плотность алюминия $\rho = 2,70 \text{ г/см}^3$, $Z = 13$.

Завершение работы с установкой

1. Сразу же после завершения последнего измерения сообщите об этом преподавателю или сотруднику лаборатории, чтобы сдать источник. **Не доставайте источник из держате-**

ля самостоятельно и не держите его в руках или на открытой поверхности вне защиты!

2. Уберите до нуля высокое напряжение на детекторе, закройте программу «*Spectrometer*» и выключите спектрометр.

Обработка результатов

1. Рассчитайте погрешность оценки истинного значения числа импульсов $\Delta N_{и}$. Занесите данные в таблицы.

2. Постройте зависимость функции пропускания $T(x) = \langle N_{и} \rangle / \langle N_{и}(0) \rangle$ (т. е. отношения числа импульсов, зарегистрированных после прохождения гамма-излучения через поглотитель к числу импульсов в отсутствие поглотителя) от толщины поглотителя x , используя логарифмический масштаб для оси ординат. Разместите рассматриваемые функции пропускания для всех материалов поглотителя на одном графике. Объясните ход зависимостей.

3. На основании построенных зависимостей и формулы (19) проведите для каждого из поглотителей оценку среднего значения линейного коэффициента ослабления μ и его погрешности. Используйте для этих целей метод наименьших квадратов (МНК). Разрешается провести оценку методом МНК с помощью программ для численного анализа данных (например, Origin, MatLab и т. п.).

4. Постройте зависимость линейного коэффициента ослабления μ с учетом погрешностей от атомного номера материала поглотителя Z .

5. Постройте зависимость линейного коэффициента ослабления μ с учетом погрешностей от плотности материала поглотителя ρ .

6. Используя знания, полученные из раздела «Механизмы взаимодействия гамма-излучения с веществом», проанализируйте вклад механизмов взаимодействия гамма-квантов с веществом в результирующий коэффициент ослабления μ .

7. В отчете представьте результаты в виде таблиц и графиков, а также выводы.

ЗАДАНИЕ 2

Выполнение измерений

1. Включите компьютер, затем спектрометр. Запустите программу «Spectrometer». Установите рекомендуемый режим работы спектрометра. Выполните измерение фонового значения числа импульсов $N_{\text{ф}}$ (без источника) за время экспозиции $t = 300$ с.

2. Получите у преподавателя **неизвестный гамма-источник № 1** и установите его на крышке блока защиты. Проведите за время экспозиции измерение числа импульсов без поглотителя $N_{\text{иф}}$, запишите значение. Получите истинное значение числа импульсов $N_{\text{и}}$ от источника, вычитая из значения $N_{\text{иф}}$ фоновое число импульсов $N_{\text{ф}}$.

Запишите полученные результаты в таблицы 1–2.

3. Введите между источником и детектором (рисунок 10) свинцовый поглотитель с минимальной толщиной.

4. Запишите значение числа импульсов за время экспозиции. Проведите корректировку на фон. Запишите результаты в таблицу.

5. Последовательно, в 5–7 приемов, увеличивайте толщину поглотителя до максимальной (x_{max} варьируется от 2 см для свинца до 4 см для алюминия, в соответствии с плотностью поглотителя), каждый раз выполняя операции по п. 4.

6. Смените свинцовый поглотитель на алюминиевый и проделайте для него аналогичные операции по пп. 4–5.

7. Заполните таблицы 1–2.

8. Сдайте преподавателю неизвестный гамма-источник № 1 и получите **неизвестный гамма-источник № 2**. Выполните с ним измерения согласно пунктам 2–6.

Таблица 1 – Свинцовый поглотитель

Толщина поглотителя x , мм	Число гамма-квантов от источника и фона $N_{иф}$	$\Delta N_{иф}$	Число гамма-квантов от источника $N_{и}$	$\Delta N_{и}$

Плотность свинца $\rho = 11,34 \text{ г/см}^3$, $Z = 82$.

Таблица 2 – Алюминиевый поглотитель

Толщина поглотителя x , мм	Число гамма-квантов от источника и фона $N_{иф}$	$\Delta N_{иф}$	Число гамма-квантов от источника $N_{и}$	$\Delta N_{и}$

Плотность алюминия $\rho = 2,70 \text{ г/см}^3$, $Z = 13$.

Завершение работы с установкой

1. Сразу же после завершения последнего измерения сообщите об этом преподавателю или сотруднику лаборатории, чтобы сдать источник. **Не доставайте источник из держателя самостоятельно и не держите его в руках или на открытой поверхности вне защиты!**

2. Уберите до нуля высокое напряжение на детекторе, закройте программу «*Spectrometer*» и выключите спектрометр.

Обработка результатов

1. Постройте зависимости числа импульсов, зарегистрированных после прохождения гамма-излучения через поглотитель, от толщины поглотителя. Используйте логарифмический масштаб для оси ординат, чтобы упростить последующий

анализ данных. Разместите зависимости $\ln N_i(x)$ на двух графиках – для каждого из поглотителей сделайте отдельный график с результатами измерений от двух источников.

2. На основании построенных зависимостей проанализируйте состав гамма-излучения неизвестных источников на монохроматичность. Обратите внимание на возможность нелинейного представления кривой ослабления в логарифмическом масштабе в том случае, когда источник гамма-излучения не является монохроматическим.

3. С помощью программы для численного анализа данных Origin на основании формулы (19) проведите для каждого из поглотителей оценку μ и его погрешности.

4. По полученным значениям μ для свинца и алюминия, используя приложение 1, определите энергии линий для обоих гамма-источников. Значения энергий каждой линии усредните по данным для алюминия и свинца.

5. С помощью приложения 2 установите вид радиоактивного изотопа для каждого из источников (источник содержит изотопы только одного вида).

6. Оцените погрешность в определении энергии гамма-линий методом поглощения, сделайте выводы. При анализе учитывайте вклад в процесс ослабления каждого из механизмов взаимодействия гамма-квантов с веществом на энергиях, определенных вами для источника.

7. Рассчитайте толщину половинного ослабления $\Delta_{1/2}$ (см) в свинце и алюминии при полученных энергиях источников. Проанализируйте.

8. В отчете представьте результаты в виде таблиц, графиков, значения $\Delta_{1/2}$, а также выводы.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В каких процессах образуется гамма-излучение?
2. Каковы основные виды взаимодействия гамма-излучения с веществом?

3. Что такое фотоэффект?
4. Какова зависимость вероятности фотоэффекта от энергии падающих гамма-лучей и от порядкового номера Z мишени?
5. На каких оболочках атома вероятность фотоэффекта наибольшая и почему?
6. Что такое эффект Комптона?
7. Какова зависимость вероятности эффекта Комптона от энергии падающих гамма-лучей и от порядкового номера Z мишени?
8. Что такое эффект образования пар? Почему этот эффект происходит только в поле ядра?
9. Какова зависимость вероятности образования пар от энергии гамма-лучей и от Z вещества?
10. Каков диапазон энергии гамма-излучения?
11. Каковы основные виды взаимодействия гамма-излучения с веществом?
12. Как зависит вклад каждого вида взаимодействия от энергии гамма-квантов?
13. В чем разница между приближением узких и широких пучков?
14. Каков закон ослабления гамма-излучения веществом в геометрии узких пучков?
15. Каков закон ослабления гамма-излучения веществом в геометрии широких пучков?
16. Что такое линейный и массовый коэффициенты ослабления? От чего они зависят?
17. Какова типичная кривая ослабления (зависимость логарифма скорости счета $\ln(N)$ от толщины поглотителя)?
18. Какова зависимость $\ln(N)$ от толщины поглотителя, если источник содержит две монохроматические гамма-линии с существенно разными энергиями?

ЛИТЕРАТУРА

1. Защита от ионизирующих излучений : в 2 т. / Н. Г. Гусев [и др.] ; под ред. Н. Г. Гусева. – 3-е изд. – М. : Энергоатомиздат, 1992. – Т. 1 : Физические основы защиты от излучений.
2. Практикум по ядерной физике / под ред. В. О. Сергеева. – СПб. : СПбГУ, 2006.
3. Черняев, А. П. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом / А. П. Черняев. – М. : Физматлит, 2004.
4. Ядерная физика : лабораторный практикум для студентов физического факультета / Э. А. Авданина [и др.]. – Минск : БГУ, 2006.

ПРИЛОЖЕНИЯ
Приложение 1

**Линейные коэффициенты ослабления μ (см^{-1}) узкого пучка
гамма-излучения в свинце, меди и алюминии
как функция его энергии**

Энергия излучения, МэВ	Поглотители		
	Свинец, $\rho = 11,34 \text{ г/см}^3$	Медь, $\rho = 8,9 \text{ г/см}^3$	Алюминий, $\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$
0,3	4,76	0,950	0,278
0,4	2,51	0,824	0,251
0,5	1,72	0,732	0,228
0,6	1,37	0,670	0,210
0,7	1,12	0,624	0,196
0,8	0,99	0,585	0,184
0,9	0,86	0,551	0,176
1,0	0,79	0,522	0,166
1,1	0,72	0,497	0,158
1,2	0,68	0,476	0,152
1,3	0,64	0,456	0,146
1,4	0,60	0,442	0,141
1,5	0,58	0,426	0,137
1,6	0,55	0,413	0,131
1,7	0,54	0,400	0,128
1,8	0,53	0,390	0,124
1,9	0,52	0,380	0,120
2,0	0,51	0,371	0,117
2,5	0,48	0,338	0,106
3,0	0,46	0,317	0,094
4,0	0,47	0,294	0,084
5,0	0,49	0,282	0,075
6,0	0,51	0,274	0,072

Приложение 2

Образцовые спектрометрические источники гамма-излучения (ОСГИ)

Нуклид	Энергия E_{γ} , кэВ	Квантовый выход η_{γ} , %	Период полу- распада $T_{1/2}$, лет
Ba-133	81,00	32,90	10,54
	276,40	7,20	
	302,90	18,30	
	356,00	62,00	
	383,85	8,90	
Bi-207	74,97	36,80	32,90
	569,70	97,80	
	1063,60	74,60	
Na-22	1274,54	99,94	2,60
Am-241	26,30	2,40	432,60
	59,50	35,80	
Ti-44	68,90	94,40	60,00
	78,30	96,20	
	1157,00	99,90	
Eu-152	5,64	15,00	13,52
	39,52	20,83	
	40,12	37,73	
	45,40	14,64	
	121,78	28,43	
	964,00	14,44	
	1085,80	9,96	
	1112,00	13,30	
1408,00	20,75		
Co-60	1173,20	99,90	5,27
	1332,50	100,00	
Cs-134	569,32	15,43	2,06
	604,70	97,60	
	795,84	85,40	
Cs-137	661,70	85,10	30,02
Cd-109	88,00	3,61	461,4 дней
Mn-54	834,80	100,00	312,1 дней
Zn-65	511,00	2,92	244,1 дней
	1115,53	50,75	
Y-88	898,00	92,71	106,6 дней
	1836,1	99,35	

Учебное издание

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

Методические указания
к выполнению лабораторной работы
по дисциплине «Защита от ионизирующих излучений»
для студентов специальности 1-43 01 08
«Паротурбинные установки атомных электрических станций»

Составитель

КАЧАН Светлана Михайловна

Редактор *Т. А. Зезюльчик*

Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 29.01.2014. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 2,09. Уч.-изд. л. 1,64. Тираж 50. Заказ 1417.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет. ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.