

Лабораторная работа №4

Принципы создания защиты от нейтронного излучения. Характеристики защитных материалов

Цель работы: изучение свойств различных материалов в отношении ослабления потоков быстрых нейтронов; сравнение ослабляющих свойств различных типов нейтронной защиты: гомогенной и гетерогенной; оценка степени генерации вторичного гамма-излучения при использовании различных типов защитных материалов.

Ослабление потоков нейтронов различных энергий

С точки зрения расчета защиты все процессы взаимодействия нейтрона с веществом можно разбить на два: рассеяние и поглощение. Рассеяние может приводить к изменению энергии и направления движения нейтрона, но непосредственно не приводит к исчезновению последнего. Поглощение связано с полным исчезновением нейтрона в результате ядерной реакции с образованием нового ядра и других частиц.

Различают два вида рассеяния: упругое и неупругое.

Первое возможно при любых энергиях нейтрона, при этом часть энергии передается ядру-мишени. Величина потери энергии зависит от энергии падающего нейтрона и массы ядра. Процесс замедления нейтронов обычно состоит из последовательных упругих столкновений нейтронов с ядрами замедлителя. Наиболее эффективными замедлителями являются легкие ядра. Упругое рассеяние происходит в соответствии с законом сохранения энергии и импульса системы. Для него характерна анизотропия в лабораторной системе координат (преимущественно рассеяние вперед).

При неупругом рассеянии изменяется квантовое состояние ядра. Процесс передачи энергии сопровождается образованием возбужденного состояния ядра и переходом в основное состояние с излучением одного или нескольких

гамма-квантов. Неупругое рассеяние становится возможным, когда энергия налетающего нейтрона превышает энергию первого уровня ядра в $(A + 1)/A$ раз (A - массовое число). Сечение неупругого рассеяния растет, начиная с энергии, соответствующей энергии первого возбужденного уровня состояния ядра, в то время как сечение упругого рассеяния с повышением энергии, как правило, уменьшается. Следовательно, неупругие столкновения существенно влияют на замедление только в области высоких энергий и только на тяжелых ядрах. При сравнительно малых энергиях определяющим в механизме замедления становится упругое рассеяние. Потеря энергии нейтрона при неупругом взаимодействии значительна, а само рассеяние более изотропно, чем упругое. Поглощение нейтронов в веществе происходит в результате захвата нейтрона атомом-мишенью с испусканием γ -квантов или заряженных частиц (например, реакции (n,γ) ; (n,p) ; (n,α)). Для вопросов защиты наиболее важна реакция (n,γ) именуемая радиационным захватом.

Образовавшееся ядро находится в возбужденном состоянии. Возбуждение снимается испусканием гамма-квантов. При низких энергиях нейтронов сечение радиационного захвата для многих элементов составляет основную часть полного сечения. Для быстрых нейтронов ($E > 1 \text{ МэВ}$) сечение реакции (n,γ) очень мало для легких ядер и увеличивается с ростом A , достигая насыщения при $A \approx 100$. Вклад радиационного захвата в полное сечение взаимодействия при высоких энергиях невелик. Следовательно, быстрые нейтроны обладают наиболее проникающими возможностями. В соответствии с этим нейтронная защита рассчитывается на ослабление быстрых нейтронов. Учет нейтронов с меньшей энергией, по аналогии с γ -излучением, возможен как расчет своего рода фактора накопления нейтронов. Тепловые нейтроны практически полностью поглощаются сравнительно тонкими слоями защиты, играя лишь роль в образовании захватного γ -излучения.

Распределение быстрых нейтронов от точечного изотропного источника в приближении выведения описывается функцией:

$$\varphi(r) = \frac{S}{4\pi r^2} \cdot e^{-\frac{r}{\lambda}}.$$

В этом выражении фактор $1/4\pi r^2$ описывает геометрическое ослабление (за счет расстояния), а экспоненциальная функция $\exp[-\lambda/r]$ – описывает «физическое» ослабление. Приближение выведения кинетического уравнения служит теоретической основой для двух полуэмпирических методов расчета ослабления нейтронов: метода длин релаксаций и метода сечения выведения.

Метод длин релаксаций используется для расчета ослабления быстрых нейтронов. Функцию ослабления для точечного изотропного источника быстрых нейтронов можно записать в виде:

$$\phi_{б.н.}(r) = \frac{S}{4\pi r^2} f(r),$$

физическое ослабление аппроксимируется экспоненциальной функцией, т.е.

$f(r) = e^{-r/\lambda}$, где λ – экспериментальный параметр, называемый длиной релаксации. Если защита состоит из нескольких слоев различных материалов,

то $f(r) = e^{-\sum_i \frac{t_i}{\lambda_i}}$ где t_i – толщина i -го слоя; λ_i – длина релаксации быстрых нейтронов в материале i -го слоя защиты. Для схемы защиты, представленной на рис.1, плотность потока быстрых нейтронов в точке D от точечного изотропного источника с использованием метода длин релаксаций находится по формуле

$$\phi(r) = \frac{S}{4\pi r^2} e^{-\sum_i \frac{t_i}{\lambda_i}}.$$

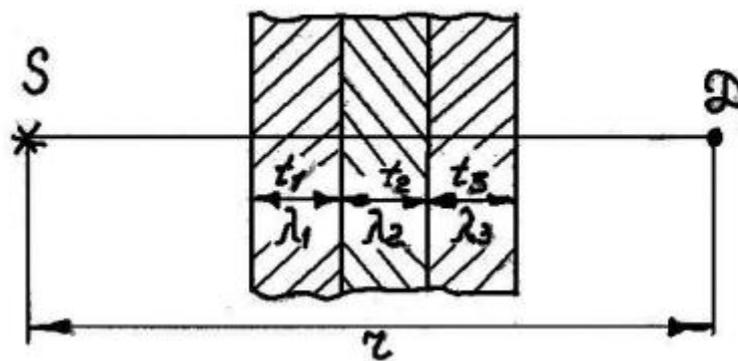


Рис.1. схема геометрии защиты для расчета методом длин релаксаций.

Необходимо отметить, что метод длин релаксаций позволяет рассчитать поток быстрых нейтронов не только за защитой, но и для любой точки внутри защиты. При этом в формуле для расчета потока в показателе экспоненты должна быть толщина защиты в длинах релаксации между источником и расчетной точкой.

Расчет доз от нейтронного источника более сложен, чем расчет доз β - и γ -излучений. Это связано со сложностью расчета и измерений сечения взаимодействия нейтронов различных энергий с биологической тканью. Сечения взаимодействия и характер взаимодействия нейтронов с веществом зависят от энергии нейтронов.

Особенностью нейтронных взаимодействий является то, что образуются вторичные частицы различного типа в зависимости от энергии нейтронов и атомного состава поглощающего вещества. По экспозиционной дозе γ -излучения, измеренной в воздухе, можно судить о дозе излучения в других средах. В случае нейтронного излучения обязательным условием, обеспечивающим равенство поглощенной энергией в различных средах, является их одинаковый изотопный состав. Это не позволяет установить универсальную единицу экспоненциальной дозы нейтронов, подобную рентгену.

Формирование сопутствующего гамма-излучения в защите

Под вторичным понимается ионизирующее излучение, возникающее в результате взаимодействия первичного излучения с рассматриваемой средой. Одним из наиболее проникающих видов вторичного излучения является вторичное гамма-излучение в защите, сопровождающее захват и неупругое рассеяние нейтронов на ядрах изотопов конструкционных, строительных материалов и материалов биологической защиты.

Высокие потоки нейтронов в защитах ядерно-технических установок могут создавать высокую плотность источников вторичного гамма-излучения. Поэтому в ряде случаев радиационная обстановка за защитой ядерно-технических установок целиком определяется вторичным гамма-излучением. Задача определения поля вторичного гамма-излучения в среде сводится к интегрированию вкладов в поле излучения в данной точке детектирования, обусловленных вторичными фотонами, образующимися в актах взаимодействия с нейтронами во всем объеме защиты.

Наилучшими с точки зрения минимума выхода вторичного гамма-излучения являются среды, состоящие из смеси легких и тяжелых веществ.

Для снижения выхода захватного гамма-излучения можно использовать гомогенное или гетерогенное борирование среды.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В настоящей лабораторной работе проводится экспериментальное исследование ослабления потока быстрых нейтронов парафином в сочетании со свинцом.

В качестве источника нейтронов используется генератор нейтронов ИНГ-07Т, описание характеристик которого дано ниже. Нейтроны в данном генераторе образуются за счет реакции синтеза ядер D и T. Значение энергии

нейтронов, вылетающих по направлению оси генератора можно считать равным 14 МэВ.

Генератор предназначен для генерации потока нейтронов с энергией 14 МэВ в непрерывном режиме.

Работа ИНГ-07Т осуществляется в следующих климатических условиях:

- температура окружающего воздуха от плюс 10 до плюс 40 °С;
- относительная влажность воздуха - не более 90 % при температуре 35°С;
- атмосферное давление - от $0,86 \cdot 10^5$ до $1,06 \cdot 10^5$ Па (645 - 795 мм рт.ст.).

Технические данные:

- поток нейтронов на мишени нейтронной трубки до $1,0 \times 10^9$ нейтр./с
- режим излучения нейтронного потока: непрерывный
- время непрерывной работы генератора:
 - на потоке $5 \cdot 10^8$ нейтр./с не менее 2 часов
 - на максимальном потоке не менее 30 минут

Время непрерывной работы ограничено температурой перегрева излучателя (60 ± 5) °С. При достижении этой температуры генератор автоматически отключается.

- питание генератора осуществляется с использованием сети переменного тока с напряжением 220 В и частотой 50 Гц
- потребляемая мощность не более 250 Вт.

Внешний вид генератора нейтронов ИНГ-07т и блока питания и управления (БПУ) приведены на рисунке 1.



Рис.1. Внешний вид генератора нейтронов ИНГ-07Т (справа) и БПУ

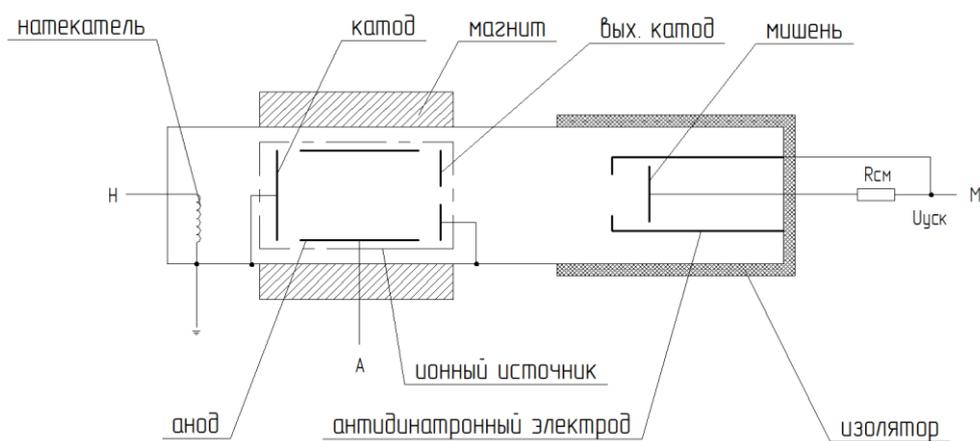


Рис.2 Схема генератора нейтронов ИНГ-07Т

Структурная схема генератора нейтронов приведена на рисунке 2. Источником нейтронов и основным элементом конструкции генератора является отпаянная газонаполненная нейтронная трубка, установленная в блоке излучателя нейтронов. По физическому принципу действия нейтронная трубка представляет собой линейный ускоритель ионов, генерация нейтронов в которой происходит в результате экзотермической реакции (2), когда ускоренные ионы дейтерия бомбардируют мишень, содержащую тритий. Получаемые при этом в результате реакции нейтроны имеют энергию 14 МэВ и излучаются изотропно в угол 4π относительно мишени.

Трубка имеет ионный источник Пеннинга с холодным катодом, хранилище рабочего газа - натекатель, специальный электрод вблизи мишени для подавления вторичных электронов, мишень. Рабочий газ (50% дейтерий + 50% тритий) содержится в адсорбированном состоянии в натекателе, представляющем собой цилиндр из гидрида металла. Выделение рабочего газа происходит в результате термодесорбции при прохождении через натекатель электрического тока. Ионы в источнике образуются в результате газового разряда в скрещенных электрическом и магнитном полях. Аксиальное магнитное поле создается постоянным кольцевым магнитом, размещенным соосно с источником ионов.

Система управления генератора регулирует и автоматически контролирует все процессы, происходящие в нейтронной трубке.

Генератор нейтронов ИНГ-07Т в основном используется для проведения нейтронно-активационного анализа состава вещества, а также в методах нейтронографии, для получения изображений структуры изучаемого объекта в поле быстрых нейтронов.

В связи с особенностями конструкции генератора, а также в связи с ненулевой энергией частиц, вступающих в нейтронообразующую реакцию, выход нейтронов не является изотропным в пространстве.

В качестве детектора быстрых нейтронов используется блок детектирования БДКН-03, входящий в состав дозиметра-радиометра МКС-1117М. В сочетании с блоком обработки информации БОИ блок БДКН-03 может давать информацию как о дозовой составляющей нейтронного излучения, так и информировать о значении флюенса и плотности потока нейтронного излучения.



Рис.3. Блок детектирования нейтронов БДКН-03, подключенный к БОИ.

При этом блок обработки информации может использоваться как дозиметр гамма-излучения, за счет установленного в него газоразрядного детектора гамма-излучения. Данная особенность позволяет использовать данное устройство также для оценки дозы вторичного гамма-излучения. Характеристики блока БДКН-03 и БОИ приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики блока детектирования нейтронов БДКН-03 и блока обработки информации БОИ2, входящих в состав дозиметра-радиометра МКС-1117М

Детектор	
БОИ2	счетчик Гейгера-Мюллера
БДКН-03	^3He пропорциональный счетчик в полиэтиленовом замедлителе
Диапазон энергий	
БОИ2 (γ)	60 кэВ – 3 МэВ
БДКН-03 (n)	0,025 эВ – 14 МэВ
Диапазон измерения мощности амбиентного эквивалента дозы	
БОИ2 (γ)	1 мкЗв/ч – 10 мЗв/ч
БДКН-03 (n)	0,1 мкЗв/ч – 10 мЗв/ч
Диапазон измерения амбиентного эквивалента дозы	
БОИ2 (γ)	1 мкЗв – 1 Зв
БДКН-03 (n)	0,1 мкЗв – 10 Зв
Энергетическая зависимость чувствительности относительно энергии 662 кэВ (^{137}Cs) [БОИ2(γ)]	от -25% до +35% (в диапазоне энергий 60 кэВ – 3 МэВ)

Чувствительность к гамма-излучению источника ^{137}Cs [БОИ2]	1,0 имп·с-1/мкЗв·ч-1
Чувствительность к нейтронному излучению Pu-Be источника [БДКН-03]	0,355 имп·с-1/мкЗв·ч-1
Диапазон измерения плотности потока нейтронного излучения [БДКН-03]	0,1 – 104 нейтрон·с-1·см-2
Диапазон измерения флюенса нейтронного излучения [БДКН-03]	1 – $3 \cdot 10^6$ нейтрон·см-2
Чувствительность к нейтронному излучению Pu-Be источника [БДКН-03]	1,5 (имп·с ⁻¹)/(нейтрон·с ⁻¹ ·см ⁻²)
Предел основной относительной погрешности измерений	±20%
Время непрерывной работы	не менее 24 ч
Диапазон рабочих температур	от -30°C до +50°C

Поскольку блок детектирования БДКН-03 чувствителен к нейтронам с широким диапазоном энергий, в данной работе БДКН-03 помещается при измерениях в специальный кадмиевый чехол. Данная мера позволяет исключить вклад тепловых нейтронов в полезный сигнал, однако следует учитывать то, что информация, поступающая от БДКН-03, всё еще содержит в себе сведения не только о быстрых нейтронах, но и о промежуточных.

При измерении мощности дозы или плотности потока излучения, на дисплее БОИ2 отображается информация о погрешности полученных значений в виде относительной погрешности (значения в %). Данные значения погрешности можно использовать при расчетах.

Особенностью работы блока БДКН-03 является то, что данный блок связан достаточно коротким (до 2 м) кабелем с блоком обработки и вывода информации. В связи с этим, в данной работе максимальный выход быстрых нейтронов из мишени генератора ограничивается значением 10^6 н/с. При данном значении выхода нейтронов, на расстоянии 2 м от генератора плотность потока быстрых нейтронов составит не более 8 н / см²·с, что соответствует требованиям норм радиационной безопасности. Соответственно, при работе генератора нейтронов в данном режиме, можно будет находиться в одном помещении с данным генератором, на расстоянии не менее 2 м от него. Это позволит проводить измерения нейтронного потока

и мощности дозы нейтронного излучения с использованием дозиметра-радиометра МКС-1117М.

Защитный барьер, предназначенный для ослабления потока быстрых нейтронов, в данной работе представлен в трёх конфигурациях, изображенных на рисунке 4.

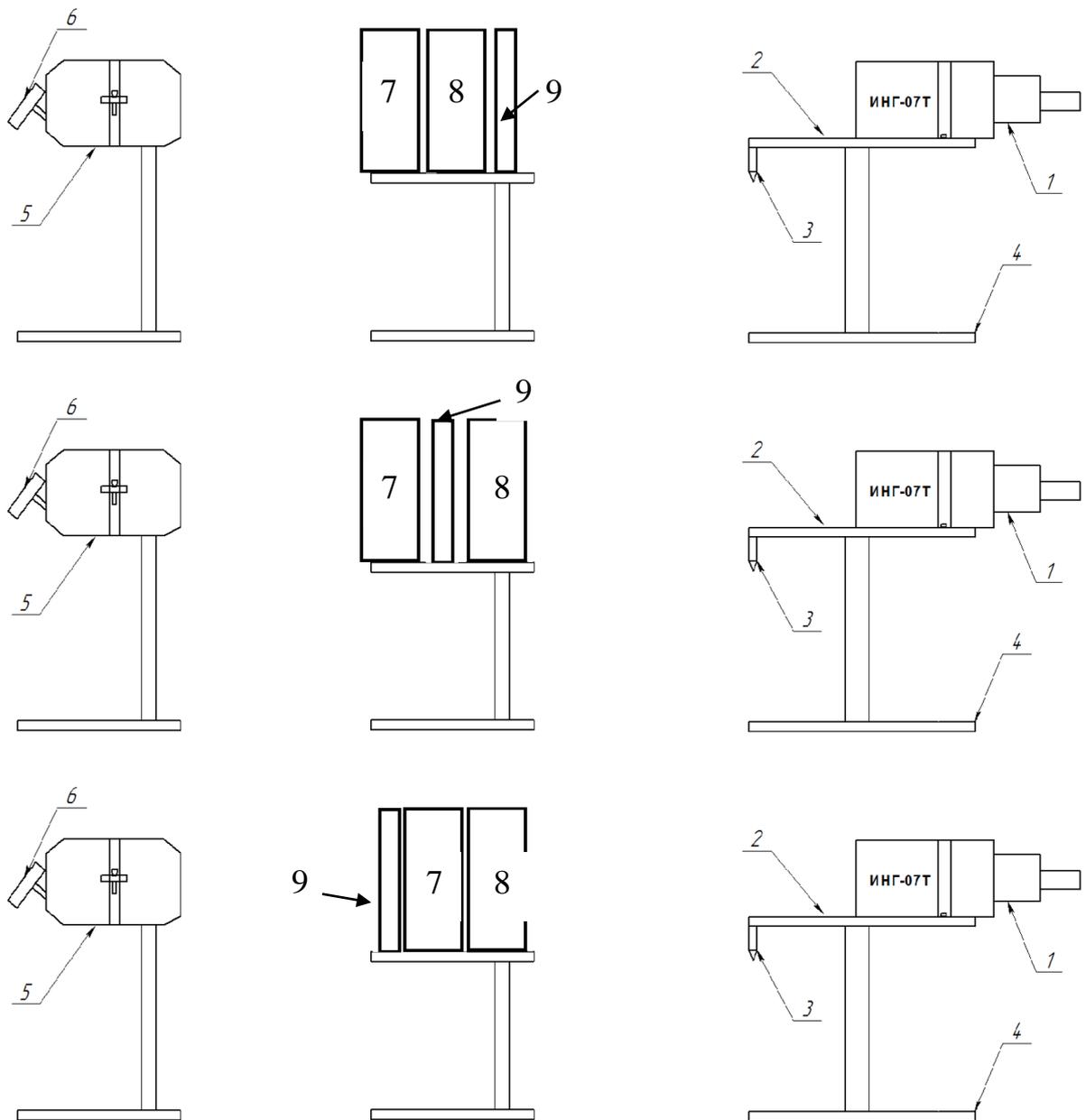


Рис. 4. Конфигурации расположения защитных материалов для данной работы: 1-генератор нейтронов, 2-платформа для генератора, 3-риск-указатель, 4-основание платформы, 5-блок детектирования БДКН-03, 6-блок БОИ-2, 7 и 8 – блоки парафина, 9 – стенка из свинцовых кирпичей

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Перед проведением экспериментов, необходимо произвести расчет кратности ослабления потока быстрых нейтронов слоем защитного материала, в виде 10 см. свинца (со стороны генератора), далее 40 см (два блока толщиной по 20 см) парафина (конфигурация 1, рис. 4). Считать, что центр защитного слоя совпадает с серединой расстояния между генератором и исследуемой точкой (которая находится на расстоянии 2 м от генератора). Аналогичный расчет провести и для двух других конфигураций расположения защитных материалов (конфигурации 2 и 3 рис.4).

Управление генератором нейтронов осуществляется под руководством преподавателя или лаборанта.

1. Ознакомиться с описанием приборов, используемых в лабораторной работе, провести подготовку их к работе, пройти проверку знания техники безопасности при работе с генератором нейтронов.

2. Замерить фон нейтронного и гамма излучения в течение восьми минут в исследуемой точке (2 м от внешней стенки генератора нейтронов по направлению оси генератора). Измерения гамма-фона осуществить в виде замера мощности дозы, для нейтронного излучения – мощности дозы и плотности потока. Данные занести в таблицу, подготовленную самостоятельно заранее.

3. Замерить поток быстрых нейтронов без ослабляющего материала в течение пяти минут при описанном выше режиме работы нейтронного генератора. Данные занести в таблицу.

4. Замерить мощность дозы, создаваемую данным потоком быстрых нейтронов также в течение 5 минут. Данные занести в таблицу.

5. Замерить мощность дозы сопутствующего гамма (рентгеновского) излучения (длительность измерения – 5 минут). Данные занести в таблицу.

6. Разместить защитный барьер (описание приведено выше) в первой конфигурации между генератором нейтронов и исследуемой точкой.

7. Замерить ослабление потока и мощности дозы нейтронов и изменение уровня вторичного гамма (рентгеновского) излучения при размещении защитного барьера между исследуемой точкой и генератором нейтронов. Данные занести в таблицу.

8. Провести аналогичные замеры ослабления потока и мощности дозы для двух других конфигураций защитных материалов.

9. Разобрать защиту после завершения экспериментов. Перед разбором защиты, с помощью портативного дозиметра убедиться в том, что уровень наведенной гамма-активности в материалах защиты не превышает допустимых норм.

10. После окончания работы замерить фон в течение пяти минут аналогично п. 2.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Сравнить результаты эксперимента с данными, полученными в ходе расчетов с учетом погрешности измерений. Проанализировать результаты.

Оценить вклад вторичного гамма (рентгеновского) излучения в формирование мощности дозы при работе рентгеновского генератора при отсутствии и при наличии защитного слоя.

Оценить влияние конфигурации расположения защитных материалов на вклад в итоговую мощность дозы нейтронного и гамма излучения.

Подготовить отчет о проделанной работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. На какие энергетические группы можно разделить нейтроны?
2. Чем отличается расчет дозового воздействия нейтронного излучения от расчета воздействий других видов ионизирующих излучений?
3. Что такое коэффициент качества излучения? Какое значение данного коэффициент имеет для нейтронного излучения?
4. Каковы причины возникновения сопутствующего рентгеновского и гамма излучения, при наличии нейтронного излучения?
5. Основные методы расчета ослабления потока нейтронов защитными материалами.

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.