

## Измерение откликов различных элементов на воздействие 14 МэВ нейтронов

*Цель работы:* Изучение метода меченых нейтронов. Определение амплитудно-временных характеристик гамма-излучения при прохождении быстрых нейтронов через вещество.

### ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Одна из главных проблем использования нейтронных методов анализа вещества состоит в высоком уровне фоновой загрузки гамма-детектора при регистрации информационного излучения. Источником фона могут быть гамма-кванты, испускаемые при взаимодействии нейтронов с элементами установки или окружающими предметами, распаде образующихся изотопов и т.д. Наносекундный метод меченых нейтронов позволяет за счет пространственной и временной селекции событий существенно снизить уровень регистрируемого фонового излучения.

Схема устройства с мечеными нейтронами представлена на рисунке 1.1. На тритиевую мишень нейтронного генератора падает пучок дейтронов. В реакции взаимодействия дейтерия с тритием  $T(d,n)He^4$  образуются быстрые нейтроны и альфа-частицы ( $He^4$ ), причем начальные энергии и векторы направления движения нейтрона и альфа-частицы однозначно связаны и определяются из законов сохранения энергии и импульса:

$$\begin{aligned}W_d + W_Q &= W_\alpha + W_n, \\p_\alpha^2 &= p_n^2 + p_d^2 - 2p_n p_d \cos\theta_{\alpha-d}, \\p_n^2 &= p_\alpha^2 + p_d^2 - 2p_\alpha p_d \cos\theta_{n-d},\end{aligned}\tag{4-1}$$

где  $p_d$ ,  $p_n$ ,  $p_\alpha$  – импульс дейтрона, нейтрона и альфа-частицы, соответственно;  $\theta_{\alpha-d}$  – угол между направлениями вылета альфа-частицы и дейтрона,  $\theta_{n-d}$  – угол между направлениями вылета нейтрона и дейтрона,  $W_Q$  – энергия  $T(d,n)He^4$  реакции, равная 17,6 МэВ. Из решения системы уравнений следует, что энергия нейтрона  $W_n$ , сопутствующей альфа-частицы  $W_\alpha$ , и угол испускания нейтрона относительно направления движения дейтрона  $\theta_{n-d}$  зависят только от энергии дейтрона  $W_d$  и от угла вылета альфа-частицы  $\theta_{\alpha-d}$  (рисунок 1.2). Это обуславливает возможность измерения

вектора движения нейтрона путем регистрации угла вылета альфа-частицы.

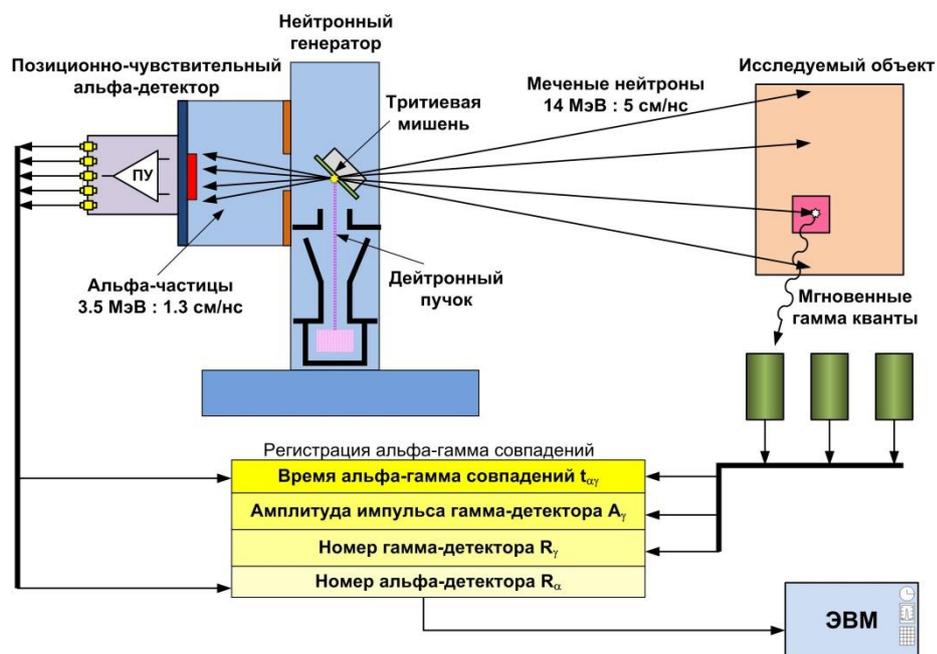


Рис. 1.1. Схема устройства с мечеными нейтронами

Позиционно- чувствительный (многопиксельный) альфа-детектор фиксирует координаты  $R_\alpha$  сработавшего пикселя и время регистрации альфа-частицы  $t_\alpha$ , что позволяет, вводя поправку на скорость альфа-частицы ( $\sim 1,3$  см/нс), определить время вылета и направление движения (вектор) альфа-частицы. По этим данным можно оценить время вылета, направление движения, и энергию (скорость) нейтрона (рисунок 1.2) в направлении исследуемого объекта, т.е. «пометить» нейтрон сопутствующей зарегистрированной альфа-частицей.

Таким образом, зная расстояние  $L$  и вектор движения меченого нейтрона относительно мишени нейтронного генератора, можно определить пространственные координаты места, где произошло испускание гамма-кванта при неупругом рассеянии меченого нейтрона в исследуемом объекте. Информация о событии (одновременной регистрации альфа-частицы и гамма-кванта в узком временном окне) обрабатывается и записывается в виде кода, содержащего данные об интервале времени  $\Delta t$  альфа-гамма совпадения, координате пикселя альфа-детектора, номере (координате) гамма-детектора и амплитуде импульса с гамма-детектора.

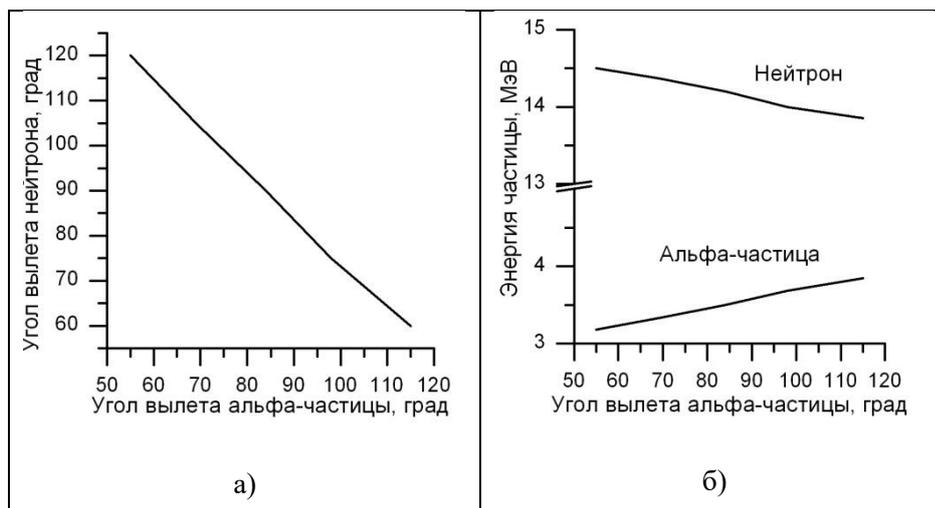


Рис.1.2. Зависимость а) угла испускания нейтрона, б) энергии нейтрона и альфа-частицы от угла вылета альфа-частицы при энергии дейтрона 100 кэВ.

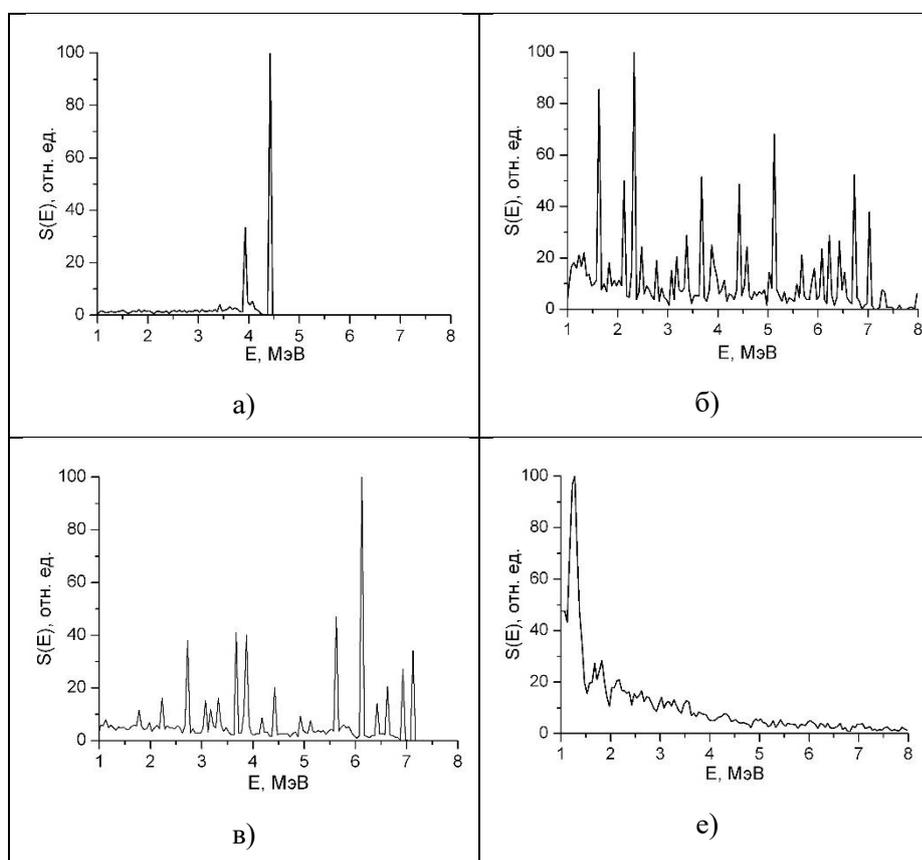


Рисунок 1.3. Спектр гамма-квантов при неупругом рассеянии 14 МэВ нейтронов на ядрах: а) углерода, б) азота, в) кислорода, г) железа.

При неупругом рассеянии быстрых нейтронов в реакции  $(n,n'\gamma)$  возникает характеристическое гамма-излучение, дающее информацию о ядре-рассеивателе. Спектры гамма-излучения (в виде энергии гамма-квантов, поглощенной в

сцинтилляторе гамма-детектора), представлены на рисунке 1.3.

Видно, что энергия гамма-излучения при неупругом рассеянии нейтронов на ядрах азота, кислорода и углерода (рисунок 1.3а- 1.3в) существенно превосходит энергию гамма-квантов, испускаемых при рассеянии нейтронов на ядрах других элементов, например, железа (рисунок 1.3е) и имеет четкие сигнатурные признаки. Основные спектральные линии, которые можно использовать для идентификации азота, кислорода и углерода, следующие:

$^{12}\text{C}$ :	4,43 МэВ
$^{14}\text{N}$ :	1,64; 2,31; 5,10 МэВ
$^{16}\text{O}$ :	3,67; 6,13; 6,92; 7,12 МэВ

Сечения реакций ( $n, n'\gamma$ ) выхода основных спектральных линий для ядер углерода, азота и кислорода даны на рисунке 1.4. Максимум выхода гамма-квантов соответствует энергии нейтронов в диапазоне 5 – 9 МэВ.

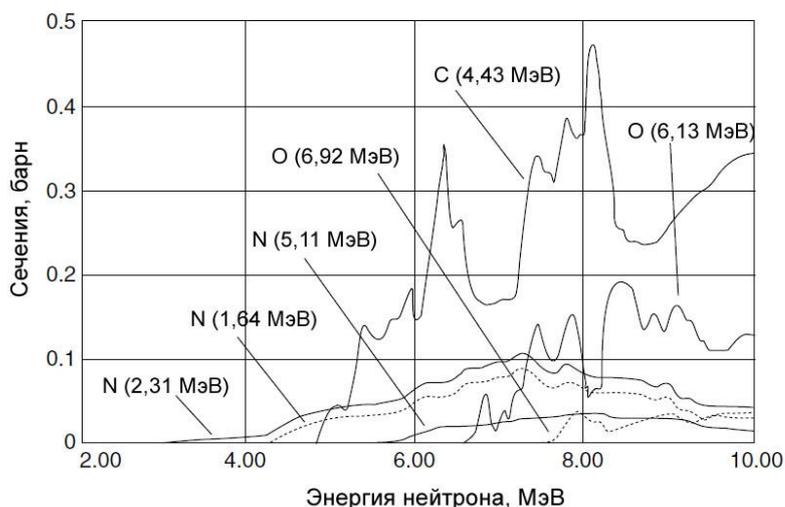


Рисунок 1.4. Сечения выхода основных линий гамма-квантов при рассеянии нейтронов на ядрах углерода, азота и кислорода. На графике указаны энергии линий.

Важной особенностью метода меченых нейтронов является то, что сигналы от «некоррелируемого» фона, обусловленного регистрацией гамма-квантов, испускаемых при радиоактивном распаде, при взаимодействии с веществом «немеченых» нейтронов или при попадании быстрых нейтронов на гамма-детектор, в большинстве случаев не сопровождаются сопутствующей альфа-частицей, и при

регистрации альфа-гамма совпадений не фиксируются как события. Это позволяет эффективно дискриминировать фоновые сигналы и увеличить отношение эффект/фон в некоторых случаях на 2- 4 порядка.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### *Описание экспериментальной установки*

Экспериментальная установка (рис.1.5) содержит нейтронный генератор, установленный на экспериментальном столе, гамма-детектор для регистрации гамма-квантов при прохождении нейтронов через объект исследования. Между нейтронным генератором и гамма-детектором установлена радиационная защита для уменьшения количества фоновых отсчетов гамма-детектора при работе нейтронного генератора.

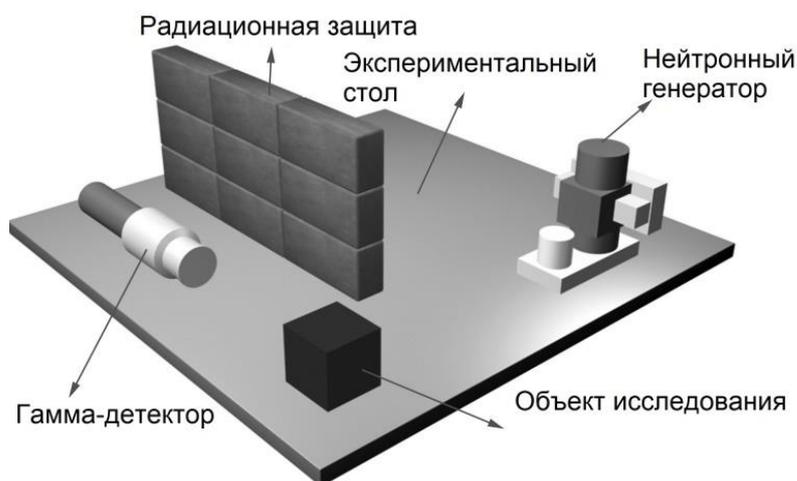


Рис. 1.5. Схема экспериментальной установки.

В генератор нейтронов установлен 9-ти (3x3) пиксельный альфа-детектор, геометрия которого дана на рисунке 1.6. Сигналы от каждого пикселя альфа-детектора усиливаются предварительным усилителем и передаются на блок Амплитудно-временных измерений (БАВ). Также на БАВ поступают сигналы от гамма-детектора. Управление нейтронным генератором и блоком БАВ осуществляется дистанционно.

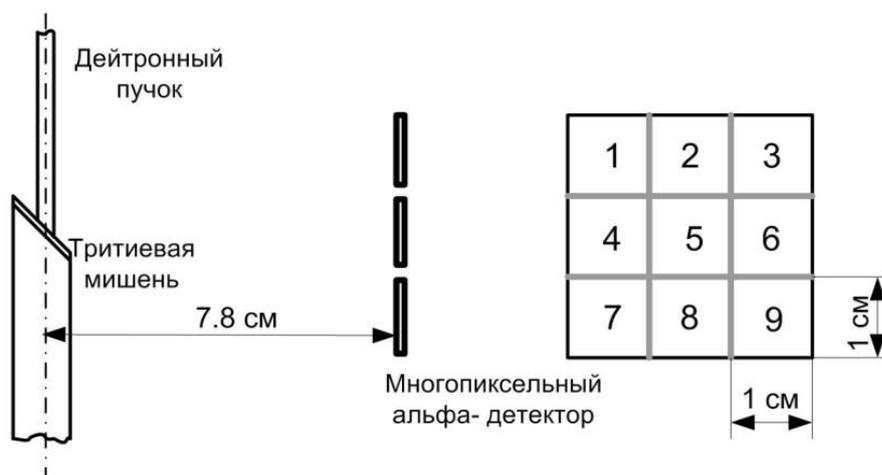


Рисунок 1.6. Геометрия многопиксельного альфа-детектора.

Блок БАВ производит оцифровку сигналов с детекторов с последующим вычислением их временных и амплитудных характеристик. Для обеспечения требуемой скорости передачи данных интерфейс работает в режиме канала прямого доступа к памяти. При заполнении выделенного буфера данных происходит переключение канала прямого доступа на свободную область памяти, а заполненная часть обрабатывается программой селекции и обработки. Процессы записи и обработки идут параллельно. Информация о событии передается в виде 11-ти байтного числа, содержащего коды амплитуды сигнала с гамма-детектора, времени альфа-гамма совпадений, номеров гамма-канала и пикселей альфа-детектора. Программа обработки и визуализации событий позволяет сформировать временные спектры альфа-гамма совпадений и просматривать амплитудные спектры гамма-излучения для событий, попадающих в определенные интервалы (временные окна) на временном спектре.

Блок БАВ позволяет просматривать сигналы в режиме цифрового осциллографа для каждого канала для контроля работы гамма- и альфа- детекторов и выбора порогов дискриминации сигналов.

### **Подготовка установки к работе и измерения**

1. Расположить компоненты экспериментальной установки в соответствии с рисунком 1.5.
2. Включить питание блока БАВ, подать напряжение на гамма-детектор, выждать 10 мин для прогрева аппаратуры.

3. Подать напряжение питания на альфа-детектор и нейтронный генератор. Убедиться, что нейтронный генератор имеет связь с ПК.  
Включить нейтронный генератор в режим подготовки и дождаться, когда нейтронный генератор перейдет в режим «ГОТОВО».
4. Включить нейтронный генератор в режим «ИЗЛУЧЕНИЕ» при интенсивности  $1 \cdot 10^6$  1/с. Убедиться в наличие сигналов с гамма- и альфа-детекторов
5. Произвести измерение событий (альфа-гамма совпадений) в течение 5 мин с расположенным на расстоянии 25 см от нейтронного генератора с объектом исследования в виде:
  - a. меламинам весом 400 г;
  - b. полиэтиленом весом 400г;
  - c. воды (или аналога) весом 400г.
6. Произвести измерение событий (альфа-гамма совпадений) в течение 10 мин с объектом исследования ((меламинам весом 500 г) на расстоянии 40 см от нейтронного генератора.
7. Произвести измерение событий (альфа-гамма совпадений) в течение 10 мин без объекта исследования для измерения фона.

### ЗАДАНИЯ

#### *I. Калибровка энергетического спектра гамма-детектора*

1. Установить изотоп Со-60 рядом с гамма-детектором.
2. Произвести измерение спектра сигналов с гамма-детектора в течение 2 мин.
3. Результаты измерений занести в таблицу 1.1.
4. Вычислить калибровочные коэффициенты.

**Таблица 1.1**  
**Таблица результатов калибровки гамма-детектора**

Линия на энергетическом спектре E, МэВ	Канал аппаратного спектра A, соответствующий данной линии	Калибровочные коэффициенты	
		a	b
1,17			
2,5			

Калибровка производится по двум линиям энергетического спектра гамма-квантов  $E_1$  и  $E_2$ , соответствующих каналам аппаратного спектра  $A_1$  и  $A_2$ , соответственно, а энергия гамма-кванта находится по из соотношения:

$$E = a + bA,$$

где калибровочные коэффициенты  $a$  и  $b$  определяются из уравнений:

$$a = E_1 - \frac{E_1 - E_2}{A_1 - A_2} A_1, \quad b = \frac{E_1 - E_2}{A_1 - A_2}$$

## II. *Определение химических элементов в составе меламина*

1. С помощью программы (МАТЛАБ) построить диаграмму аппаратного спектра гамма-детектора во временном окне, соответствующему прохождению нейтронов через образцы по результатам измерений по п. 6.
2. Вычесть фон из аппаратного спектра по результатам измерений по п. 8.
3. С помощью найденных калибровочных коэффициентов преобразовать аппаратный спектр в энергетический. Сохранить измеренные спектры для последующего использования в Лаб. работе №2.
4. Определить основные энергетические линии на энергетическом спектре. С помощью данных, приведенных на рисунке 1.4, сопоставить энергетические линии с наличием химических элементов в составе меламина. Результаты занести в таблицу 1.2.

Химический элемент	Энергии основных спектральных линий (по рисункам 1.4 и 1.3)	Линии на энергетическом спектре, МэВ
Водород		
Углерод		
Азот		
Кислород		

## III. *Определение энергии меченого нейтрона*

1. Определить скорость нейтрона путем сопоставления результатов измерений по пп. 6 и 7.
2. Определить энергию нейтрона.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Обосновать возможность определения направления движения нейтрона, возникающего в  $T(d,n)He^4$ , путем регистрации направления движения альфа-частицы.
2. Какая энергия альфа-частицы, сопутствующая меченому нейтрону?
3. Для каких задач может использоваться метод меченых нейтронов?
4. Что такое аппаратный и энергетический спектр сигналов с гамма-детектора?
5. Как можно определить координаты объекта исследования с помощью метода меченых нейтронов?