

Лабораторная работа № 3

Определение потерь энергии альфа-частицами в воздухе

Цель работы: Изучение ионизационных потерь альфа-частиц в воздухе в зависимости от расстояния между источником излучения и детектором.

Общие сведения об альфа-распаде и потерях альфа-частиц в среде АЛЬФА-РАДИОАКТИВНЫЙ РАСПАД ЯДЕР

Законы смещения при альфа-распаде: $\Delta Z = -2; \Delta A = -4$. Он подчиняется также следующим закономерностям:

- α -распад характерен для ядер с $Z \geq 83$. Исключение – α -распад ядра ${}^8_4\text{Be}$ и некоторых редкоземельных элементов;
- хотя α -распад происходит по сильному взаимодействию, он протекает с весьма малой вероятностью;
- спектр частиц α -распада – дискретный;
- для α -частиц характерна связь между пробегом и постоянной распада материнского ядра вида: $\lg \lambda = A \lg R_\alpha + B$, где A и B – константы, R_α – пробег α -частицы. Эта зависимость называется законом Гейгера – Нетолла. Следует подчеркнуть, что константы A и B имеют постоянное значение для каждого из радиоактивных семейств. Объяснение первой из перечисленных закономерностей можно получить, используя капельную модель и представление о виде потенциала взаимодействия α -частицы с ядром.

Основным эффектом, вызывающим потери энергии любой заряженной частицы при прохождении через вещество являются ионизационные потери. Так как кинетическая энергия тяжелых заряженных частиц, получаемых в результате альфа-распада тяжелых ядер подчиняется соотношению $E_{\text{кин.}} \ll mc^2$ задачу по поиску соотношения потерь и пройденного в среде пути можно считать нерелятивистской и тогда величина потерь описывается нерелятивистской формулой Бете-Блоха

$$-\frac{dE}{dx} \approx \frac{2\pi n_e z^2 e^4}{E} \frac{M_\alpha}{m_e} \left[\ln \left(\frac{4m_e E}{MI_{\text{ион}}} \right) - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 - \delta - U \right] \quad (1)$$

В формуле (1) E -кинетическая энергия альфа-частицы, n_e - плотность электронов в веществе, z - заряд ядра альфа-частицы, M_α - масса альфа-частицы (без электронов), m_e - масса электрона, $I_{\text{ион}}$ - средний ионизационный потенциал среды, $\beta = v/c$ (v -скорость альфа-частицы, c - скорость света в вакууме), слагаемое δ описывает влияние эффекта плотности, а последнее слагаемое U отвечает за снижение потерь альфа-частицы на ионизационное торможение в области очень низких энергий, когда скорость движения альфа-частицы становится меньше орбитальной скорости электрона (точнее собственного значения оператора орбитальной скорости) на К- и L- оболочках, и ионизация на этих оболочках становится невозможна. При энергиях альфа-частица в пределах нескольких МэВ вообще все слагаемые в скобках в формуле (1), кроме первого, становятся очень малы и, как правило, не учитываются. Таким образом в настоящей лабораторной работе наиболее верно использовать упрощенную формулу Бере-Блоха:

$$-\frac{dE}{dx} \approx \frac{2\pi n_e z^2 e^4}{E} \frac{M_\alpha}{m_e} \left[\ln \left(\frac{4m_e E}{MI_{\text{ион}}} \right) \right] \quad (2)$$

Зависимость ионизационных потерь от среды

Если нам известен характер ионизационных потерь альфа-частиц (как впрочем и любого другого типа тяжелых заряженных частиц в какой-то однородной (в пределах погрешности измерений) среде, то построить график зависимости ионизационных потерь в другой однородной среде не представляется сколько-нибудь сложной задачей. Так как концентрация электронов $n_e = n_{\text{яд}} Z$, где Z - заряд ядра однородной среды, то с учетом того, что для большинства веществ (в данном агрегатном состоянии) $n_{\text{яд}} \approx \text{const}$, можно считать, что

$$\left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{среда1}} / \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{среда2}} \approx Z_2 / Z_1 \quad (3)$$

Связь энергии и пробега альфа-частиц в воздухе

Формально получить формулу связи кинетической энергии альфа-частиц и их полного пробега в воздухе можно было бы проинтегрировав формулу Бете-Блоха по dE , поставив на верхний предел начальную E_α , а на

верхний предел 0, а для дифференциала dx на верхнем пределе величина пробега, а на нижнем пределе 0, но в этом случае возникают очень серьезные сложности с необходимостью правильного учета слагаемого U , к тому же появится сильная зависимость от состояния воздуха (например повлияет влажность). Поэтому для практических целей удобнее пользоваться феноменологической формулой:

$$\bar{R} = 0.318 E_{\alpha}^{3/2} \quad (4)$$

Эта формула хорошо работает при пробегах альфа-частиц от 2 см до 8 см в воздухе и становится неприменимой только при достаточно высоких энергиях альфа-частиц (более 30 МэВ), которые при радиоактивном распаде не возникают.

Экспериментально была установлена зависимость потерь альфа-частицы при прохождении через воздушную среду (имеется в виду нормальное давление и влажность) от энергии альфа-излучения. Эта зависимость получила название кривой Брэгга-Вульфа и приведена на рисунке 1

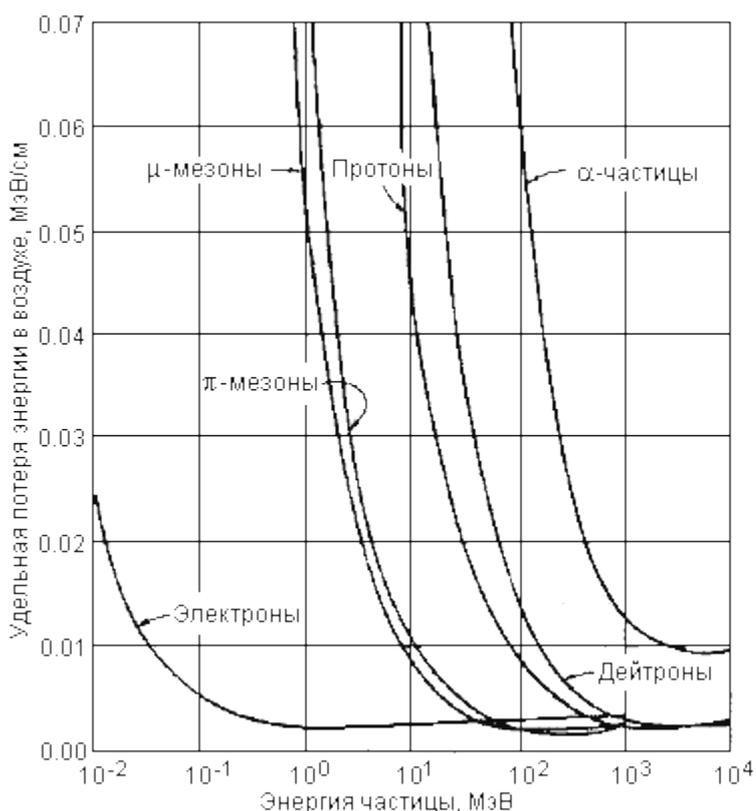


Рисунок 1. Кривая Брэгга-Вульфа

В нашей работе указанная кривая имеет определенное значение, так как в некотором смысле является калибровочной зависимостью для нашего

источника альфа-частиц, но непосредственно в эксперименте данные кривой Брэгга-Вульфа использоваться не будут.

Порядок проведения эксперимента и обработка экспериментальных данных

Измерение энергии альфа-частицы от радиоизотопа производится при помощи спектрометра, основанного на алмазном детекторе, который расположен на различных расстояниях от источника альфа-частиц. Благодаря потерям энергии на ионизационное торможение в воздухе, измеренная в каждом эксперименте энергии уменьшается по ходу увеличения расстояния от источника до детектора. В таблице 1 приведены некоторые литературные данные зависимости полного пробега альфа-частиц в воздухе от кинетической энергии распадной альфа-частицы

Таблица 1

Вещество	E_{α} , МэВ						
	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
Воздух, см	2.5	3.5	4.6	5.9	7.4	8.9	10.6

Как можно видеть из приведенной таблицы, при энергии альфа-частицы в районе 4 МэВ (для нашего источника основная линия излучения составляет примерно 4.2 МэВ) полный пробег составляет около 2.5-2.8 см, поэтому это предельно возможное расстояние для нашего эксперимента. Реально же измерения следует проводить на меньших расстояниях.

Последовательность проведения измерений.

1. Определение радиационного фона в лаборатории. С этой целью проводится измерение в течение 600 секунд спектра радиационного фона без использования источника альфа-частиц. Полученный спектр $N_0(E)$ заносится в память компьютера, играющего роль анализатора в спектрометрической установке.
2. Последовательным образом проводится измерение спектра при использовании источника альфа-частиц на расстояниях между источником и детектором $R=0.4$ см, 0.8 см, 1.2 см, 1.6 см, 2.0 см, 2.4 см. Соответственно им присваиваются номера $N_1(E)$, $N_2(E)$, $N_3(E)$, $N_4(E)$, $N_5(E)$, $N_6(E)$, все измерения продолжаются 600 секунд, все спектры заносятся в память компьютера.

3. Производится процедура вычитания фонового спектра из всех полученных спектров $N_i(E)$. То есть каждый спектр $N_{i \text{ прив}} = N_i - N_0$

4. Из полученных спектров $N_{i \text{ прив}}$ определяется величина энергии E_i альфа-частиц (по максимуму на спектре при известной калибровке энергетической шкалы), а также статистическая погрешность измерения. При этом приборная погрешность составляет примерно 80 кэВ.

5. Полученные в пункте 4 данные заносятся в Таблицу 2

Таблица 2

Номер измерения	1	2	3	4	5	6
Расстояние (r) От источника До детектора (см) +/- погрешность определения расстояния	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0	2.4
Найденная из спектра энергия альфа-частиц (МЭВ) E_i						
Полная погрешность Измерения Энергии (МЭВ)						
Потери энергии альфа- частицы при прохождении указанного расстояния в воздухе $\Delta E_i = E_0 - E_i$ +/- погрешность определения потерь						

Величина E_0 для данного радионуклида берется из справочника.

6. Исходя из полученных данных строится график зависимости ΔE_i от r на котором откладываются погрешности измерения экспериментальных величин.

7. Используя формулу Бете-Блоха (заменяя дифференциалы на сами величины) определяем теоретические величины потерь ΔE_i от r в воздухе и сравниваем полученные расчетные результаты с экспериментальными.

Описание экспериментальной установки

На рис. 2 показана схема экспериментальной установки.

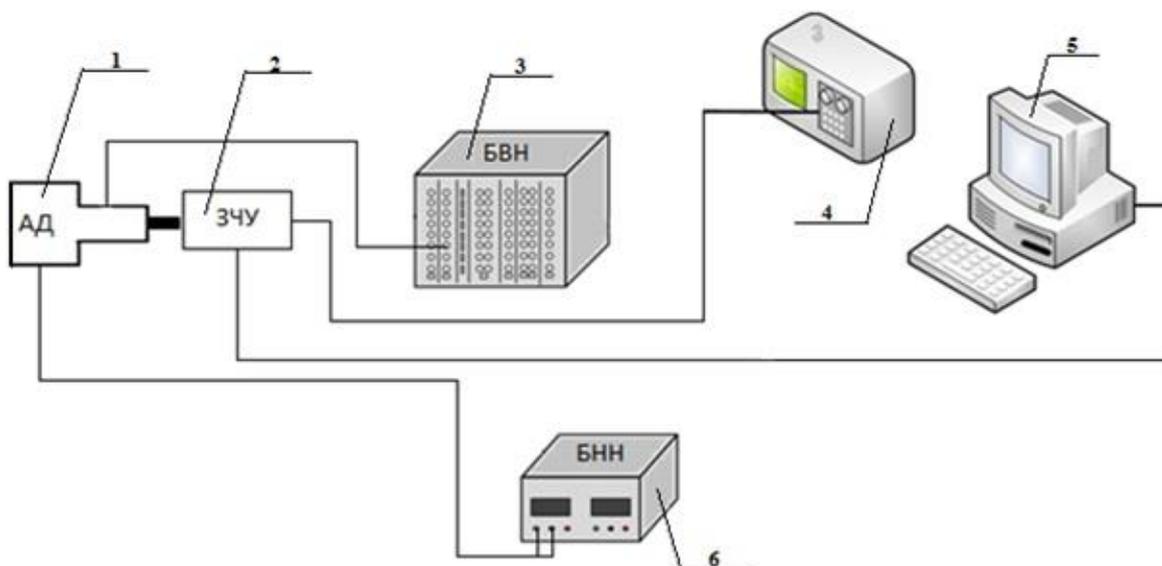


Рис. 2. Схема экспериментальной установки. (1) – алмазный детектор, (2) – зарядо-чувствительный усилитель, (3) – блок высокого напряжения, (4) – осциллограф, (5) – компьютер, (6) – блок низкого напряжения.

Источник ионизирующего излучения располагается на расстоянии не более 5 мм от детектора (1). Напряжение смещения подается с помощью высоковольтного источника (3). Питание зарядочувствительного усилителя осуществляется с помощью низковольтного источника напряжения (6). Выходной сигнал с детектора поступает на цифровой осциллограф, а также на спектрометрический анализатор SBS-77 фирмы «Гринстар», который располагается на персональном компьютере. С помощью программного обеспечения сигнал обрабатывается и выдается конечный результат, в виде

спектра. На рисунке 3 представлен внешний вид экспериментальной установки.



Рис.3 Внешний вид экспериментальной установки

В рамках проведения данной работы используются серийные спектрометрические алмазные детекторы модели АДИИ-1. Детекторы данной модели предназначены для регистрации α -, β -, и γ - излучения. Детекторы изготовлены фирмой ООО «ПТЦ «УралАлмазИнвест». На рисунке 4 представлен внешний вид детекторов модели АДИИ-1.

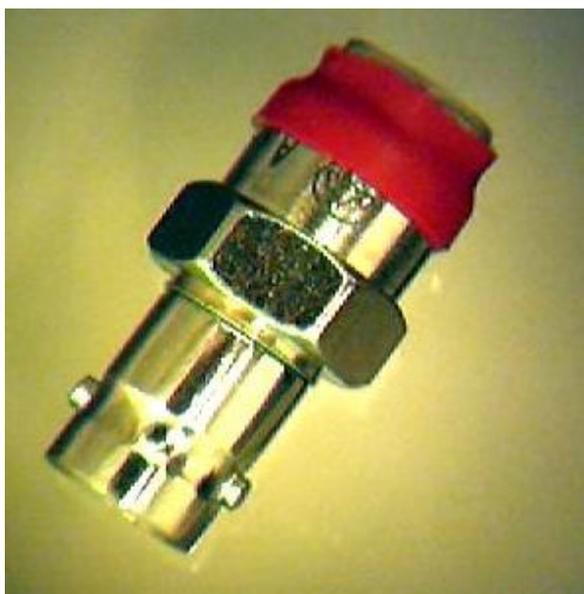


Рис.4 Внешний вид детекторов модели АДИИ-1

Детекторы модели АДИИ-1 представляют собой спектрометрические алмазные детекторы, с толщиной чувствительного элемента 0,3 мм и разрешением по α частицам с энергией 5,5 МэВ не более 5%, кристаллы данных детекторов изготавливаются как из природных алмазов так и из искусственных алмазов, выращенных в лаборатории группы «DeBeers».

Сигналы с детектора поступают на вход платы анализатора импульсов (SBS-77), установленной в персональном компьютере. Данный анализатор импульсов представляет собой устройство, позволяющее разделять поступающие на него импульсы по их амплитуде. Для наглядного представления анализатор импульсов можно изобразить в качестве шкалы с пустыми пронумерованными ячейками (1,2,3...n). Каждой из этих ячеек соответствуют импульсы разной амплитуды, поступающие с детектора. В первую ячейку попадают импульсы с самой маленькой амплитудой, и далее при увеличении номера ячейки, увеличивается и амплитуда импульсов, которые могут в неё попасть. Амплитуда импульсов, поступающих от детектора, в свою очередь, зависит от энергии частиц, которые в детектор попадают. Чем большую энергию частица потеряет в детекторе, тем больше будет амплитуда импульса на выходе из детектора. Таким образом, производится запись *аппаратурного спектра* излучения. Аппаратурный спектр излучения – распределение числа зарегистрированных импульсов в зависимости от их энергии. Связь номера ячейки, или номера канала спектрометра с энергией частицы, вызвавшей образование импульса, попавшего в данный канал, выражается так называемым калибровочным соотношением спектрометра. Обычно данное соотношение является линейной зависимостью номера энергии от номера канала.

$$\text{Energy} = a * n + b$$

где Energy – энергия зарегистрированной частицы, n – номер канала спектрометра (номер ячейки, в которую попал импульс от регистрации частицы), (a, b) – коэффициенты линейной зависимости, устанавливаемые для каждого спектрометра экспериментальным путём.

Для работы с платой анализатора импульсов предназначена программа набора и обработки данных eSBS-7x. Данная программа позволяет визуализировать набираемые спектры и проводить их первичную обработку.

Низкое напряжение питания используется для работы зарядочувствительного усилителя. Высокое напряжение (не более 140 Вольт) подается через разъемы усилителя на детектор. В качестве источника

высокого напряжения используется плата высоковольтного питания, установленная в кейт, который с помощью USB кабеля подключен к персональному компьютеру. Плата высоковольтного питания управляется дистанционно с помощью программы, установленной на компьютер.

Последовательность набора и обработки спектров

1. Убедиться в том, что источники высокого и низкого питания отключены;
2. Подключить алмазный детектор к зарядочувствительному усилителю (ЗЧУ);
3. Подключить выход зарядочувствительного усилителя ко входу платы анализатора импульсов (установлена в корпусе компьютера);
4. Подключить разъемы питания ЗЧУ к источникам низковольтного и высоковольтного питания;
5. Убедиться в том, что выходные каналы низковольтного источника питания работают в независимом режиме (на лицевой панели источника клавиши управления соответствуют режиму «independend»);
6. Убедившись в том, что ручки регулировки напряжения низковольтного источника повернуты в крайнее левое положение, включить источник питания;
7. Выставить напряжение по каждому каналу источника питания в размере 9 (девять) Вольт;
8. Включить кейт, в котором установлена плата высоковольтного питания;
9. Включить персональный компьютер, дождаться загрузки рабочего стола;
10. С помощью ярлыка на рабочем столе запустить программу управления высоковольтным источником питания («HV control»);
11. Используя интерфейс программы, подать на детектор, подключенный к ЗЧУ, напряжение в размере +110 Вольт;
12. С помощью ярлыка на рабочем столе запустить программу набора и обработки спектров eSBS-7x;
13. Отказаться от предложения поднять высокое напряжение. Нажать кнопку «настройки», со значком  на панели инструментов, в открывшемся окне выбрать команду «загрузить», после чего загрузить файл настроек с наименованием «настройки альфа алмаз», находящийся на рабочем столе;

14. Установить время автоматического завершения набора спектра, нажав кнопку со значком , и установив значение «по живому времени» 600 секунд;
15. Установить источник излучения в необходимое положение активной частью напротив входного окна детектора;

Напоминание: при работе с источниками ионизирующего излучения запрещается подвергать их разрушающим воздействиям, брать незащищенными руками, подносить к глазам, забирать с собой или как-либо еще использовать не по назначению.

16. Запустить набор спектра нажатием клавиши со значком  на панели инструментов программы. Должен начаться набор спектра излучения установленного источника. В случае, если набор спектра по каким-то причинам не начинается, обратитесь к преподавателю или инженеру, сопровождающему выполнение работы. По оси «икс» находятся каналы спектрометра, соответствующие различной амплитуде регистрируемых импульсов. По оси «игрек» находится число импульсов, попадающих в данные каналы. Впоследствии, используя калибровочное соотношение спектрометра, можно будет установить связь между номером канала спектрометра и энергией частиц, регистрируемых детектором;
17. Окончание набора спектра происходит автоматически по завершении установленного времени. Сохранить набранный спектр в папку «РЗ. Потери энергии альфа-частиц» на рабочем столе с помощью команды «Сохранить спектр» во вкладке «Файл». При сохранении выбрать формат файла с расширением «.spe».
18. Калибровочное соотношение спектрометра можно увидеть нажав на кнопку со значком  на панели инструментов программы. Откроется окно энергетической калибровки спектрометра, в котором и будет находиться калибровочное соотношение. Данное соотношение необходимо перезаписать себе.
19. Записанные спектры в формате .SPE можно открыть с помощью текстового редактора. На рисунке 5 показано, из чего состоит данный файл.

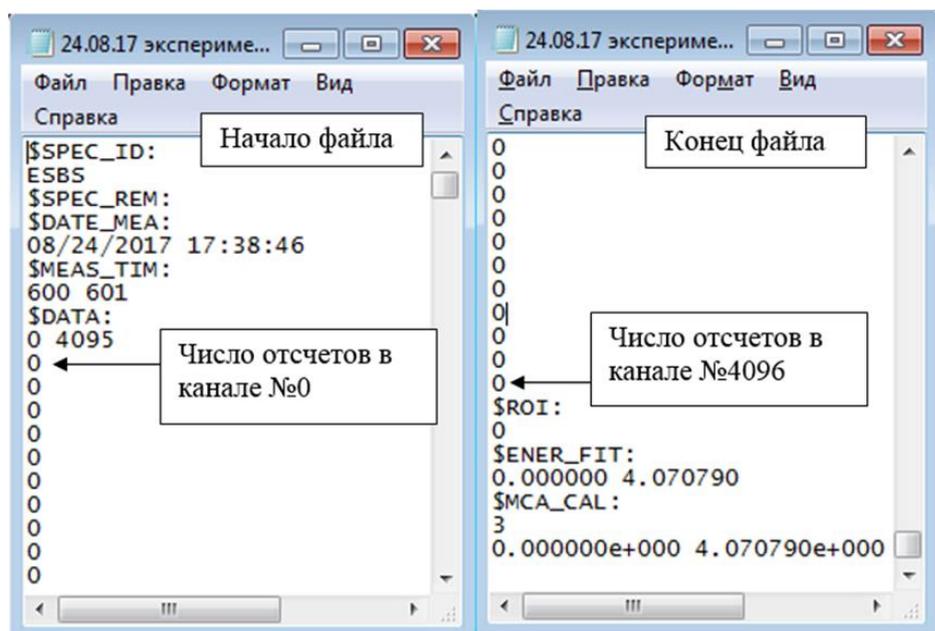


Рис.5. содержимое файла спектра в формате .SPE

В начале и конце файла находится блок справочных данных о характеристиках набранного спектра. Основной информацией является столбец цифр, число в каждой из строк является числом импульсов, попавших в канал, номер которого совпадает с номером строки. Нумерация каналов начинается с нуля. Используя эти данные можно построить набранный спектр в любой программе обработки данных (Mathcad, Excel, Origin и др.).

Используя известное калибровочное соотношение можно построить спектр в энергетических единицах, преобразовав значения номеров каналов спектрометра в численное значение энергии.

Построенные таким образом спектры в дальнейшем можно подвергать различным методам обработки (вычитание, сложение, нахождение энергии зарегистрированных частиц и т.д.).

Контрольные вопросы

1. Какие существуют механизмы потерь энергии тяжелыми заряженными частицами в веществе и в каких областях энергий каждый из механизмов работает.
2. Почему учет релятивистских эффектов снижает удельные потери энергии заряженных частиц на ионизацию.
3. Увеличиваются или уменьшаются удельные потери энергии заряженных частиц при прохождении через воздух, влажность которого больше?

4. В области каких энергий необходимо обязательно учитывать слагаемое U в формуле Бете-Блоха.
5. Почему формула зависимости пробега альфа-частицы в воздухе от её энергии имеет нелинейный характер?
6. Если в лабораторной работе заменить воздух на атомарный хлор, увеличатся или уменьшатся удельные потери энергии альфа-частиц?
7. Если в качестве частицы использовать не альфа-частицу, а протоны той же энергии, во сколько раз изменятся удельные потери энергии при прохождении через воздух (влажность воздуха та же самая)