

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

**Компьютерная сцинтилляционная  
 $\gamma$ -спектрометрия**

выполнил студент группы Б03-903

Деревянкин Иван

Долгопрудный, 2021 г.

# 1 Цель работы

Снять и исследовать спектры излучения различных источников, характеризовать различные пики в спектрах радиоактивных веществ.

## 2 В работе используются:

- сцинтиллятор
- ФЭУ
- предусилитель импульсов
- высоковольтный блок питания для ФЭУ
- АЦП
- компьютер.

## 3 Теоретические положения

**Фотоэффект** - это процесс взаимодействия гамма-кванта с электроном, связанным с атомом, при котором электрону передается вся энергия гамма-кванта. При этом электрону сообщается кинетическая энергия  $T_e = E_\gamma - I_i$ , где  $E_\gamma$  - энергия гамма-кванта,  $I_i$  - потенциал ионизации  $i$ -той оболочки атома. Фотоэффект особенно существен для тяжелых веществ, где он идет с заметной вероятностью даже при высоких энергиях гамма-квантов. В легких веществах фотоэффект становится заметен лишь при относительно небольших энергиях гамма-квантов.

**Эффект Комптона** - это упругое рассеяние фотона на свободном электроне, сопровождающееся изменением длины волны фотона. Максимальная энергия образующихся комптоновских электронов соответствует рассеянию гамма-квантов на  $180^\circ$  и равна

$$E_{\max} = \frac{\eta\omega}{1 + \frac{mc^2}{2\eta\omega}}. \quad (1)$$

**Процесс образования электрон-позитронных пар.** При достаточно высокой энергии гамма-кванта наряду с фотоэффектом и эффектом Комптона может происходить третий вид взаимодействия гамма-квантов с веществом - образование электрон-позитронных пар. Процесс образования пар не может происходить в пустоте, так как в этом случае не выполняются законы сохранения энергии и импульса. В присутствии ядра или электрона процесс образования пары гамма-квантов возможен, так как можно распределить энергию и импульс гамма-кванта между тремя частицами без противоречия с законами сохранения. При этом если процесс образования пары идет в кулоновском поле ядра или протона, то энергия образующегося ядра отдачи оказывается весьма малой, так что пороговая энергия гамма-кванта  $E_0$ , необходимая для образования пары, практически совпадает с удвоенной энергией покоя электрона  $E_0 \cong 2mc^2 = 1.022$  МэВ.

Появившийся в результате процесса образования пар электрон свою энергию на ионизацию среды. Таким образом, вся энергия электрона остается в детекторе. Позитрон будет двигаться до тех пор, пока практически не остановится, а затем аннигилирует с электроном среды, в результате чего появятся два гамма-кванта. Т.е., кинетическая энергия позитрона также останется в детекторе. Далее возможны три варианта развития событий:

1. оба родившихся гамма-кванта не вылетают из детектора, и тогда вся энергия первичного гамма-кванта останется в детекторе, а в спектре появится пик с  $E = E_\gamma$ ;
2. один из родившихся гамма-квантов покидает детектор, и в спектре появляется пик, соответствующий энергии  $E = E_\gamma - E_0$ , где  $E_0 = mc^2 = 511$  кэВ;
3. оба родившихся гамма-кванта покидают детектор, и в спектре появляется пик, соответствующий энергии  $E = E_\gamma - 2E_0$ , где  $2E_0 = 2mc^2 = 1022$  кэВ.

Таким образом, любой спектр, получаемый с помощью гамма-спектрометра, описывается несколькими компонентами, каждая из которых связана с определенным физическим процессом. Как описано выше, основными физическими процессами взаимодействия гамма-квантов с веществом является фотоэффект, эффект Комптона и образование электрон-позитронных пар, и каждый из них вносит свой вклад в образование спектра. Помимо этих процессов, добавляется *экспонента*, связанная с наличием фона, *пик*

характеристического излучения, возникающий при взаимодействии гамма-квантов с окружающим веществом, а также пик обратного рассеяния, образующийся при энергии квантов  $E_\gamma \gg mc^2/2$  в результате рассеяния гамма-квантов на большие углы на материалах конструктивных элементов детектора и защиты. Положение пика обратного рассеяния определяется по формуле:

$$E_{\text{обр}} = \frac{E}{1 + 2E/mc^2}, \quad (2)$$

где  $E$  – энергия фотопика.

**Энергетическое разрешение спектрометра.** Даже при поглощении частиц с одинаковой энергией амплитуда импульса на выходе фотоприёмника сцинтилляционного детектора меняется от события к событию. Это связано:

1. со статистическим характером процессов сбора фотонов на фотоприёмнике и последующего усиления,
2. с различной вероятностью доставки фотона к фотоприемнику из разных точек сцинтиллятора,
3. с разбросом высвечиваемого числа фотонов

В результате в набранном спектре линия (которая для идеального детектора представляла бы дельта-функцию) оказывается размытой, её часто описывают гауссианом.

Энергетическим разрешением спектрометра называется величина

$$R_i = \frac{\Delta E_i}{E_i}, \quad (3)$$

где  $\Delta E_i$  – ширина пика полного поглощения, измеренная на половине высоты,  $E_i$  – энергия регистрируемого  $\gamma$ -излучения. Значение  $E_i$  пропорционально среднему числу фотонов  $\bar{n}_i$  на выходе ФЭУ, т.е.:

$$E_i = \alpha \bar{n}_i. \quad (4)$$

Полуширина пика полного поглощения  $\Delta E_i$  пропорциональна среднеквадратичной флуктуации  $\overline{\Delta n_i}$ . Т.к.  $n_i$  является дискретной случайной величиной, которая распределена по закону Пуассона, то  $\overline{\Delta n_i} = \sqrt{\bar{n}_i}$  и поэтому

$$\Delta E_i = \alpha \overline{\Delta n_i} = \alpha \sqrt{\bar{n}_i}. \quad (5)$$

Из (4), (5) получаем, что

$$R_i = \frac{\Delta E_i}{E_i} = \frac{\text{const}}{\sqrt{E_i}}. \quad (6)$$

Поскольку энергетическое разрешение зависит от энергии, его следует указывать для конкретной энергии. Чаще всего разрешение указывают для энергии гамма-линии  $^{137}\text{Cs}$  (661.7 кэВ).

## 4 Ход работы

Проведем измерения гамма-спектров для всех препаратов:

#### 4.1 $^{60}\text{Co}$

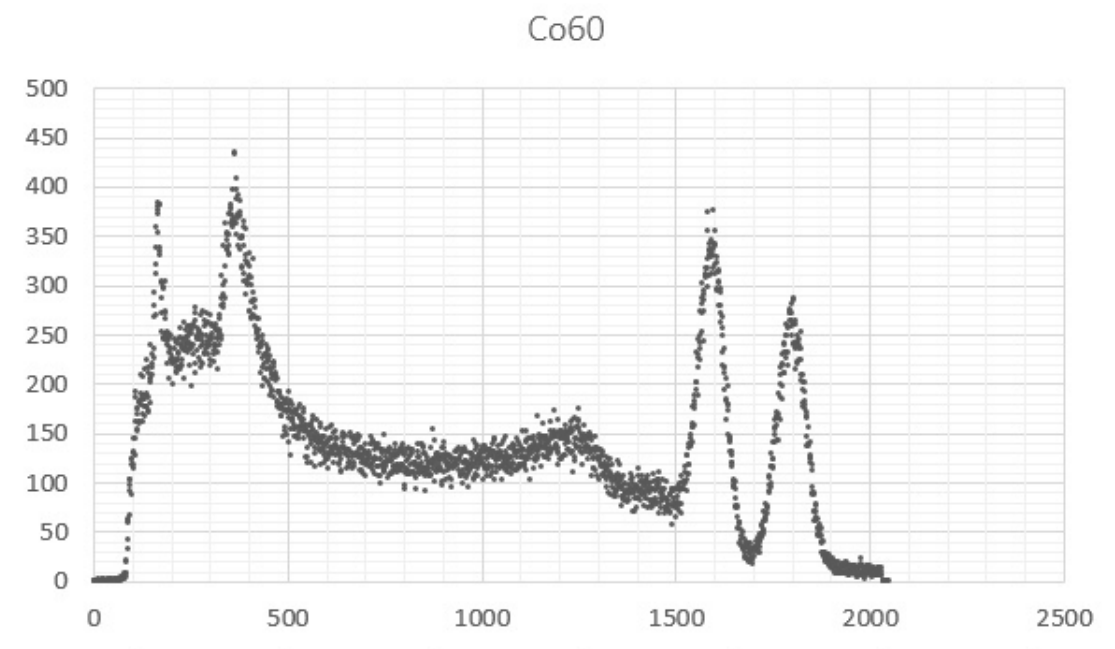


Рис.2. Спектр  $^{60}\text{Co}$

#### 4.2 $^{22}\text{Na}$

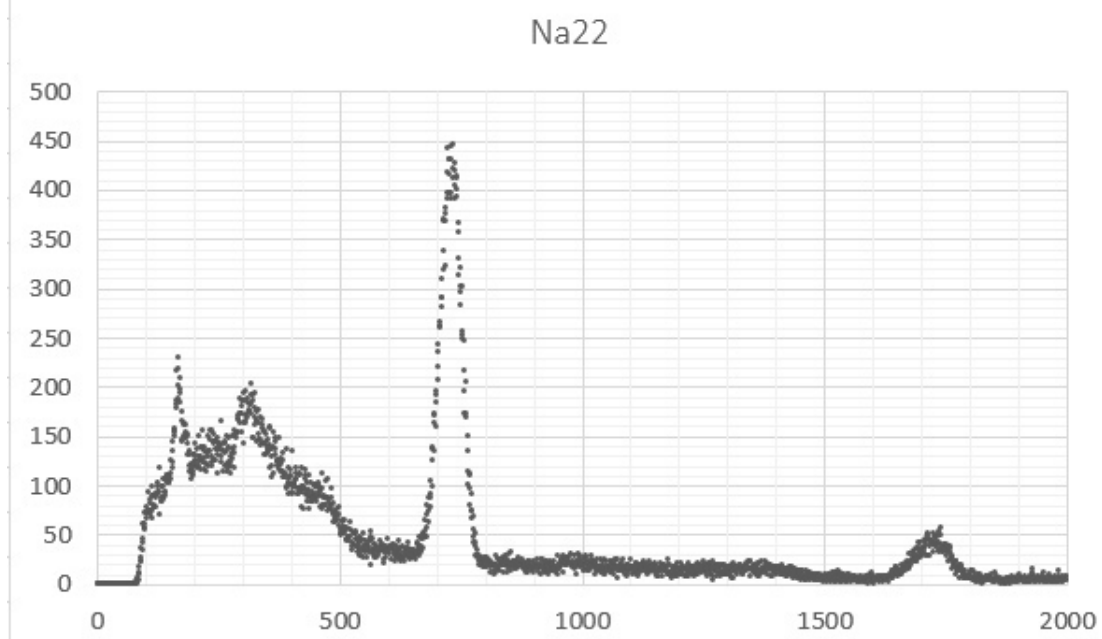


Рис.3. Спектр  $^{22}\text{Na}$

#### 4.3 $^{152}\text{Eu}$

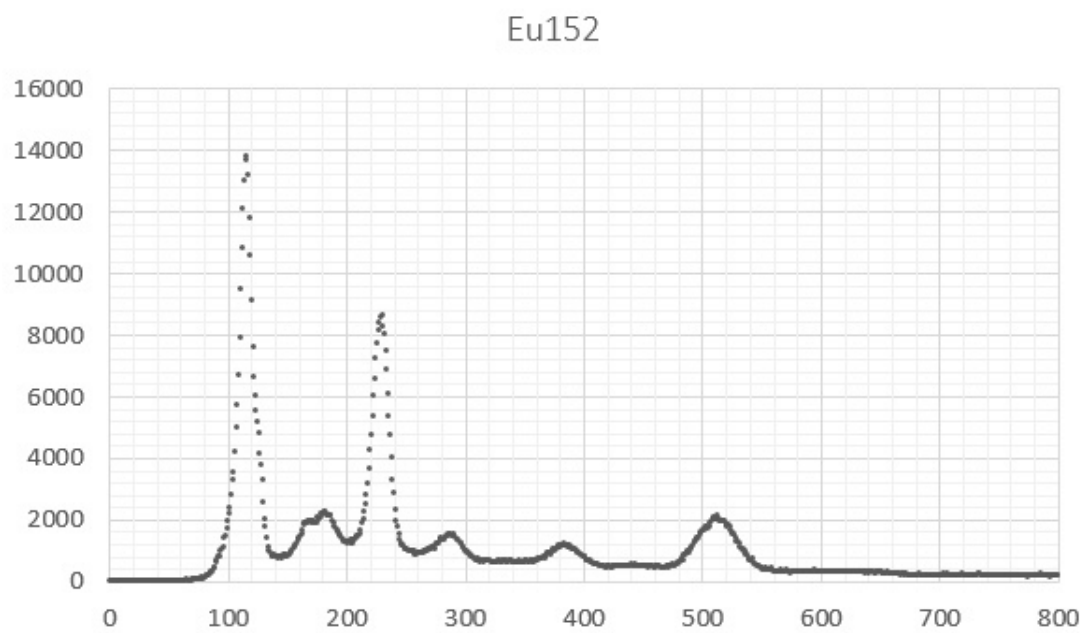


Рис.4. Спектр  $^{152}\text{Eu}$

#### 4.4 $^{137}\text{Cs}$

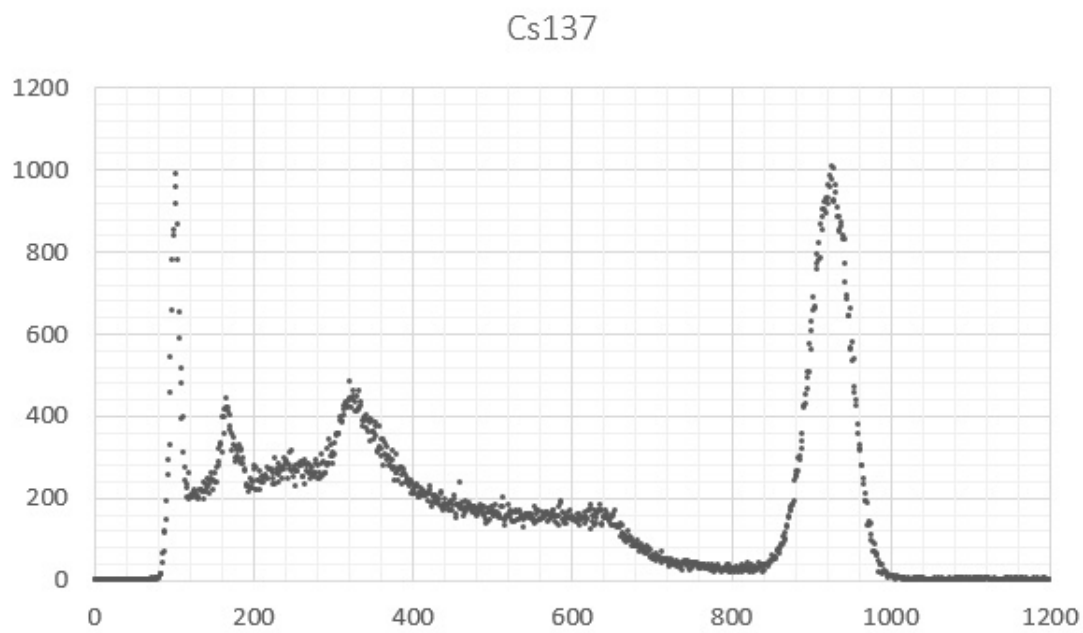


Рис.5. Спектр  $^{137}\text{Cs}$

#### 4.5 $^{241}\text{Am}$

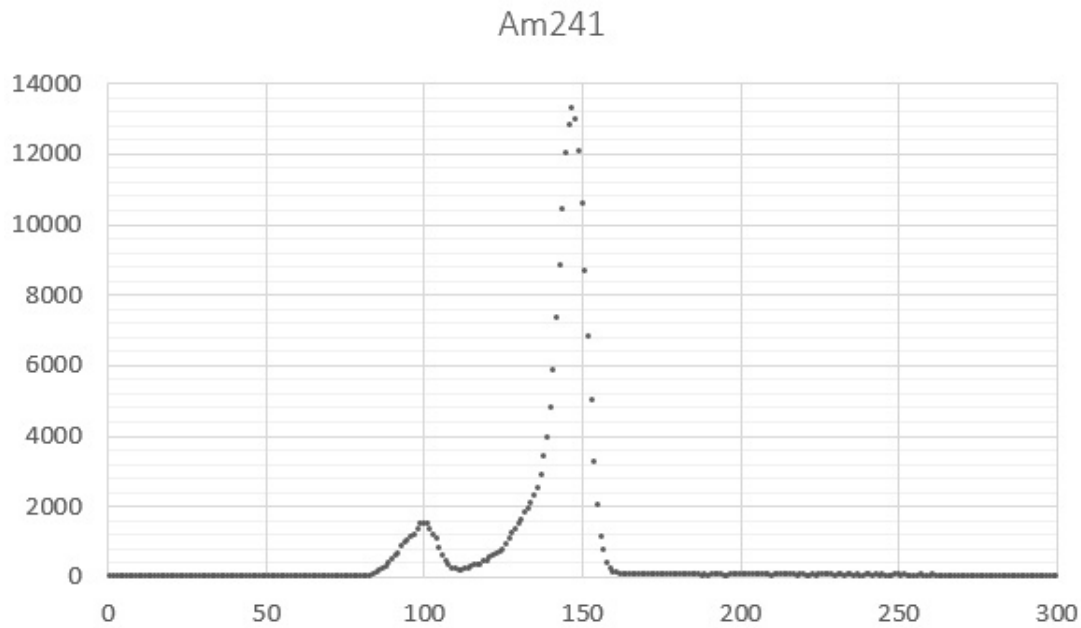


Рис.6. Спектр  $^{241}\text{Am}$

Используя известные значения пиков в спектрах натрия и цезия, построим калибровочный график соответствия номера канала определённому значению энергии и получим уравнение для перехода от номера канала к значению энергии в кэВ:

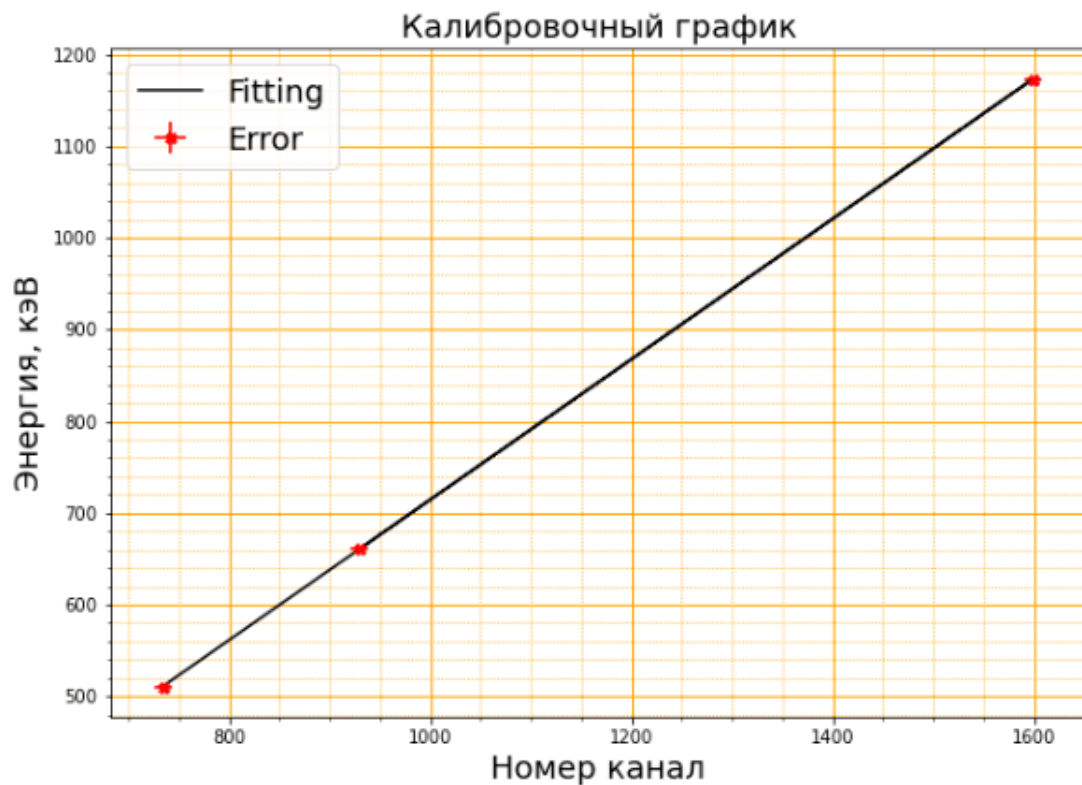


Рис.6. Спектр  $^{241}\text{Am}$

$$E = 0.75N_i - 55,2$$

где  $a = 0.75 \pm 0.02$ ,  $b = 55.2 \pm 9.0$ . Погрешности посчитаны согласно методу наименьших квадратов.

Используя калибровочный график, определим значения энергии пиков полного поглощения  $E_i$ , их ширины на половине высоты  $\Delta E_i$  и энергетическое разрешение  $R_i$ . Результаты занесём в таблицу 1.

Таблица погрешностей:

Построим график зависимости  $R^2 = f(1/E)$  на рис.7. Наблюдаем линейную зависимость.

Источник	$N_i$	$\Delta N_i$	$E_i$ , МэВ	$\Delta E_i$ , МэВ	$R_i$
$^{22}\text{Na}$	1730	123	1275	94	0,074
$^{60}\text{Co}$	1827	89	1173	80	0,068
$^{137}\text{Cs}$	937	75	661	56	0,084
$^{241}\text{Am}$	160	19	67	14,8	0,220
$^{152}\text{Eu}$	526	47	347	36	0,104

Таблица 1: Пики полного поглощения

Источник	$\sigma_E$	$\sigma_{\Delta_E}$	$\sigma_{\Delta_R}$
$^{22}\text{Na}$	34,60	1,88	0,05
$^{60}\text{Co}$	36,54	1,60	0,04
$^{137}\text{Cs}$	18,74	1,12	0,06
$^{241}\text{Am}$	3,20	0,296	0,09
$^{152}\text{Eu}$	10,52	0,72	0,07

Таблица 2: Таблица погрешностей

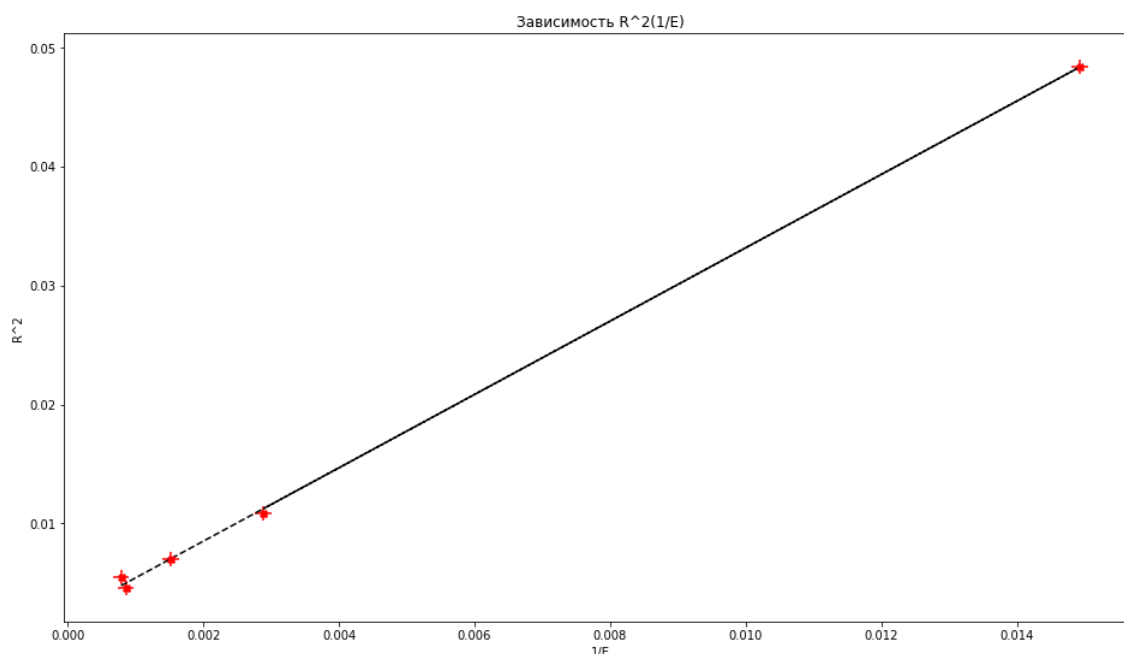


Рис.7. График зависимости  $R^2$  от  $1/E$

Определим энергии края комптоновского поглощения для образцов  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ , сравним их с соответствующими справочными значениями.

$^{22}\text{Na}$ :	$E_{Cexp} = 0,999 \text{ MeV}$	$E_{Cth} = 1.062 \text{ MeV}$
$^{60}\text{Co}$ :	$E_{Cexp} = 0,922 \text{ MeV}$	$E_{Cth} = 0.963 \text{ MeV}$
$^{137}\text{Cs}$ :	$E_{Cexp} = 0,448 \text{ MeV}$	$E_{Cth} = 0.477 \text{ MeV}$

## 5 Вывод

В ходе лабораторной работы был разобран принцип устройства сцинтиллятора. Также был изучен ряд радиоактивных источников и снят спектр образцов  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ . Был построен график и была проверена линейная зависимость квадрата спектрального разрешения прибора от величины, обратной энергии полного поглощения.

## Список литературы

- [1] Лабораторный практикум по общей физике: Учеб. пособие для вузов. Т. 3. Квантовая физика / Игошин Ф.Ф., Самарский Ю.А., Ципенюк Ю.М.; Под ред. Ципенюка Ю.М. - М.:Физматкнига, 2005. 432 стр.