

Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

**ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ
ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ**

*Методические указания к лабораторной работе № 41
по курсу «Физика» для студентов всех форм обучения
всех направлений подготовки*

Екатеринбург
УрФУ
2017

УДК 621.791.76(075.8)

Составители – А. Н. Филанович, А. А. Клименков

Научный редактор – проф., д-р физ.-мат. наук А. А. Повзнер

Измерение коэффициента поглощения гамма-излучения : методические указания к лабораторной работе № 41 по курсу «Физика» / сост. А. А. Клименков. – Екатеринбург: УРФУ, 2017. – 16 с.

Данные методические указания содержат основные сведения о гамма-излучении и механизмах его взаимодействия с веществом поглотителя. В работе приведены рекомендации по измерению коэффициента поглощения гамма-излучения различными материалами. Экспериментальная часть включает описание лабораторной установки, методику измерений и обработки результатов. Приведена форма отчета.

Методические указания предназначены для студентов всех форм обучения всех специальностей.

Подготовлено кафедрой физики

© Уральский федеральный
университет, 2017

ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕ И ЕГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ВЕЩЕСТВОМ

Гамма-излучение образуется при радиоактивном распаде некоторых атомных ядер – процессе самопроизвольного превращения неустойчивых ядер одних элементов в ядра других элементов, сопровождающемся испусканием элементарных частиц или ядер, а также при ядерных реакциях. По виду испускаемых частиц различают α -распад (поток ядер гелия) и β -распад (поток быстро движущихся электронов или позитронов).

Гамма-излучение представляет собой электромагнитное излучение с очень малой длиной волны ($\lambda < 10^{-10}$ м). При взаимодействии с веществом гамма-излучение проявляет четко выраженные корпускулярные свойства, и его можно рассматривать как поток фотонов (гамма-квантов).

Возникновение гамма-излучения при α - и β -распадах объясняется тем, что ядра, образующиеся в результате радиоактивных распадов, могут находиться в возбужденном состоянии. Переходя в состояние с меньшей энергией, ядра испускают гамма-кванты, энергия которых равна разности энергий ядра до и после перехода. Спектр гамма-квантов (их распределение по энергиям) линейный, что обусловлено дискретностью энергетических состояний атомных ядер.

При прохождении через вещество радиоактивное излучение теряет свою энергию, постепенно поглощаясь веществом. Проникающая способность излучения зависит от типа излучения, природы вещества и других факторов.

Особенно сильно поглощаются веществом α -частицы: в газах при нормальном давлении их пробег составляет несколько сантиметров, а в твердых веществах – доли миллиметра. β -частицы поглощаются веществом несколько меньше: например, они полностью поглощаются пластинкой алюминия толщиной в несколько сантиметров. Заряженные α - и β -частицы теряют свою энергию из-за много-

кратных столкновений с атомами вещества, приводящих к возбуждению и ионизации этих атомов.

Гамма-излучение имеет значительно большую проникающую способность, чем α - и β -излучения. Гамма-кванты, обладая нулевой массой покоя, не могут замедляться в среде, поэтому при прохождении сквозь вещество они либо поглощаются, либо рассеиваются (изменяют направление своего движения). Основными процессами, сопровождающими прохождение гамма-излучения через вещество, являются фотоэффект, эффект Комптона и образование электронно-позитронных пар.

Фотоэффект – процесс неупругого взаимодействия гамма-излучения с веществом, при котором падающий фотон поглощается атомом и передает свою энергию одному из электронов, выбивая его из атома. Фотоэффект происходит на связанных электронах (когда энергия связи электрона в атоме сравнима с энергией фотона), поэтому по мере увеличения энергии фотонов вероятность фотоэффекта уменьшается. Фотоэффект является преобладающим механизмом поглощения в области малых энергий гамма-квантов ($E < 0,1$ МэВ для алюминия и $E < 0,5$ МэВ для свинца).

При более высоких значениях энергий гамма-квантов вероятность фотоэффекта очень мала, и основным механизмом их взаимодействия с веществом становится комптоновское рассеяние – процесс упругого взаимодействия фотона со свободным электроном (электрон можно считать свободным, если энергия фотона существенно превышает энергию связи электрона в атоме). В результате взаимодействия падающий фотон передает часть энергии электрону и изменяет направление своего движения (рассеивается).

Образование электронно-позитронных пар ($\gamma \rightarrow e^- + e^+$) может происходить при прохождении фотона с энергией $E > 1,02$ МэВ (удвоенная энергия покоя электрона) в электрическом поле атомных ядер. При этом фотон исчезает, и вся его энергия распределяется

между образовавшимися электроном и позитроном. Вероятность этого процесса увеличивается с ростом энергии фотона.

В результате всех этих процессов при прохождении через вещество поток гамма-излучения ослабляется. Электромагнитное излучение характеризуется интенсивностью I , величиной, представляющей собой энергию, переносимую фотонами в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения излучения.

Уменьшение интенсивности гамма-излучения при прохождении бесконечно тонкого слоя вещества пропорционально толщине этого слоя dx и интенсивности падающего излучения I :

$$-dI = \mu I dx, \quad (1)$$

где μ – линейный коэффициент ослабления, зависящий от природы поглощающего вещества и энергии фотонов падающего излучения.

Интегрируя уравнение (1), можно получить закон ослабления излучения слоем вещества толщиной x :

$$I = I_0 e^{-\mu x}, \quad (2)$$

где I_0 и I – интенсивность излучения до и после прохождения слоя вещества соответственно.

Из формулы (2) следует, что интенсивность гамма-излучения по мере прохождения через слой вещества толщиной x уменьшается по экспоненциальному закону. Быстрота изменения интенсивности определяется коэффициентом поглощения μ (обычно измеряемым в см^{-1}). Экспоненциальная зависимость (2) строго выполняется для узкого пучка фотонов одинаковой энергии.

Для характеристики ослабляющей способности вещества используется также понятие толщины слоя половинного ослабления $\Delta_{1/2}$, при прохождении которого интенсивность излучения уменьшается в два раза. Используя (2), можно показать, что

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

При взаимодействии гамма-излучения с веществом наиболее существенны процессы фотоэффекта, комптоновского рассеяния и образования электрон-позитронных пар. Каждый из них происходит независимо от других, поэтому полный коэффициент поглощения μ состоит из трех слагаемых:

$$\mu = \tau + y + e, \quad (4)$$

где τ , y , e – коэффициенты поглощения, обусловленные соответственно фотоэффектом, комптоновским рассеянием, образованием электронно-позитронных пар.

Коэффициент поглощения при фотоэффекте определяется выражением

$$t = f_1(E_\gamma) \frac{Z^{4,5} \rho}{A}, \quad (5)$$

где f_1 – функция, зависящая от энергии фотона; Z – атомный номер вещества; A – его атомная масса; ρ – плотность вещества. Расчеты показывают, что, если принять $E_\gamma = 1,25$ МэВ (как для источника излучения Co^{60}), ρ выразить в кг/м^3 , а τ – в см^{-1} , функция f_1 численно равна $7 \cdot 10^{-12}$. Из формулы (5) видно, что коэффициент поглощения фотонов одинаковой энергии при фотоэффекте существенно возрастает с увеличением атомного номера вещества.

Коэффициент поглощения при комптоновском рассеянии можно представить в виде

$$y = f_2(E_\gamma) \frac{Z\rho}{A}, \quad (6)$$

где f_2 – функция, зависящая от энергии фотона при тех же условиях, что и выше, численно равна $1,1 \cdot 10^{-4}$. Согласно формуле, зависимость σ от природы вещества в основном определяется его плотностью, так как отношение Z/A мало отличается для разных элементов. Вкладом эффекта образования электронно-позитронных пар в данных условиях можно пренебречь.

Логарифмируя уравнение (2), получаем

$$\ln I = \ln I_0 - \mu x. \quad (7)$$

Эта зависимость представляет собой уравнение прямой в координатах $\ln I$ и x , тангенс угла наклона которой (с обратным знаком) равен коэффициенту поглощения μ .

Измерив на опыте зависимость $I(x)$ для различных материалов и построив графики $\ln I = f(x)$ (рис. 1), можно по прямолинейной части графиков определить коэффициенты поглощения гамма-излучения соответствующих материалов по формуле

$$\mu = \frac{\ln I_1 - \ln I_2}{X_2 - X_1}, \quad (8)$$

где X_1 и X_2 – толщины поглощающего слоя. Наблюдаемая иногда нелинейность зависимости $\ln I = f(x)$ обусловлена энергетической неоднородностью пучка фотонов, а также наличием β -излучения.

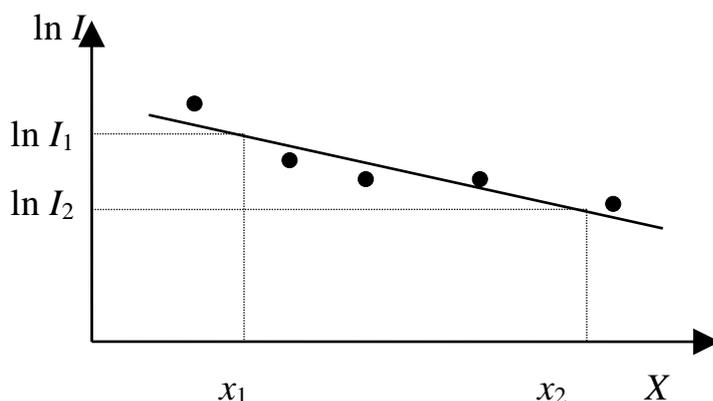


Рис. 1. Зависимость логарифма интенсивности радиоактивного излучения от толщины слоя поглощающего материала

Регистрация гамма-излучения

Методы регистрации радиоактивных излучений и частиц основаны на их способности производить ионизацию и возбуждение атомов среды. Заряженные частицы вызывают эти процессы непосредственно, а гамма-кванты обнаруживаются по ионизации, вызываемой быстрыми заряженными частицами, возникающими в результате их взаимодействия с электронами и ядрами атомов среды.

Одним из наиболее распространенных устройств для измерения интенсивности гамма-излучения является счетчик Гейгера–Мюллера

(рис. 2), действие которого основано на ионизации газовой среды частицами. Он представляет собой тонкостенный проводящий цилиндр,

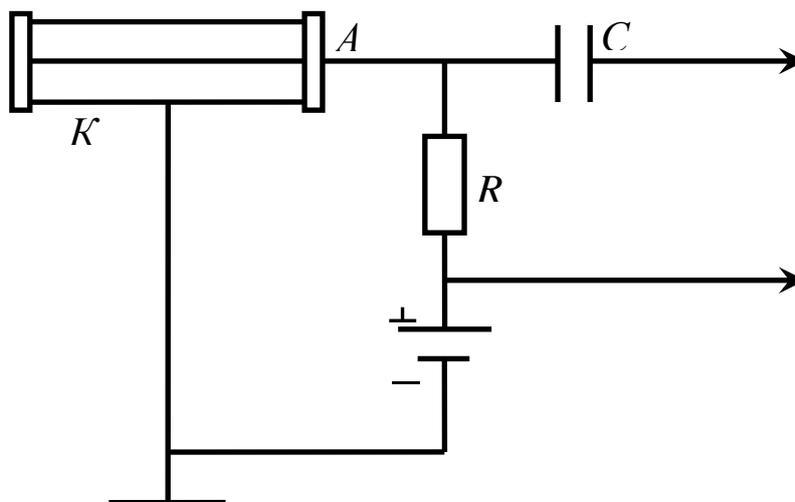


Рис. 2. Схема счетчика Гейгера-Мюллера.

заполненный газом при пониженном давлении. По оси цилиндра натянута тонкая металлическая нить. Между нитью (анодом) и цилиндром (катодом) возникает напряжение около 400 В. Анод счетчика соединен с положительным полюсом источника ЭДС через сопротивление $R \sim 10^9$ Ом.

Механизм регистрации гамма-излучения основан на вторичной ионизации. Пролетающие через счетчик гамма-кванты выбивают из катода быстрые электроны, которые и вызывают ионизацию атомов газа. Возникающие при этом ионы и электроны движутся под действием приложенного к электродам напряжения и вызывают импульсы тока. Число импульсов тока пропорционально интенсивности падающего излучения. Для измерения числа импульсов счетчик через конденсатор C подключен к пересчетному устройству.

Счетчики Гейгера-Мюллера работают при таком напряжении на электродах, что образующиеся в результате ионизации ионы и электроны приобретают под действием электрического поля энергию, достаточную для ионизации нейтральных атомов газа при соударениях. Это приводит к лавинообразному нарастанию числа ионов и электронов в счетчике – процесс носит характер самостоятельного газовой-

го разряда (поддерживается после прекращения внешнего воздействия). Для регистрации счетчиком отдельных частиц возникший разряд следует гасить. Для этого в цепь анода включается высокоомное сопротивление R (рис. 2). На этом сопротивлении происходит большое падение напряжения, в результате чего разность потенциалов на электродах счетчика уменьшается настолько, что окажется недостаточной для поддержания самостоятельного газового разряда: разряд погасит до попадания в счетчик другого гамма-кванта. Временное разрешение счетчиков Гейгера–Мюллера составляет 10^{-3} – 10^{-7} с, что позволяет регистрировать до нескольких тысяч проходящих через счетчик гамма-квантов в секунду.

Цель работы и экспериментальная установка

Цель данной работы состоит в измерении коэффициентов поглощения гамма-излучения различными материалами (алюминием и свинцом).

Источник гамма-излучения – радиоактивный препарат изотопа ^{60}Co ($E_\gamma = 1,17$ – $1,33$ МэВ).

Экспериментальная установка для измерения интенсивности гамма-излучения состоит из следующих элементов:

1. Источник гамма-излучения – изотоп ^{60}Co .
2. Счетчик Гейгера–Мюллера с усилительным блоком.
3. Свинцовый контейнер
4. Набор пластин из сделанных и укрепленных на барабане поглощающих материалов (алюминий и свинец).
5. Секундомер (не показан на рисунке).

Радиоактивный препарат I помещен в массивный свинцовый контейнер 2 , установленный на рабочем столе (рис. 3).

На контейнере закреплен плексигласовый цилиндр, внутри которого по оси расположен счетчик Гейгера–Мюллера 3 . Поворотом барабана, на котором расположены поглощающие пластины 4 , экранирующие счетчик от излучения, можно изменять толщину пластин от 0

до 20 мм. Вращение барабана осуществляется поворотом рукоятки, снабженной стрелкой-указателем для определения толщины пластин (барабан и шкала с указателем толщины пластин на рис. 3 не показаны).

На одном основании с цилиндром установлен усилительный блок. С помощью двух кабелей он соединен с пересчетным прибором: по одному из них подается напряжение на счетчик, по другому – питание схемы и снимается сигнал на усилительный блок.

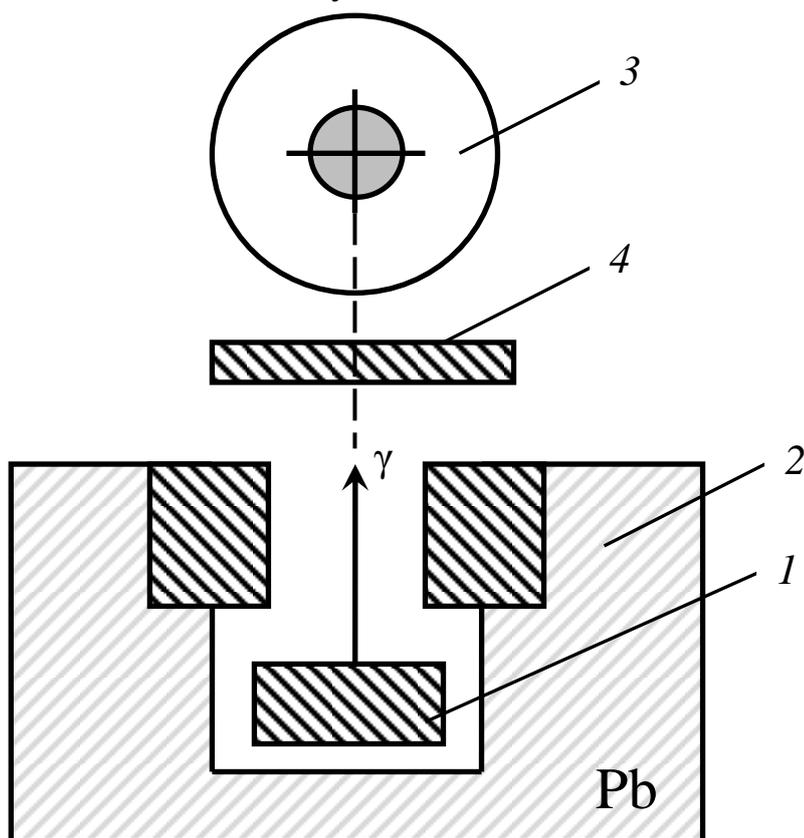


Рис. 3. Схема лабораторной установки

При измерении интенсивности гамма-излучения счетчиком Гейгера–Мюллера необходимо учитывать поправки, связанные с тем, что счетчик производит отсчет импульсов даже в отсутствие исследуемых источников излучения из-за существования так называемого фона излучения. Этот фон объясняется наличием космического излучения, радиоактивностью Земли и другими факторами. Интенсив-

ность фона I_{ϕ} необходимо вычитать из измеренного на опыте числа импульсов I . В работе значение I_{ϕ} задается преподавателем.

В настоящее время источники радиоактивного излучения извлечены из лабораторных установок и работа выполняется на установках-симуляторах. Установки подключены к компьютеру с помощью многоканального аналого-цифрового преобразователя (АЦП). В работе используется программа измерений, выполненная в среде LabVIEW (рис. 4).

Порядок выполнения работы

1. Включить компьютер и запустить программу измерений, щелкнув левой кнопкой мыши ярлык «Работа №40».

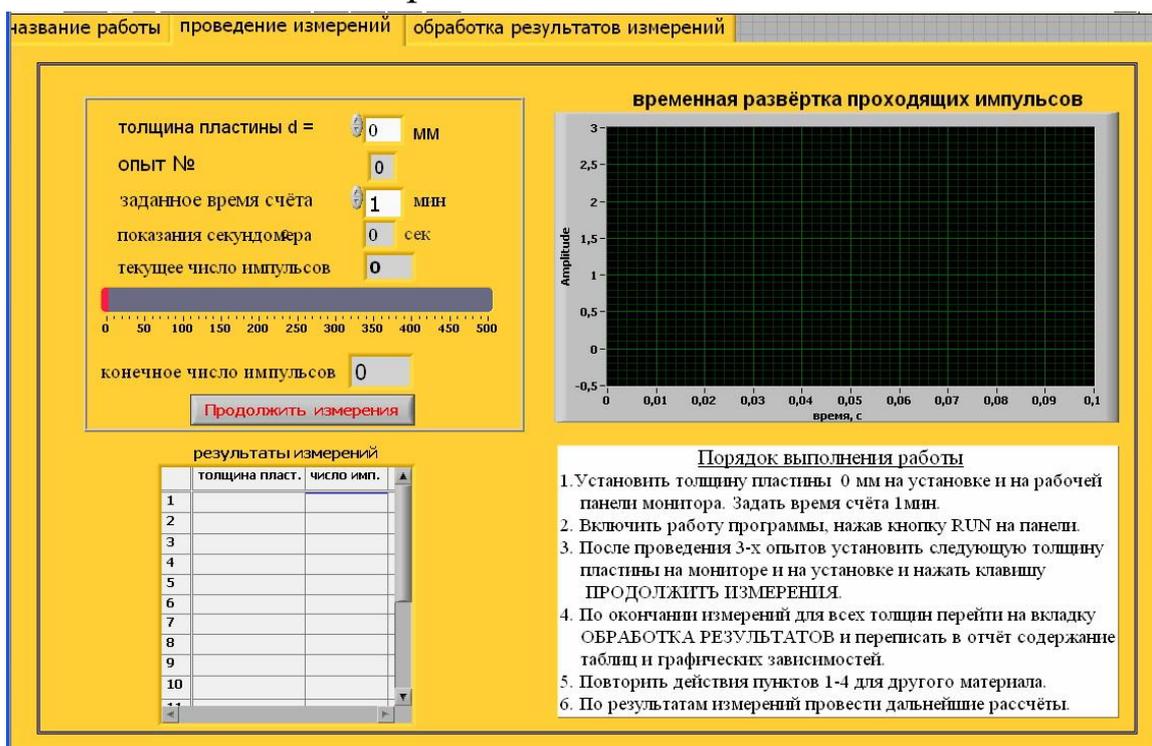


Рис. 4. Лицевая панель программы измерений

2. Установить толщину пластины «0» на установке и в окне программы. Убедиться, что заданное время счёта составляет 1 мин.

3. Включить работу программы, нажав кнопку  на экране монитора. Программа проведёт серию из 3 опытов и предложит изменить толщину пластины.

4. Установить следующую толщину алюминиевой пластины **на установке и в окне программы** (2,5; 5; 10; 15; 20 мм) и нажать кнопку «Продолжить измерения». Повторить данное действие для всех значений толщины пластины.

5. По окончании измерений перейти на вкладку «Результаты измерений», занести результаты в таблицу 2 отчета.

6. Повторить измерения (п. 2-5) для второго материала (свинец).

7. По данным таблицы 2 отчёта на одном графике построить зависимости $\ln I = f(x)$ для алюминия и свинца. По формуле (8) по прямолинейным участкам этих зависимостей рассчитываются соответствующие коэффициенты поглощения μ и сравниваются между собой. Для повышения точности измерений при расчете μ по формуле (8) точки с координатами x_1 и x_2 не должны слишком близко находиться друг к другу.

8. Выполнить расчёты толщины слоя половинного ослабления для обоих материалов, коэффициентов поглощения τ и γ для свинца, теоретического значения полного коэффициента поглощения μ для свинца.

9. Сформулировать выводы.

Контрольные вопросы

1. Дайте характеристику различных видов радиоактивного излучения.

2. Каковы основные механизмы взаимодействия гамма-излучения с веществом?

3. Какой вид имеет закон ослабления гамма-излучения при прохождении через вещество?

4. Опишите конструкцию и принцип действия счетчика Гейгера–Мюллера.

5. Сформулируйте цель данной работы.

6. Изложите порядок выполнения работы.

УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра физики

О Т Ч Е Т

по лабораторной работе № 41

**ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ
ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ**

Студент(ка) _____

Группа _____

Преподаватель _____

Дата _____

1. Основная расчетная формула:

$$\mu = \frac{\ln I_1 - \ln I_2}{X_2 - X_1},$$

где μ – _____;

I – _____;

X – _____.

2. Средства измерения и их характеристики:

Таблица 1

| Средства измерения | Предел измерений | Цена деления | Предел основной погрешности |
|---------------------------|------------------|--------------|-----------------------------|
| 1. Пересчетное устройство | | | |
| 2. Секундомер | | | |

3. Результаты измерений

Таблица 2

| Вещество | x , см | I' , имп./мин | I_{ϕ} имп./мин | I , имп./мин | $\ln I$ |
|----------|----------|--------------------|------------------------|-------------------|---------|
| Al | 0 | | | | |
| | 0,25 | | | | |
| | 0,50 | | | | |
| | 1,00 | | | | |
| | 1,50 | | | | |
| | 2,00 | | | | |
| Pb | 0 | | | | |
| | 0,25 | | | | |
| | 0,50 | | | | |
| | 1,00 | | | | |
| | 1,50 | | | | |
| | 2,00 | | | | |

где I' – интенсивность, измеренная без поправки на фон (показания пересчетного прибора); I_{ϕ} – интенсивность фона, $I = I' - I_{\phi}$ – истинная интенсивность излучения.

5. График зависимости $\ln I = f(x)$ для обоих материалов прилагается.

6. Расчет коэффициентов поглощения материалов:

$$\mu_{Al} = \dots$$

$$\mu_{Pb} = \dots$$

7. Расчет толщины слоя половинного ослабления $\Delta_{1/2}$:

- алюминий: $\Delta_{1/2} =$
- свинец: $\Delta_{1/2} =$

8. Расчет теоретического коэффициента поглощения для свинца

$$\tau =$$

$$y =$$

$$\mu_{\text{теор}} =$$

Справочные данные для свинца: $Z = 82$, $A = 207$, $\rho = 11,3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Относительная погрешность определения коэффициента поглощения свинца

$$\gamma = (|\mu_{Pb} - \mu_{\text{теор}}|) \cdot 100\% / \mu_{\text{теор}} =$$

8. Выводы.