

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ

«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра физики

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к выполнению лабораторной работы

**ФИЗИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ОТ ИОНИЗИРУЩИХ
ИЗЛУЧЕНИЙ. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ БЕТА-ИЗЛУЧЕНИЯ
С ВЕЩЕСТВОМ**

по модулю «Радиационная безопасность»

Брест 2024

УДК 614.876(075.8)

Методические указания предназначены для студентов технических специальностей дневной и заочной форм обучения, выполняющих лабораторные работы по модулю «Радиационная безопасность» дисциплины «Безопасность жизнедеятельности человека». Указания содержат теоретические сведения, описание лабораторной установки и методику измерений, а также задания для самостоятельной работы, контрольные вопросы и рекомендуемую литературу.

Составители: А. И. Пинчук, доцент, к. ф.-м. н., доцент
С. В. Чугунов, старший преподаватель

Рецензент: А. В. Демидчик, к. ф.-м. н., доцент, заведующий кафедрой общей и теоретической физики учреждения образования «Брестский государственный университет имени А.С. Пушкина»
С. В. Басов, доцент кафедры инженерной экологии и химии, УО «БрГТУ», к.т.н., доцент

Учреждение образования
© «Брестский государственный технический университет», 2024

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12

ФИЗИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ОТ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ БЕТА-ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

Цель работы: определение экстраполированного пробега бета частиц в алюминии.

Приборы и материалы: дозиметр-радиометр МКС-АТ1117М с выносным интеллектуальным блоком детектирования; проба «Калийная соль».

1 Устройство и принцип действия прибора. Схема установки

Прибор состоит из блока обработки информации (БОИ2) и выносного блока детектирования (БД) БДПБ-01.



Рисунок 1 – Блок обработки информации БОИ2



Рисунок 2 – Выносной блок детектирования БДПБ-01 и крышка-фильтр

Принцип действия БД БДПБ-01 основан на использовании высокочувствительного метода сцинтилляционных измерений с применением детекторов NaI(Tl) Ø60×1 мм и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ).

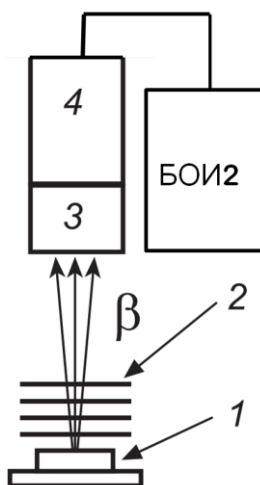


Рисунок 3 – Схема установки

Бета-частицы испускаются радиоактивным препаратом (проба «Калийная соль»), который помещен в контейнер 1 и закрыт тонкой пленкой. Бета-частицы поглощаются алюминиевыми пластинками 2 и регистрируются детектором (рисунок 3). Детектор состоит из сцинтиллятора 3 и ФЭУ 4 (детектор и ФЭУ смонтированы в общем цилиндрическом корпусе). Импульсы от детектора подаются на блок обработки информации (БОИ2). Нужная толщина поглотителя достигается путем последовательного наложения пластинок друг на друга. Толщина пластинки указана на пластинке.

2. Включение и выключение прибора

Для выполнения прибором своих функций необходимо подключить БД БДПБ-01 к розетке БОИ2 (находится на нижней панели) кабелем из комплекта поставки. На приборе автоматически устанавливается режим измерения плотности потока бета-излучения, при этом на табло появляется индикация «β». (Примечание – если БДПБ-01 уже подключен к БОИ2, делать этого не требуется).

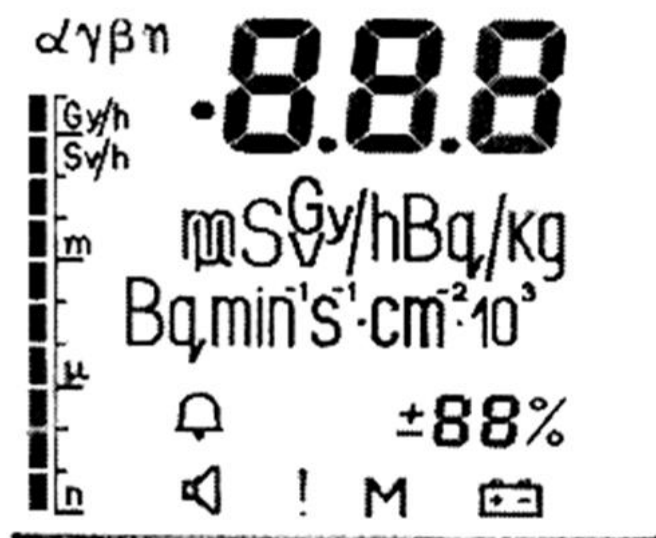


Рисунок 4 – Тестовое изображение

Для **включения прибора** необходимо нажать кнопку «ПУСК» на передней панели БД БДПБ-01. После включения питания прибор автоматически переходит в режим самоконтроля. На короткое время включается звуковой сигнал, затем загорается подсветка табло и в течение ~1 с индицируется тестовое изображение, приведённое на рисунке 4.

В случае успешного завершения самоконтроля прибор автоматически переходит в режим измерения. На табло БОИ2 появляется индикация

измеряемой величины (α, β, γ, n), единицы измерения, статистической погрешности, символ «» и мигающий символ «!», свидетельствующий о работе прибора. Через ~20 с начинается измерение мощности дозы.

Выключение прибора осуществляется быстрым трёхкратным нажатием кнопки «ПУСК». При этом на табло появляется сообщение «OFF», и через 1-2 с прибор выключается.

3 Заряд блока аккумуляторов

Заряд блока аккумуляторов БОИ2 необходимо провести в случае, если на табло появляется сообщение «bAt 00» и мигающая индикация «» или сообщение «bAt 00», мигающая индикация «» и звуковая сигнализация. В последнем случае измерения провести нельзя, так как при нажатии на кнопку «ПУСК» прибор выключается.

4 Измерение плотности потока бета-излучения с БДПБ-01

4.1. Закрепите БДПБ-01 с закрытой крышкой-фильтром на кронштейне таким образом, чтобы под детектором было возможно размещение пробы «Калийная соль» и алюминиевого поглотителя толщиной до 2 мм.

4.2. Снимите крышку-фильтр с БДПБ-01 путём перемещения её вниз.

4.3. Проведите замер фона I_{ϕ} , однократно нажав кнопку «ПУСК» на БОИ2.

4.4. Поместите под БДПБ-01 пробу «Калийная соль».

4.5. Нажимая кнопку «ПУСК», проведите замеры полной плотности потока бета-излучения I , $\text{мин}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$, для толщин поглотителя (алюминия), x , в диапазоне 0.2...1.0 мм с интервалом 0.2 мм. Для каждой толщины слоя поглотителя провести измерения плотности потока бета-частиц не менее 3-х раз в течение времени измерения 2 мин. Найдите среднее значение плотности потока бета-частиц для каждой толщины слоя поглотителя.

4.6. Данные измерений свести в таблицу

x , см	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1
I , $\text{мин}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$					
$\ln I$, $\text{мин}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$					

4.7. На основе полученной таблицы построить график, дающий зависимость полной плотности потока бета-частиц $\ln I(x)$ от толщины алюминиевого поглотителя x . *Примечание* – В данном случае следует использовать именно полную плотность потока $I = I_{\beta} + I_{\phi}$ (I_{β} – плотность потока с вычетом фона), чтобы не усложнять практическое определение пробега из-за расходимости значения $\ln I_{\beta}$ при малых I_{β} .

5 Определение экстраполированного пробега бета-частиц

5.1. Из построенного графика $\ln I(x)$ найдите экстраполированный пробег R_{β} . Экстраполированный пробег определяется как толщина поглотителя, при которой продолжение линейного участка зависимости $\ln I(x)$ от толщины поглотителя x пересекает уровень фона $\ln I_{\phi}$ (см. рисунок 5).

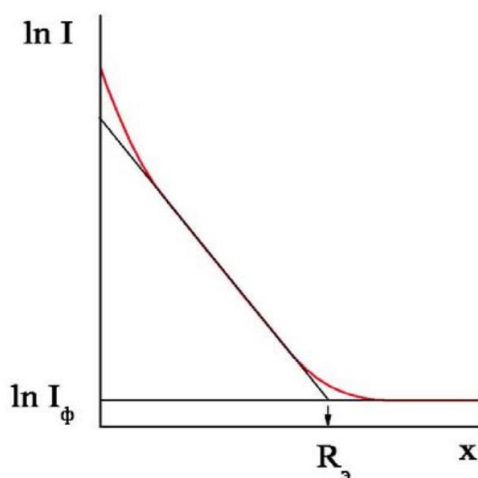


Рисунок 5 – Определение экстраполированного пробега R_{β} бета-частиц из графика зависимости $\ln I(x)$

5.2. Рассчитайте экстраполированный пробег в г/см² электронов с энергией E (МэВ) в алюминии по формулам:

$$R(\text{Al}) = 0.4 E^{1.4}, \text{ при } E < 0.8,$$
$$R(\text{Al}) = 0.54 E - 0.133, \text{ при } E > 0.8.$$

Энергию электронов найдите из схемы распада калия-40 (см. рисунок П.1 Приложения).

5.3. Пересчитайте экстраполированный пробег с размерностью г/см² в экстраполированный пробег с размерностью см. Для этого разделите экстраполированный пробег с размерностью г/см² на плотность алюминия равную 2.7 г/см³.

5.4. Сравните экстраполированные пробеги, полученные графическим и аналитическим методом. Сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. Какие виды бета-распад существуют?
2. Что такое экстраполированный пробег бета-частиц в веществе?
3. Спектр бета-распада.
4. Взаимодействие заряженных частиц с веществом, длина пробега электронов β -распада в веществе.
5. Ионизационные потери электронов β -распада.

Бета-распад

Бета-распадом называется самопроизвольное превращение атомного ядра, при котором его заряд (Z) меняется на единицу, а массовое число (A) остается неизменным. Существуют три типа β -распада: β^- -распад, β^+ -распад и e -захват, т. е. захват электрона ядром с одной из ближайших к ядру оболочек.

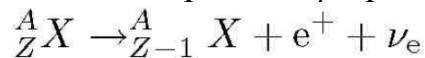
За β -распад ответственно слабое взаимодействие. Принимающие в нём участие лептоны [электроны, позитроны, (анти)нейтрино] не участвуют в сильных взаимодействиях, а (анти)нейтрино участвуют только в слабых взаимодействиях.

β^- -распад. В силу сохранения лептонного заряда электрон e^- рождается вместе с электронным антинейтрино $\bar{\nu}_e$. Необходимым условием распада является положительность энергии распада E_β .

$$E_\beta = M(A, Z) - M(A, Z + 1) - m_e > 0 ,$$

где m_e – масса электрона, M – массы ядер. Энергия распада выделяется в форме кинетических энергий продуктов распада – дочернего ядра, электрона и антинейтрино. Однако, поскольку масса электрона много меньше массы дочернего ядра, а у антинейтрино масса очень мала, то энергия распада практически полностью распределяется между электроном и антинейтрино.

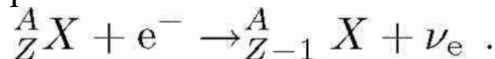
β^+ -распад. Аналогичный вид имеют реакция β^+ -распада



и его условие

$$E_\beta = M(A, Z) - M(A, Z - 1) - m_e > 0$$

e -захват. В случае e -захвата ядро захватывает электрон с одной из ближайших атомных оболочек, вероятнее всего с K -оболочки.



Реакция возможна при условии

$$E_\beta = M(A, Z) + m_e - M(A, Z - 1) > 0 .$$

Примером служит β -распад изотопа ${}^{40}\text{K}$ (рисунок П.1). При распаде ${}^{40}\text{K}$:

- 88.8 % ядер распадается по β^- -каналу с образованием стабильного изотопа ${}^{40}\text{Ca}$;
- 11 % ядер претерпевает e -захват с образованием ядра ${}^{40}\text{Ar}^*$ в возбуждённом состоянии с последующим испусканием γ -кванта и образованием основного состояния стабильного изотопа ${}^{40}\text{Ar}$;
- 0.16 % ядер испытывает β^+ -распад с образованием изотопа ${}^{40}\text{Ar}$ в основном состоянии;

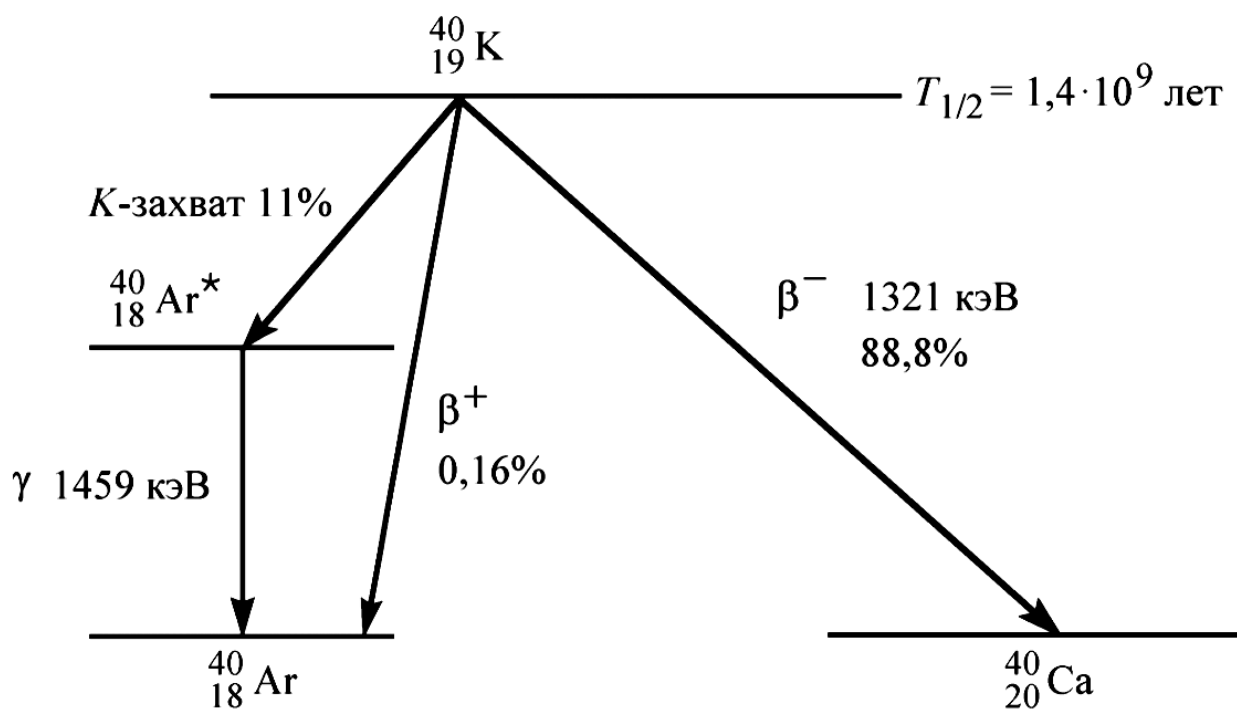


Рисунок П.1 – Схема распада ^{40}K

Энергии частиц, образующихся при β -распаде

Для большого количества одинаковых ядер в результате статистического усреднения получается вполне определенное распределение электронов (позитронов) по энергиям. Это распределение называется бета-спектром, а величина $E_{\text{гр}}$ – граничной (максимальной) энергией бета-спектра. Максимальная энергия бета-частиц определяет энергию распада и является важной физической величиной. Значения $E_{\text{гр}}$ для бета-распада для различных радиоактивных веществ могут сильно различаться.

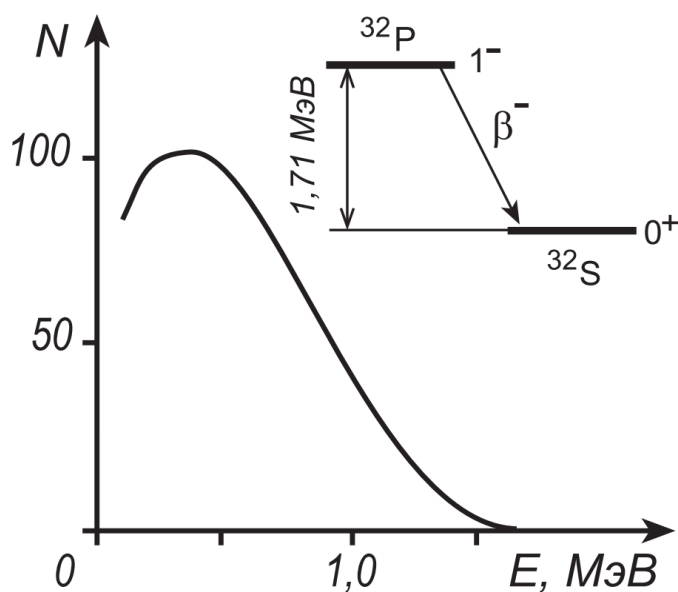


Рисунок П.2 – Бета-спектр и схема распада ^{32}P

Типичный бета-спектр показан на рисунке П.2. Бета-распад ^{32}P происходит на основное состояние ^{32}S и не сопровождается γ -излучением (см. схему распада). Однако во многих случаях бета-распад происходит на возбужденные уровни ядра-продукта. В этих случаях бета-излучение сопровождается γ -излучением.

Взаимодействие электронов с веществом

При прохождении через вещество любая заряженная частица взаимодействует с атомами этого вещества. Регистрация частиц также происходит в результате их взаимодействия с веществом детектора. Взаимодействие частиц с веществом зависит от их типа, заряда, массы и энергии. Заряженные частицы ионизируют атомы вещества, взаимодействуя с электронами в атомах. Взаимодействие частиц зависит от таких характеристик вещества, как плотность, атомный номер и средний ионизационный потенциал вещества.

При прохождении через вещество электроны теряют свою энергию вследствие электромагнитного взаимодействия с электронами и атомными ядрами поглотителя. Для электронов с относительно малой энергией (меньше так называемой критической) потери энергии обусловлены, как и для тяжелых заряженных частиц, ионизацией и возбуждением электронов тормозящего вещества – ионизационными потерями. При энергиях электрона, превышающих критическую, наиболее существенным становится другой механизм взаимодействия – испускание электромагнитного тормозного излучения в электрических полях ядер поглотителя – радиационные потери. Энергии E электронов и позитронов, вылетающих из ядра при β^+ -распадах, лежат в диапазоне

$$2.64 \text{ кэВ } ({}^{187}_{75}\text{Re}) \leq E \leq 16.6 \text{ МэВ } ({}^{12}_7\text{N}).$$

Критические энергии для легких поглотителей составляют несколько десятков МэВ, т. е. намного превышают энергию электронов β -распада. Таким образом, за поглощение электронов β -распада в легких поглотителях, например алюминии, ответственны только ионизационные потери.

Длина пробега заряженной частицы равна пути, на котором первичная кинетическая энергия частицы растрачивается за счет взаимодействия со средой, находится из соотношения

$$R = \int_0^{E_0} \frac{dE}{-\left(\frac{dE}{dx}\right)}.$$

Величина ионизационных потерь энергии на единицу длины пути описывается соотношением

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ион}} = \frac{4\pi e^4 z_1^2}{m_e v^2} ZNB,$$

где $z_1 e$ – заряд частицы, v – ее скорость, N – число атом в 1 см^3 поглотителя, Z – его атомный номер, m_e – масса электрона.

Из последней формулы видно, что ионизационные потери зависят от мате-

риала поглотителя и определяется концентрацией электронов в поглотителе ZN (влияние величины потенциала ионизации атомов поглотителя в коэффициенте торможения B практически несущественно).

Коэффициент торможения B в нерелятивистском диапазоне энергии есть логарифмическая функция скорости частицы, среднего потенциала ионизации атомов поглотителя и приведенной массы взаимодействующих частиц. Однако области нерелятивистских энергий влияние логарифмической функции B на ход зависимости ионизационных потерь от энергии мало, так что

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ион}} \sim \frac{1}{v^2}.$$

Отсюда следует, что пробег частицы есть функция ее кинетической энергии, поэтому измерения длин пробегов частиц позволяют определить их кинетические энергии.

Пробеги измеряются либо в единицах длины, либо в г/см^2 , причем $R[\text{г/см}^2] = R[\text{см}] \cdot \rho[\text{г/см}^3]$.

Учебное издание

Составители:

Александр Иванович Пинчук
Сергей Владимирович Чугунов

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к выполнению лабораторной работы

**ФИЗИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ОТ ИОНИЗИРУЩИХ
ИЗЛУЧЕНИЙ. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ БЕТА-ИЗЛУЧЕНИЯ
С ВЕЩЕСТВОМ**

по модулю «Радиационная безопасность»

Ответственный за выпуск: Пинчук А. И.
Редактор: Винник Н. С.
Компьютерная вёрстка: Сирота А. Р.
Корректор: Дударук С. А.

Подписано в печать 20.12.2024 г. Формат 60х84 ¹/₁₆. Бумага «Performer».
Гарнитура «Times New Roman». Усл. печ. л. 0,7. Уч. изд. л. 0,75. Заказ № 1269. Тираж 30 экз.
Отпечатано на ризографе учреждения образования «Брестский государственный
технический университет». 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1569 от 16.10.2017 г.

