

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.14

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЛГОЖИВУЩЕГО ИЗОТОПА КАЛИЯ

Цель работы: Экспериментальное определение периода полураспада  ${}_{19}\text{K}^{40}$ ; оценка  $\beta$ -активности исследуемого источника и человеческого организма.

Приборы и принадлежности: индикатор ионизирующих частиц, счетное устройство, стабилизированный источник питания, исследуемый источник – соль KCl.

#### ВВЕДЕНИЕ

В данной работе объектом исследования является один из самых распространенных естественных долгоживущих радиоактивных изотопов нашей планеты –  $\text{K}^{40}$ , период полураспада которого сравним со временем жизни Солнечной системы. Природный калий представляет собой смесь трех изотопов:  ${}_{19}\text{K}^{39}$  ( $\approx 93,1\%$ ),  ${}_{19}\text{K}^{40}$  ( $\approx 0,012\%$ ) и  ${}_{19}\text{K}^{41}$  ( $\approx 6,88\%$ ), из которых только  ${}_{19}\text{K}^{40}$  радиоактивен. Калий встречается в достаточно большом количестве не только в горных породах Земли и в почве, но и входит в состав тканей растений и животных. Относительное весовое содержание калия в теле человека составляет примерно 0,12-0,35%.  $\text{K}^{40}$  – единственный изотоп, который при поступлении через желудочно-кишечный тракт вносит значительный вклад во внутреннее облучение человека в течение всей его жизни.

Схема распада  ${}_{19}\text{K}^{40}$  представлена на рис.4.14.1.

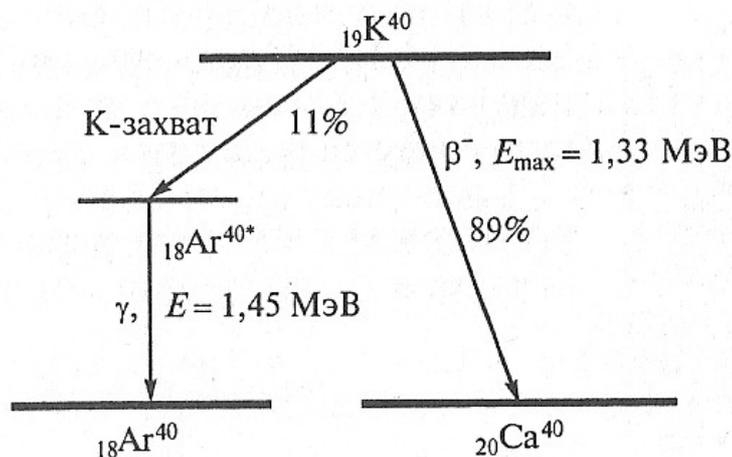
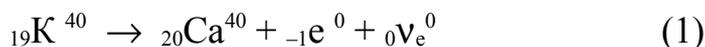


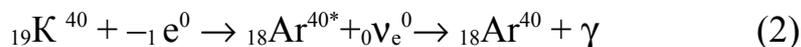
Рис. 4.14.1

В 89% случаев распада этот изотоп калия претерпевает  $\beta^-$ -распад (переход нуклона из состояния нейтрона в состояние протона) с образованием изотопа  ${}_{20}\text{Ca}^{40}$  в основном состоянии:



Максимальная кинетическая энергия испускаемых при этом  $\beta$ -частиц  $E_{\max}=1,33$  МэВ.

В 11% случаев ядро  ${}_{19}\text{K}^{40}$  распадается путем захвата орбитального электрона (К-захват, переход нуклона из состояния протона в состояние нейтрона) с образованием изотопа  ${}_{18}\text{Ar}^{40}$  в возбужденном состоянии. Ядро  ${}_{18}\text{Ar}^{40}$  переходит из возбужденного состояния в основное, испуская  $\gamma$ -кванты с энергией  $E=1,45$  МэВ:



Таким образом,  $\beta$ -распад ядра радиоактивного изотопа  ${}_{19}\text{K}^{40}$  сопровождается испусканием  $\beta$ -частиц, имеющих непрерывный спектр с максимальной энергией 1,33 МэВ, и моноэнергетического  $\gamma$ -излучения с энергией 1,45 МэВ.

Человек подвергается радиационному облучению двумя способами. Радиоактивные вещества могут находиться вне организма и облучать его снаружи; в этом случае говорят о внешнем облучении. В другом случае они могут оказаться в воздухе, пище или воде и попасть внутрь организма. Такой способ облучения называют внутренним.

В среднем примерно 2/3 эффективной эквивалентной дозы облучения, которую человек получает от естественных источников радиации, поступает от радиоактивных веществ, попавших в организм с пищей, водой или воздухом. Совсем небольшая часть этой дозы приходится на радиоактивные изотопы типа углерода-14 или трития, которые образуются под воздействием космической радиации. Все остальное поступает от источников земного происхождения. Достаточно большую дозу внутреннего облучения человек получает от нуклидов радиоактивных рядов урана-238 и тория-232 (радон и его дочерние продукты). Однако изотоп  ${}_{19}\text{K}^{40}$  также вносит существенный вклад во внутреннее облучение живых организмов. Калий можно встретить во всех тканях организма, хотя основная его масса сосредоточена в мышцах. Таким же образом будет распределена и введенная в организм радиоактивная форма калия. Образующиеся при распаде  ${}_{19}\text{K}^{40}$   $\beta$ -частицы имеют пробег в биологических тканях порядка 0,7 см, а  $\gamma$ -излучение свободно проходит сквозь ткани живого организма. Поскольку физический период полураспада  $\text{K}^{40}$  достаточно велик, а его запасы в организме постоянно пополняются за счет пищевых источников, то этот долгоживущий радиоактивный изотоп представляет собой один из основных естественных источников радиации, обуславливающий постоянное внутреннее  $\beta$ - и  $\gamma$ -облучение живых организмов в течение всей жизни. Концентрация калия (соответственно, и  $\text{K}^{40}$ ) в организме человека значительно зависит от возраста и других факторов. В среднем в год человек получает дозу облучения 0,3 мЗв (12,5% эффективной эквивалентной дозы облучения от

естественных источников) за счет этого радиоактивного изотопа, усваиваемого организмом вместе с нерадиоактивными изотопами калия, необходимыми для жизнедеятельности организма (поваренная соль, зерновые и бобовые культуры, пивные дрожжи, молочные продукты и т.д.).

Для долгоживущих изотопов не пригоден обычный способ определения периода полураспада по уменьшению активности препарата со временем (экспоненциальный закон), так как за время проведения эксперимента активность препарата практически не меняется. Для определения периода полураспада таких изотопов необходимо знать полную, то есть учитывающую все виды распадов, активность  $A$  препарата и число  $N$  радиоактивных атомов в нем:

$$A = \lambda N = \frac{\ln 2}{T} N = \frac{\ln 2}{T} N_0 V, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – постоянная радиоактивного распада;  $N_0$  – число радиоактивных атомов в единице объема;  $V$  – объем источника;  $T$  – период полураспада.

Пусть источник, представляющий собой кювету толщиной  $a$  с солью KCl, приставлен к окну торцевого счетчика  $\beta$ -частиц (см.рис.4.14.2.). Можно считать, что в окно счетчика попадают только те частицы, которые вылетели из источника, площадь основания которого равна площади окна счетчика:

$$S = d \cdot l.$$

Из слоя толщиной  $dX$ , находящемся на расстоянии  $X$  от окна счетчика, вылетит в направлении окна за 1 секунду  $dn$  электронов:

$$dn = \frac{1}{2} \cdot \frac{\ln 2}{T} N_0 \cdot S \cdot dX \cdot \varepsilon, \quad (4)$$

где  $\varepsilon$  – доля распадов  $K^{40}$ , происходящих путем  $\beta$ -распада.

При прохождении через слой вещества толщиной  $X$  плотность потока частиц убывает по закону:  $J = J_0 \cdot e^{-\alpha X}$ , где  $\alpha$  – линейный коэффициент поглощения излучения. Следовательно, из этих  $dn$   $\beta$ -частиц часть поглотится в кристаллах KCl на пути  $X$ , и окна счетчика достигнут только  $e^{-\alpha X} dn$  частиц. Проинтегрируем выражение  $e^{-\alpha X} dn$  по всей толщине источника. Поскольку толщина кюветы  $a$  много больше того расстояния, с которого еще долетают частицы до счетчика

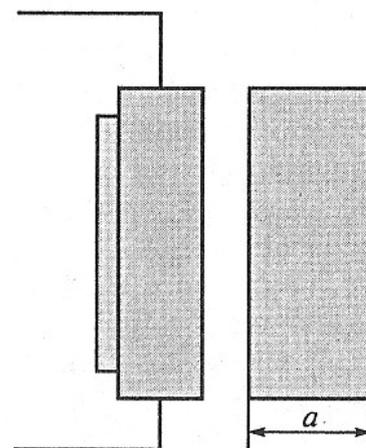


Рис. 4.14.2

( $a \gg \alpha^{-1}$ ), то можно считать  $a \sim \infty$  :

$$N^i = \int_0^{\infty} e^{-\alpha x} dx = \frac{\ln 2 \cdot N_0 \cdot S \cdot e}{2T \cdot \alpha}, \quad (5)$$

где  $N^*$  – полное число  $\beta$ -частиц, обусловленное распадом  $K^{40}$ , и достигающих окна счетчика за 1 секунду.

Однако счетчик имеет определенную эффективность  $\phi$ , то есть регистрирует лишь некоторую долю влетающих в него  $\beta$ -частиц (значение  $\phi$  указывается в паспорте установки) –  $\phi N^*$ . Кроме того, счетчик срабатывает при попадании в него как  $\beta$ -частиц, летящих от источника, так и частиц, обусловленных фоном. Фоновая скорость счета  $N_\phi$  при измерении  $\beta$ -излучения препарата обусловлена не только космическим излучением и радиоактивностью окружающей среды, но и  $\gamma$ -квантами, испускаемыми исследуемым препаратом.

Поэтому полное число частиц, регистрируемых счетчиком за единицу времени, определяется следующим выражением:

$$N^i = \phi N^* + N_\phi = \frac{\ln 2 \cdot N_0 \cdot S \cdot \phi \cdot e}{2T \cdot \alpha} + N_\phi. \quad (6)$$

Число радиоактивных атомов  $N_0$  в единице объема определяется соотношением:

$$N_0 = \frac{N_A \cdot m^o}{m_K \cdot V}, \quad (7)$$

где  $\mu_K$  – молярная масса  ${}_{19}K^{40}$ ;  $m^o$  – масса изотопа  ${}_{19}K^{40}$  в образце;  $V$  – объем образца.

Если  $f$  – доля  ${}_{19}K^{40}$  ( $f = 1,19 \times 10^{-4}$ ) в природном калии, общая масса которого  $M_K$ , то

$$m^o = f M_K = f \cdot \frac{M_{\text{aCl}}}{m_{\text{KCl}}} \cdot m_K, \quad (8)$$

где  $M_{\text{KCl}}$  – масса источника, содержащего чистую соль  $\text{KCl}$ , а  $\mu_{\text{KCl}}$  – молярная масса  $\text{KCl}$ .

Подставляя (7), (8) в (6), получаем:

$$T = \frac{\ln 2 \cdot N_A \cdot f \cdot I_{\text{KCl}} \cdot e \cdot S}{2(N^{**} - N_\phi) \cdot m_{\text{KCl}} \cdot \alpha \cdot V} \quad (9)$$

Часто линейный коэффициент поглощения  $\alpha$  выражают через слой половинного ослабления  $D\rho_{1/2}$ , то есть толщину слоя вещества, ослабляющего интенсивность излучения в 2 раза:

$$\alpha = \frac{\ln 2}{D\rho_{1/2}} \left( \frac{1}{\rho} \right). \quad (10)$$

Линейный коэффициент поглощения зависит от плотности  $\rho$  поглощающего вещества:  $\alpha = \alpha^* \rho$ , где  $\alpha^*$  – массовый коэффициент поглощения. Тогда величина слоя половинного ослабления (или поглощения) с учетом материала поглотителя будет рассчитываться по формуле:

$$\Delta \rho^{i/2} = \frac{\ln 2}{\alpha^i} = \frac{\rho \cdot \ln 2}{\alpha} = \rho \cdot \Delta \rho_{1/2} \left( \frac{z}{\text{см}^2} \right) \quad (11)$$

Подставив (11) в (9), получаем окончательную формулу для расчета периода полураспада долгоживущего изотопа  $K^{40}$ :

$$\dot{O} = \frac{N_A \cdot f \cdot j \cdot e \cdot S \cdot D \rho^{i/2}}{2(N^{**} - N_0) \cdot m_{\text{KCl}}} \quad (12)$$

Зная период полураспада  $T$ , можно по формуле (3) оценить активность источника. Для источника массой  $M$  активность равна:

$$A = \frac{\ln 2}{T} \cdot \frac{m^0 N_A}{m_K} \text{ (расп/с)} \quad (13)$$

Тогда  $\beta$ -активность образца будет рассчитываться по формуле:

$$A_\beta = A \cdot \varepsilon \text{ (расп/с)} \quad (14)$$

Единица измерения активности в системе СИ называется Беккерель (Бк),  $1 \text{ Бк} = 1 \text{ расп/с}$ . Активность источника выражают также в специальных (внесистемных) единицах КЮРИ:  $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ расп/с}$ . Таким образом можно записать:  $A(\text{Ки}) = A(\text{Бк}) / 3,7 \cdot 10^{10}$ .

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ.

Экспериментальная установка (рис.4.14.3.), состоит из индикатора ионизирующих частиц – счетчика Гейгера (1), питание на который подается от стабилизированного источника питания (2). Сигнал со счетчика поступает на вход счетного устройства ПСО-2 (3), где накапливается в течение заданного времени и фиксируется на жидкокристаллическом табло. В работе используется экологически безопасный радиоактивный источник (4) – чистая соль  $\text{KCl}$ , запрессованная в кювету.

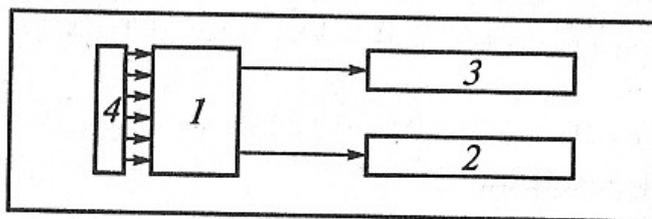


Рис. 4.14.3

## ИЗМЕРЕНИЯ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Задание 1. Экспериментальное определение периода полураспада изотопа  $^{19}\text{K}^{40}$ .

1. Подготовьте пересчетное устройство к проведению измерений.
2. Определите число срабатываний счетчика, обусловленное радиоактивным фоном. Для этого уберите блок с эталонным источником КСI подальше от окна счетчика. Измерьте количество импульсов, зарегистрированных счетчиком за 5 минут. Измерения повторите не менее 5 раз и найдите среднее значение фона  $N_{\text{ф. ср.}}$  (имп/с)
3. Установите блок с эталонным источником КСI напротив окна счетчика. Проведите измерения полного числа частиц  $N^{**}$ , регистрируемых счетчиком за 5 минут. Измерения повторите не менее 5 раз и найдите среднее значение  $N^{**\text{ ср.}}$  (имп/с)
4. По формуле (12) рассчитайте период полураспада изотопа  $^{19}\text{K}^{40}$ . Значение  $\Delta\rho_{1/2}^*$  примите равным  $78,5 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^2$ .

Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу 1.

ТАБЛИЦА 1.

№	$N_{\text{ф.}}$ (имп/с)	$N_{\text{ф. ср.}}$ (имп/с)	$N^{**}$ (имп/с)	$N^{**\text{ ср.}}$ (имп/с)	$T_{1/2}$ (с)	$T_{1/2}$ (лет)

Задание 2. Оценка  $\beta$ -активности исследуемого источника и организма человека

- 1) Используя формулу (14), рассчитайте  $\beta$ -активность исследуемого препарата. Выразите активность исследуемого препарата в Бк и Ки.
- 2) Определите  $\beta$ -активность изотопа  $^{19}\text{K}^{40}$ , содержащегося в Вашем организме, учитывая, что в организме человека калий составляет 0,2% от его общей массы.
- 3) Часто в качестве одной из характеристик радиоактивного источника используют понятие удельной активности источника. Удельной активностью источника  $A_m$  называется отношение активности препарата к его массе:  $A_m = A/m$  [Ки/кг]. Зная массу исследуемого источника, оцените его удельную активность.

- 4) Оцените величину *удельной  $\beta$ -активности* Вашего организма за счет распада  $^{19}\text{K}^{40}$ .
- 5) Оцените *мощность поглощенной дозы*, обусловленной  $\beta$ -активностью изотопа  $^{19}\text{K}^{40}$ , содержащегося в тканях человеческого организма. Среднюю энергию излучаемых  $\beta$ -частиц принять равной 0,6 МэВ.
- 6) Оцените *среднюю ожидаемую эффективную эквивалентную дозу облучения*, которую Вы получите за 70 лет жизни за счет присутствия в организме радиоактивного изотопа  $\text{K}^{40}$ . Сравните полученную величину с дозой облучения, которую человек в среднем получает за 70 лет жизни от всех естественных источников излучения.

### ВОПРОСЫ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Запишите закон радиоактивного распада. Поясните физический смысл постоянной распада и периода полураспада.
2. Что называется активностью радиоактивного препарата? Перечислите известные Вам единицы измерения активности.
3. Запишите уравнения реакций для распада ядер по схеме  $\beta^+$  и  $\beta^-$ -распада, K-захвата.
4. Какие особенности  $\beta$ -распада свидетельствуют об участии нейтрино в этом процессе?
5. Какие естественные радиоактивные изотопы ответственны за постоянное внутреннее облучение человеческого организма?
6. Какой вклад во внутреннее облучение человека вносит изотоп  $^{19}\text{K}^{40}$ ?
7. Какие факторы необходимо учитывать при оценке внутреннего облучения организма?
8. Определите концентрацию  $\text{K}^{40}$  в коровьем молоке, если на литр молока приходится 1.4 г естественного калия, и если он содержит 0,0119% радиоактивного  $\text{K}^{40}$ .