

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет

## **Взаимодействие $\beta$ -излучения с веществом**

Методические указания к лабораторной работе

*Электронный учебный материал*

Минск  $\diamond$  БНТУ  $\diamond$  2013

УДК 614.876(075.8)

ББК 51.26я7

***Авторы:***

Н.Н.Митькина

И.К.Султанова

***Рецензенты:***

И.А.Сатиков, директор МИДО, канд. физ.-мат. наук

П.Г.Кужир, зав. кафедрой физики БНТУ, канд. физ.-мат. наук

В методических указаниях рассмотрено взаимодействие  $\beta$ -излучения с веществом, особенности его измерения, а также методы защиты от  $\beta$ -излучения. Кратко обсуждается природа, свойства и источники  $\beta$ -излучения.

Белорусский национальный технический университет

Пр-т Независимости, 65, г. Минск, Республика Беларусь

Тел.(017)292-77-52 факс (017)292-91-37

E-mail:...

<http://www...>

Регистрационный № БНТУ/ФИТР47-43.2013

© БНТУ, 2013

© Митькина Н.Н., Султанова И.К., 2013

2013

## Содержание

Введение .....	4
$\beta$ -распад .....	4
Взаимодействие $\beta$ -частиц с веществом .....	7
Защита от $\beta$ -излучения .....	10
Методика приготовления проб для измерения на бета-радиометре .....	12
Бета-радиометр РУБ-91 .....	13
Органы управления бета-радиометра .....	14
Эсперимент .....	15
Контрольные вопросы .....	18
Список литературы .....	19

## Введение

Ионизирующее излучение, воздействуя на живой организм, вызывает в нем цепочку обратимых и необратимых изменений, которые приводят к опасным биологическим последствиям. Первичным этапом, инициирующим многообразные процессы, происходящие в биологическом объекте, являются ионизация и возбуждение атомов. Именно в этих физических актах взаимодействия происходит передача энергии ионизирующего излучения облучаемому объекту. В методических указаниях рассматривается природа  $\beta$ -излучения, его взаимодействие с веществом, способы защиты от внешних потоков  $\beta$ -излучения, а также особенности его измерения.

### Цель работы:

1. Изучить

- - взаимодействие  $\beta$ -частиц с веществом;
- - способы защиты от  $\beta$ -излучения;
- - принцип действия  $\beta$ -радиометра;
- - методику приготовления проб для проведения измерений  $\beta$ -излучения радионуклидов;

2. Измерить активность образцов по *Sr-90+Y-90* и *K-40*.

3. Рассчитать удельные и объемные активности образцов.

4. Решить задачу.

### Указания по технике безопасности.

1. **Включение лабораторной установки производится с разрешения преподавателя или инженера лаборатории.**

2. **В лабораторной работе используются очень хрупкие кюветы с порошками. Будьте осторожны!**

## 1. $\beta$ -распад

Устойчивость ядра определяется оптимальным соотношением протонов и нейтронов. Если нейтронов слишком много, они способны превращаться в протоны, а если протонов много, они способны превращаться в нейтроны. И в том, и в другом случае ядро превращается в другое ядро, образуется новый химический элемент. Этот процесс называется радиоактивным распадом и сопровождается

ся испусканием  $\beta$ -излучения.

$\beta$ -излучение это поток  $\beta$ -частиц.  $\beta$ -частицами называют два вида элементарных частиц: электроны  ${}_{-1}^0e$  и позитроны  ${}_{+1}^0e$ . Они имеют одинаковые характеристики: массу, величину заряда, спин и т.д., отличаясь лишь знаком электрического заряда. Источниками  $\beta$ -частиц являются радиоактивные ядра, которые испытывают  $\beta$ -распад.

$\beta$ -распад – самопроизвольное превращение ядра одного химического элемента в ядро другого химического элемента с тем же массовым числом  $A$  и с зарядовым числом, отличающимся от исходного на  $\Delta Z = \pm 1$ .

Периоды полураспада  $\beta$ -активных ядер лежат в широком интер-

*электронный или  $\beta^-$  - распад*, при котором из ядра вылетает электрон  ${}_{-1}^0e$  и антинейтрино  $\tilde{\nu}$  ( антинейтрино – элементарная незаряженная частица с массой покоя меньше, чем  $4 \cdot 10^{-4} m_e$ ) и образуется ядро с тем же массовым числом, но с увеличенным на единицу зарядовым числом ( $\Delta Z = +1$ ).

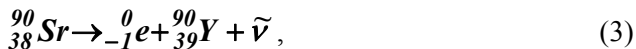
Электронный распад подчиняется закону смещения:



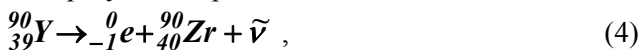
Электрон и антинейтрино возникают в ядре в процессе радиоактивного превращения одного из нейтронов  ${}^1_0 n$  в протон  ${}^1_1 p$



Примером этого вида распада является радиоактивное превращение  ${}^{90}_{38} Sr$  :



период полураспада  $Sr-90$  равен 29,1 года. Дочернее ядро иттрия-90 также является радиоактивным и тоже испытывает  $\beta^-$  - распад, в результате которого образуется цирконий:



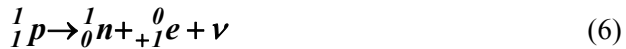
период полураспада  $Y-90$  равен 64 часа. Электронный распад испытывают все естественные радионуклиды и большинство искусственных радионуклидов.

**позитронный или  $\beta^+$ -распад**, при котором из ядра вылетают позитрон и нейтрино  $\nu$ , а новое ядро имеет зарядовое число на единицу меньше ( $\Delta Z = -1$ ).

Закон смещения для позитронного распада:



Позитрон и нейтрино возникают в результате превращения одного из протонов в нейтрон. Распад свободного протона невозможен энергетически, так как его масса меньше массы нейтрона. Внутри ядра такой процесс может идти за счет энергии ядра:



Вероятность этого процесса составляет доли процента. Позитронный распад испытывают некоторые искусственные радионуклиды.

**электронный захват** или **K-захват**, при котором ядро захватывает электроны из электронной оболочки и испускает нейтрино. При этом внутри ядра один протон превращается в нейтрон:



Электронный захват испытывает радиоактивный изотоп калия **K-40**, в результате чего образуется кальций:



Период полураспада **K-40** равен  $1,26 \cdot 10^9$  лет. Наиболее вероят-

При распаде некоторых  $\beta$ -активных ядер наблюдаются одновременно несколько конкурирующих процессов. Например, при распаде радионуклида **K-40**, доля которого в природном калии составляет 0,0118 %, наблюдается конкуренция  $\beta^-$ -распада и K-захвата.

Экспериментальное исследование энергии, выделяющейся при  $\beta$ -распаде привело к открытию нейтрино. Калориметрические ис-

следования показали, что энергия  $\beta$ -частиц меньше максимальной энергии, равной разности между массой покоя материнского ядра и суммой масс электрона и дочернего ядра. Следовательно, эти распады протекают с кажущимся нарушением закона сохранения энергии. Чтобы объяснить исчезновение энергии В.Паули высказал в 1932 году предположение, что при  $\beta$ -распаде вместе с электроном испускается еще одна частица, которая уносит часть энергии. Э.Ферми предложил назвать эту частицу нейтрино (маленький нейтрон). Экспериментальное доказательство существования нейтрино было получено только в 1956 году.

Так как при электронном и позитронном распаде из ядра вылетают две частицы, а распределение между ними общей энергии, выделяющейся при распаде, происходит статистически, то кинетическая энергия  $\beta$ -частицы может изменяться от нуля до некоторого предельного значения  $E_{max}^{\beta}$ , характерного для рассматриваемого радионуклида. Значения максимальной энергии изменяются от 18 кэВ (для  ${}^3_1H$ ) до 16,6 МэВ (для  ${}^{12}_7N$ ). Средняя энергия  $\beta$ -частиц  $E_{cp}^{\beta}$  это энергия, которую имеет наибольшее число  $\beta$ -частиц, испускающихся при распаде данных радионуклидов. Таким образом спектр  $\beta$ -излучения – сплошной.

## 2. Взаимодействие $\beta$ -частиц с веществом

Проходя через вещество,  $\beta$ -частица взаимодействует с ядрами и электронами атомов вещества. При каждом столкновении с ядрами или электронами среды  $\beta$ -частица может значительно изменять направление движения, поэтому  $\beta$ -частицы движутся в веществе по ломаной линии и им не свойственна определенная глубина проникновения в вещество.

Процессы прохождения через вещество позитронов и электронов примерно одинаковы. В дальнейшем для определенности рассматривается торможение электронов в веществе. Это оправдано еще и тем, что подавляющее большинство встречающихся в практике радиационного контроля  $\beta$ -активных ядер испытывает электронный распад.

При прохождении через вещество в результате взаимодействия с ядрами и атомными электронами  $\beta$ -частицы постепенно теряют свою энергию. Потери энергии  $\beta$ -частиц складываются из ионизационных и радиационных потерь.

**Ионизационные потери** возникают вследствие неупругого взаимодействия  $\beta$ -частицы с атомным электроном. Электрон, получив энергию, может либо покинуть атом (т.е. атом превращается в положительно заряженный ион), либо атом переходит в возбужденное состояние (т.е. атом приобретает «лишнюю» энергию).

**Радиационные потери** обусловлены испусканием  $\beta$ -частицей тормозного рентгеновского излучения. Если любая заряженная частица движется в электрическом поле, то на нее действует сила. Следовательно, частица движется с ускорением. Из электродинамики известно, что движущаяся с ускорением заряженная частица испускает электромагнитное излучение. Поэтому, если  $\beta$ -частицы пролетают вблизи ядра атома, они начинают испускать тормозное рентгеновское излучение. Установлено, что интенсивность тормозного рентгеновского излучения прямо пропорциональна квадрату зарядового числа атомного ядра, в поле которого движется частица, и обратно пропорциональна массе частицы:

$$I \approx \frac{Z^2}{m_e} \quad (9)$$

По своему вкладу в потери энергии  $\beta$ -частиц радиационные потери примерно на три-четыре порядка меньше, чем ионизационные потери. Однако радиационные потери играют огромную роль в обнаружении и определении активности радионуклидов,  $\beta$ -распад которых не сопровождается испусканием  $\gamma$ -излучения. Например, обнаружение чистого  $\beta$ -излучателя стронция-90, попавшего внутрь организма человека, осуществляется по измерению тормозного рентгеновского излучения с помощью гамма-спектрометров излучения человека (СИЧ). Поскольку пробеги  $\beta$ -частиц в биологической ткани невелики,  $\beta$ -излучение не выходит из тела человека. Рентгеновское излучение пронизывает тело человека насквозь и его можно измерить. А затем рассчитать активность человека по **Sr-90**.

Количественной мерой радиоактивности вещества является активность. **Активность** – отношение числа радиоактивных рас-



падов  $dN'$ , происшедших в радиоактивном препарате, к промежутку времени  $dt$ , за который они произошли:

$$A = \frac{dN'}{dt} \quad (10)$$

$$A = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} N = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot \frac{m}{M} \cdot N_A, \quad (11)$$

где  $T_{1/2}$  - период полураспада,  $N$  - количество ядер радионуклида,

$M$  - молярная масса,  $m$  - масса радионуклида,  $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$  *моль*<sup>-1</sup> - число Авогадро.

Единицы измерения активности:

СИ	Внесистемные единицы
Бк (Беккерель)	Ки (Кюри)
1 Бк = $2,7 \cdot 10^{-11}$ Ки	1 Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк

Активность радионуклидов в препарате равна 1 Бк, если в препарате происходит 1 радиоактивный распад за 1 секунду. 1 Ки - активность одного грамма радия.

Как видно из формулы (11) активность препарата зависит от количества радионуклидов, и, следовательно, от количества препарата, поэтому на практике используются следующие величины:

$$\text{Удельная активность } A_m = \frac{A}{m}, \text{ Бк/кг} \quad (12)$$

где  $m$  - масса вещества.

$$\text{Объемная активность } A_V = \frac{A}{V}, \text{ Бк/м}^3, \text{ Бк/л} \quad (13)$$

где  $V$  - объем вещества.

### 3. Защита от $\beta$ -излучения

Важнейшей величиной, характеризующей распространение частиц в веществе, является *пробег  $R$*  - смещение в пространстве по прямой линии от точки рождения до точки остановки или поглощения, независимо от того, по какой траектории двигалась частица. Пробег  $R$  измеряется в единицах длины (мм, см). Поскольку энергия  $\beta$ -частиц, испускаемых данными радионуклидами, изменяется от нуля до максимальной величины  $E_{max}^{\beta}$ , то пробеги  $\beta$ -частиц от одного и того же радионуклида неодинаковы. В связи с этим понятие «пробег  $\beta$ -частицы, испущенной данным радионуклидом» не имеет физического смысла. Кроме того, из-за извилистости траектории глубина проникновения  $\beta$ -частиц в вещество меньше, чем средняя длина пробега. Поэтому для  $\beta$ -частицы вводится понятие максимального пробега.

*Максимальный пробег  $\beta$ -частиц  $R_{max}^{\beta}$*  - минимальная толщина слоя вещества, при которой ни один из электронов, падающих нормально на слой, из него не вылетает. В литературе обычно приводятся эмпирические формулы для пробегов моноэнергетических электронов. Величины максимальных пробегов моноэнергетических электронов в биологической ткани, воздухе и алюминии для значений энергий, характерных для бета-частиц, испускаемых радионуклидами, приведены в табл. I.

Таблица 1. Максимальный пробег моноэнергетических электронов в различных веществах

Максимальная энергия $\beta$ -частиц, МэВ	Воздух, см	Биологическая ткань, мм	Алюминий, мм
0,01	0,13	0,002	0,0006
0,05	2,91	0,046	0,0144
0,1	10,1	0,158	0,050
0,5	119	1,87	0,593
1,0	306	4,80	1,52

1,5	494	7,80	2,47
2,0	710	11,1	3,51
2,5	910	14,3	4,52

Для грубых оценок максимальных пробегов  $\beta$ -частиц в алюминии и воздухе можно использовать следующие формулы:

$$R_{max}^{\beta} \approx 450 E_{max}^{\beta} \quad \text{для воздуха} \quad (10)$$

$$R_{max}^{\beta} \approx 0,25 E_{max}^{\beta} \quad \text{для алюминия} \quad (11)$$

В этих формулах энергия  $\beta$ -частиц ставится в МэВ и длина пробега получается в см.

Пробег частиц имеет важное значение для определения оптимальной толщины пробы измеряемого образца и толщины защитных экранов.

Используя данные о максимальных пробегах  $\beta$ -частиц, нетрудно рассчитать толщину защитных экранов, предохраняющую человека от воздействия внешних потоков  $\beta$ -излучения. Очевидно, что эта толщина должна быть больше максимального пробега  $\beta$ -частиц. Материал, выбираемый для защитных экранов, должен быть легким (алюминий, органическое стекло), так как в веществе в результате взаимодействия ядер атомов с  $\beta$ -частицами возникает тормозное рентгеновское излучение, которое является проникающим. Интенсивность рентгеновского излучения прямо пропорциональна квадрату зарядового числа атомного ядра тормозящего вещества.

Максимальная энергия бета-частиц большинства "чернобыльских" радионуклидов не превышает 2 МэВ. Соответственно в воздухе их пробеги не превышают 10м, в биологической ткани - 10 см, в алюминии - 5 мм. В значительной мере  $\beta$ -излучение этих радионуклидов задерживается одеждой, а если и достигает тела, то проникает практически на глубину всего лишь нескольких миллиметров. Достаточно знать о наличии  $\beta$ -излучения, чтобы средствами индивидуальной защиты предотвратить попадание радионуклидов внутрь организма.

Наибольшую опасность внешние потоки  $\beta$ -частиц представляют для хрусталика глаз. Если возможно облучение  $\beta$ -активными радионуклидами, для которых  $E_{max}^{\beta} \geq 3,5 \text{ МэВ}$ , для защиты глаз

необходимо использовать очки из органического стекла или прозрачные плексигласовые щитки. Для защиты кожи рук рекомендуется применять защитные перчатки.

#### 4. Методика приготовления проб для измерения на бета-радиометре

Пробег  $\beta$ -частиц имеет важное значение для определения оптимальной толщины пробы измеряемого образца.  $\beta$ -частицы легко поглощаются слоем конденсированного вещества миллиметровой толщины. Поэтому в исследуемой пробе фактически излучает в окружающую среду только тонкий поверхностный слой пробы, которую необходимо специально готовить. Для подготовки проб для измерения на бета-радиометре используют метод концентрирования радиоактивного стронция.

Пробы воды концентрируют различными способами: выпариванием, осаждением и ионным обменом.

Пробу почвы взвешивают целиком с растительным покровом, высушивают до воздушно-сухого состояния и прокаливают целиком при температуре 550°C в течение 6-8 часов до полного удаления органического вещества (периодически пробу вынимают из печи и перемешивают). Прокаленную пробу взвешивают.

Отбирают 3 пробы массой до 100 г каждая и на радиометре РУБ-91 измеряют их  $\beta$ -радиоактивность. Проба считается хорошо гомогенизированной, если результаты измерений не различаются более, чем в 1,5-2 раза от среднего значения. Если различия превышают указанную величину, то повторяют перемешивание. Для радиометрического анализа отбирают среднюю пробу.

Пробу растительности и продуктов питания растительного происхождения взвешивают, измельчают ножом или на мясорубке, помещают в сушильный шкаф и высушивают при температуре 100-120°C. Сухую пробу обугливают на электрической плитке и озоляют в муфельной печи при температуре 600-700°C.

Мясо и мышцы рыбы отделяются от костей, нарезаются мелкими кусками, высушиваются под инфракрасной лампой, обугливаются на электроплитке и озоляют при температуре 600-700°C.

Свежее молоко выпаривают в широкой эмалированной или алюминиевой кастрюле.

Для любого вида продукции объем пробы, размещенной в измерительной кювете, должен соответствовать ее объему -  $30 \text{ см}^3$ , отличаясь от него не более, чем на  $\pm 10\%$ .

## 5. Бета-радиометр РУБ-91

Бета-радиометр РУБ-91 "Адани" предназначен для измерения удельной (объемной) активности стронция-90 в природных объектах и продуктах питания.

Бета-радиометр позволяет проводить измерения в твердых и сыпучих образцах, сухих и сублимированных продуктах питания, а также пробах почв на фоне радионуклидов техногенного происхождения, таких как цезий-137, рутений-106, церий-144 и естественного радионуклида калия-40.

Принцип действия бета-радиометра основан на анализе амплитудного распределения импульсов, возникающих в сцинтилляционном детекторе при попадании в него  $\beta$ -частиц. Вычисление активности исследуемого образца производится на основе анализа распределения импульсов по амплитуде. Упрощенная структурная схема бета-радиометра приведена на рисунке.

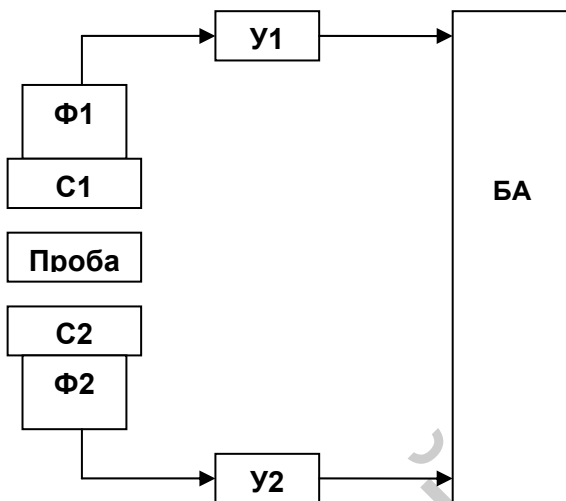


Рис. Упрощенная структурная схема бета-радиометра.

$\beta$ -частица, испускаемая пробой, вызывает вспышку в одном из сцинтилляторов С1 или С2. Вспышки, попадая на один из фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) Ф1 или Ф2, преобразуются в электрические импульсы. Импульсы тока с выходов ФЭУ через усилители У1 и У2 поступают на блок анализатора БА.

## 6. Органы управления бета-радиометра

### 6.1. Блок анализатора.

Кнопка «**СЕТЬ**» служит для включения и выключения прибора.

Кнопка «**СБРОС**» служит для отмены ошибочной команды и приведения радиометра в исходное состояние.

Кнопки блока «**РЕЖИМ ИНДИКАЦИИ**» предназначены для вывода на цифровое табло количественных характеристик активности измеряемой пробы.

Кнопки « $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ » и « $^{40}\text{K}$ » используются для вы-

вода на цифровое табло активности пробы соответствующих радионуклидов;

Кнопка «**ПОГРЕШНОСТЬ**» служит для вывода на цифровое табло погрешности определения активности радионуклида в пробе.

Кнопка «**ФОН**» включает режим измерения фона.

Кнопки «**ВРЕМЯ ИЗМЕРЕНИЯ** · 10<sup>3</sup> » служат для задания вре-


2 4


Кнопки «**ПЛОТНОСТЬ**, г · см<sup>-3</sup> » предназначены для задания

Выполнение команды при нажатии любой из кнопок подтверждается звуковым сигналом. При этом загорается соответствующий этой кнопке светодиод.

Светодиоды «**Бк/пр**» и «**кБк/пр**», расположенные на цифровом табло, служат для индикации единицы измерения активности исследуемой пробы.

## 6.2. Блок детекторов.


Кнопка «  » служит для включения и выключения блока детекторов.

Кнопка «  » предназначена для включения высоковольтных источников питания фотоумножителей.

## 7. Эксперимент

Нажмите кнопки «**СЕТЬ**» на блоке детекторов и блоке анализатора;


- нажмите кнопку «**СБРОС**» блока анализатора;
- выдержите бета-радиометр включенным в течение 2-х минут.

Выход на рабочий режим бета-радиометра сопровождается звуковым сигналом и высвечиванием «**0**» во всех разрядах табло блока анализатора и загоранием светодиода над кнопкой «  » блока

детекторов.

### Задание 1. Измерение фона.

1. Задвиньте столик блока анализатора до упора и закрепите его винтом;

2. Нажмите кнопку «СБРОС»; выдержите бета-радиометр включенным в течение 2-х минут. Выход на рабочий режим бета-радиометра сопровождается звуковым сигналом и высвечиванием «0» во всех разрядах табло блока анализатора и загоранием светодиода над кнопкой  блока детекторов.

3. Нажмите кнопку «ФОН», при этом над кнопкой загорится светодиод и прозвучит звуковой сигнал;

4. Нажмите кнопку «ВРЕМЯ ИЗМЕРЕНИЯ · 10<sup>3</sup>» - «0,5». В

### Задание 2. Измерение активности пробы № 1.

1. Установите кювету №1 на выдвижной столик блока анализатора, задвинув столик до упора и закрепив его винтом.

**ВНИМАНИЕ! Запрещается устанавливать кювету с пробой внутрь блока детектора без приклеенной крышки!**

2. Проконтролируйте, чтобы над кнопкой «ФОН» не горел светодиод, в противном случае повторно нажмите кнопку «ФОН» для его выключения;

3. Нажмите кнопку «СБРОС»;

4. Нажмите кнопку, соответствующую виду пробы с определенной

плотностью (плотность пробы определяется по формуле)

$$\rho = m / V, \quad (14)$$

где  $m$  – масса пробы в граммах,  $V$  – объем измерительной кюветы, равный 30 см<sup>3</sup>.

5. Нажмите кнопку «  на блоке детекторов;



6. Нажмите кнопку «**ВРЕМЯ ИЗМЕРЕНИЯ**·10<sup>3</sup>» - «0,5». Над

<sup>40</sup>К

<sup>90</sup>Sr+<sup>90</sup>Y

7. Для индикации величины абсолютной погрешности  $\Delta A$  (Бк/пр) нажмите кнопку «**ПОГРЕШНОСТЬ**». Величину относительной погрешности измерения определите по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\Delta A}{A} \cdot 100\% \quad (15)$$

A - активность пробы в Бк/пр. Если полученная величина относительной погрешности больше 35%, то для повышения точности следует увеличить время измерения. Данные занесите в табл. 2.

8. Аналогичные измерения проведите для всех образцов, указанных преподавателем. **Внимание! При смене образца не забывайте нажимать кнопку «СБРОС».**

Таблица 2.

№ пробы	Активность пробы, A, Бк/пр.		Погрешность, $\Delta A$ , Бк/пр.		Относительная погрешность, $\varepsilon$	
	<sup>90</sup> Sr+ <sup>90</sup> Y	<sup>40</sup> К	<sup>90</sup> Sr+ <sup>90</sup> Y	<sup>40</sup> К	<sup>90</sup> Sr+ <sup>90</sup> Y	<sup>40</sup> К
1						
2						

### Задание 3. Расчет удельной и объемной активности проб.

Используя данные таблицы 2, рассчитайте удельную активность по формуле (12) и объемную активность по формуле (13), объем пробы при полном заполнении измерительной кюветы равен 0,03 л.

Данные расчета занесите в табл.3.

Таблица 3.

№ пробы	Масса пробы, кг	Объем пробы, л	Удельная активность, $A_m$ , Бк/кг		Объемная активность, $A_v$ , Бк/л	
			$^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$	$^{40}\text{K}$	$^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$	$^{40}\text{K}$
1						
2						

**Задание 4.** Решите задачу по выбору преподавателя.

Задача 1. Определите годовую эквивалентную дозу внутреннего облучения легких естественным радионуклидом калия-40.

Удельная активность легких по К-40  $A_m=2,08 \cdot 10^{-9}$  Ки/кг. В каждом акте распада К-40 поглощается энергия 0,47 МэВ. Период полураспада К-40 равен  $T_{1/2}=1,26 \cdot 10^9$  лет.

Задача 2. По измеренной активности рассчитайте массу радионуклидов в исследованных образцах.

### Контрольные вопросы

1. Природа  $\beta$ -излучения.
2. Законы смещения при  $\beta$ -распаде (для всех видов распада). Взаимопревращения протонов и нейтронов.
3. Ионизационные и радиационные потери  $\beta$ -излучения.
4. Пробег частицы в веществе. Максимальный пробег  $\beta$ -частиц.
5. Способы защиты от внешнего  $\beta$ -излучения.
6. Активность, объемная и удельная активность. Единицы измерения.
7. Принцип действия  $\beta$ -радиометра.
8. Методика приготовления проб для измерения  $\beta$ -излучения.

## Список литературы

1. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика: в 3 т. Санкт-Пб, М., Лань, 2008. – Т.1: Физика атомного ядра -2008. -383 с.
2. Кужир П.Г., Сатиков И.А., Трофименко Е.Е. Радиационная безопасность: Учебное пособие – Минск: НПООО «Пион», 1999. – 279 с.
3. Защита от ионизирующих излучений: в 2 т./ под ред. Н.Г. Гусева – М., Энергоатомиздат, 1989. – Т.1: Физические основы защиты от излучений – 1989. – 509 с.