

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**  
Учреждение образования  
**«БРЕСТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**Кафедра физики**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
к лабораторной работе Р–8  
**КОМБИНИРОВАННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ**  
по дисциплине  
**«Радиационная безопасность»**  
для студентов технических и экономических специальностей  
дневной формы обучения

**Брест 2010**

УДК 614. 876 (075.8)

Методические указания предназначены для студентов технических и экономических специальностей дневной формы обучения при изучении дисциплины «Радиационная безопасность». Содержат теоретические сведения, задания для самостоятельной работы, методику комбинированных измерений ионизирующих излучений, рекомендуемую литературу. Методические указания могут использоваться при выполнении лабораторных работ, а также для самостоятельной работы студентов.

Составители: А.И. Пинчук, к. ф.-м. н., доцент  
Т.Л. Кушнер, к. ф.-м. н., доцент  
М.И.Швец, ассистент

Рецензент: Костко В.С., к. ф.-м. н., доцент кафедры общей физики Брестского государственного университета им. А.С. Пушкина

## УКАЗАНИЯ МЕР БЕЗОПАСНОСТИ

- при измерении величины мощности эквивалентной дозы гамма-излучения, плотности потока бета-излучения с загрязненных поверхностей, отборе проб, измерении удельной активности радионуклидов в пробах и метрологической поверке прибора необходимо соблюдать «Нормы радиационной безопасности (НРБ-2000)» и «Основные санитарные правила (ОСП) обеспечения радиационной безопасности»;
- при работе со снятой крышкой-фильтром прибора РКСБ-104 соблюдайте осторожность и не повредите пленочные фильтры газоразрядных счетчиков, т.к. во включенном состоянии счетчики находятся под высоким напряжением (порядка 400 В);
- в ходе выполнения лабораторной работы избегайте падения верхней заслонки свинцового домика и прибора РКСБ-104.

**1. Цель работы:** измерение плотности потока бета-излучения с поверхности, расчет удельной активности радионуклидов цезия ( $Cs-137$ ) и калия ( $K-40$ ) в пробах.

**2. Приборы и принадлежности:** комбинированный прибор для измерения ионизирующих излучений РКСБ-104-01, выносной блок детектирования БДУС-001, кюветы с исследуемыми пробами.

### 3. Описание экспериментальной установки

Прибор РКСБ-104-01 (общий вид показан на рисунке 1) представляет собой прибор РКСБ-104, дополненный комплектом блока детектирования БДУС-001. РКСБ-104 состоит из корпуса (1) и крышки (2), скрепленных между собой. К крышке крепятся крышка отсека питания (3) и крышка-фильтр (4). На лицевой панели имеются окно для индикатора и три тумблера – для включения прибора и выбора режима его работы (S1, S2 и S3). Под крышку-фильтр (4) выведены движки кодового переключателя S4, с помощью которого можно выбрать вид измерения (мощности полевой эквивалентной дозы, плотности потока бета-излучения с поверхности, удельной активности радионуклида K-40 и Cs-137 в пробах), а также подключить внешний блок детектирования излучений. В верхней части крышки (2) имеется окно (5), в которое выведен разъем для подключения внешнего блока детектирования.

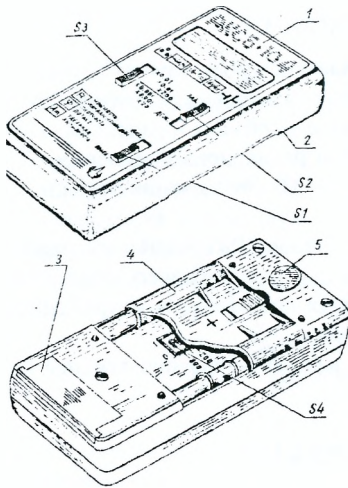


Рисунок 1 – Общий вид прибора РКСБ-104

Комплект блока детектирования состоит из свинцового домика (рис. 2), внутри которого находится внешний блок детектирования БДУС-001, а также футляра с кюветами. Свинцовый домик представляет собой прямоугольный контейнер с толщиной стенок не менее 1 см. В передней части домика находится дверка (2), через которую производится установка блока детектирования (3). В нижней части внутренней поверхности дверки имеется паз (4) для укладки кабеля. Верхняя заслонка домика (5) смещается в горизонтальном направлении и обеспечивает доступ к рабочему отсеку блока детектирования.

Под открывающейся крышкой свинцового домика между двумя рабочими поверхностями счетчиков имеется отсек. В отсеке, в направляющих пазах, размещенных в непосредственной близости от рабочих поверхностей счетчиков, установлены две съемные рамки с защитной пленкой толщиной 10 мкм. Рабочая кювета с исследуемыми пробами устанавливаются в центральные направляющие пазы.

#### 4. Подготовка прибора к работе

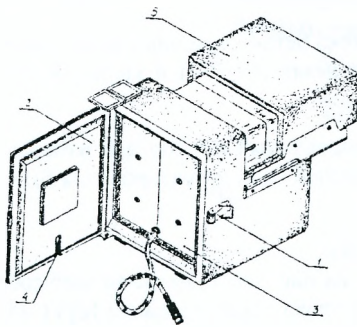


Рисунок 2 – Общий вид блока детектирования БДУС-001 в свинцовом домике

4.2. При проведении измерений загрязненности поверхностей бета-излучающими радионуклидами движки кодового переключателя S4 под крышкой-фильтром должны находиться в положениях, показанных на рисунке 3.

4.1. При измерениях без внешнего блока детектирования переведите тумблер S1 в верхнее положение «ВКЛ». При измерениях с внешним блоком детектирования присоедините блок детектирования кабелем с соединительной вилкой к прибору РКСБ-104-01 через окно (5), в которое выведен разъем для подключения блока (см. рисунок 1).

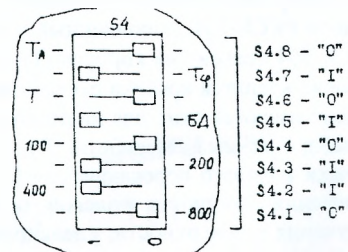


Рисунок 3 – Положения движков при проведении измерений плотности потока бета-частиц с поверхности

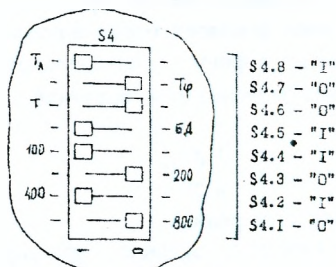


Рисунок 4 – Положение движков при измерении удельной активности без подключения внешнего блока детектирования

## 5. Проведение измерений

5.1. В качестве отсчета показания прибора принимается цифровая величина, являющаяся значащей частью 4-разрядного числа, устанавливающегося на табло после окончания измерения (в этот момент прибор выдает прерывистый звуковой сигнал).

Например:

- На табло индицируется число 0018; показание прибора – 18;
- На табло индицируется число 1850; показание прибора – 1850.

Длительность цикла измерения зависит от измеряемой величины и поддиапазона измерения.

5.2. Для получения результата измерения конкретной физической величины среднее арифметическое нескольких отсчетов показаний надо умножить на пересчетный коэффициент, указанный для каждой измеряемой величины (см. расчетные формулы ниже). Результаты получаются в единицах измерений, указанных на панели прибора РКСБ-104 под табло индикатора.

## 6. Задания для самостоятельной работы

6.1. *Измерение загрязненностей поверхностей бета-излучающими радионуклидами*

6.1.1. Переведите движки кодового переключателя S4 в требуемые положения (см. рисунок 3). Переведите тумблеры S2 и S3 в верхние положения. Согласуйте выбор исследуемой поверхности с преподавателем.

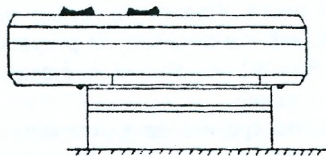


Рисунок 5 – Положение прибора при определении фонового показания в случае измерения плотности потока бета-частиц

4.3. При проведении измерений удельной активности радионуклида K-40 и Cs-137 без подключения внешнего блока детектирования движки кодового переключателя S4 под крышкой-фильтром должны находиться в положениях, показанных на рисунке 4.

4.4. При проведении измерений удельной активности с подключенным внешним блоком детектирования все движки кодового переключателя S4 под крышкой-фильтром должны находиться в крайнем правом положении.

6.1.2. Измерьте фоновое показание прибора одним из двух способов (выбор способа измерения согласуйте с преподавателем). 1 способ: поднесите прибор к исследуемой поверхности, поместив между ними пластмассовую упаковку прибора (рис. 5). 2 способ: удалите при-

бор от этой поверхности на расстояние 110-120 см. Включите прибор тумблером S1, установив его в положение «ВКЛ». Снимите фоновое показание прибора  $N_{\Phi}^{\text{ф}}$ , соответствующее внешнему радиационному фону гамма-излучения. Опыт повторите не менее 5 раз. Найдите среднее значение этой величины по формуле:

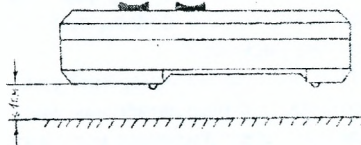


Рисунок 6 – Положение прибора при определении показания в случае измерения плотности потока бета-частиц

$$\bar{N}_{\Phi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i^{\text{ф}},$$

где  $n$  – число измерений.

**6.1.3.** Снимите заднюю крышкуче-фильтр и поместите прибор над исследуемой поверхностью на расстояние не более 1 см (рис. 6). Снимите показания прибора со снятой крышкуче-фильтром  $N_i^{\text{изм}}$ , которое соответствует внешнему радиационному фону гамма-излучения и потоку бета-частиц с исследуемой поверхности. Опыт повторите не менее 5 раз. Найдите среднее значение этой величины по формуле:

$$\bar{N}_{\text{изм}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i^{\text{изм}}.$$

**6.1.4.** Определите величину загрязненности поверхности бета-излучающими радионуклидами, которая характеризуется величиной плотности потока бета-излучения с поверхности ( $\varphi$ ,  $1/(\text{с}\cdot\text{см}^2)$ ), по формуле:

$$\varphi = K_1 (\bar{N}_{\text{изм}} - \bar{N}_{\Phi}),$$

где  $K_1$  – пересчетный коэффициент, равный 0,01.

**6.1.5. Дополнительное задание (по указанию преподавателя).** Если расчет показал, что величина  $\varphi \leq 10$   $1/(\text{с}\cdot\text{см}^2)$ , то для получения более точного результата измерений, необходимо повторить измерения при нижнем положении тумблера S3. Положения остальных органов управления прибора не изменяются. В этом случае разность показаний ( $\bar{N}_{\text{изм}} - \bar{N}_{\Phi}$ ) следует умножить на коэффициент  $K_1 = 0,001$ .

**6.2. Измерение удельной активности радионуклида K-40 и Cs-137 без подключения внешнего блока детектирования.**

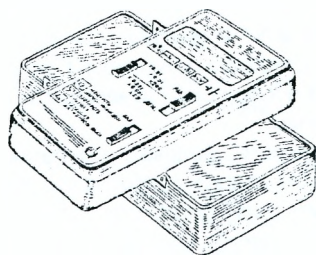


Рисунок 7 – Положение прибора при определении фонового показания в случае измерения удельной активности

**6.2.1.** Переведите движки кодового переключателя в требуемые положения (см. рисунок 4). Поместите заднюю крышкуче-фильтр на ее место. Установите прибор на его упаковку, как это показано на рисунке 7. Тумблеры S3 и S2 необходимо поставить в верхнее положение.

**6.2.2.** Найдите среднее арифметическое фоновых показаний прибора ( $\bar{N}_{\Phi}$ ) (см. формулу в пункте 6.1.2).

**6.2.3.** Заполните упаковку до метки-буртика исследуемой пробой (в полиэтиле-



новом пакете). Проведя необходимое количество циклов измерений, найдите среднее арифметическое значение показаний прибора ( $\bar{N}_{изм}$ ) (см. формулу в пункте 6.1.3).

**6.2.4.** Рассчитайте величину удельной активности радионуклидов К-40 и Cs-137 в пробах по формуле:

$$A_m = K_2 \frac{150}{m_{пробы}} (\bar{N}_{изм} - \bar{N}_ф), \text{ (Бк/кг)},$$

где  $K_2$  – пересчетный коэффициент, равный 20,  $m_{пробы}$  – масса пробы в граммах.

**6.2.5.** Переведите полученное значение удельной активности радионуклидов К-40 и Cs-137 из Бк/кг в Ки/кг (кюри на килограмм), используя следующее соотношение  $1 \text{ Бк} = 2,7 \cdot 10^{-11} \text{ Ки}$ .

**6.2.6.** При получении результата меньше  $2,0 \cdot 10^3 \text{ Бк/кг}$  ( $5,4 \cdot 10^{-8} \text{ Ки/кг}$ ), а также во всех случаях, когда имеется возможность использовать комплект внешнего блока детектирования, измерения следует проводить с этим блоком.

**6.3.** Измерение удельной активности радионуклида К-40 и Cs-137 с подключенным внешним блоком детектирования.

**6.3.1.** Подготовьте прибор к работе с внешним блоком детектирования БДУС-001. Переведите движки кодового переключателя S4 в крайнее правое положение.

**6.3.2.** Установите пустую кювету в отсек блока детектирования, для чего:

- а) сместите верхнюю заслонку свинцового домика;
- б) поворотом против часовой стрелки откройте крышку блока детектирования;
- в) опустите в направляющие отсека блока детектирования кювету;
- г) сместите до упора в обратном направлении верхнюю заслонку свинцового домика.

**6.3.3.** Включите прибор и найдите среднее значение фоновых показаний  $\bar{N}_ф$  (см. формулу в пункте 6.1.2).

**6.3.4.** Извлеките пустую кювету из блока детектирования. Затем установите туда кювету с исследуемой пробой. Произведите необходимое количество циклов измерений и найдите среднее арифметическое значение показаний прибора ( $\bar{N}_{изм}$ ) (см. формулу в пункте 6.1.3).

**6.3.5.** Рассчитайте удельную активность радионуклида К-40 и Cs-137 по формуле:

$$A_m = K_3 \frac{70}{m_{проба}} (\bar{N}_{изм} - \bar{N}_ф), \text{ (Бк/кг)},$$

где  $K_3 = 40 \text{ Бк/кг}$  – пересчетный коэффициент при верхнем положении тумбл. S3,  $K_3 = 4 \text{ Бк/кг}$  – при измерениях в нижнем положении тумбл. S3,  $m_{проба}$  – масса пробы в граммах.

**6.3.6.** Переведите полученное значение удельной активности радионуклидов К-40 и Cs-137 из Бк/кг в Ки/кг (кюри на килограмм), используя следующее соотношение  $1 \text{ Бк} = 2,7 \cdot 10^{-11} \text{ Ки}$ .

**6.3.7.** В случае, когда удельная активность определена только по Cs-137 или Sr-90, необходимо сделать вывод о соответствии полученных значений удель-

ной активности проб Республиканским допустимым уровням содержания радионуклидов Cs-137 и Sr-90 в пищевых продуктах и питьевой воде (см. Приложение).

## 7. Сведения из теории

### 7.1. Искусственная и естественная радиоактивность

Все известные радионуклиды подразделяются на две группы: естественного и искусственного происхождения. Естественные радионуклиды существуют в природе, а искусственные могут быть получены посредством ядерных реакций. Также существует разделение на естественные и искусственные источники радиации. Естественными называются источники, которые имеются в природе. К естественным источникам радиации относятся:

- космические излучения и частицы;
- излучения изотопов земной коры;
- излучения изотопов в организме самого человека.

Искусственным источниками радиации являются те, которые возникают в результате жизнедеятельности человека. К ним относятся:

- рентгеновское излучение в медицине;
- ядерные реакторы;
- атомное оружие и т.д.

Из всего многообразия радиоактивных элементов, которые содержатся в земной коре, и наряду с космическим излучением создают специфический для каждой местности естественный радиационный фон, следует в первую очередь упомянуть изотоп К-40. Радионуклиды данного элемента имеют такой большой период полураспада, что не успели распасться за время существования Земли, и играют важную роль в эволюции растительного и животного мира. Из долгоживущих естественных радионуклидов в природных водах больше всего содержится К-40 (до 330 пКи/л в морской воде). В то же самое время К-40 входит в состав калийных удобрений, добыча которых увеличивает перераспределение данного элемента на Земле и включает его в различные миграционные цепочки. Использование фосфорных удобрений в сельском хозяйстве также приводит к проникновению радионуклидов естественного происхождения из почвы в пищевые культуры. С другой стороны, основными мерами, направленными на снижение уровня накопления радионуклидов растениями (контрмерами), являются внесение повышенных доз фосфорно-калийных удобрений и обязательное применение известкования. Чем больше потребность растения в калии или кальции, тем больше оно будет накапливать из почвы соответственно  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  (стронций), которые являются основными радионуклидами чернобыльского выброса. Это определяется сходностью химических свойств калия и  $^{137}\text{Cs}$ , а также кальция и  $^{90}\text{Sr}$ . Таким образом, использование минеральных удобрений важно с точки зрения повышения урожайности и снижения уровня накопления сельскохозяйственными культурами  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , однако не следует превышать рекомендуемые нормы внесения фосфорных и калийных удобрений на фоне известкования почв.



## 7.2. Активность, ее единицы измерения

Активность – физическая величина, численно равная количеству распадов, происходящих в единицу времени. Единицей измерения активности в системе Си является беккерель (Бк) в честь Антуана Анри Беккереля, открывшего явление естественной радиоактивности урана. Один беккерель – это активность, при которой происходит один распад в секунду. Очень часто встречается и внесистемная единица измерения активности – кюри (Ки). Она названа так в честь супругов Кюри, открывших количественный закон радиоактивного распада, обнаруживших биологическое действие радиоактивных излучений и т.д. Один кюри – это активность одного грамма радия. Связаны кюри и беккерели следующим соотношением:  $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$ . Среди нескольких видов активности необходимо отметить две наиболее часто употребляемые. Удельная активность ( $A_{уд}$ ) – активность единицы массы вещества, измеряется в беккерелях на килограмм (Бк/кг). Поверхностная активность ( $A_s$ ) – активность единицы площади поверхности. Измеряется поверхностная активность в беккерелях на метр квадратный (Бк/м<sup>2</sup>). Но часто для измерения активности больших площадей пользуются другой единицей – кюри на километр квадратный (Ки/км<sup>2</sup>). Такая величина получила название «загрязненность местности». Поверхностную активность можно как измерить специальными приборами, так и рассчитать косвенно.

## 7.3. Внутренне облучение

В процессе потребления пищи и воды, при выдыхании воздуха в организм человека попадают радионуклиды, которые вносят свой вклад во внутреннюю дозу облучения.

Внутреннее облучение – это процесс, при котором организм человека получает дозу радиации от радиоизотопов, попавших в него при дыхании, в процессе потребления пищи и воды или через повреждения кожного покрова. Подвергаясь в тканях тела радиоактивному распаду, эти изотопы излучают альфа-, бета- или гамма-частицы. По сравнению с внешним, внутреннее облучение имеет принципиальные отличия. В случае внутреннего облучения мы лишены возможности использовать те методы защиты, которые разработаны для внешнего облучения (т.е. экранирование, удаление от источника, сокращение времени пребывания в поле излучения). При внутреннем облучении бета- и альфа-частицы полностью поглощаются организмом за счет малого пробега этих частиц в биологической ткани. Что касается гамма-лучей, то значительная их часть выходит за пределы организма, практически не причиняя вреда. Еще одной причиной, обуславливающей опасность внутреннего облучения, является тот факт, что концентрация радиоизотопов в том или ином органе человека может во много раз превышать их концентрацию в окружающей среде и в организме в среднем. Поэтому локальные поглощенные дозы облучения в органах, накопивших эти изотопы, могут оказаться высокими, в то время как в среднем по организму содержание изотопа невелико.

Для уменьшения дозы внутреннего облучения применяются: биохимические стимуляторы обменных процессов; адсорбенты (вещества, которые могут «по-

глотить» радионуклиды и уменьшить их всасывание в стенки желудочно-кишечного тракта); комплексообразователи (вещества, связывающие радионуклиды в форму с повышенной скоростью выведения из организма).

Средняя годовая эффективная эквивалентная доза, получаемая жителем Беларуси за счет К-40 составляет приблизительно 0,33 мЗв, из которых 0,15 мЗв/год приходится на внешнее облучение и 0,18 мЗв/год – на внутреннее. Годовая индивидуальная доза за счет внутреннего облучения может быть оценена по формуле:

$$H = \frac{A_0 \cdot E_{эфф} \cdot t}{m},$$

где  $A_0$  – равновесная активность радионуклида в организме (Бк),  $E_{эфф}$  – эффективная энергия, передаваемая облучаемому органу в каждом акте распада (Дж),  $t$  – время облучения (с),  $m$  – масса человека (кг). Для Cs-137  $E_{эфф} = 0,94 \cdot 10^{-13}$  Дж.

Вступив в «ядерную эру», человечество начало широко использовать источники ионизирующего излучения в медицине, промышленности, энергетике и т.д. В настоящее время невозможно себе представить диагностику без использования рентгеновского излучения, а лечение онкологических заболеваний без радионуклидной диагностики и лучевой терапии. Ядерные энергетические установки, применяемые в атомных электростанциях, космических аппаратах, атомных подводных лодках являются иллюстрацией колоссального технического прогресса, свершенного в XX веке. Говоря о полезной стороне достижений ядерной физики, нельзя забывать, что серьезным источником дополнительного облучения человека явились испытания атомного оружия и крупные аварии на ядерно-энергетических установках.

Беспрецедентной по своим масштабам стала авария на Чернобыльской АЭС, которая произошла 26 апреля 1986 года. Выброс большого количества радиоактивных веществ привел к тому, что изотопами Cs-137 и Sr-90 загрязнено свыше 40 000 км<sup>2</sup> территории Республики Беларусь. Но если большинство Sr-90 сосредоточено в 30-километровой зоне вокруг станции, то Cs-137 – это основной радионуклид, формирующий огромные «пятна» загрязненности в Гомельской и Могилевской областях. Он также загрязняет некоторые районы Брестской, Минской и Гродненской областей. В настоящее время Cs-137 и Sr-90 являются основными радионуклидами, определяющими степень загрязнения пищевых продуктов для человека. С точки зрения миграции радионуклидов в организм человека различают следующие основные пищевые цепочки:

- растительные продукты → человек;
- растение → животное → мясо (молоко) → человек;
- вода → рыба → человек.

#### 7.4. Основные закономерности β-распада ядер

Распространенный естественный радионуклид К-40, а также основные радионуклиды чернобыльского выброса Cs-137 и Sr-90 претерпевают бета-распад. Бета-радиоактивность объединяет три типа радиоактивных превращений:

- электронный распад ( $\beta^-$ -радиоактивность);

- позитронный распад ( $\beta^+$ -радиоактивность);
- электронный захват (К-захват).

В настоящее время известно свыше семисот естественных и искусственных  $\beta$ -изотопов, периоды полураспада которых находятся в интервале от  $\sim 10^{-2}$  с до  $\sim 10^{15}$  лет, а энергия  $\beta$ -частиц от 18 кэВ до 16.6 МэВ. При всем многообразии  $\beta$ -радиоактивных ядер, они обладают одной общей особенностью: энергия испускаемых электронов (или позитронов) имеет непрерывный спектр, простирающийся до некоторого значения  $E_{\max}$ , называемого верхней границей энергии  $\beta$ -спектра и являющейся характеристикой источника  $\beta$ -излучения. Для данного источника невозможны энергии  $\beta$ -частиц, превышающие  $E_{\max}$ .

$$E_{\max} = (m_X - m_Y - m_e) \cdot c^2,$$

где  $m_X$  – масса материнского ядра;  $m_Y$  – масса дочернего ядра;  $m_e$  – масса электрона или позитрона;  $c$  – скорость света в вакууме.

Энергетический спектр  $\beta$ -частиц схематически показан на рисунке 8. Он представляет собой зависимость доли электронов, испускаемых при  $\beta$ -распаде, которые имеют энергию в интервале от  $E$  до  $E+dE$ , от энергии электронов.

Как показали эксперименты, при  $\beta$ -распаде атомное ядро одного и того же изотопа всегда теряет одинаковое количество энергии. Поэтому наличие непрерывного энергетического спектра электронов, «выбрасываемых» данным ядром, приводит, казалось бы, к нарушению закона сохранения энергии и не согласуется с дискретностью энергетических уровней ядер. Даже происхождение электронов в радиоактивных ядрах на первом этапе исследований в ядерной физике было трудноразрешимой задачей.

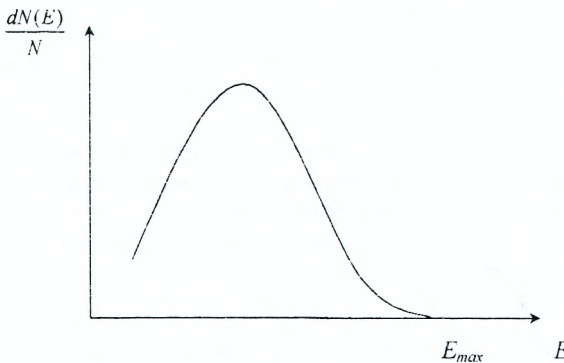


Рисунок 8 – График распределения электронов, испускаемых при  $\beta$ -распаде, по энергиям

Австрийский физик Вольфганг Паули (1890-1958) высказал гипотезу: при каждом акте  $\beta$ -распада одновременно с электроном вылетает еще одна частица, обладающая нулевым зарядом, ничтожно малой массой покоя и спином, равным  $\hbar/2$ . Итальянский физик Энрико Ферми, разработавший на основе гипотезы Паули теорию  $\beta$ -распада ядер, назвал эту частицу нейтрино. В настоящее

время различают два сорта частиц – нейтрино  ${}^0_0\nu$  и антинейтрино  ${}^0_0\bar{\nu}$ , которые сопровождают соответственно  $\beta^+$ - и  $\beta^-$ -распад, и являются по отношению друг к другу античастицами. Различие состоит в том, что у нейтрино направление спина совпадает с направлением движения, а у антинейтрино – противоположно направлению движения.

Введение в рассмотрение нейтрино и антинейтрино позволило объяснить наличие сплошного энергетического спектра у  $\beta$ -радиоактивных ядер. Энергия, теряемая ядром при  $\beta$ -распаде, распределяется между  $\beta$ -частицами и сопровождающими их нейтрино (или антинейтрино) случайным образом и подчиняется статистическим законам. Однако сумма энергий этих частиц всегда равна  $E_{\text{max}}$ .

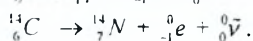
Рассмотрим более подробно, что происходит внутри ядра при  $\beta$ -радиоактивных превращениях.

### $\beta^-$ -распад

Для ядра, в котором нейтронов больше, чем протонов, наиболее прямым путем к стабильности является превращение нейтрона в протон. В ядре происходит следующая реакция, сопровождающаяся вылетом электрона:

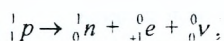


Например:

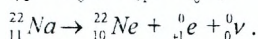


### $\beta^+$ -распад

Для ядра, имеющего в своем составе меньшее число нейтронов по сравнению с числом протонов, наиболее прямой путь к стабильности – это превращение протона в нейтрон, сопровождающееся испусканием положительно заряженной частицы:



Например:



В данном случае испускаемая энергия распределяется между нейтрино и позитроном, что приводит к непрерывной кривой спектра  $\beta^+$ -частиц.

### К-захват

Еще одним способом превращения протона в нейтрон является захват атомным ядром электрона, принадлежащего внутренней К-оболочке атома (но возможны захваты электронов и с L- или M-оболочек):

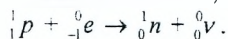
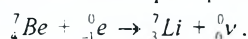


Схема превращения:

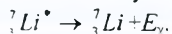


Пример: превращение радиоактивного ядра бериллия  ${}^7_4\text{Be}$  в литий  ${}^7_3\text{Li}$ :



При К-захвате не происходит непосредственного излучения ядром заряженной частицы. Однако после захвата К-электрона в электронной оболочке образуется вакансия (следовательно, освобождается место в наиболее низком энергетическом состоянии атома). После захвата вакантное место в оболочке заполняется одним из более удаленных электронов (вероятнее всего, с L-оболочки), а

разница энергий между L- и K-оболочками служит причиной испускания атомом характеристического рентгеновского излучения:



Энергия излучения  $E_\gamma$  является характеристикой дочерних ядер.

На рисунке 9 схематически показаны превращения изотопа калия K-40.

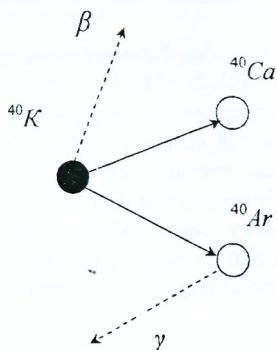


Рисунок 9 – Схема распада изотопа  ${}^{40}_{19}\text{K}$

$\beta$ -распады ядер могут сопровождаться также  $\gamma$ -излучением. Причина состоит в том, что дочернее ядро, как правило, возникает не в основном, а в возбужденном состоянии. Переходя затем в состояние с меньшей энергией, ядро испускает  $\gamma$ -кванты.

Некоторые ядра могут испытывать все три вида превращений. Примером может служить ядро  ${}^{64}_{29}\text{Cu}$ , которое в 40 % случаев испускает электрон, в 40 % случаев испытывает K-захват, и в 20 % случаев испускает позитрон.

### 7.5. Взаимодействие бета-излучения с веществом

При прохождении заряженной бета-частицы через вещество она теряет свою энергию на ионизацию или возбуждение электронных оболочек атома. Такие потери называются ионизационными. Потери же энергии бета-частицы на тормозное электромагнитное излучение называются радиационными. Важнейшей величиной, определяющей перенос частиц в веществе, является длина пробега  $R$ , т.е. толщина слоя этого вещества, которую может пройти частица до полной остановки, если направление ее движения было перпендикулярно поверхности слоя. Длину пробега бета-частицы в воздухе  $R_\beta^{\text{возд}}$  можно оценить по формуле:

$$R_\beta^{\text{возд}} = 400E_{\text{max}}, \text{ см},$$

где  $E_{\text{max}}$  – верхняя граница энергии  $\beta$ -спектра, МэВ.

Длину пробега бета-частиц в иной среде можно найти из соотношения:

$$R_\beta^{\text{среда}} = R_\beta^{\text{возд}} \frac{\rho^{\text{возд}}}{\rho^{\text{среда}}}, \text{ см},$$

где  $\rho^{\text{возд}}$  – плотность воздуха при нормальных условиях,  $\rho^{\text{среда}}$  – плотность среды.



Из этих соотношений можно найти, что пробег бета-частиц в веществе составляет лишь несколько миллиметров. В случае внешнего облучения плотная одежда и кожный покров организма действуют как экраны, предотвращая проникновение бета-частиц в жизненно важные органы и ткани организма человека. В случае же, если изотоп, являющийся бета-излучателем, находится внутри организма, то испускаемые им бета-частицы полностью поглощаются организмом, причиняя ущерб.

Для определения плотности потока бета-частиц с поверхности в данной работе используется дозиметр РКСБ-104. На внутренней стороне крышки-фильтра прибора находятся металлические экраны. При измерении излучения с выбранной поверхности со снятой крышкой-фильтром газоразрядные детекторы прибора регистрируют как гамма-, так и бета-излучение. При наличии крышки-фильтра попадание бета-излучения в детекторы предотвращается металлическими экранами. Поэтому, найдя разницу между показаниями прибора, полученными со снятой крышкой-фильтром, и показаниями, полученными при наличии крышки-фильтра, можно определить плотность потока бета-частиц с выбранной поверхности.

### Контрольные вопросы

1. Какие источники радиации называются естественными?
2. Какие источники радиации называются искусственными?
3. Дайте определение понятиям «активность», «удельная активность», «поверхностная активность».
4. Дайте определение понятию «внутреннее облучение».
5. Чем опасно внутреннее облучение организма человека?
6. Назовите некоторые области применения ионизирующих излучений.
7. Поясните существование сплошного энергетического спектра у  $\beta$ -частиц.
8. Что такое верхняя граница энергии  $\beta$ -спектра?
9. Почему при определении плотности потока бета-частиц с поверхности измерения проводятся дважды: со снятой задней крышкой-фильтром РКСБ-104 и при ее наличии?
10. а) Используя рисунок 9, напишите схемы превращений изотопа  ${}_{19}^{40}\text{K}$  в другие изотопы; б) Напишите три вида  $\beta$ -распадов для ядра  ${}_{29}^{64}\text{Si}$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. Дорожко, С.В. Защита населения и объектов в чрезвычайных ситуациях. Радиационная безопасность: пос.: в 3 ч. / С.В. Дорожко, В.П. Бубунов, В.Т. Пустовит. – 3-е изд., перераб. и доп. – Минск: Дикта, 2008. – Ч. III: Радиационная безопасность. – 308 с.
2. Основы радиоэкологии: Теория и практика / А.И. Пинчук [и др.]; под. ред. А.И. Пинчука. – Мозырь: ООО ИД «Белый ветер», 2002. – 76 с.
3. Русаков, К.И. Радиационная безопасность. Конспект лекций и лабораторный практикум. Пособие / К.И. Русаков, Ю.П. Ракович, Т.Л. Кушнер. – Брест: БрГТУ, 2005. – 148 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов Cs-137 и Sr-90 в пищевых продуктах и питьевой воде (РДУ-99)

(утверждены постановлением главного государственного санитарного врача Республики Беларусь № 16 от 26.04.1999 г. и внесены в Национальный реестр правовых актов Республики Беларусь 30 апреля 1999 г., регистрационный № 309)

Наименование продукции	Бк/кг, Бк/л
<b>Cs-137</b>	
Вода питьевая	10
Молоко и цельномолочная продукция	100
Молоко сгущенное и концентрированное	200
Творог и творожные изделия	50
Сыры сычужные и плавленые	50
Масло коровье	100
Мясо и мясные продукты, в том числе:	
говядина, баранина и продукты из них	500
свинина, птица и продукты из них	180
Картофель	80
Хлеб и хлебобулочные изделия	40
Мука, крупы, сахар	60
Жиры растительные	40
Жиры животные и маргарин	100
Овощи и корнеплоды	100
Фрукты	40
Садовые ягоды	70
Консервированные продукты из овощей, фруктов и ягод садовых	74
Дикорастущие ягоды и консервированные продукты из них	185
Грибы свежие	70
Грибы сушеные	2500
Специализированные продукты детского питания в готовом для употребления виде	37
Прочие продукты питания	370
<b>Sr-90</b>	
Вода питьевая	0,37
Молоко и цельномолочная продукция	3,7
Хлеб и хлебобулочные изделия	3,7
Картофель	3,7
Специализированные продукты детского питания в готовом для употребления виде	1,85

#### Примечания:

- 1) Для продуктов питания, потребление которых составляет менее 5 кг/год на человека (специ, чай, мед и др.), устанавливаются уровни в 10 раз более высокие, чем величины для пищевых продуктов.
- 2) К специализированным продуктам детского питания относятся продукты промышленного производства, вырабатываемые по нормативной документации на продукты детского питания и имеющие специальную маркировку, а также продукция детских молочных кооперативов.

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

**Составители:**

Пинчук Александр Иванович

Кушнер Татьяна Леонидовна

Швец Мария Ивановна

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к лабораторной работе Р-8

**КОМБИНИРОВАННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ  
ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ**

по дисциплине

**«Радиационная безопасность»**

для студентов технических и экономических специальностей  
дневной формы обучения

Ответственный за выпуск: Пинчук А.И

Редактор: Строкач Т.В.

Компьютерная вёрстка: Кармаш Е.Л.

Корректор: Никитчик Е.В.

---

Подписано к печати 02.12.2010 г. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Гарнитура «Times New Roman». Усл. печ. л. 0,93. Уч. изд. л. 1,0. Заказ № 1174. Тираж 50 экз. Отпечатано на ризографе учреждения образования «Брестский государственный технический университет». 224017, г. Брест, ул. Московская, 267