

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра производственной и экологической безопасности

***ОЦЕНКА ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ  
И МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ ОТ НИХ***

Методическое пособие  
к практическим занятиям по дисциплине  
«Защита населения и хозяйственных объектов в чрезвычайных ситуациях.  
Радиационная безопасность»  
для студентов всех специальностей и форм обучения БГУИР

Минск 2003

УДК 621.039.553.5(075.8)  
ББК 68.69я73  
О-93

А в т о р ы:  
И.С. Асаёнок, А.И. Навоша, А.И. Машкович, К.Д. Яшин

**Оценка** ионизирующих излучений и методы защиты от них: Метод. О-93 пособие к практ. занятиям по дисц. «Защита населения и хозяйственных объектов в чрезвычайных ситуациях. Радиационная безопасность» для студ. всех спец. и всех форм обуч. БГУИР/ И.С. Асаёнок, А.И. Навоша, А.И. Машкович, К.Д. Яшин. – Мн.: БГУИР, 2003. – 40 с.

ISBN 985-444-551-8.

Методическое пособие содержит краткие сведения о радиоактивных веществах, видах излучения ядер и процессах их взаимодействия с веществом, дозовых характеристиках ионизирующих излучений и единицах их измерения. Приведены примеры решения задач с использованием изложенных методик и варианты задач для самостоятельной работы. В приложениях приведены справочные материалы, необходимые для решения задач. Пособие предназначено для практических занятий.

УДК 621.039.553.5(075.8)  
ББК 68.69я73

ISBN 985-444-551-8

© Коллектив авторов, 2003  
© БГУИР, 2003

## СОДЕРЖАНИЕ

### 1. Основные понятия о радиоактивности

Примеры решения задач

Задачи для самостоятельной работы

Контрольные вопросы

### 2. Прохождение ионизирующих излучений через вещество и защита от них

Примеры решения задач

Задачи для самостоятельной работы

Контрольные вопросы

### 3. Дозиметрические величины и их единицы

Примеры решения задач

Задачи для самостоятельной работы

Контрольные вопросы

Литература

Приложения

## 1. Основные понятия о радиоактивности

Во многих областях практической деятельности человека используются источники ионизирующих излучений. Непрерывно расширяется сфера их применения в промышленности, сельском хозяйстве, медицине, научных исследованиях. Растет круг лиц, постоянно работающих с источниками и полями ионизирующих излучений. Всё это приводит к возрастанию потенциальной радиационной опасности и возможности загрязнения окружающей среды продуктами радиоактивного распада. С последствиями реализации этой потенциальной опасности уже пришлось столкнуться очень большому числу людей.

В результате катастрофы на Чернобыльской АЭС в природную среду было выброшено огромное количество радиоактивных веществ. Биосфера Земли – это единый взаимосвязанный организм и отгородиться от заражённых территорий, источников радиоактивности, перекрыть все пути их поступления в организм человека невозможно. Однако уменьшение степени воздействия – задача разрешимая.

Важнейшую роль в этом должна сыграть широкая информированность населения республики, понимание потенциальной опасности радиоактивного заражения и путей защиты от воздействия ионизирующих излучений.

Наименьшая частица вещества, сохраняющая химические свойства определенного элемента, называется атомом. Атом состоит из ядра и окружающих его электронов. В свою очередь ядро состоит из элементарных частиц – протонов и нейтронов. Если нейтрон электрически нейтрален, то протон имеет положительный заряд, равный по абсолютной величине заряду атомного электрона. Атом вещества электрически нейтрален, так как количество протонов в ядре равно числу электронов на орбитах.

Число протонов в ядре называется атомным номером и обозначается буквой  $Z$ . Оно совпадает с порядковым номером химического элемента в периодической системе Д.И. Менделеева. Очевидно, что заряд ядра равен  $Z \cdot e$ , поэтому число  $Z$  называется также зарядовым числом ядра.

Нейтрон электрически нейтрален. Протоны и нейтроны объединяют общим названием – нуклоны. Общее число нуклонов в ядре называют массовым числом  $A_m$  или атомной массой:

$$A_m = Z + n_e,$$

где  $n_e$  – количество нейтронов в ядре.

Чтобы охарактеризовать химический элемент, используют его символ  $X$  и указывают атомный номер и массовое число ядра:

$${}^A_m_Z X.$$

Например, запись «плутоний-239  ${}^{239}_{94}Pu$ » означает: ядро атома плутония содержит 94 протона и 145 нейтронов ( $239-94=145$ ).

В ядрах атомов одного и того же химического элемента число нейтронов может быть различным, а число протонов постоянное. Элементы, ядра которых содержат одинаковое число протонов, но различное количество нейтронов, называют изотопами. Элементы, ядра которых имеют одно и то же массовое число  $A_m$  при разных  $Z$ , называют изобарами.

Как известно, одноименно заряженные частицы отталкиваются. Поэтому наличие в ядре нескольких положительно заряженных протонов свидетельствует о существовании специфических ядерных сил притяжения, которые преобладают над электрическими силами отталкивания протонов. Эти силы обеспечивают стабильность ядер. Поэтому ядерными силами называются силы, связывающие протоны и нейтроны в ядре.

Измерения ядерных масс показали, что масса ядра  $M$  всегда меньше суммы масс составляющих его нуклонов:

$$M < Z \cdot m_p + (A_m - Z) \cdot m_n, \quad (1.1)$$

где  $m_p$  и  $m_n$  – масса покоя протона и нейтрона соответственно.

Согласно формуле Эйнштейна масса  $m$  и энергия  $E$  связаны соотношением

$$E = m \cdot c^2. \quad (1.2)$$

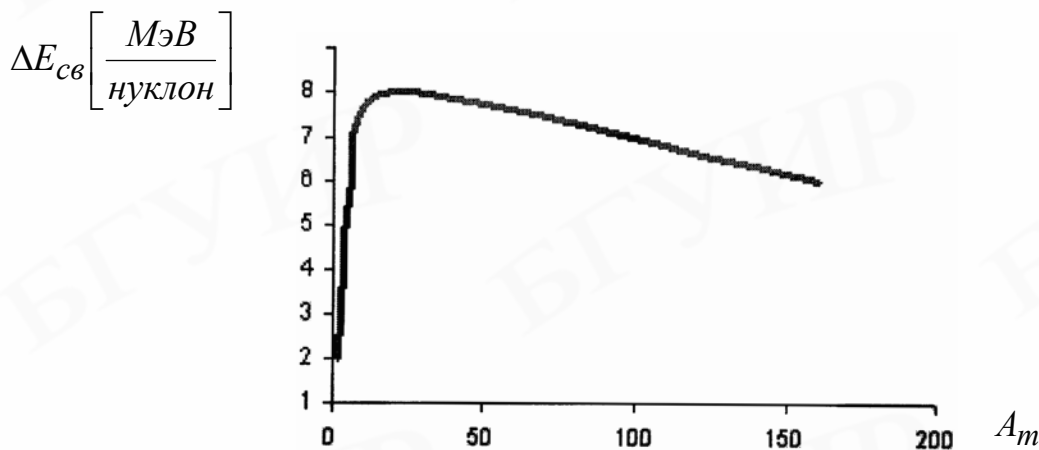
Сопоставляя выражения (1.1) и (1.2), можно сделать вывод, что при образо-

вании ядра выделяется некоторая энергия. Соответственно такое же количество энергии необходимо затратить для разделения ядра на отдельные нуклоны. Энергия связи ядра – это энергия или работа, которую необходимо затратить для расщепления ядра на составляющие его нуклоны без придания им кинетической энергии. Следует подчеркнуть, что энергия связи не содержится в самом ядре. Это энергия, которой не достаёт ядру по сравнению с суммарной энергией покоя составляющих его нуклонов.

Удельной энергией связи ядра называют энергию связи, приходящуюся на один нуклон, т.е.

$$\Delta E_{св} = E_{св} / A_m . \quad (1.3)$$

Зависимость удельной энергии связи от массового числа  $A_m$  для стабильных ядер показана на рисунке:



С увеличением  $A_m$  кривая сначала возрастает и выходит на насыщение (примерно 8 МэВ/нуклон) при  $A_m=15$ . При  $A_m$  более 60 кривая медленно спадает. Следовательно, наиболее устойчивыми являются ядра элементов в середине периодической системы, т.е. те, у которых наибольшая удельная энергия связи.

Энергетически выгодны процессы синтеза лёгких ядер в более тяжёлые и деления тяжёлых ядер на более лёгкие. Примером синтеза лёгких ядер в более тяжёлые с выделением энергии является взрыв водородной бомбы. Деление тяжёлых ядер с выделением энергии используется на АЭС и в ядерном боеприпасе.

Ядро, имеющее наименьшую возможную энергию, равную энергии связи, называют находящимся в основном состоянии. Если ядро имеет энергию  $E > E_{мин}$ , то говорят о возбуждённом состоянии ядра. Случай, когда  $E = 0$ , соответствует распаду его на составляющие нуклоны. Следовательно, ядра атомов могут быть неустойчивыми. Такие неустойчивые ядра имеются в радиоактивных веществах.

Вещество является радиоактивным, если оно содержит радионуклиды и в нем идет процесс радиоактивного распада. Под радионуклидом понимают радиоактивное ядро с присущими ему  $Z$  и  $A_m$ . Процесс самопроизвольного превращения неустойчивых ядер одного химического элемента в ядра другого элемента сопровождается испусканием элементарных частиц или излучением квантов энергии. Интенсивность данного процесса не поддаётся управлению и определяется исключительно индивидуальными физическими свойствами самих радионуклидов.

Самопроизвольный распад атомных ядер подчиняется закону

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (1.4)$$

где  $N$  – количество ядер в объёме вещества в момент времени  $t$ ;

$N_0$  – количество ядер в данном объёме вещества в момент времени  $t = 0$ ;

$\lambda$  – постоянная распада.

Постоянная  $\lambda$  имеет смысл вероятности распада ядер за единицу времени. Это отношение доли ядер  $dN/N$ , распадающихся за интервал времени  $dt$ , к этому интервалу времени:

$$\lambda = (1/N)(dN/dt). \quad (1.5)$$

Для характеристики устойчивости ядер к распаду пользуются понятием периода полураспада  $T_{1/2}$ . Он равен времени, в течение которого исходное количество радионуклидов данного вещества уменьшается в 2 раза, т.е.  $N = 1/2 N_0$ .

Связь между  $T_{1/2}$  и  $\lambda$  вытекает из выражения (1.4). Если  $e^{-\lambda t} = 1/2$ , то

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda = 0,693 / \lambda. \quad (1.6)$$

Процесс радиоактивного распада сопровождается выделением энергии. При

этом выполняются законы сохранения энергии, электрического заряда и другие законы материального мира.

Число распадов ядер данного препарата в единицу времени характеризует активность вещества. Согласно выражению (1.4) активность определяется величиной

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N_0 e^{-\lambda t}, \text{ или } A = A_0 e^{-\lambda t}, \quad (1.7)$$

где  $A_0 = \lambda N_0$  – радиоактивность вещества в начальный момент времени.

Из сравнения выражений (1.4) и (1.7) следует, что активность вещества с течением времени падает по экспоненциальному закону радиоактивного распада, но в любой момент времени её уровень существенно зависит от начальной активности:

$$A_0 = \lambda N_0 = (\ln 2 / T_{1/2}) N_0 = (0,693 / T_{1/2}) N_0.$$

За единицу измерения активности в системе СИ принят беккерель (Бк). Это активность данного количества вещества, при котором за одну секунду происходит один распад. Эта единица активности мала, поэтому используют кратные ей единицы килобеккерель (кБк) и мегабеккерель (МБк). Широкое распространение получила внесистемная единица активности кюри (Ки). 1 Ки равен  $3,7 \cdot 10^{10}$  распадов в секунду. Такой активностью обладает один грамм радия, в котором за одну секунду происходит 37 млрд распадов. Легко получить взаимосвязь между единицами активности: 1 Ки =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк. Массу  $m$  радионуклида активностью  $A$  можно определить из выражения

$$m = k \cdot A_m \cdot T_{1/2} \cdot A, \quad (1.8)$$

где  $k$  – константа, зависящая от избранных единиц измерения;

$A_m$  – атомная масса радионуклида.

Если период полураспада задан в сутках, активность – в беккерелях, а масса – в граммах, то

$$k = 2,07 \cdot 10^{-19}.$$

Если радионуклиды распределены по объёму вещества, то его активность



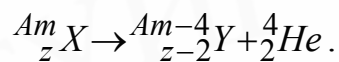
определяют в единицах объема, т.е. объемная радиоактивность  $A_V$  – Бк/м<sup>3</sup> или Ки/км<sup>3</sup>.

Если радионуклиды распределены по поверхности, то ее характеризуют активностью единицы поверхности, т.е. поверхностной радиоактивностью  $A_S$ , Бк/м<sup>2</sup> или Ки/км<sup>2</sup>. Аналогично можно вывести удельную активность в расчете на массу.

По проникающей способности радиоактивные излучения подразделяют на три основных вида: альфа-, бета- и гамма-излучения.

Альфа-излучением (распадом) называется самопроизвольное испускание радиоактивным ядром альфа-частиц, представляющих собой ядра гелия ( ${}^4_2\text{He}$ ).

Распад протекает по схеме



Как видно из схемы, атомный номер дочернего ядра (Y) уменьшается на две единицы. Заряд альфа-частиц положительный. Обособлению этой группы нуклонов способствует насыщение ядерных сил, так что сформировавшаяся альфа-частица подвержена меньшему действию ядерных сил притяжения, чем отдельные нуклоны.

Альфа-частицы характеризуют двумя основными параметрами: длиной пробега (в воздухе до 9 см, в биологической ткани до 52 мкм) и кинетической энергией  $E_\alpha$ , изменяющейся от 2 до 9 МэВ.

Бета-распад объединяет два основных вида ядерных превращений: электронный ( $\beta^-$ ) и позитронный ( $\beta^+$ ) распад. При первом виде превращений ядро испускает электрон и антинейтрино (при  $\beta^-$  распаде), а при втором – позитрон и нейтрино (при  $\beta^+$  распаде). Электрон (позитрон) и антинейтрино (нейтрино) не существуют в атомных ядрах. Они образуются в результате ядерной реакции в ядре. Нуклоны в радиоактивных ядрах нестабильны и в процессе реакции преобразуются в другие виды частиц.

Бета-частицы характеризуют теми же двумя параметрами, что и альфа-

частицы. Так как масса альфа-частицы в несколько раз больше бета-частицы, то длина пробега последней больше (в воздухе до 20 м, а в биологической ткани до 3 мм). Для бета-распада величина кинетической энергии заключена в области от 15 кэВ до 15 МэВ.

Гамма-излучением называется электромагнитное излучение, энергия которого высвобождается при переходе ядер из возбужденного в основное или менее возбужденное состояние, а также при ядерных реакциях. Длина волны гамма-излучения не превышает 0,1 нанометра. Процесс гамма-излучения не является самостоятельным типом радиоактивности, так как происходит без изменения массового и зарядового чисел ядра.

### Примеры решения задач

Задача 1. Начальная активность  $A$  кобальта-60 ( $^{60}\text{Co}$ ) составляла  $10^9$  Бк. Рассчитать активность  $A$  этого вещества через 5 лет.

*Решение.*

1. Из прил. 1 находим период полураспада кобальта-60. Он составляет  $T_{1/2} = 5,27$  года.

2. Определяем активность этого вещества через 5 лет из выражения (1.7):

$$A = A_0 e^{-\frac{0,693 \cdot t}{T_{1/2}}} = 10^9 e^{-\frac{0,693 \cdot 5}{5,27}} = 0,52 \cdot 10^9 \text{ (Бк)}.$$

Задача 2. Определить активность пробы, содержащей изотопы рутения-103 ( $^{103}\text{Ru}$ ) и рутения-106 ( $^{106}\text{Ru}$ ), массой 32,6 и 120 граммов, соответственно.

*Решение.*

1. Из прил. 1 находим периоды полураспада рутения-103 и -106. Они составляют

$$T_{1/2}(^{103}\text{Ru}) = 39,3 \text{ сут}; T_{1/2}(^{106}\text{Ru}) = 365 \text{ сут}.$$

2. Определяем активность рутения-103 и 106 из выражения (1.8):

$$A_{103} = \frac{m_{103}}{k \cdot A_m \cdot T_{1/2}} = \frac{32,6}{2,07 \cdot 10^{-19} \cdot 103 \cdot 39,3} = 3,9 \cdot 10^{16} \text{ (Бк)};$$

$$A_{106} = \frac{m_{106}}{k \cdot A_m \cdot T_{1/2}} = \frac{120}{2,07 \cdot 10^{-19} \cdot 106 \cdot 365} = 1,5 \cdot 10^{16} \text{ (Бк)}.$$

Активность пробы определяется из соотношения

$$A_{np} = A_{103} + A_{106} = (3,9 + 1,5) 10^{16} = 5,4 \cdot 10^{16} \text{ (Бк)}.$$

Задача 3. Поверхностная активность загрязненной местности  $A_S$  составляет  $40 \text{ Ки/км}^2$ . Определить плотность потока частиц  $\Phi$  на площади  $1 \text{ см}^2$ , если выход частиц на распад равен 1.

*Решение.*

Плотность потока частиц оценивается выражением

$$\Phi = A_S \cdot S \text{ [распадов в секунду]},$$

где  $A_S$  – поверхностная активность загрязненной местности;

$S$  – площадь загрязненной местности.

Тогда  $\Phi = 3,7 \cdot 10^{10} \cdot 40 \cdot 1 = 148$  (распадов в секунду).

Задача 4. Начальная активность радия-226 ( $^{226}\text{Ra}$ ) составляет  $10^{12}$  Бк. Рассчитать число радиоактивных ядер этого вещества через 1000 лет.

*Решение.*

1. Из прил. 1 находим период полураспада радия-226. Он составляет

$$T_{1/2} = 1600 \text{ лет.}$$

2. Определяем активность радия через 1000 лет по формуле (1.7):

$$A = A_0 e^{-\frac{0,693 \cdot t}{T_{1/2}}} = 10^{12} e^{-\frac{0,693 \cdot 1000}{1600}} = 0,65 \cdot 10^{12} \text{ (Бк)}.$$

3. Рассчитываем число радиоактивных ядер из выражения

$$A = \lambda N,$$

где  $A$  – активность вещества;

$\lambda$  – постоянная распада;

$N$  – число радиоактивных ядер в веществе.

Тогда

$$N = \frac{A}{\lambda} = \frac{A \cdot T_{1/2}}{0,693} = \frac{0,65 \cdot 10^{12} \cdot 1600 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60}{0,693} = 4,8 \cdot 10^{22} \text{ (ядер)}.$$

### Задачи для самостоятельной работы

Задача 1. Начальная активность вещества  $M$  составляет  $A_0$  Бк. Рассчитать активность этого вещества через  $t$  лет. Исходные данные для расчета приведены в табл.1.1.

Таблица 1.1

Параметр	Номер варианта					
	1	2	3	4	5	6
Вещество $M$	Цезий $^{134}\text{Cs}$	Радий $^{226}\text{Ra}$	Европий $^{154}\text{Eu}$	Калий $^{40}\text{K}$	Стронций $^{90}\text{Sr}$	Цезий $^{137}\text{Cs}$
$A_0$ , Бк	$10^{10}$	$10^9$	$10^8$	$10^7$	$10^6$	$10^{11}$
Время $t$ , лет	0,5	1400	12	25	20	27

Окончание табл. 1.1

Параметр	Номер варианта					
	7	8	9	10	11	12
Вещество М	Натрий $^{22}\text{Na}$	Плутоний $^{239}\text{Pu}$	Радий $^{226}\text{Ra}$	Рутений $^{106}\text{Ru}$	Теллур $^{204}\text{Tl}$	Цинк $^{65}\text{Zn}$
$A_0$ , Бк	$10^5$	$10^6$	$10^8$	$10^{12}$	$10^{11}$	$10^9$
Время t, лет	1,5	15 000	1200	0,5	2,5	0,4

Задача 2. Начальная активность вещества М составляет  $A_0$  Бк. Рассчитать число радиоактивных ядер этого вещества через t лет. Исходные данные для расчета приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Параметр	Номер варианта					
	1	2	3	4	5	6
Вещество М	Прометий $^{145}\text{Pm}$	Рутений $^{106}\text{Ru}$	Натрий $^{22}\text{Na}$	Плутоний $^{239}\text{Pu}$	Европий $^{154}\text{Eu}$	Цезий $^{137}\text{Cs}$
$A_0$ , Бк	$10^8$	$10^7$	$10^9$	$10^6$	$10^7$	$10^8$
Время t, лет	2,0	0,5	1,6	22 500	8,5	20

Окончание табл. 1.2

Параметр	Номер варианта					
	7	8	9	10	11	12
Вещество М	Кобальт $^{60}\text{Co}$	Стронций $^{90}\text{Sr}$	Цинк $^{65}\text{Zn}$	Теллур $^{204}\text{Tl}$	Калий $^{40}\text{Ka}$	Цезий $^{134}\text{Cs}$
$A_0$ , Бк	$10^6$	$10^8$	$10^6$	$10^8$	$10^7$	$10^9$
Время t, лет	2,6	10,5	0,3	2,5	25	1,5

Задача 3. Поверхностная активность загрязненной местности составляет  $A_s$ , Ки/км<sup>2</sup>. Рассчитать плотность потока частиц  $\Phi$  на площади S, если выход частиц на распад равен 1. Исходные данные для расчета приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Параметр	Номер варианта					
	1	2	3	4	5	6
$A_s, \text{Ки/км}^2$	40	20	10	5	15	80
$S, \text{см}^2$	1	5	100	40	10 000	800

Окончание табл. 1.3

Параметр	Номер варианта					
	7	8	9	10	11	12
$A_s, \text{Ки/км}^2$	60	5	45	12	28	90
$S, \text{см}^2$	150	800	20	60	2000	4000

**Задача 4.** Рассчитать активность пробы  $A_{\text{пр}}$ , содержащей изотопы веществ  $M_1$  и  $M_2$ , массой  $m_1$  и  $m_2$  граммов, соответственно. Исходные данные для расчета приведены в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Параметр	Номер варианта					
	1	2	3	4	5	6
Вещество $M_1$	Бром $^{82}\text{Br}$	Лантан $^{140}\text{La}$	Цинк $^{65}\text{Zn}$	Йод $^{131}\text{I}$	Марганец $^{52}\text{Mn}$	Полоний $^{210}\text{Po}$
Масса $m_1, \text{г}$	25,2	30,5	125	40,5	115	212
Вещество $M_2$	Йод $^{131}\text{I}$	Полоний $^{210}\text{Po}$	Марганец $^{52}\text{Mn}$	Рутений $^{103}\text{Ru}$	Полоний $^{210}\text{Po}$	Бром $^{82}\text{Br}$
Масса $m_2, \text{г}$	50,5	895	170	85,6	205	2,6

Окончание табл. 1.4

Параметр	Номер варианта					
	7	8	9	10	11	12
Вещество $M_1$	Мышьяк $^{74}\text{As}$	Рутений $^{103}\text{Ru}$	Медь $^{64}\text{Cu}$	Бром $^{82}\text{Br}$	Йод $^{131}\text{I}$	Полоний $^{210}\text{Po}$
Масса $m_1, \text{г}$	25,3	35,4	150	16,5	41,3	12,8
Вещество $M_2$	Лантан $^{140}\text{La}$	Полоний $^{210}\text{Po}$	Рутений $^{106}\text{Ru}$	Рутений $^{103}\text{Ru}$	Полоний $^{210}\text{Po}$	Цинк $^{65}\text{Zn}$
Масса $m_2, \text{г}$	60,5	4,2	695	8,7	758	694

## Контрольные вопросы

1. Поясните, из каких элементарных частиц состоит атом любого вещества и что показывает порядковый номер в таблице Д.И. Менделеева.
2. Какие силы в атомном ядре удерживают положительно заряженные протоны?
3. Что понимают под изотопами и изобарами; в чем отличие этих элементов друг от друга?
4. Поясните, что понимают под удельной энергией связи ядра и в чем ее отличие от энергии связи ядра.
5. Какие вещества называют радиоактивными и что понимают под радионуклидом?
6. Что характеризует постоянная распада радиоактивного вещества?
7. Поясните, что такое период полураспада радиоактивного вещества.
8. Какая связь существует между периодом полураспада и постоянной распада радиоактивного вещества?
9. Поясните, что такое активность радиоактивного вещества и дайте характеристику единиц ее измерения.
10. Что такое объемная и поверхностная радиоактивность, единицы их измерения?
11. Перечислите основные виды излучений радиоактивных ядер.
12. Дайте характеристику альфа-распада радиоактивного ядра.
13. Назовите виды бета-распадов радиоактивного ядра и их сущность.
14. Дайте характеристику гамма-лучей и поясните, в чем их отличие от альфа- и бета-излучений.

## 2. Прохождение ионизирующих излучений через вещество и защита от них

При прохождении ионизирующего излучения через вещество (среду) имеет место передача энергии веществу. Основным процессом передачи энергии явля-

ется ионизация. Для заряженных частиц характерна постепенная передача энергии в процессе многократного столкновения с электронами и ядрами вещества.

Альфа-частицы, проходя через вещество (среду), взаимодействуют с электронами атомов вещества. Процесс взаимодействия альфа-частиц с ядрами вещества маловероятен, так как, во-первых, масса ядра атомов вещества значительно больше массы частицы, во-вторых, ядро и альфа-частица имеют одинаковый (положительный) электрический заряд. В процессе столкновения альфа-частицы с ядром она отклоняется на практически незначительный угол. Следовательно, путь альфа-частицы в веществе (среде) практически прямолинеен. При взаимодействии альфа-частицы с атомными электронами вещества имеет место потеря этой частицей кинетической энергии. Получив кинетическую энергию, один или несколько атомных электронов уходят с орбит и атом становится ионом. Если полученной энергии недостаточно, то атомные электроны смещаются на другие орбиты и атом возбуждается. И в том, и в другом случае потери энергии альфа-частицей называют ионизационными.

Если концентрация электронов в веществе равна  $n_e$ , то потери энергии альфа-частицей (ионизационные потери) в результате ее взаимодействия со всеми встречающимися на пути электронами будут определяться величиной  $-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ион}}$  – уменьшением энергии частицы на единице пути. Ионизационные потери характеризуются величиной средних потерь энергии альфа-частицы на единице пути. Эти потери оцениваются выражением

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ион}} \approx \frac{z_\alpha^2 n_e}{V_\alpha^2}, \quad (2.1)$$

где  $z_\alpha$  – заряд альфа-частицы;

$n_e$  – концентрация электронов в веществе;

$V_\alpha$  – скорость движения альфа-частицы.

В результате экспериментальных данных установлен ряд эмпирических соотношений между энергией альфа-частицы и ее пробегом. Пробег альфа-частицы



( $R_\alpha$ , см) с энергией  $E_0$  до 9 МэВ в воздухе определяется из соотношения

$$R_\alpha = 1,24E_0 - 2,62 \text{ (см)}. \quad (2.2)$$

Для веществ, отличающихся от воздуха, пробег альфа-частицы оценивается выражением

$$R_\alpha = \frac{10^{-4} \sqrt{A_m E_0^3}}{\rho_x} \text{ [см]}, \quad (2.3)$$

где  $A_m$  – атомная масса вещества;

$E_0$  – энергия альфа-частицы, МэВ;

$\rho_x$  – плотность вещества, г/см<sup>3</sup>.

Так как пробег альфа-частиц незначителен (в воздухе до 9 см, в биологических тканях десятки микрометров), то защита от внешнего облучения не является проблемой. Для защиты от альфа-частиц достаточен слой воздуха в несколько сантиметров. Также применяют экраны из плексигласа и стекла толщиной в несколько миллиметров.

Процесс прохождения бета-частиц через вещество более сложный, так как энергия этих частиц расходуется не только на ионизационные, но и радиационные потери, а также на их рассеяние.

Ионизационные потери кинетической энергии бета-частицей рассчитываются из выражения (2.1).

При взаимодействии бета-частицы с ядром атома вещества имеют место радиационные потери, которые определяются из выражения (2.1, но с заменой индексов  $\alpha$  на индекс  $\beta$ )

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{рад}} \approx \frac{z_\beta^2}{m_\beta^2}, \quad (2.4)$$

где  $m_\beta$  – масса бета-частицы.

Кроме того, за счет заряда ядра вокруг него создается кулоновское поле. Кулоновские силы пропорциональны заряду ядра. Под действием кулоновских

сил заряженная бета-частица, имея малую массу, получает ускорение. Согласно классической электродинамике любая заряженная частица, движущаяся с ускорением, излучает электромагнитные волны, интенсивность которых пропорциональна квадрату ускорения частицы. Это излучение ускоренной бета-частицы называют тормозным, а длина его волны соответствует длине волны рентгеновского излучения. Потери на тормозное излучение пропорциональны заряду ядра. Поэтому для тяжёлых элементов они более существенны, чем для легких. Отсюда следует, что вклад тормозного излучения в полную потерю энергии бета-частицы возрастает с увеличением её кинетической энергии в тяжёлых веществах.

Для оценки максимального пробега бета-частицы в воздухе ( $R_\beta$ ) используют эмпирическое соотношение

$$R_\beta \geq 4,1E_0 \text{ [м]}, \quad (2.5)$$

где  $E_0$  – кинетическая энергия бета-частицы (МэВ). Приблизительно пробег бета-частицы в любом веществе ( $R_\beta$ ) оценивается выражением

$$R_\beta = \frac{R_\beta(z/A_m)_\beta}{(zA_m)_\beta}, \quad (2.6)$$

где  $z$  – атомный (зарядный) номер вещества;

$A_m$  – атомная масса вещества.

Для защиты от бета-частиц применяются комбинированные экраны, которые изготавливаются из материалов с малой и большой атомной массой. Материалы с малой атомной массой дают наименьшее тормозное излучение. При использовании экранов для защиты из таких материалов, возникает высокоинтенсивное излучение малоэнергетических квантов, а при применении экранов из тяжёлых материалов возникают кванты больших энергий, но меньшей интенсивности. При этом, со стороны источника излучения располагают материал с малой атомной массой, а за ним – с большой. Возникающие в материале внутреннего экрана кванты с малой энергией поглощаются в дополнительном экране из материала с большой атомной массой.

Гамма- и рентгеновское излучение представляют собой электромагнитные волны. Для этих видов излучения не существует понятий пробега и потерь энергии на единицу пути. Гамма-лучи, проходя через вещество, взаимодействуют как с электронами, так и с ядрами атомов вещества. В результате взаимодействия интенсивность лучей уменьшается. Для однородного вещества ослабление лучей происходит по экспоненциальному закону:

$$I = I_0 e^{-\mu d}, \quad (2.7)$$

где  $I$  – интенсивность лучей после прохождения слоя вещества (поглотителя) толщиной  $d$ ;

$I_0$  – начальная интенсивность гамма-лучей;

$\mu$  – линейный коэффициент ослабления, определяемый по таблицам.

Под интенсивностью понимается произведение энергии гамма-кванта на число гамма-квантов, падающих каждую секунду на поглотитель. Линейный коэффициент ( $\mu$ ,  $\text{см}^{-1}$ ) зависит от энергии излучения и свойств поглощающего материала. Массовый коэффициент ослабления ( $\mu_m$ ) связан с линейным соотношением

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} [\text{см}^2/\text{г}], \quad (2.8)$$

где  $\rho$  – плотность поглощающего материала,  $\text{г}/\text{см}^3$ .

Толщину слоя вещества, необходимую для уменьшения интенсивности энергии гамма-излучения в два раза, называют слоем половинного ослабления ( $\Delta_{1/2}$ ). Из закона поглощения получим

$$\Delta_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0,693}{\mu}. \quad (2.9)$$

Для защиты от гамма-излучений применяют экраны из материалов с большой атомной массой и высокой плотностью (свинец, вольфрам и др.).

Прежде чем использовать тот или другой материал для экрана, проводят расчет толщины защитного слоя. Эффективность экранов оценивают кратностью ослабления ( $K$ ). Кратность ослабления рассчитывают из выражения

$$K = \frac{X}{X_D}, \text{ или } K = \frac{P_x}{P_{x_D}}, \quad (2.10)$$

где  $X$  или  $P_x$  – величина экспозиционной дозы или мощность экспозиционной дозы в данной точке при отсутствии экрана;

$X_D$  или  $P_{x_D}$  – то же, но при наличии экрана.

### Примеры решения задач

**Задача 1.** Рассчитать пробег альфа-частиц в воздухе и алюминии в зависимости от энергии частиц  $E_0 = 4,5$  МэВ. Плотность алюминия  $\rho = 2,7$  г/см<sup>3</sup>, а атомная масса  $A_m = 27$ .

*Решение.*

1. Определяем пробег альфа-частиц в воздухе из соотношения (2.2):

$$R_\alpha = 1,24 \cdot E_0 - 2,62 = 1,24 \cdot 4,5 - 2,62 = 2,96 \text{ (см)}.$$

2. Определяем пробег альфа-частиц в алюминии из выражения (2.3):

$$R_\alpha = \frac{10^{-4} \sqrt{A_m E_0^3}}{\rho_x} = \frac{10^{-4} \sqrt{27 \cdot 91,125}}{2,7} = \frac{10^{-4} \cdot 49,6}{2,7} = 18,37 \cdot 10^{-4} \text{ (см)}.$$

**Задача 2.** На свинцовую пластину падает поток гамма-квантов с энергией 1 МэВ. После прохождения пластины интенсивность потока уменьшается на 10%. Определить толщину пластины, слой половинного ослабления и массовый коэффициент ослабления свинца для гамма-квантов этой энергии.

*Решение.*

1. Из прил. 2 находим плотность свинца и значение линейного коэффициента ослабления для  $E_\gamma = 1$  МэВ. Они равны 11,3 и 0,789 г/см<sup>3</sup>, соответственно.

Толщину пластины определим из закона поглощения (2.7):

$$d = \frac{\ln(I_0/I)}{\mu} = \frac{\ln(1/0,9)}{0,789} \approx 0,14 \text{ (см)}.$$

2. Из равенства (2.9) следует, что

$$\Delta_{1/2} = \frac{0,693}{0,789} \approx 0,87 \text{ (см)}.$$

3. Определим массовый коэффициент ослабления из соотношения (2.8):

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \frac{0,789}{11,3} \approx 0,07 \text{ (см}^2\text{/г)}.$$

Задача 3. Рассчитать толщину стен помещения из бетона, в котором размещается источник излучения кобальт-60 активностью 3 Ки; энергия излучения  $E_0 = 0,1$  МэВ. Расстояние от источника излучения до лиц (не связанных с работой источника), находящихся в соседнем помещении, 5 метров.

*Решение.*

1. Определяем мощность экспозиционной дозы  $P_x$  по формуле

$$P_x = \frac{AK_\gamma}{R^2},$$

где  $A$  – активность источника излучения;

$K_\gamma$  – гамма–постоянная радионуклида, определяемая по прил. 1;

$R$  – расстояние от источника до рабочего места.

Гамма–постоянная равна мощности экспозиционной дозы, создаваемой гамма-излучением точечного радионуклидного источника активностью 1 мКи на расстоянии 1 см от него. Гамма-постоянная выражается в  $\text{Р}\cdot\text{см}^2 / (\text{мКи}\cdot\text{ч})$ .

Тогда

$$P_x = \frac{3 \cdot 10^3 \cdot 12,93}{2,5 \cdot 10^5} = 0,155 \text{ (Р/ч)}.$$

2. Рассчитываем кратность ослабления из выражения (2.10):

$$K = \frac{P_x}{P_{xПД}},$$

где  $P_{xПД}$  – предел дозы, который согласно нормам радиационной безопасности составляет 0,057 мбэр/ч.

Тогда

$$K = \frac{0,155 \cdot 10^3}{0,057} = 2,7 \cdot 10^3.$$

По графику (прил. 3) определяем толщину стен помещения, которая составит примерно 18 см.

Задача 4. Мощность экспозиционной дозы без защиты на рабочем месте равна  $P_x = 280$  мР/ч. Рассчитать толщину защиты из железа, если источником излучения является цезий-137 ( $E_\gamma = 0,662$  МэВ), а время работы 25 часов в неделю.

*Решение.*

1. Рассчитаем предельно допустимую мощность экспозиционной дозы  $P_{xПД}$  из выражения

$$P_{xПД} = \frac{100}{t},$$

где  $t$  – время работы в неделю, ч.

*Тогда*

$$P_{xПД} = \frac{100}{25} \text{ (мР/ч)}.$$

2. Определяем кратность ослабления из выражения (2.10):

$$K = \frac{P_x}{P_{xПД}} = \frac{280}{4} = 70.$$

3. Из прил. 2 находим линейный коэффициент ослабления гамма-излучения при  $E_\gamma = 0,662$  МэВ. Он равен 0,57.

4. Рассчитаем толщину защиты  $d$  из железа, используя соотношение

$$d = \frac{\ln K}{\mu} = \frac{\ln 70}{0,57} \approx 7,5 \text{ (см)}.$$

## Задачи для самостоятельной работы

Задача 1. На пластину М падает поток гамма-квантов с энергией  $E_0$ , МэВ. После прохождения пластины интенсивность потока уменьшается на  $n\%$ . Определить толщину пластины, слой половинного ослабления и массовый коэффициент ослабления пластины для гамма-квантов этой энергии. Исходные данные для расчета приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Параметр	Номер варианта					
	1	2	3	4	5	6
Пластина М	Алюминий	Бетон	Железо	Медь	Олово	Свинец
Энергия $E_0$ , МэВ	1,0	0,5	1,25	1,5	0,4	1,0
$n$ , %	25	20	30	50	10	15

Окончание табл. 2.1

Параметр	Номер варианта					
	7	8	9	10	11	12
Пластина М	Алюминий	Бетон	Железо	Медь	Олово	Свинец
Энергия $E_0$ , МэВ	1,5	1,25	2,0	1,25	1,0	2,0
$n$ , %	40	20	60	20	10	50

Задача 2. Рассчитать пробег альфа-частиц в веществе (среде)  $N$  в зависимости от их энергии  $E_0$  и плотности вещества  $\rho_x$ . Исходные данные для расчета приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Параметр	Номер варианта					
	1	2	3	4	5	6
Вещество (среда), $N$	Алюминий	Воздух	Алюминий	Воздух	Алюминий	Воздух
Энергия $E_0$ , МэВ	4,0	4,0	5,0	5,0	6,0	6,0
$\rho_x$ , г/см <sup>3</sup>	2,7	1,0	2,7	1,0	2,7	1,0

Окончание табл. 2.2

Параметр	Номер варианта					
	7	8	9	10	11	12
Вещество (среда), $N$	Алюминий	Воздух	Алюминий	Воздух	Алюминий	Воздух
Энергия $E_0$ , МэВ	7,0	7,0	8,0	8,0	8,5	8,5
$\rho_x$ , г/см <sup>3</sup>	2,7	1,0	2,7	1,0	2,7	1,0

Задача 3 Мощность экспозиционной дозы без защиты на рабочем месте равна  $P_x$ , мР/ч. Рассчитать толщину защиты из вещества  $M$ , если источником является цезий-137 ( $E_\gamma$ , МэВ), а время работы  $t$  часов в неделю. Исходные данные для расчета приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Параметр	Номер варианта					
	1	2	3	4	5	6
Вещество $M$	Алюминий	Бетон	Железо	Медь	Олово	Свинец
Энергия $E_\gamma$ , МэВ	0,662	0,6	0,8	1,0	0,5	1,25
Время работы, $t$	7	10	13	5	10	11
$P_x$ , мР/ч	280	220	140	250	240	220

Окончание табл. 2.3

Параметр	Номер варианта					
	7	8	9	10	11	12
Вещество $M$	Алюминий	Бетон	Железо	Медь	Олово	Свинец
Энергия $E_\gamma$ , МэВ	1,0	0,8	1,0	0,662	1,5	0,662
Время работы, $t$	8	7	4	6	5	9
$P_x$ , мР/ч	240	280	250	320	250	270

Задача 4. Рассчитать толщину стен помещения из бетона, в котором разме-



щается источник излучения  $N$  активностью  $A$ , энергия излучения которого  $E_0$  МэВ. Расстояние от источника излучения до лиц, находящихся в соседнем помещении (не связанных с работой источника),  $R$  метров. Исходные данные для расчета приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Параметр	Номер варианта					
	1	2	3	4	5	6
Источник излучения, $N$	Натрий $^{22}\text{Na}$	Йод $^{131}\text{I}$	Бром $^{82}\text{Br}$	Мышьяк $^{74}\text{As}$	Цезий $^{134}\text{Cs}$	Ртуть $^{203}\text{Hg}$
Активность источника $A$ , Ки	2	1	3	4	5	6
Энергия излучения $E_0$ , МэВ	0,1	0,6	0,3	0,2	0,5	0,4
Расст. от ист. до РМ $R$ , м	5	6	7	4	5	4

Окончание табл. 2.4

Параметр	Номер варианта					
	7	8	9	10	11	12
Источник излучения, $N$	Аргон $^{41}\text{Ar}$	Кобальт $^{60}\text{Co}$	Цезий $^{137}\text{Cs}$	Рутений $^{106}\text{Ru}$	Европий $^{154}\text{Eu}$	Медь $^{64}\text{Cu}$
Активность источника $A$ , Ки	1	4	5	3	6	2
Энергия излучения $E_0$ , МэВ	0,1	0,2	0,4	0,5	0,6	0,3
Расст. от ист. до РМ $R$ , м	5	7	4	6	7	4

### Контрольные вопросы

1. Поясните, в чем сущность взаимодействия альфа-частиц с атомными электронами вещества.
2. Что понимают под ионизационными потерями и от каких трех факторов они зависят?
3. Поясните принцип взаимодействия альфа-частиц с ядрами вещества.
4. Поясните сущность взаимодействия бета-частиц с ядрами вещества.
5. Что понимают под тормозным излучением и при каких видах излучения

ядра они имеют место?

6. Что такое радиационные потери и от каких двух факторов они зависят?

7. Поясните, почему при одинаковой кинетической энергии 5 МэВ альфа-частица имеет длину пробега в воздухе до 9 см, а бета-частица – до 20 м.

8. По какому закону уменьшается интенсивность гамма-излучения при прохождении его через вещество?

9. Что понимают под линейным коэффициентом ослабления и в чем его отличие от массового коэффициента?

10. Поясните принцип изготовления защитных экранов от бета-частиц.

11. Каким показателем оценивается эффективность экранов, используемых для защиты от ионизирующих излучений и как он рассчитывается?

### *3. Дозиметрические величины и их единицы*

Первая из характеристик взаимодействия излучения и среды – это ионизационный эффект. В начальный период развития радиационной дозиметрии чаще всего приходилось иметь дело с рентгеновским излучением, распространяющимся в воздухе. Поэтому в качестве количественной меры поля излучения использовали степень ионизации воздуха рентгеновских трубок или аппаратов. Количественная мера, основанная на величине ионизации сухого воздуха при нормальном атмосферном давлении, достаточно легко поддающаяся измерению, получила название «экспозиционная доза».

Экспозиционная доза определяет ионизационную способность рентгеновского и гамма-излучения и выражает энергию излучения, преобразованную в кинетическую энергию заряженных частиц, в единице массы атмосферного воздуха. Экспозиционная доза  $X$  – это отношение суммарного заряда  $dQ$  всех ионов одного знака в элементарном объеме воздуха к массе  $dm$  воздуха в этом объеме, т.е.

$$X = \frac{dQ}{dm}. \quad (3.1)$$

В системе СИ единицей измерения экспозиционной дозы является кулон деленный на килограмм [Кл/кг]. Внесистемная единица – рентген ( $R$ ).  $1R$  соответствует образованию  $2,08 \cdot 10^{18}$  пар ионов в  $1 \text{ см}^3$  воздуха при температуре  $0^\circ \text{C}$  и давлении 760 мм рт. ст.

Однако при расширении круга известных видов ионизирующего излучения и сфер его приложения оказалось, что мера воздействия ионизирующего излучения на вещество не поддается простому определению из-за сложности и многообразия протекающих при этом процессов. Важным из них, дающим начало физико-химическим изменениям в облучаемом веществе и приводящим к определенному радиационному эффекту, является поглощение энергии ионизирующего излучения веществом. В результате этого возникло понятие «поглощенная доза».

Поглощенная доза показывает, какое количество энергии излучения поглощено в единице массы любого облучаемого вещества. Если в результате воздействия на любое вещество массой  $dm$  поглощается энергия ионизирующего излучения  $dE$ , то поглощенная доза определяется выражением

$$D = \frac{dE}{dm}. \quad (3.2)$$

За единицу поглощенной дозы в системе СИ принят грей ( $Гр$ ). Это такая доза, при которой массе 1 кг передается энергия ионизирующего излучения 1 Дж. Внесистемной единицей поглощения дозы является рад.

$$1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}.$$

Эквивалентная доза отличается от поглощенной тем, что она учитывает особенности радиационного эффекта в биологической ткани. Этот эффект при одной и той же поглощенной дозе  $D$  может быть весьма различным в зависимости от того, каким видом излучения производится воздействие на ткань. Указанные особенности разрушительного воздействия на конкретный вид ткани установлены эмпирически. Они численно оцениваются усредненным коэффициентом качества облучения  $\bar{k}$  (табл. 3.1), что позволяет определить эквивалентную дозу  $H$  выражением

$$H = \bar{k} D. \quad (3.3)$$

Для излучений,  $\bar{k}$  которых равны единице,  $H=D$ . За единицу эквивалентной дозы в системе СИ принят зиверт (Зв). 1 зиверт равен такой эквивалентной дозе, при которой произведение поглощенной дозы на средний коэффициент качества облучения составляет 1 Дж/кг в биологической ткани стандартного состава. Вне-системной единицей эквивалентной дозы является бэр (биологический эквивалент рада).

$$1 \text{Зв} = 100 \text{бэр}.$$

Таблица 3.1

**Значения  $\bar{k}$  для некоторых видов излучения**

Вид излучения	$\bar{k}$
Рентгеновское и гамма-излучение	1
Бета-излучение (электроны и позитроны)	1
Протоны с энергией меньше 10 МэВ	10
Альфа-излучение с энергией меньше 10 МэВ	20
Нейтроны с энергией 0,1...10 МэВ	10
Нейтроны с энергией меньше 20 кэВ	3

Эффективная эквивалентная доза введена для оценки опасности для всего организма при облучении отдельных органов и тканей, которые имеют неодинаковую восприимчивость к ионизирующим излучениям. Эффективная эквивалент-

ная доза облучения оценивается соотношением

$$H_{\text{эф}} = \sum_{i=1}^n W_i \cdot H_i, \quad (3.4)$$

где  $W_i$  – взвешивающий коэффициент, характеризующий степень риска облучения данного органа (ткани) по отношению к суммарному риску облучения всего организма;

$H_i$  – среднее значение эквивалентной дозы облучения в  $i$ -м органе или ткани организма.

Взвешивающие коэффициенты (коэффициенты радиационного риска) позволяют определять риск облучения вне зависимости от того, облучается весь организм равномерно или неравномерно. Значения  $W_i$  приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Органы ткани	$W_i$
Гонады (половые железы)	0,20
Красный костный мозг	0,12
Легкие	0,12
Мочевой пузырь	0,05
Грудная железа	0,05
Печень	0,05
Пищевод	0,05
Щитовидная железа	0,05
Кожа	0,01
Клетки костных тканей	0,01
Головной мозг	0,025
Остальные ткани	0,05

Сумма взвешивающих коэффициентов  $W_{\Sigma}$  для всего организма

$$W_{\Sigma} = W_1 + W_2 + \dots + W_i = 1. \quad (3.5)$$

Взвешивающие коэффициенты устанавливаются эмпирически и рассчитываются таким образом, чтобы их сумма для всего организма составляла единицу.

Например, при работе с источником ионизирующего излучения работник получил облучение органов малого таза и нижних конечностей дозой в 300 бэр. Эффективная доза данного излучения составила 84 бэр ( $H_{эф} = 300 \cdot 0,25 + 300 \cdot 0,03$ ).

Как видим, облучение указанных участков тела дозой в 300 бэр вызовет у работника такие же изменения, которые бы у него произошли при облучении всего организма дозой в 84 бэр. При этом облучение только нижних конечностей было бы эквивалентно облучению всего организма дозой в 9 бэр ( $300 \cdot 0,03$ ).

Важной характеристикой ионизирующих излучений является мощность дозы  $P$ , которая показывает, какую дозу облучения получает среда или вещество за единицу времени. Мощность любой дозы – это изменение дозы во времени. Она оценивается выражениями

$$P_D = \frac{dD}{dt} \text{ и } P_X = \frac{dX}{dt}, \quad (3.6)$$

где  $P_D$  – мощность поглощенной дозы;

$P_X$  – мощность экспозиционной дозы.

Для экспозиционной дозы единицей этой величины являются Кл/(кг·ч); Р/ч; для поглощенной дозы Гр/ч или рад/с.

Аналогичным образом введены понятия мощности других доз ионизирующих излучений.

Мощности поглощенной и экспозиционной доз для точечного источника гамма-излучения можно определить по формулам

$$P_X = \frac{A \cdot K_\gamma}{R^2} \text{ и } P_{\dot{A}} = \frac{A \cdot \tilde{A}_\delta}{R^2}, \quad (3.7)$$

где  $A$  – активность источника излучения;

$R$  – расстояние от источника излучения до рабочего места;

$K_\gamma$  и  $\tilde{A}_\delta$  – соответственно гамма- и керма-постоянные радионуклида, определяемые по таблице (прил. 1).

Керма-постоянная равна мощности поглощенной дозы в воздухе, создаваемой гамма-излучением точечного радионуклидного источника активностью 1 Бк на расстоянии 1 м от него. Она выражается в  $\text{Гр}\cdot\text{м}^2/(\text{Бк}\cdot\text{с})$ .

Гамма-постоянная равна мощности экспозиционной дозы, создаваемой гамма-излучением точечного радионуклидного источника активностью 1 мКи на расстоянии 1 см от него. Выражается гамма-постоянная в  $\text{Р}\cdot\text{см}^2/(\text{мКи}\cdot\text{ч})$ .

С учетом (3.7) поглощенная и экспозиционная дозы, накопленные за время облучения  $t$ , равны соответственно

$$D = \frac{A \cdot \Gamma_{\delta} \cdot t}{R^2} \text{ и } X = \frac{A \cdot K_{\gamma} \cdot t}{R^2}. \quad (3.8)$$

### Примеры решения задач

Задача 1. Определить величину экспозиционной дозы гамма-излучения от точечного источника кобальта-60 ( $^{60}\text{Co}$ ) активностью 10 мКи на расстоянии 0,5 м в течение 1 недели.

*Решение.*

1. Из прил. 1 определяем период полураспада для кобальта-60. Он равен  $T_{1/2}=5,3$  года.

2. Так как период полураспада намного больше времени облучения, то для определения экспозиционной дозы используем выражение (3.8):

$$X = \frac{A \cdot K_{\gamma} \cdot t}{R^2} = \frac{10 \cdot 12,93 \cdot 7 \cdot 24}{50^2} = 8,67 (\text{Р}).$$

Задача 2. Определить, какую эквивалентную дозу накопил биологический объект за 7 суток, если он подвергся комбинированному облучению альфа- и бета-частицами, мощности поглощенных доз которых составили 20 и 300  $\text{Гр}/\text{ч}$  соответственно.

*Решение.*

1. Рассчитываем дозу, полученную биологическим объектом за 7 суток

(168 ч) облучения альфа-частицами из соотношения (3.6),

$$\dot{A}_\alpha = D_\alpha \cdot t = 20 \cdot 168 = 3360 \text{ (Гр)}.$$

2. Рассчитываем дозу, полученную биологическим объектом за 7 суток при облучении бета-частицами,

$$\dot{A}_\beta = D_\beta \cdot t = 20 \cdot 168 = 50400 \text{ (Гр)}.$$

3. Определяем эквивалентную дозу, полученную при облучении объекта альфа- и бета-частицами, с учетом коэффициентов качества облучения из выражения (3.3):

$$H = \bar{K}_\alpha \cdot \dot{A}_\alpha + \bar{K}_\beta \cdot \dot{A}_\beta = 20 \cdot 3360 + 1 \cdot 50400 = 1,18 \cdot 10^5 \text{ (Гр)}.$$

Задача 3. При работе с источником ионизирующих излучений рабочий получил облучение гонад (половых желез) и клеток костных поверхностей эквивалентной дозой 550 бэр. Определить эффективную эквивалентную дозу облучения. Используя материал прил. 4, сделать выводы о последствиях этого облучения.

*Решение.*

1. По табл. 3.2 определяем значения взвешивающих коэффициентов для гонад и клеток костных тканей. Они составляют 0,20 и 0,01 соответственно.

2. Определяем эффективную эквивалентную дозу облучения из соотношения (3.4):

$$\dot{I}_{\text{эф}} = \sum_{i=1}^n W_i \cdot H_i = 550 \cdot 0,20 + 550 \cdot 0,01 = 115,5 \text{ (бэр)}.$$

Выводы: 1. Полученная доза превышает допустимую месячную дозу облучения в чрезвычайных ситуациях военного времени.

2. Эта же доза вызовет временную стерилизацию мужчин.

### *Задачи для самостоятельной работы*

Задача 1. Определить, какую эквивалентную дозу накопил биологический объект за время  $t$ , если он подвергся комбинированному облучению двумя видами излучения, мощности поглощенных доз которых составили  $P_{D1}$  и  $P_{D2}$  соответст-



венно. Исходные данные для расчета приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Параметр	Номер варианта					
	1	2	3	4	5	6
Время облучения $t$ , сут.	4	14	21	15	20	5
Первый вид излучения	Альфа	Гамма	Бета	Протоны	Гамма	Нейтроны до 10 МэВ
$R_{д1}$ , Гр/ч	25	30	15	10	8	18
Второй вид излучения	Бета	Протоны	Гамма	Бета	Нейтроны до 10 МэВ	Альфа
$R_{д2}$ , Гр/ч	35	20	12	17	15	13

Окончание табл. 3.3

Параметр	Номер варианта					
	7	8	9	10	11	12
Время облучения $t$ , сут.	2	3	5	4	6	7
Первый вид излучения	Нейтроны до 10 МэВ	Протоны	Гамма	Альфа	Бета	Гамма
$R_{д1}$ , Гр/ч	14	8	17	6	5	3
Второй вид излучения	Гамма	Бета	Нейтроны до 10 МэВ	Гамма	Протоны	Альфа
$R_{д2}$ , Гр/ч	24	10	13	12	6	2

Задача 2. Доза, поглощенная в биологической ткани при облучении альфа-частицами, составила  $D$  рад. Какой дозе квантового облучения это соответствует по биологическому действию? Исходные данные для расчета приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Параметр	Номер варианта					
	1	2	3	4	5	6
$D$ , рад	10	64	18	92	56	170

Окончание табл. 3.4

Параметр	Номер варианта					
	7	8	9	10	11	12
Д, рад	200	160	360	840	440	320

Задача 3. При работе с источником ионизирующих излучений рабочий получил облучение органов  $N$  и  $M$  эквивалентной дозой  $H$  бэр. Определить эффективную эквивалентную дозу облучения. Используя материал прил. 4, сделать выводы о последствиях этого облучения. Исходные данные для расчета приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Параметр	Номер варианта					
	1	2	3	4	5	6
Орган $N$	Легкие	Головной мозг	Кожа	Щитовидная железа	Гонады	Печень
Орган $M$	Пищевод	Клетки костных тканей	Клетки костных тканей	Пищевод	Мочевой пузырь	Кожа
Н, бэр	500	350	600	550	950	450

Окончание табл. 3.5

Параметр	Номер варианта					
	7	8	9	10	11	12
Орган $N$	Печень	Гонады	Кожа	Легкие	Головной мозг	Щитовидная железа
Орган $M$	Кожа	Мочевой пузырь	Клетки костных тканей	Пищевод	Клетки костных тканей	Пищевод
Н, бэр	1200	1350	2150	1780	1690	1000

Задача 4. Определить величину экспозиционной дозы гамма-излучения от точечного источника радиоактивного вещества  $N$  активностью  $A$  мКи на расстоянии  $R$  метров в течение 1 недели. Исходные данные для расчета приведены в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Параметр	Номер варианта					
	1	2	3	4	5	6
Вещество $N$	Цезий $^{134}\text{Cs}$	Цезий $^{137}\text{Cs}$	Кобальт $^{60}\text{Co}$	Рутений $^{106}\text{Ru}$	Марганец $^{52}\text{Mn}$	Европий $^{154}\text{Eu}$
Активность $A$ , мКи	8	10	6	12	14	9
Расстояние $R$ , м	0,3	0,4	0,5	0,2	0,6	0,4

Окончание табл. 3.6

Параметр	Номер варианта					
	7	8	9	10	11	12
Вещество $N$	Натрий $^{22}\text{Na}$	Европий $^{154}\text{Eu}$	Цезий $^{137}\text{Cs}$	Кобальт $^{60}\text{Co}$	Цезий $^{134}\text{Cs}$	Рутений $^{106}\text{Ru}$
Активность $A$ , мКи	10	12	8	7	12	10
Расстояние $R$ , м	0,4	0,3	0,5	0,5	0,4	0,5

### Контрольные вопросы

1. Поясните, что понимают под экспозиционной дозой облучения и назовите единицы ее измерения.
2. Что характеризует поглощенная доза облучения, как она рассчитывается и в каких единицах измеряется?
3. Поясните, что учитывает эквивалентная доза облучения и перечислите единицы ее измерения.
4. С какой целью введена эффективная эквивалентная доза облучения и в чем сущность взвешивающих коэффициентов?
5. Что понимают под мощностью любой дозы облучения и в каких единицах ее измеряют?
6. Перечислите приборы, с помощью которых измеряются дозы облучения.

7. С помощью каких приборов проводится измерение мощности доз облучения?

8. Перечислите приборы, позволяющие измерять активность радиоактивных веществ.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Асаенок И.С., Лубашев Л.П., Навоша А.И. Радиационная безопасность: Учеб. пособие. – Мн.: БГУИР, 2000.

2. Козлов В.Ф. Справочник по радиационной безопасности. – М.: Энергоатомиздат, 1991.

3. Гусев Н.Г., Машкович В.П., Суворов А.П. Защита от ионизирующих излучений. – М.: Атомиздат, 1980.

4. Демиденко Г.П. и др. Защита объектов народного хозяйства от оружия массового поражения. – Киев: Вищ. шк., 1989.

5. Машкович В.П. Защита от ионизирующих излучений: Справочник. – М.: Энергоиздат, 1982.

6. Иванов В.И. Курс дозиметрии. – М.: Энергоатомиздат, 1984.

7. Люцко А.М. и др. Выжить после Чернобыля. – Мн.: Выш. шк., 1990.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

### Характеристика радиоактивных веществ

№ п/п	Вещества	Постоянные			T <sub>1/2</sub>
		$\Gamma_{\delta}$ [ $\frac{Гр \cdot м^2}{Бк \cdot с} \cdot 10^{-18}$ ]	K <sub>γ</sub> [ $\frac{Р \cdot см^2}{мКи \cdot ч}$ ]	B <sub>sy</sub> [ $\frac{Зв \cdot м^2}{Бк \cdot с}$ ]	
1	Аргон-41 ( <sup>41</sup> Ar)	43,09	6,6		1,8 ч
2	Бром-82 ( <sup>82</sup> Br)	87,3	14,5		35,3 ч
3	Европий-154 ( <sup>154</sup> Eu)	43,04	5,02		16 лет
4	Йод-131 ( <sup>131</sup> I)	14,2	2,15	1,93·10 <sup>-16</sup>	8,04 сут
5	Калий-40 ( <sup>40</sup> Ka)				30 лет
6	Кобальт-60 ( <sup>60</sup> Co)	84,63	12,93	1,15·10 <sup>-15</sup>	5,3 года
7	Лантан-140 ( <sup>140</sup> La)	75,6	11,14		40,2 ч
8	Марганец-52 ( <sup>52</sup> Mn)	118,3	18,03		271 сут
9	Марганец-56 ( <sup>56</sup> Mn)	55,8	2,28		2,6 ч
10	Медь-64 ( <sup>64</sup> Cu)	7,42	1,12		12,7 ч
11	Мышьяк-74 ( <sup>74</sup> As)	16,74	4,43		26 ч
12	Натрий-22 ( <sup>22</sup> Na)	78,02	11,9		2,6 года
13	Натрий-24 ( <sup>24</sup> Na)	119,4	18,55		15,005 ч
14	<b>Плутоний-239 (<sup>239</sup>Pu)</b>			3,73·10 <sup>-20</sup>	24 300 лет
15	Полоний-210 ( <sup>210</sup> Po)				138,4 сут
16	Прометий-145 ( <sup>145</sup> Pm)				2,6 года
17	Радий-226 ( <sup>226</sup> Ra)				1600 лет
18	Ртуть-203 ( <sup>203</sup> Hg)				46,8 сут
19	Рутений-103 ( <sup>103</sup> Ru)			2,68·10 <sup>-16</sup>	39,3 сут
20	Рутений-106 ( <sup>106</sup> Ru)	7,58	1,54	1,03·10 <sup>-16</sup>	1 год
21	Стронций-90 ( <sup>90</sup> Sr)				29,12 года
22	Теллур-204 ( <sup>204</sup> Tl)				3,6 года
23	Цезий-134 ( <sup>134</sup> Cs)	57,44	8,6	7,83·10 <sup>-16</sup>	2,06 года
24	Цезий-137 ( <sup>137</sup> Cs)	21,33	3,24	2,91·10 <sup>-16</sup>	30 лет
25	Цинк-65 ( <sup>65</sup> Zn)				244 сут

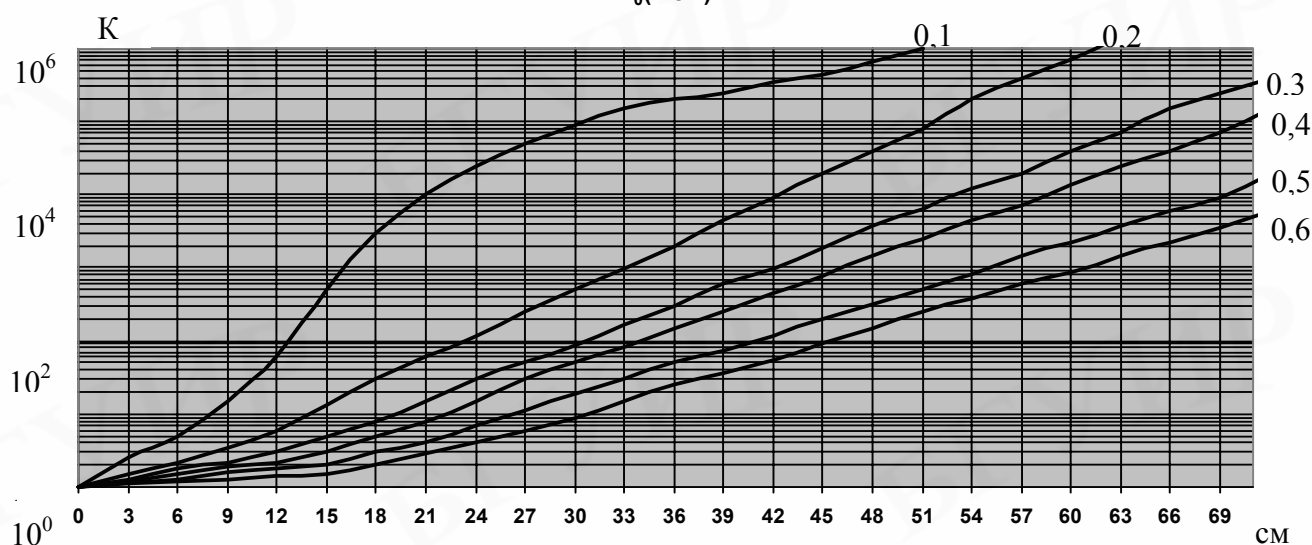
Приложение 2

Линейный коэффициент ослабления узкого пучка гамма-излучения, см<sup>-1</sup>

№ п/п	E <sub>γ</sub> , МэВ	Алюминий, ρ=2,7 г/см <sup>3</sup>	Бетон, ρ=2,35г/см <sup>3</sup>	Железо, ρ=7,8г/см <sup>3</sup>	Медь, ρ=8,92г/см <sup>3</sup>	Олово, ρ=7,28г/см <sup>3</sup>	Свинец, ρ=11,3г/см <sup>3</sup>
1	0,1	0,456	0,397	2,92	3,702	7,15	62,068
2	0,2	0,329	0,291	1,146	1,293	2,228	10,689
3	0,3	0,281	0,251	0,864	0,945	1,114	4,278
4	0,4	0,250	0,224	0,738	0,813	0,801	2,496
5	0,5	0,228	0,204	0,659	0,728	0,757	1,725
6	0,6	0,210	0,189	0,604	0,668	0,572	1,350
7	0,662	0,200	0,178	0,570	0,642	0,541	1,18
8	0,8	0,184	0,166	0,525	0,582	0,472	0,983
9	1,0	0,166	0,149	0,470	0,522	0,413	0,789
10	1,25	0,148	0,132	0,408	0,474	0,373	0,655
11	1,5	0,135	0,122	0,381	0,426	0,333	0,592
12	2,0	0,117	0,104	0,333	0,373	0,296	0,525
13	3,0	0,0953	0,0853	0,283	0,319	0,266	0,480
14	4,0	0,0837	0,0745	0,259	0,296	0,259	0,478
15	5,0	0,0761	0,0674	0,246	0,284	0,259	0,483
16	6,0	0,0712	0,0630	0,239	0,276	0,261	0,495
17	8,0	0,0650	0,0571	0,231	0,271	0,269	0,521
18	10,0	0,0618	0,0538	0,231	0,273	0,280	0,555

Приложение 3

Толщина защиты из бетона (ρ=2,3 г/см<sup>3</sup>)  
E<sub>0</sub>(МэВ)



*Значение некоторых доз облучения для населения*

№ п/п	Наименование доз облучения	Величины доз и единицы измер.
1	Допустимая разовая доза облучения в чрезвычайных ситуациях военного времени	50 бэр
2	Допустимая месячная доза облучения в чрезвычайных ситуациях военного времени	100 бэр
3	Допустимая годовая доза облучения в чрезвычайных ситуациях военного времени	300 бэр
4	Допустимая накопленная доза облучения при авариях на радиационно опасных объектах	25 бэр
5	Допустимая средняя годовая доза облучения персонала	2 бэр/год
6	Допустимая средняя годовая доза облучения населения	0,1 бэр/год
7	Доза облучения, вызывающая временную стерилизацию мужчин	10 бэр
8	Доза облучения, вызывающая постоянную стерилизацию мужчин	200 бэр
9	Доза облучения, вызывающая постоянную стерилизацию женщин	300 бэр
10	Доза облучения, которую выдерживают почки	2300 бэр
11	Доза облучения, которую выдерживают кости и хрящи	7000 бэр
12	Доза облучения, которую выдерживает печень	4000 бэр
13	Доза облучения, которую выдерживает головной мозг	8000 бэр



Учебное издание

**Асаёнок** Иван Степанович,  
**Навоша** Адам Имполитович,  
**Машкович** Александр Иванович,  
**Яшин** Константин Дмитриевич

## **ОЦЕНКА ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ И МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ ОТ НИХ**

Методическое пособие  
к практическим занятиям по дисциплине  
«Защита населения и хозяйственных объектов в чрезвычайных ситуациях.  
Радиационная безопасность»  
для студентов всех специальностей и форм обучения БГУИР

Редактор Т.Н. Крюкова  
Корректор Е.Н. Батурчик  
Компьютерная верстка Т.В. Шестакова

---

Подписано в печать .09.2003.  
Печать ризографическая.  
Уч.-изд. л. 2,0.

Формат 60x84 1/16.  
Гарнитура «Таймс».  
Тираж 300 экз.

Бумага офсетная.  
Усл. печ. л.  
Заказ 357.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».  
Лицензия ЛП № 156 от 30.12.2002.  
Лицензия ЛВ № 509 от 03.08.2001.  
220013, Минск, П. Бровки, 6