

# 1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Во многих областях практической деятельности людей применяются радиоактивные вещества и источники ионизирующих излучений.

При помощи радиоактивных изотопов проводится контроль качества изделий (рентгеновскими и гамма-дефектоскопами), управление технологическими операциями (радиоизотопными датчиками и измерителями), включение пожарной сигнализации (дымовыми извещателями) и т.д.

Кроме этого люди постоянно подвергаются воздействию внешнего ионизирующего излучения от солнца и поверхности земли, а также внутреннего облучения от попадающих внутрь организма радионуклидов при дыхании и употреблении воды и пищи.

Вопросы определения доз облучения людей были актуальными во время и после проведения испытаний ядерного оружия, но особую актуальность получили после аварии на Чернобыльской АЭС, когда в атмосферу было выброшено около 50 МКи различных радионуклидов и радиоактивным выпадениям были подвергнуты территории Украины, Белоруссии и России. Первичная информация о радиационном загрязнении территории практически не дает представления о возможных индивидуальных дозах облучения и путях формирования суммарной дозы у человека, поэтому необходимы знания расчета доз облучения (в первую очередь от  $\gamma$ -излучающих радионуклидов) и определения уровня риска.

## 1.1 Ионизирующее излучение, радионуклиды, радиоактивный распад

Ионизирующее излучение - излучение, воздействие которого со средой приводит к образованию ионов разных знаков. Основными источниками ионизирующего излучения являются радионуклиды - разновидности атомов с данным массовым числом и атомным номером. Массовое число нуклида указывается сверху слева от символа химического элемента, например, нуклид стронция  $^{90}\text{Sr}$ , нуклид цезия  $^{137}\text{Cs}$ .

Один и тот же элемент может иметь разные массовые числа и разновидности этого элемента называются изотопами, например,  $^{131}\text{I}$  и  $^{133}\text{I}$ .

Радиоактивный распад сопровождается корпускулярным излучением ( $\alpha$ -частиц,  $\beta$ -частиц, нейтронов и т.п.), или фотонным излучением (гамма или рентгеновским):

$\alpha$ -частицы являются ядрами атомов гелия, несущими положительный заряд. Они имеют незначительный пробег (в воздухе от 2 до 9 см, в биологических тканях - от 0.02 до 0.06 мм), но высокой степенью ионизации. При внешнем облучении  $\alpha$ -частицы не представляют опасности, но при попадании внутрь организма радиоактивных веществ в виде пыли они очень опасны;

$\beta$ -частицы представляют собой поток электронов или позитронов, в воздухе они могут пройти до 40 м, а в биологической ткани - до 12 мм. Плотность ионизации атомов среды  $\beta$ -частицами в десятки раз меньше, чем при ионизации  $\alpha$ -частицами;

$\gamma$ -лучи это электромагнитное излучение с длиной волны приблизительно  $10^{-12}$  м и частотой около  $10^{20}$  Гц. Эти лучи обладают значительно меньшей, чем  $\alpha$ -частицы, ионизирующей способностью, но высокой проникающей способностью (бетонные стены толщиной 5 см ослабляют  $\gamma$ -излучение в два раза);

рентгеновские лучи - это коротковолновое электромагнитное излучение с длиной волны от  $10^{-7}$  до  $10^{-12}$  м. Они, также как  $\gamma$ -лучи, обладают высокой проникающей способностью.

## 1.2 Активность радионуклидов

Активность радионуклидов  $A$  - это число самопроизвольных случайных распадов или число испускаемых частиц  $\Delta N$  в единицу времени  $\Delta t$ :

$$A = \Delta N / \Delta t. \quad (1.1)$$

Единицей активности является Бк (беккерель), 1 Бк = 1 расп/с.

Также единицей активности является Ки (кюри), 1 Ки =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк.

Активность радионуклидов со временем уменьшается по экспоненциальному закону. Изменение активности описывается формулой

$$A_t = A_0 \exp(-0,693 t / T_{1/2}), \quad (1.2)$$

где  $A_t$  - активность радионуклида по прошествии времени  $t$ ;

$A_0$  - активность радионуклида в начальный период ( $t = 0$ );

$t$  - время;

$T_{1/2}$  - период полураспада, т.е. время в течение которого распадается половина радиоактивных атомов.

Если  $t = T_{1/2}$ , то  $A_t = A_0 / e^{0,693} = A_0 / 2$ .

Период полураспада у некоторых радионуклидов составляет несколько суток, а у некоторых - годы (табл. 1.1).

Таблица 1.1 – Радиобиологические свойства радионуклидов

Нуклид	Эффективная энергия $E_{эф}$ , МэВ расп	Гамма постоянная $K_\gamma$ , $\frac{P \cdot \text{см}^2}{\text{ч} \cdot \text{мКи}}$	Период полураспада $T_{1/2}$ , сут	Критический орган	Доля нуклида, попадающая в рассматриваемый орган		Период полувыведения из организма $T_{B/2}$ , сут
					При заглатывании $f_3$	При вдыхании $f_{вд}$	

$^{60}\text{Co}$	1,5	6,75	$1,9 \cdot 10^3$	Все тело Печень	0,3 0,001	0,45 0,02	9,5 9,5
$^{131}\text{J}$	0,41	1,69	8	Все тело. Щитов ид железа	1,0 0,3	0,75 0,23	138 138
$^{137}\text{Cs}$	0,59	3,19	$1,1 \cdot 10^4$	Все тело	1,0	0,75	70
$^{226}\text{Ra}$	110	9,36	$5,9 \cdot 10^5$	Все тело	0,3	0,4	$8,1 \cdot 10^3$
$^{90}\text{Sr}$	1,1	2,94	$1 \cdot 10^4$	Скелет	0,3	0,12	$1,8 \cdot 10^4$
$^{235}\text{U}$	46	0,51	$2,6 \cdot 10^{11}$	Все тело Кости Почки	$1 \cdot 10^4$ $0,1 \cdot 10^{-5}$ $1,1 \cdot 10^{-5}$	0,25 0,028 0,028	100 300 15

### 1.3 Экспозиционная доза

Экспозиционная доза является качественной характеристикой фотонного излучения (рентгеновского и гамма-излучения), она определяется по ионизации воздуха, т.е. когда поглощенная энергия в некотором объеме воздуха равна суммарной кинетической энергии электронов и позитронов, образованных фотонным излучением в том же объеме.

Непосредственно измеряемой физической величиной при определении экспозиционной дозы  $\gamma$ -излучения является электрический заряд ионов одного знака, образованных в воздухе за время облучения:

$$D_{\text{эксп}} = Q / m, \quad (1.3)$$

где  $D_{\text{эксп}}$  - экспозиционная доза, Кл/кг;

$Q$  - полный заряд ионов одного знака, Кл;

$m$  - масса объема воздуха, кг.

Внесистемной единицей экспозиционной дозы является рентген (Р),

$$1 \text{ Р} = 0,285 \text{ мКл/кг.}$$

### 1.4 Поглощенная доза

Поглощенная доза характеризует изменения, происходящие в облучаемом веществе (воздухе, воде, дереве, железе и т.д.).

Поглощенная доза - это энергия, передаваемая веществу массой в одну единицу:

$$D_{\text{погл}} = E / m, \quad (1.4)$$

где  $D_{\text{погл}}$  - поглощенная доза, Дж/кг;

$E$  - энергия ионизирующего излучения, поглощенная облучаемым веществом, Дж;

$m$  - масса облучаемого вещества, кг.

В системе СИ поглощенная доза измеряется в Гр (грей):

$$1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг.}$$

В практике часто используется специальная единица поглощенной дозы - рад. Один рад соответствует такой поглощенной дозе, при которой количество энергии, выделяемой одним граммом любого вещества, равно 0,01 Дж, т.е.

$$1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Дж/кг} = 0,01 \text{ Гр}.$$

Поглощенная доза связана с экспозиционной дозой следующим соотношением:

$$D_{\text{полг}} = D_{\text{эксп}} \cdot K_1, \quad (1.5)$$

где  $K_1$  - коэффициент, учитывающий вид облучаемого вещества (воздух, вода и т.п.), т.е. учитывающий отношение энергии, поглощенной данным веществом, к электрическому заряду ионов, образованных в воздухе такой же массы.

При экспозиционной дозе в 1 Р энергия  $\gamma$ -излучения, расходуемая на ионизацию 1 г воздуха, равна 0,87 рад, т.е. для воздуха

$$K_1 = 0,87 \text{ рад/Р} = 0,87 \cdot 0,01 \text{ Дж/кг} = 0,87 \cdot 0,01 \text{ Гр/Р}.$$

Поскольку ткани организма имеют несколько иной эффект поглощения по сравнению с водой, то используются переводные коэффициенты для различных тканей тела человека:

$$\begin{aligned} \text{для воды в организме} \quad K_1 &= 0,887 \dots 0,975 \text{ рад/Р}, \\ \text{для мышц} \quad K_1 &= 0,933 \dots 0,972 \text{ рад/Р}, \\ \text{для костей} \quad K_1 &= 1,03 \dots 1,74 \text{ рад/Р}. \end{aligned}$$

В целом для организма человека при облучении от  $\gamma$ -источника коэффициент  $K_1 = 1 \text{ рад/Р} = 0,01 \text{ Гр/Р}$ .

### 1.5 Эквивалентная доза

Эквивалентная доза учитывает не только энергию, передаваемую веществу, но и те биологические эффекты, которые производит проникающая радиация в теле человека:

$$D_{\text{экв}} = D_{\text{полг}} \cdot K_2 = D_{\text{эксп}} \cdot K_1 \cdot K_2, \quad (1.6)$$

где  $D_{\text{экв}}$  - эквивалентная доза, Зв;

$K_2$  - коэффициент качества облучения (таблица 1.2).

Таблица 1.2

Средние значения коэффициента качества  $K_2$

Вид излучения	$K_2$ (Зв/Гр или бэр/рад)
Рентгеновское и $\gamma$ -излучение	1
Электроны и позитроны, $\beta$ -излучение	1
Нейтроны с энергией меньше 20 кэВ	3

Нейтроны с энергией 0,1 - 10 МэВ	10
$\alpha$ -излучение с энергией меньше 10 МэВ	20

В системе СИ единицей измерения эквивалентной дозы является зиверт (Зв).

Специальной единицей эквивалентной дозы является бэр (биологический эквивалент рентгена).

Для рентгеновского и  $\gamma$  излучения коэффициенты

$$K_1 = 1 \text{ рад/Р}, K_2 = 1 \text{ бэр/рад и } 1 \text{ Р эквивалентен } 1 \text{ бэр},$$

$$\text{т.е. } 1 \text{ Р} \Leftrightarrow 1 \text{ рад} \Leftrightarrow 1 \text{ бэр}.$$

Чтобы отметить различие между экспозиционной, поглощенной и эквивалентной дозами, а также единицами измерений эти параметры сведены в таблицу 1.3.

Таблица 1.3

Основные параметры, характеризующее излучение

Параметры	Единицы измерения	
	Старая система	Система СИ
А – активность радионуклида (количество частиц, вылетающих из вещества в единицу времени)	Бк (беккерель) 1 Бк = 1 расп/с 1 Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк	
$D_{\text{эксп}}$ – экспозиционная доза (определяется по ионизации воздуха)	Р (рентген)	Кл/кг $1 \text{ Р} = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$
$D_{\text{погл}}$ – поглощенная доза (определяется по энергии, поглощенной воздухом, водой и другими веществами)	рад	Гр (грей) 1 Гр = 1 Дж/кг 100 рад = 1 Гр
$D_{\text{экв}}$ – эквивалентная доза (определяется по действию на человека)	бэр	Зв (зиверт) 100 бэр = 1 Зв
$D_{\text{экв}} = D_{\text{погл}} \cdot K_2 = D_{\text{эксп}} \cdot K_1 \cdot K_2$ <p>Для рентгеновского и <math>\gamma</math>-излучения 1 Р эквивалентен 1 бэр, т.е. коэффициенты <math>K_1 = 1 \text{ рад/Р} = 0,01 \text{ Гр/Р}</math>, <math>K_2 = 1 \text{ бэр/рад} = 1 \text{ Зв/Гр}</math>,  <math>1 \text{ Р} \Leftrightarrow 1 \text{ рад} \Leftrightarrow 1 \text{ бэр}</math>,  <math>100 \text{ Р} \Leftrightarrow 1 \text{ Гр} \Leftrightarrow 1 \text{ Зв}</math></p>		

### 1.6 Мощность дозы и доза

Мощность экспозиционной, поглощенной или эквивалентной дозы  $\dot{D}$  характеризуется дозой, полученной в единицу времени, т.е.

$$\dot{D} = \frac{\Delta D}{\Delta t} \quad (1.7)$$

где  $\Delta D$  - приращение дозы за промежуток времени  $\Delta t$ .

Мощность экспозиционной дозы  $\dot{D}_{\text{эксп}}$  измеряется в системе СИ в Кл/(кг·с); внесистемными единицами являются Р/с, Р/ч, мР/ч, мкР/ч и др.

Мощность поглощенной дозы  $\dot{D}_{\text{погл}}$  в системе СИ измеряется в Гр/с, мкГр/с, аГр/с и т.д.

Мощность эквивалентной дозы  $\dot{D}_{\text{экв}}$  измеряется в системе СИ в Зв/с, мЗв/ч, мкЗв/ч; внесистемными единицами являются бэр/с, бэр/ч и т.д.

Для измерения мощности дозы применяются различные приборы, имеющие ионизационные камеры, камеры с люминесцирующим веществом, химические системы и др.

По измеренным значениям мощности дозы можно определить дозу облучения:

$$D = \int_0^t \dot{D} dt, \quad (1.8)$$

если мощность дозы не меняется во времени, то

$$D = \dot{D} \cdot t, \quad \dot{D} = \text{const}, \quad (1.9)$$

где  $t$  - время воздействия ионизирующего излучения.

Для измерения дозы ионизирующего излучения применяются приборы - дозиметры. Сравнительная простота измерения ионизации воздуха привела к тому, что большинство дозиметрических приборов фиксируют экспозиционную дозу.

## **2. ВОЗДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА, НОРМИРОВАНИЕ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ**

Ионизирующее излучение оказывает вредное воздействие на организм человека, но наши органы чувств не приспособлены к их восприятию, поэтому без специальных приборов мы не можем судить о наличии радиации и ее уровне.

Ионизация живой ткани приводит к разрыву молекулярных связей, изменению химической структуры молекул и как следствие - к гибели клеток. Под влиянием излучения происходит расщепление молекул воды с образованием радикалов, которые могут вступать в реакции с веществами. В результате нормальное течение биохимических процессов и обмен веществ нарушается. Чем больше поглощенная доза, тем больше ионизация и отрицательный биологический эффект.

Красный костный мозг теряет способность нормально

функционировать при дозах облучения 0,5...1 Зв (50...100 бэр). Репродуктивные органы и глаза отличаются повышенной чувствительностью к облучению. Однократное облучение семенников при дозе 0,1 Зв приводит к временной стерильности мужчин, а дозы свыше 2 Зв - могут привести к постоянной стерильности. Облучение глаз при дозе 2...10 бэр/год в течение 10 - 20 лет приводит к гибели клеток хрусталика глаза, появлению помутневших участков хрусталика (катаракте), а затем и полной слепоте.

Рак - наиболее серьезное из всех последствий облучения человека при малых дозах. Вероятность заболевания раком растет прямопропорционально дозе облучения. Первыми в группе раковых заболеваний стоят лейкозы, они вызывают гибель людей в среднем через 10 лет с момента облучения. Далее - рак молочной железы и рак щитовидной железы; эти виды заболеваний в начальной стадии излечимы.

Рак желудка, печени, толстой кишки и т.д. встречаются реже. Рак легких практически неизлечим.

У людей, получающих малые дозы облучения, наблюдается повышенное содержание клеток крови с хромосомными нарушениями. Эти нарушения проявляются в следующем или последующих поколениях (это дети, внуки и более отдаленные потомки).

Если облучение производится не однократно, а в этой дозе растянуто во времени, то эффект облучения будет снижен. Это связано с тем, что живые организмы, в том числе и человек, способны восстанавливать нормальную жизнедеятельность после нарушений.

Условия безопасной работы с радиоактивными веществами регламентированы Нормами радиационной безопасности НРБ-76/87 и Основными санитарными правилами работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений ОСП-72/87 [1].

Радиационному воздействию могут подвергаться не только лица, непосредственно работающие с радиоактивными веществами, но и население, поэтому нормами НРБ-76/87 установлены предельно допустимые уровни облучения в зависимости от категории облученных лиц и группы критических органов (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Дозовые пределы облучения

Дозовые пределы внешнего и внутреннего облучения, бэр за год	Критическая группа органов		
	1 (все тело, половые железы и красный костный мозг)	2 (мышцы, щитовидная железа, внутренние органы)	3 (кожные покровы, костная ткань, кисти рук, стопы)
ПДД для			

категории А (профессиональ ные работники, постоянно или временно работающие непосредственно с источниками ионизирующих излучения)	5	15	30
ПД для категории Б (население, не работающее непосредственно с источниками излучения, но может подвергаться воздействию радиоактивных веществ)	0,5	1,5	3

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ ОТ ТОЧЕЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Величина мощности экспозиционной дозы от точечного источника (рисунок 3.1) прямо пропорциональна активности радионуклида и обратно пропорциональна квадрату расстояния до него. Кроме этого, разные радионуклиды при одинаковой активности создают разную величину экспозиционной дозы, что учитывается гамма-постоянной:

$$\dot{D}_{\text{эксп}} = \frac{K_{\gamma} \cdot A}{R^2}, \quad (3.1)$$

где  $\dot{D}_{\text{эксп}}$  - мощность экспозиционной дозы, Р/ч;

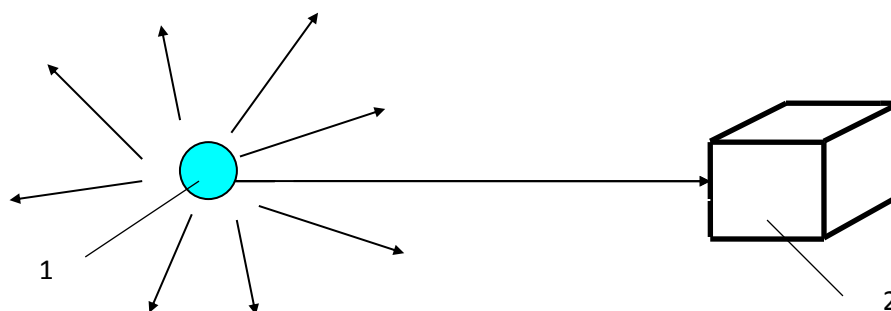
$K_{\gamma}$  - гамма-постоянная радионуклида, Р·см<sup>2</sup> / (ч ·мКи);

A - активность радионуклида, мКи;

R - расстояние от точечного радионуклида до места измерения, см.

Гамма-постоянная показывает, какую мощность экспозиционной дозы создает данный радионуклид активностью 1 мКи на расстоянии 1 см. За эталон принят радий-226 массой 1 мг, заключенный в платиновую упаковку толщиной 0,5 мм, который создает на расстоянии 1 см мощность дозы  $\dot{D}_{\text{эксп}} = 8,4$  Р/ч. Значения гамма-постоянных приведены в таблице 1.1, например, для цезия-137  $K_{\gamma} = 3,19$  Р·см<sup>2</sup>/(ч·мКи).





1- точечный источник  $\gamma$ -излучения; 2 - облучаемое вещество

Рисунок 3.1 – Схема для расчета мощности экспозиционной и поглощенной дозы

Для определения дозы облучения от точечных источников  $\gamma$ -излучения обычно используется формула (1.9), т.е. принимается мощность дозы постоянной во времени.

3.1. Пример. Определить эквивалентную дозу и сравнить с допустимой, полученной рабочим от точечного изотропного источника  $^{60}\text{Co}$  активностью  $1,1 \cdot 10^{-2} \text{ Ки}$ , если он работает с источником в течение всего рабочего времени на расстоянии 0,8 м. Продолжительность рабочего времени для персонала составляет 1700 ч/год (36-часовая рабочая неделя).

Решение.

Определяем мощность экспозиционной дозы на рабочем месте по формуле (3.1):

$$\dot{D}_{\text{эксп}} = \frac{K_{\gamma} \cdot A}{R^2},$$

где значение гамма-постоянной выбираем из таблицы 1.1,

$$\dot{D}_{\text{эксп}} = \frac{6,75 \cdot 1,1 \cdot 10^{-2} \cdot 10^3}{80^2} = 0,0116 \text{ Р/ч.}$$

Экспозиционную дозу, полученную рабочим за год, определяем по формуле (1.9)

$$D_{\text{эксп}} = \dot{D}_{\text{эксп}} \cdot t = 0,0116 \cdot 1700 = 19,7 \text{ Р/год.}$$

Эквивалентная доза, полученная рабочим, составляет

$$D_{\text{эксп}} = \dot{D}_{\text{эксп}} \cdot K_1 \cdot K_2 = 19,7 \cdot 1 \cdot 1 = 19,7 \text{ бэр/год,}$$

т.е. она превышает почти в 4 раза предельно допустимую дозу для категории А (таблица 2.1).

3.2. Пример. На расстоянии  $R = 0,3 \text{ м}$  от точечного источника радионуклида  $^{60}\text{Co}$  мощность эквивалентной дозы от  $\gamma$ -излучения составляет  $D_{\text{экв}} = 450 \text{ мкЗв/ч}$ . На каком расстоянии от источника ( $R_{\text{пдд}}$ ) можно работать, чтобы доза облучения персонала не превышала ПДД при

36-часовой рабочей неделе и равномерном распределении дозы в течение года?

Решение.

Эквивалентную дозу, полученную рабочим за год, определяем по формуле (1.9)

$$D_{\text{экв}} = \dot{D}_{\text{экв}} \cdot t = 450 \cdot 10^{-6} \cdot 1700 = 0,765 \text{ Зв/год.}$$

Полученная доза превышает ПДД (0,05 Зв/год) в 15,3 раза, поэтому необходимо увеличить расстояние от источника излучения до рабочего места.

Мощность дозы, а следовательно и доза, уменьшаются с увеличением квадрата расстояния (по зависимости 3.1), поэтому требуемое расстояние  $R_{\text{ПДД}}$  можно вычислить по отношению

$$\begin{aligned} \dot{D}_{\text{эксп}} \cdot R^2 &= \dot{D}_{\text{эксп}} \cdot R_{\text{ПДД}}^2, \\ \dot{D}_{\text{эксп}} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot t \cdot R^2 &= \dot{D}_{\text{эксп.тр}} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot t \cdot R_{\text{ПДД}}^2, \\ \dot{D}_{\text{экв}} \cdot R^2 &= \text{ПДД} \cdot R_{\text{ПДД}}^2, \\ R_{\text{ПДД}} &= \sqrt{\frac{\dot{D}_{\text{экв}} \cdot R^2}{\text{ПДД}}} = \sqrt{\frac{0,765 \cdot 0,3^2}{0,05}} = 1,17 \text{ м.} \end{aligned}$$

Таким образом получено, что расстояние от источника излучения до рабочего места должно быть не менее 1,17 м.

## 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЗ ОТ РАДИОНУКЛИДОВ, РАВНОМЕРНО РАСПРЕДЕЛЕННЫХ В ПОЧВЕ

### 4.1 Определение доз от $\gamma$ -излучения радионуклидов, находящихся в почве, путем измерения мощности эквивалентной дозы прибором

При определении эквивалентной дозы облучения человека от  $\gamma$ -излучающих радионуклидов, находящихся в земле, можно использовать формулу (1.9). Кроме этого, необходимо учитывать экранирование тканей человека другими тканями, а также стенами зданий и сооружений. Научный комитет ООН по действию атомной радиации (НКДАР) рекомендует использовать усредненное значение коэффициента ослабления поглощенной дозы в теле человека по сравнению с поглощенной дозой в воздухе  $K_{\text{нкдар}}=0,7$ .

Измерив мощность эквивалентной дозы облучения на высоте 1 м от поверхности земли, можно определить дозу, полученную человеком:

$$D_{\text{экв}} = \dot{D}_{\text{экв}} \cdot t \cdot K_{\text{нкдар}}, \quad (4.1)$$

где  $D_{\text{экв}}$  - эквивалентная доза облучения человека, Зв;

$\dot{D}_{\text{экв}}$  - мощность эквивалентной дозы облучения, Зв/ч;

$t$  - время нахождения человека в данном районе, ч.

4.1. Пример. Оценить опасность нахождения людей на территории,

если мощность эквивалентной дозы облучения человека на расстоянии 1 м от поверхности земли составляет 0,6 мкЗв/ч.

Решение.

Годовая эквивалентная доза рассчитывается по формуле (4.1):

$$\begin{aligned} D_{\text{экв}} &= \dot{D}_{\text{экв}} \cdot t \cdot K_{\text{нкдар}} = \\ &= 0,6 \cdot 10^{-6} \cdot 24 \cdot 365 \cdot 0,7 = 0,0037 \text{ Зв/год} . \end{aligned}$$

Предельно допустимая доза для населения (категория Б, таблица 2.1) ПДД<sub>Б</sub> = 0,5 бэр/год = 0,005 Зв/год. То есть эквивалентная доза  $D_{\text{экв}}$  меньше ПДД<sub>Б</sub> в 1,3 раза.

#### 4.2 Определение доз от $\gamma$ -излучения радионуклидов, находящихся в почве, по величине активности единицы площади земной поверхности

Доза  $\gamma$ -излучения от земной поверхности обычно определяется для точки на высоте  $H$  от земли и считается, что основное излучение попадает в эту точку с площади круга радиусом  $3 \cdot H$  (рисунок 4.1).

Формула расчета мощности дозы облучения в этом случае:

$$\dot{D}_{\text{экср}} = \pi \cdot A_s \cdot K_{\gamma} \cdot \ln \frac{H^2 + R^2}{H^2}, \quad (4.2)$$

где  $\dot{D}_{\text{экср}}$  - мощность экспозиционной дозы  $\gamma$ -излучения от земной поверхности, Р/ч;

$A_s$  - среднегодовая активность (плотность загрязнения радионуклидами) поверхности земли, мКи/см<sup>2</sup>;

$H$  - высота над поверхностью земли, м;

$R$  - радиус круга земной поверхности, м.

Для определения дозы, полученной человеком, принимается  $H=1$ м,  $R = 3$  м.

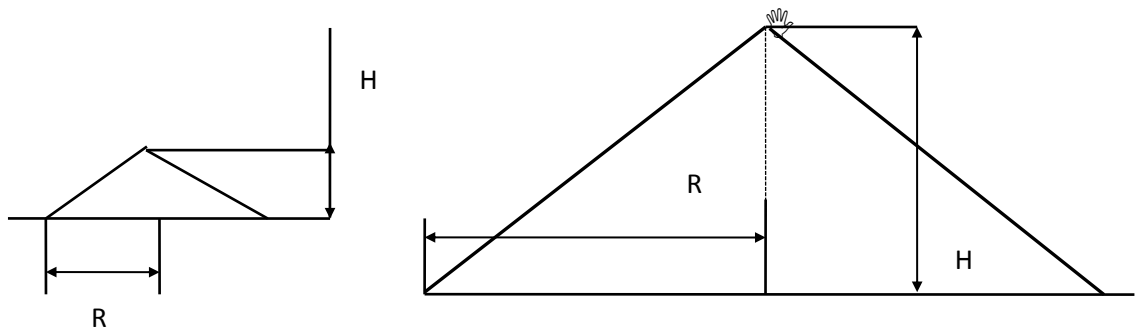


рисунок 4.1 – Схема определения дозы  $\gamma$ -излучения от поверхности земли

4.2. Пример. Определить эквивалентную дозу облучения, полученную

человеком за год, если среднегодовая активность поверхности земли от цезия-137 составляет  $2 \cdot 10^6$  Бк/м<sup>2</sup>.

Решение.

Мощность экспозиционной дозы определяем по формуле (4.2)

$$\dot{D}_{\text{эксп}} = \pi \cdot A_s \cdot K_\gamma \cdot \ln \frac{H^2 + R^2}{H^2},$$

где активность

$$A_s = 2 \cdot 10^6 \text{ Бк/м}^2 = \frac{2 \cdot 10^6 \cdot 10^3}{3,7 \cdot 10^{10} \cdot 10^4} \text{ мКи/см}^2 = 5,4 \cdot 10^{-6} \text{ мКи/см}^2;$$

$$\dot{D}_{\text{эксп}} = \pi \cdot 5,4 \cdot 10^{-6} \cdot 3,19 \cdot \ln \frac{1^2 + 3^2}{1^2} = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ р/ч}.$$

Эквивалентную дозу, полученную человеком за год, вычисляем по формуле (4.1)

$$D_{\text{экв}} = \dot{D}_{\text{экв}} \cdot t \cdot K_{\text{нкдар}} = 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-2} \cdot 24 \cdot 365 \cdot 0,7 = 7,36 \cdot 10^{-3} \text{ Зв/год}$$

Эта доза примерно в 1,5 раза выше ПДД для населения.

#### 4.3 Ориентировочная оценка радиационного загрязнения поверхности земли

Для ориентировочной оценки радиационного загрязнения поверхности земли обычно используют измерительные приборы установленные на вертолете. Вертолет пролетает на высоте 100 м от земли параллельными маршрутами через 600 м и затем строится карта. Таким образом были построены карты радиационного загрязнения (Ки/км<sup>2</sup>) поверхности земли в Тульской области.

В случае загрязнения территории цезием-137 от Чернобыльской АЭС расчет доз внешнего облучения можно производить с помощью дозовых коэффициентов

$$D_{\text{экв}} = A_T \cdot d, \quad (4.3)$$

где  $D_{\text{экв}}$  - годовая эквивалентная доза облучения, бэр/год;

$A_T$  - среднегодовая плотность загрязнения территории, Ки/км<sup>2</sup>;

$d$  - дозовый коэффициент, бэр · км<sup>2</sup> / (Ки · год).

Таблица 4.1 – Значения коэффициента  $d$  с учетом ослабления внешнего облучения зданиями

Тип населенного пункта	Значение коэффициента $d$ , бэр·км <sup>2</sup> /(Ки·год)
Города областного и республиканского подчинения	0,006
Города районного подчинения и поселки городского типа	0,009
Все населенные пункты, кроме	0,013

4.3. Пример. Определить годовую эквивалентную дозу облучения населения, если плотность загрязнения поверхности земли составляет  $40 \text{ Ки/км}^2$ .

Решение.

Годовая эквивалентная доза облучения людей рассчитывается по формуле (4.3):

$$D = 40 \cdot 0,009 = 0,36 \text{ бэр/год},$$

то есть доза ниже предельно допустимой.

## 5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЗ ВНУТРЕННЕГО ОБЛУЧЕНИЯ ОТ ГАММА-ИЗЛУЧАЮЩИХ РАДИОНУКЛИДОВ

Радиоактивные вещества могут поступать в организм человека при вдыхании воздуха, загрязненного радиоактивными веществами, через желудочно-кишечный тракт, а также через кожу. Из-за большого объема легочной вентиляции ( $20 \text{ м}^3/\text{сут}$ ) и более высокого коэффициента усвоения наиболее опасен первый путь. Количество радионуклидов, поступающих из желудочно-кишечного тракта в кровь, зависит от его вида, например, цирконий Zr и ниобий Nb практически не поступают в кровь (коэффициент резорбции составляет доли процента), висмут Bi - 1%, барий Ba - 5%, кобальт Co и стронций Sr - до 30%, водород и щелочно-земельные вещества - 100%.

Поступления в кровь через неповрежденную кожу в 200-300 раз меньше, чем через желудочно-кишечный тракт. Исключение составляет изотоп водорода - тритий, легко проникающий в кровь через кожу.

По характеру распределения в организме радиоактивные вещества условно разделяются на три группы: равномерно распределяющиеся в организме, отлагающиеся преимущественно в скелете и концентрирующиеся в печени (см. таблицу 1.1). Особое место занимает радиоактивный йод, который селективно отлагается в щитовидной железе.

Мощность дозы, получаемая человеком при внутреннем облучении в общем виде определяется выражением

$$\dot{D}_{\text{ЭКВ.ВН}} = 2,7 \cdot 10^{-11} \cdot A_{\text{уд}} \cdot K_{\gamma} \cdot \rho \cdot g \cdot K_1 \cdot K_2, \quad (5.1)$$

где  $\dot{D}_{\text{ЭКВ.ВН}}$  - мощность эквивалентной дозы в рассматриваемом органе или ткани при внутреннем облучении человека, Зв/ч;

$A_{\text{уд}}$  - удельная активность радионуклида в рассматриваемом органе человека, Бк/кг;

$K_{\gamma}$  - гамма-постоянная радионуклида,  $\text{Р} \cdot \text{см}^2/(\text{ч} \cdot \text{мКи})$ ;

$\rho$  - плотность ткани, ( $\rho = 1 \text{ г/см}^3$ );

$g$  - геометрический фактор, см;

$K_1$  - коэффициент перевода единицы экспозиционной дозы в единицу

поглощенной дозы, ( $K_1 = 0,01 \text{ Гр/Р}$ );

$K_2$  - коэффициент качества облучения, ( $K_2 = 1 \text{ Зв/Гр}$ ).

Удельная активность радионуклида  $A_{уд}$ , Бк/кг рассчитывается по формуле

$$A_{уд} = \frac{A \cdot f}{m}, \quad (5.2)$$

где  $A$  - активность единичного поступления радионуклида в организм человека, Бк;

$f$  - коэффициент метаболизма (см. таблицу 1.1);

$m$  - масса всего тела человека (если радионуклид распространяется по всему телу) или масса органа человека, куда поступает радионуклид, кг.

Геометрический фактор  $g$  учитывает соотношение массы облучаемого тела или органа и его геометрических размеров. Например, чем ниже рост человека и больше его масса, тем больше  $g$ :

рост 2 м, масса 60 кг  $g = 117 \text{ см}$ ;

рост 1,7 м, масса 70 кг  $g = 126 \text{ см}$ ;

рост 1,4 м, масса 100 кг  $g = 154 \text{ см}$ .

При облучении печени массой 1,8 кг геометрический фактор принимается равным  $g = 80 \text{ см}$ . При облучении щитовидной железы массой 20 г  $g = 40 \text{ см}$ .

Годовую дозу внутреннего облучения следует определять с учетом эффективного периода полувыведения нуклидов из организма

$$T_{эф} = \frac{T_{1/2} \cdot T_{B/2}}{T_{1/2} + T_{B/2}}, \quad (5.3)$$

где  $T_{эф}$  - эффективный период полувыведения, сут;

$T_{1/2}$  - период полураспада изотопа, сут;

$T_{B/2}$  - период полувыведения из организма, т.е. время, в течение которого из организма выводится половина имеющегося радиоактивного вещества, сут.

$$D_{экр.вн} = \dot{D}_{экр.вн} \cdot 365 \cdot 24 \quad \text{при } T_{эф} \geq 365 \text{ сут}, \quad (5.4)$$

$$D_{экр.вн} = \dot{D}_{экр.вн} \cdot T_{эф} \cdot 24 \quad \text{при } T_{эф} < 365 \text{ сут}, \quad (5.5)$$

где  $D_{экр.вн}$  - эквивалентная годовая доза внутреннего облучения, Зв/год;

$\dot{D}_{экр.вн}$  - мощность эквивалентной дозы внутреннего облучения, Зв/ч;

365 · 24

- количество часов облучения в год, ч/год.

Пример 5.1. Рассчитать внутреннюю годовую дозу облучения человека в результате вдыхания радиоактивной пыли  $^{90}\text{Sr}$  в количестве 2 г активностью 10 Ки/кг.

Решение.

В результате попадания в организм человека радионуклид  $^{90}\text{Sr}$

задерживается в минеральной части костей и очень трудно выводится из организма  $T_{B/2} = 1,8 \cdot 10^4$  сут (таблица 1.1). Облучению подвергается все тело человека.

Единичное поступление радионуклида  $^{90}\text{Sr}$  составляет 2 г, поэтому активность единичного поступления

$$A = 2 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \text{ Ки} = 7,4 \cdot 10^8 \text{ Бк}$$

Удельную активность рассчитываем по формуле (5.2)

$$A_{\text{уд}} = \frac{A \cdot f}{m} = \frac{7,4 \cdot 10^8 \cdot 0,12}{70} = 1,27 \cdot 10^6 \text{ Бк/кг}.$$

Мощность дозы, получаемой человеком, определяем по формуле (5.1)

$$\begin{aligned} \dot{D}_{\text{экв.вн}} &= 2,7 \cdot 10^{-11} \cdot A_{\text{уд}} \cdot K_{\gamma} \cdot p \cdot g \cdot K_1 \cdot K_2 = \\ &= 2,7 \cdot 10^{-11} \cdot 1,27 \cdot 10^6 \cdot 2,94 \cdot 1 \cdot 126 \cdot 0,01 \cdot 1 = \\ &= 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ Зв/ч}. \end{aligned}$$

Эффективный период полувыведения радионуклида вычисляем по формуле (5.3)

$$T_{\text{эф}} = \frac{T_{1/2} \cdot T_{B/2}}{T_{1/2} + T_{B/2}} = \frac{10^4 \cdot 1,8 \cdot 10^4}{10^4 + 1,8 \cdot 10^4} = 6,4 \cdot 10^3 \text{ сут}.$$

Годовую эквивалентную дозу внутреннего облучения вычисляем по формуле (5.4)

$$D_{\text{экв.вн}} = \dot{D}_{\text{экв.вн}} \cdot 365 \cdot 24 = 1,27 \cdot 10^{-4} \cdot 365 \cdot 24 = 1,1 \text{ Зв/год}.$$

Полученная доза в 220 раз превышает ПДД для населения.

Пример 5.2. Рассчитать внутреннюю годовую дозу облучения человека в результате употребления им в пищу ежедневно в течение 200 дней по 0,5 л молока с радионуклидом  $^{131}\text{I}$  активностью  $7,4 \cdot 10^5$  Бк/л и сравнить с ПДД для населения.

Решение.

Радионуклид  $^{131}\text{I}$  попадает во все тело человека и в щитовидную железу (см. таблицу 1.1).

Рассчитываем мощность дозы облучения всего тела человека при единичном (в течение суток) поступлении  $^{131}\text{I}$  по формулам (5.2, 5.3 и 5.1):

$$A_{\text{уд}} = \frac{A \cdot f}{m} = \frac{0,5 \cdot 7,4 \cdot 10^5 \cdot 1}{70} = 0,53 \cdot 10^4 \text{ Бк/кг},$$

$$T_{\text{эф}} = \frac{T_{1/2} \cdot T_{B/2}}{T_{1/2} + T_{B/2}} = \frac{8 \cdot 138}{138} = 7,56 \text{ сут};$$

$$\begin{aligned} \dot{D}_{\text{экв.вн}} &= 2,7 \cdot 10^{-11} \cdot A_{\text{уд}} \cdot K_{\gamma} \cdot p \cdot g \cdot K_1 \cdot K_2 = \\ &= 2,7 \cdot 10^{-11} \cdot 0,53 \cdot 10^4 \cdot 1,69 \cdot 1 \cdot 126 \cdot 0,01 \cdot 1 = \\ &= 3,1 \cdot 10^{-7} \text{ Зв/ч}. \end{aligned}$$

Так как человек ежедневно употребляет молоко в пищу, то мощность дозы будет со временем возрастать и достигнет значения в 11 раз выше,

чем при единичном поступлении, и годовая доза облучения составит

$$D_{\text{экв.вн}} = 3,1 \cdot 10^{-7} \cdot 11 \cdot (200 + 7,56) \cdot 24 = 0,016 \text{ Зв/год},$$

то есть в 3 раза выше ПДД для населения.

Рассчитываем мощность дозы облучения щитовидной железы по формулам (5.2 и 5.1):

$$A_{\text{уд}} = \frac{A \cdot f}{m} = \frac{0,5 \cdot 7,4 \cdot 10^5 \cdot 0,3}{20 \cdot 10^{-3}} = 0,5 \cdot 10^6 \text{ Бк/кг},$$

$$\begin{aligned} \dot{D}_{\text{экв.вн}} &= 2,7 \cdot 10^{-11} \cdot A_{\text{уд}} \cdot K_{\gamma} \cdot \rho \cdot g \cdot K_1 \cdot K_2 = \\ &= 2,7 \cdot 10^{-11} \cdot 5,5 \cdot 10^6 \cdot 1,69 \cdot 1 \cdot 40 \cdot 0,01 \cdot 1 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ Зв/ч}. \end{aligned}$$

Следует отметить, что мощность дозы облучения щитовидной железы в 300 раз выше мощности дозы облучения всего организма человека.

С учетом того, что человек потребляет в пищу молоко ежедневно в течение 200 дней, годовая доза облучения щитовидной железы составит

$$D_{\text{экв.вн}} = 1 \cdot 10^{-4} \cdot 11 \cdot (200 + 7,56) \cdot 24 = 5,5 \text{ Зв/год},$$

что в 367 раз превышает ПДД для щитовидной железы.

## 6 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ РИСКА ОТ ОБЛУЧЕНИЯ

Уровень риска это вероятность неожиданных последствий какого либо действия за определенный период времени. При ионизирующем облучении количественной мерой уровня риска является вероятность заболевания или гибели человека. Воздействие ионизирующего излучения на человека, в этом случае, принимается беспороговым, т.е. чем больше доза облучения, тем выше риск заболевания.

Для персонала, работающего с источниками ионизирующих излучений (категории А), при дозе облучения равной предельно допустимой (5 бэр/год) значение уровня риска принято равным  $r_a = 8,25 \cdot 10^{-4} \text{ (чел} \cdot \text{год)}^{-1}$ . Это значит, что в течение года восемь человек из 10 000 заболеют.

Уровень риска  $r = 1 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-2} \text{ (чел} \cdot \text{год)}^{-1}$  считается высоким, а  $r > 1 \cdot 10^{-2}$  - исключительно высоким.

Безопасным уровнем риска для работников атомной промышленности считается  $r_{a.\text{без}} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ (чел} \cdot \text{год)}^{-1}$ , для населения (категории Б)  $r_{б.\text{без}} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ (чел} \cdot \text{год)}^{-1}$ .

При облучении всего организма человека уровень риска рассчитывается по формуле:

$$r = 1,65 \cdot 10^{-2} \cdot D_{\text{экв}}, \quad (6.1)$$

где  $r$  - уровень риска от облучения человека,  $\text{(чел} \cdot \text{год)}^{-1}$ ;

$D_{\text{экв}}$  - годовая эквивалентная доза облучения всего человека, Зв/год;

$1,65 \cdot 10^{-2}$  - уровень риска при облучении всего тела человека и



получении эквивалентной дозы 1 Зв/год.

При облучении отдельных органов человека уровень риска рассчитывается по формуле

$$r_{\text{орг}} = 1,65 \cdot 10^{-2} \cdot \omega \cdot D_{\text{экв}}, \quad (6.2)$$

где  $\omega$  - коэффициент, характеризующий отношение риска облучения только данного органа к риску от равномерного облучения всего тела (таблица 6.1).

Таблица 6.1  
Значения коэффициентов  $\omega$

Наименование органа или ткани	Коэффициент $\omega$
Все тело человека	1,0
Половые железы	0,25
Молочные железы	0,25
Красный костный мозг	0,12
Легкие	0,12
Щитовидная железа	0,03
Кость поверхность	0,03

6.1. Пример. Рассчитать уровень риска заболевания оператора, работающего с источниками ионизирующего излучения, при годовой дозе облучения всего тела человека  $D_{\text{экв}} = 5$  бэр/год.

Решение.

По формуле (6.1) уровень риска  $r = 1,65 \cdot 10^{-2} \cdot 0,05 = 8,25 \cdot 10^{-4}$  (чел · год), т.е. уровень риска относительно невысокий, он соответствует предельно допустимой годовой дозе облучения персонала категории А.

6.2. Пример. Рассчитать уровень риска при облучении у человека щитовидной железы и полученной дозе  $D_{\text{экв.щ}} = 5$  Зв/год.

Решение.

По формуле (6.2) уровень риска

$$r_{\text{щ}} = 1,65 \cdot 10^{-2} \cdot 0,03 \cdot 5 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ (чел · год)}.$$

Этот уровень риска является высоким, т.к. в течение года более двух человек из 1000 заболеют раком щитовидной железы.

Если взять период 10 лет, то за это время заболеют 25 человека из 1000.