

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ №4

### РАСЧЕТ ЗАЩИТЫ ОТ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

#### Введение

Цель практического занятия - закрепление полученных при изучении раздела «Ионизирующие излучения» теоретических знаний и формирование практических навыков расчета организационных и технических мероприятий по защите персонала и населения от воздействия радиоактивных излучений.

Излучение в широком понимании - это самопроизвольный или обусловленный какими-либо причинами процесс испускания материальными веществами энергии.

Ионизирующее излучение (ИИ) - любое излучение, взаимодействие которого со средой приводит к образованию в последних электрических зарядов разных знаков.

Ионизирующее излучение может быть корпускулярным и фотонным.

Корпускулярное ИИ состоит из частиц с массой покоя, отличной от нуля (ядра гелия ( $\alpha$ -излучение), электроны ( $\beta$ -излучение), протоны, нейтроны).

Фотонное излучение обусловлено действием частиц с массой покоя, равной нулю. Возникает оно при ядерных превращениях, аннигиляции (взаимоуничтожении) частиц и имеет электромагнитную природу. Различают следующие виды фотонного излучения: тормозное, характеристическое, рентгеновское и  $\gamma$ -излучение.

Тормозное - излучение с непрерывным спектром, возникает при изменении кинетической энергии заряженных частиц.

Характеристическое - излучение с дискретным спектром, возникает при изменении энергетического состояния атомов. Рентгеновское излучение - совокупность тормозного и характеристического излучений с энергией фотонов 1-1000 кэВ (килоэлектрон-Вольт).

Гамма-излучение - фотонное излучение, которое принято рассматривать как поток частиц, называемых гамма-квантами, а не электромагнитных волн, т.к. его корпускулярные свойства (фотоэффект) преобладают над волновыми (дифракция, интерференция).

Процесс поглощения веществом энергии под действием ионизирующего излучения называется облучением. Реакцию человека на облучение называют лучевой болезнью.

## 1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

### Характеристики излучений

Интенсивность изменений в биологических тканях под воздействием ИИ (степень воздействия) определяют следующие факторы:

- мощность источника;
- вид излучения;
- время воздействия;
- индивидуальные особенности организма.

Энергию излучения, которая расходуется на ионизацию, измеряют во внесистемных единицах, которые называются электрон-вольт (эВ). Энергию в 1 эВ приобретает электрон с зарядом «-1» при прохождении ускоряющей разности потенциалов в 1 В,  $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 3,8 \cdot 10^{-20} \text{ кал}$ .

Важной характеристикой источника ионизирующего излучения является активность источника, равная числу самопроизвольных ядерных превращений в этом источнике за определенный интервал времени. Единица активности - Беккерель (Бк), равный 1 ядерному превращению (распаду) за 1 с. Единицу, равную  $3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$ , называют Кюри (Ки), что соответствует активности 1 грамма радия. На практике используют удельную активность (Бк/кг; Ки/кг), объемную (Бк/л; Ки/л), а также активность, отнесенную к площади (Бк/м<sup>2</sup>; Ки/км<sup>2</sup>).

Опасность вида излучения для организма человека определяется его ионизирующей способностью (пропорциональной массе частиц) и проникающей способностью (обратно пропорциональной массе частиц, за исключением нейтронов, имеющих высокую проникающую способность за счет отсутствия электрического заряда).

Ионизирующая способность излучения является мерой ионизации и имеет размерность количества электричества (кулон), отнесенного к единице массы ионизируемой среды (К/кг). Этот показатель, характеризующий величину появившихся под действием излучения зарядов электричества в единице массы вещества, называют экспозиционной дозой, измеряемой в рентгенах (Р).

1 рентген - мера экспозиционной дозы ионизирующего излучения, под действием которого в облучаемой среде (1 см<sup>3</sup> сухого воздуха при температуре 0°С и давлении 760 мм рт. ст.) возникает 1 электростатическая единица электричества (э.с.е.), эквивалентная  $2,08 \cdot 10^9$  зарядам пар ионов. В системе СИ получим соотношение  $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ К/кг}$ .

Величину, равную отношению средней энергии, переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе вещества в этом объеме, называют поглощенной дозой.

Единица поглощенной дозы - Грей (Гр), является основной дозиметрической величиной.  $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг} = 100 \text{ рад}$ . В радах также выражается энергетический эквивалент рентгена (э.э.р.): на генерацию 1 Р необходимо затратить 0,0088 Дж/кг энергии, т.е.  $1 \text{ э.э.р.} = 0,88 \text{ рад}$  или  $0,0114 \text{ Дж/кг} = 1,14 \text{ э.э.р.} = 1 \text{ рад}$ .

Биологическое (патологическое) воздействие на человека облучения от источников различных излучений неодинаково. Кроме того, разные органы и ткани имеют различную радиочувствительность. Так, облучение всего тела в 10 раз потенциально вреднее, чем облучение костной ткани или щитовидной железы в отдельности, и в 2 раза вреднее, чем облучение молочной железы.

Поэтому для оценки возможного ущерба здоровью человека от хронического воздействия ионизирующего излучения произвольного состава вводится понятие эквивалентной дозы, определяемой как произведение поглощенной дозы на средний коэффициент качества (табл. 1). Дозу, определенную с учетом возможных последствий облучения всего тела и его локальных зон, называют эффективной эквивалентной дозой. Последняя определяется как произведение эквивалентной дозы на коэффициент радиационного риска (табл. 2).

Коэффициент качества ( $K_k$ ) - весовой коэффициент, учитывающий потенциальную вредность различных облучений в сравнении с  $\gamma$ -излучением при одинаковом уровне экспозиционной дозы. Значения коэффициента  $K_k$  приведены в табл. 1.

Таблица 1

Вид излучения	Коэффициент качества $K_k$
Рентгеновское и гамма-излучение	1
Электроны и позитроны, бета-излучение	1
Протоны с энергией до 10 МэВ	10
Нейтроны с энергией до 20 кэВ	3
Нейтроны с энергией более 10 МэВ	10
Альфа-излучение с энергией до 10 МэВ	20
Тяжелые ядра	20

Таблица 2

Орган или ткань	Коэффициент радиационного риска $K_p$
Красный костный мозг	0,12
Костная ткань	0,03
Щитовидная железа	0,03
Молочная железа	0,15

Легкие	0,12
Половые железы	0,25
Остальные органы (ткани)	0,30

$$\Sigma K_{pj}=1,00$$

Единица эквивалентной дозы - Зиверт (Зв). 1 Зв = 100 бэр = 1 Дж/кг.

Бэр - внесистемная единица (биологический эквивалент рада).

### **Основные нормы радиационного контроля**

Основными нормативными документами в области радиационной безопасности являются «Нормы радиационной безопасности» (НРБ-76/87) и «Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений» (ОСП-72/87).

Этими документами в нашей стране установлены дифференциальные нормы облучений по категориям населения и группам критических органов.

С учетом того, что степень ионизирующего воздействия излучения на разные ткани (органы) различна, выделены 3 группы критических органов в порядке убывания радиочувствительности:

- 1 - все тело, красный мозг, гонады;
- 2 - мышцы, хрусталик глаза, щитовидная железа, печень, почки, легкие, жировая ткань, желудочно-кишечный тракт и др. внутренние органы;
- 3 - кожа, костная ткань, кисти, предплечья, стопы, лодыжки. Предусмотрено три категории облучаемых лиц:
  - А - персонал, непосредственно работающий с источниками радиоактивных веществ;
  - Б - лица, которые по условиям проживания или размещения рабочих мест могут подвергаться воздействию ионизирующих излучений (ограниченная часть населения);
  - В - остальное население.

Для категории А установлена предельно-допустимая доза (ПДД) облучения за год; для категории Б - предел дозы (ПД) за год. Для остального населения (категория В) - нормы устанавливаются Министерством здравоохранения с учетом местных особенностей.

Под ПДД понимают максимальное значение индивидуальной эквивалентной дозы за год, которое при равномерном воздействии в течение 50 лет не вызывает неблагоприятных изменений в состоянии здоровья облучаемого и его потомства. В любом случае к 30 годам накопленная доза не должна превышать 12 ПДД.

Дозовые пределы приведены в табл. 3.

Таблица 3.

Категория населения	Нормируемый показатель	Дозовые пределы облучения, бэр/год по группам критических органов		
		1	2	3
А	ПДД	5	15	30
Б	ПД	0,5	1,5	3

По нормативным значениям эквивалентной дозы определяют мощность экспозиционной дозы, т.е. допустимую мощность источника ИИ.

Допустимая мощность эффективной эквивалентной дозы (ДМД) внешнего облучения всего тела для лиц категории А при работе в течение года с ионизирующими излучениями в течение 1700 ч/год не должна превышать 0,05 Зв/год = 30 мкЗв/ч = 0,03 мбэр/ч. Допустимая мощность экспозиционной дозы До в пересчете составит

$$D_{0A} = 0,1 \text{ Р/нед.} \quad (1)$$

Для лиц категории Б, находящихся на территории учреждения и в пределах санитарно-защитной зоны в течение стандартного времени (2000 час/год), ДМД не должна превышать 0,005 Зв/год = 2,4 мкЗв/час.

$$D_{0B} = 0,01 \text{ Р/нед.} \quad (2)$$

При нахождении в жилых помещениях вне санитарно-защитной зоны (категория В) в течение стандартного времени (8000 час/год) ДМД не должна превышать 0,0005 Зв/год = 0,6 мкЗв/час.

$$D_{0B} = 0,001 \text{ Р/нед.} \quad (3)$$

### Расчет мер защиты от внешнего излучения

Для расчета необходимых мер защиты используются следующие характеристики источников излучений.

*Полная ионизационная гамма – постоянная* (или просто гамма – постоянная) данного изотопа определяется как мощность экспозиционной дозы в Р/час, которая создается точечным источником гамма – излучения с активностью в 1 мКи на расстоянии 1 см без начальной фильтрации:

$$K_j = P \frac{R^2}{A}, \quad \text{Р·см/(ч·мКи)} \quad (4)$$

Где: Р – мощность экспозиционной дозы, Р/ч;

R – расстояние, R= 1 см;

A – активность, мКи.

*Гамма – эквивалент источника* определяется относительно эталонного (в качестве эталона принят точечный источник радия активностью 1 мКи с фильтром из платины толщиной 0,5 мм, находящийся в равновесии со своими продуктами распада и создающий на расстоянии 1 см мощность экспозиционной дозы, равную 8,4 р/ч) при одинаковых условиях и выражается в миллиграмм – эквивалентах радия (мг – экв. Ра):

$$m_{\text{ист}} = K_j \frac{A}{8,4R^2}, \quad \text{мг – экв. Ра,} \quad (5)$$

где:  $m_{\text{ист}}$  – гамма – эквивалент исходного источника, мг – экв. Ра;

A – активность радионуклида, мКи;

8,4 – мощность дозы радиевого эталона, Р/(ч· мг – экв. Ра);

R – эталонное расстояние при определении гамма эквивалента, принимается равным 1 см.

*Энергия  $\gamma$ - квантов  $W_\Phi$*  оценивается по формуле (6) с учетом величины флюенса излучения  $\Phi$ , фотон/  $\text{см}^2$ . Флюенсом называют поток частиц (фотонов) через единицу площади, создающий определенную эквивалентную дозу.

$$W_\Phi = 10^8 D_{0(A,B,V)} K \frac{K_k}{\Phi}, \quad \text{МэВ,} \quad (6)$$

где:  $D_{0(A,B,V)}$  – допустимая доза в З в/год (см. п. 1.2);

$K_k$  – коэффициент качества излучения (табл.1);

К – кратность ослабления;

Ф – флюенс, фотон/см<sup>2</sup> (см. варианты в табл. 7).

Меры защиты определяются на основе расчета следующих показателей:

*Допустимое время* непосредственной работы персонала с источником t:

$$t = 10^4 D_{OA} \frac{r_{\phi}^2}{m_{ист} 8,4}, \text{ час/нед}, \quad (7)$$

где:  $D_{OA}$  – допустимая мощность дозы для персонала,  $D_{OA} = 0,1$  Р/нед;

$r_{\phi}$  – фактическое расстояние между работником и источником, м (см. варианты);

$m_{ист}$  – гама – эквивалент заданного источника, мг – экв. Ра.

*Максимальная мощность источника*  $m'_{ист}$ , с которой может работать персонал полную рабочую неделю:

$$m'_{ист} = 10^4 D_{OA} \frac{r_{\phi}^2}{8,4 * t_n}, \text{ мг – экв. Ра}; \quad (8)$$

где:  $t_n$  – продолжительность рабочей недели, час/нед,  $t_n = 36$  час/нед.

*Минимально допустимое расстояние*  $r_{рас}$ , на котором должны находиться лица на территории учреждения в пределах санитарно – защитной зоны, производим по формуле (9):

$$r_{рас} = \sqrt{\frac{8,4 m_{ист} t_n}{10^4 D_{OB}}}, \text{ м} \quad (9)$$

где:  $D_{OB}$  – допустимая мощность дозы для лиц категории Б,  $D_{OB} = 0,01$  Р/нед.

*Толщина экрана* из заданного материала  $d_3$  определяется через толщину экрана из свинца  $d_{св}$ , для чего производится расчет мощности дозы заданного источника Д по формуле:

$$D = 8,4 m_{ист} t_n / (10^4 \cdot r^2), \text{ Р/нед}. \quad (10)$$

Затем осуществляют расчет необходимой кратности ослабления излучения по формуле:

$$K = D / D_{OA} \quad (11)$$

Необходимая толщина свинцового экрана  $d_{св}$  определяется по табл. 4 по величине кратности ослабления излучения К и энергии  $\gamma$ - излучения W. Энергия одного  $\gamma$ -кванта за период 1700 часов работы в год рассчитывается по формуле (6).

Если для защиты используют экраны из других материалов, то толщина такого экрана  $d_3$ , определится по формуле:

$$d_3 = d_{св} \frac{\rho_{св}}{\rho_3}, \text{ см}, \quad (12)$$

где:  $\rho_{св}$  – плотность свинца, кг/дм<sup>3</sup>;

$\rho_3$  – плотность материала экрана, кг/дм<sup>3</sup>.

Таблица 4.

Кратность ослабления К	Толщина защиты из свинца $d_{св}$ , см										
	Энергия $\gamma$ – излучения W, МэВ										
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	1,0	5,0	10,0	
2	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,76	0,8	1,3	2,0	14,3	
5	0,2	0,4	0,6	0,9	1,1	1,74	1,9	3,8	5,5	40,2	
10	0,3	0,55	0,9	1,3	1,6	2,4	2,6	4,8	7,6	58,4	
50	0,4	0,85	1,4	1,95	2,6	3,7	3,95	8,6	10,1	78,4	
100	0,5	1,0	1,6	2,3	3,0	3,85	4,7	8,0	12,9		
1000	0,7	1,5	2,4	3,3	4,4	6,5	6,95	11,1	16,5		
10000	1,05	2,1	3,3	4,55	5,9	8,5	9,1	14,0	20,8		

Плотности материалов для экранов приведены в табл. 5.

Таблица 5.

Наименование материалов	Плотность кг/дм <sup>3</sup>	Наименование материалов	Плотность кг/дм <sup>3</sup>
Алюминий	2,7	Железо	7,89
Бетон	2,1 – 2,7	Кирпич	1,4 – 1,9
Вода	1,0	Свинец	11,34
Воздух	0,00129	Чугун	7,2

## 2. Порядок выполнения задания

Задачей занятия является приобретение практических навыков в расчете параметров организационных и технических мероприятий радиационной защиты, а именно:

- Расчет времени  $t_n$  непосредственной работы персонала с источником радиации, час/нед;
- Расчет максимальной массы  $m'$  источника радиоактивности, с которым может работать персонал при полной рабочей неделе, мг-экв. Ра;
- Расчет минимально допустимого расстояния  $r$ , на котором должен находиться, лица в пределах санитарной зоны без каких-либо защитных устройств, м;
- Расчет толщины  $d_s$  защитных экранов, выполненных из различных материалов, м.

### Последовательность выполнения задания:

1. Вычисление по формуле (1) гамма – постоянной данного изотопа  $K_j$  по заданным значениям (приведены в табл. 7).
2. Вычисление по формуле (2) гамма – эквивалента заданного радионуклида.
3. Вычисление по формуле (7) допустимого времени  $t_n$  непосредственной работы персонала с источником.
4. Расчет по формуле (8) максимальной мощности источника  $m'_{ист}$ , с которой может работать персонал полную рабочую неделю.
5. Расчет минимально допустимого расстояния  $r_{рас}$ , на котором должны находиться лица на территории учреждения в пределах санитарной зоны, производим по формуле (9).
6. расчет толщины экрана из заданного материала  $d_s$ .
  - 6.1. Расчет мощности дозы заданного источника D по формуле (10).
  - 6.2. Расчет необходимой кратности ослабления излучения (11).
  - 6.3. Энергия одного  $\gamma$ - кванта в период 1700 часов работы в год рассчитывается по формуле (6).

6.4. Необходимая толщина экрана  $d_s$  определяется по табл. 4 по требуемой кратности ослабления излучения (K) и энергии  $\gamma$ -излучения (W) с учетом выражения (12).

### 3. Пример расчета

#### Исходные данные:

- Радионуклид Уран – 238;
- Мощность экспозиционной дозы  $P = 24$  Р/ч;
- Активность  $A = 100$  мКи;
- Расстояние  $r_\phi = 0,5$  м;
- Материал экрана – бетон;
- Флюенс  $\Phi = 8,5 \cdot 10^7$ , фотон/см<sup>2</sup>.

1. Гамма – постоянная радионуклида

$$K_j = P \frac{R^2}{A} = \frac{24}{100} = 0,24 \text{ Р} \cdot \text{см}/(\text{ч} \cdot \text{мКи}).$$

2. Радиевый эквивалент

$$m_{\text{ист}} = K_j \frac{A}{8,4 R^2} = 0,24 \frac{100}{8,4 \cdot 1^2} = 2,86 \text{ мг} - \text{экв. Ra}$$

3. Продолжительность рабочей недели

$$t = 10^4 D_{\text{ОА}} \frac{r_\phi^2}{m_{\text{ист}} 8,4} = 10^4 \cdot 0,1 \frac{0,5^2}{2,86 \cdot 8,4} = 10,4 \text{ час/нед.}$$

4. Расчетная максимально допустимая масса рабочего источника

$$m'_{\text{ист}} = 10^4 D_{\text{ОА}} \frac{r_\phi^2}{8,4 t_n} = 10^4 \cdot 0,1 \frac{0,5^2}{8,4 \cdot 36} = 0,83 \text{ мг} - \text{экв. Ra.}$$

5. Расчетное минимальное допустимое расстояние для лиц категории Б:

$$r_{\text{рас}} = \sqrt{\frac{8,4 m_{\text{ист}} t_n}{10^4 D_{\text{ОБ}}}} = \sqrt{\frac{8,4 \cdot 2,86 \cdot 36}{0,01 \cdot 10^4}} = 2,9 \text{ м.}$$

6. Мощность дозы заданного источника

$$D = 8,4 m_{\text{ист}} t_n / (10^4 \cdot r^2) = \frac{8,4 \cdot 2,86 \cdot 36}{(10^4 \cdot 0,5^2)} = 0,34 \text{ Р/нед.}$$

7. Кратность ослабления излучения для лиц категории А:

$$K = D/D_{0A} = 0,34/0,1 = 3,4.$$

8. Энергия  $\gamma$  – излучения (фотонов)

$$W_{\Phi} = 10^8 D_{O(A,B,\Gamma)} K \frac{K_k}{\Phi} = 10^8 \cdot 0,05 \cdot 3,4 \frac{1}{8,5 \cdot 10^7} = 1,36 \text{ МэВ.}$$

9. По табл. 4 методом интерполяции находим толщину экрана  $d_{св}$  и  $d_3$

### 5. требования к отчету

Отчет как письменный, так и устный должен содержать:

- сведения об основных видах излучений;
- сведения о дозах излучений;
- сведения об основных нормах радиационного контроля;
- сведения об основных видах защит от облучения;
- сведения о порядке расчетов;
- расчеты по формулам с указанием определяющих параметров;
- результаты расчетов, сведенные в табл. 6;
- выводы.

Выводы должны содержать обоснование выбора средств защиты от радиации и сведения об эффективности их применения.

Таблица 6

Таблица результатов

№ п/п	Показатели	Величина	Размерность	Определяющее соотношение
1	$K_j$		$P \cdot \text{см}^2/(\text{ч} \cdot \text{мКи})$	(4)
2	$m_{\text{ист}}$		мг – экв. Ра	(5)
3	$T$		ч/нед.	(7)
4	$m'_{\text{ист}}$		мг – экв. Ра	(8)
5	$\Gamma_{\text{рас}}$		м	(9)
6	$D$		P/нед	(10)
7	$K$		-	(11)
8	$W_{\Phi}$		МэВ	(6)
9	$d_{св}$		См	Табл. 4
10	$d_3$		см	(12)

### 6. Варианты заданий

Варианты заданий приведены в табл. 7.

Таблица 7.

№ вариантов	Радионуклид	Мощность экспозиционной дозы,	Активность, мКи	Расстояние, м	Материал экрана	Флюенс, фотон/ $\text{см}^2$
1.	Стронций-90	30	10	0.1	алюминий	$2 \cdot 10^7$
2.	Иод-126	50	20	0.2	бетон	$1 \cdot 10^7$
3.	Скандий-46	20	10	0.3	вода	$5 \cdot 10^7$
4.	Кобальт-60	50	20	0.4	воздух	$4 \cdot 10^7$
5.	Кадмий-115	10	20	0.2	железо	$5 \cdot 10^7$
6.	Сурьма-125	20	20	0.1	кирпич	$8 \cdot 10^7$
7.	Теллур- 129	20	20	0.4	чугун	$20 \cdot 10^7$
8.	Цезий- 134	30	50	0.3	алюминий	$3 \cdot 10^7$
9.	Иридий-192	40	100	0.1	бетон	$10 \cdot 10^7$

10.	Свинец-210	50	200	0,5	вода	$10 \cdot 10^7$
11.	Полоний-210	50	210	0,3	железо	$10 \cdot 10^7$
12.	Радий-228	240	1000	0,2	бетон	$1 \cdot 10^7$
13-	Торий-230	360	1500	0,4	чугун	$10 \cdot 10^7$
14.	Уран-238	560	2300	0,5	железо	$1 \cdot 10^7$
15.	Плутоний-242	45600	19000	0,2	чугун	$10 \cdot 10^7$