

# Лекция 8. Ионизирующее излучение реактора

- Ионизирующим называют излучение, взаимодействие которого со средой приводит к образованию положительных и отрицательных ионов и свободных электронов из электрически нейтральных атомов и молекул.
- В ЯР оно является следствием радиоактивного распада, т. е. любого превращения атомного ядра, приводящего к изменению заряда, массы или энергетического состояния этого ядра.
- Радиоактивный распад происходит по экспоненциальному закону:
- $$N(t) = N_0 * e^{-\lambda t}, \quad (\text{п.1.31})$$
- $$N(T_{1/2}) / N_0 = e^{-\lambda T_{1/2}} = 1/2$$
- где  $N_0$ , — начальное число атомов, то есть число атомов для  $t=0$ .  $N(t)$  — текущее (в момент времени  $t$ ) количество радиоактивного нуклида;
- $\lambda$ , — постоянная распада (вероятность распада ядра в единицу времени),  $\text{с}^{-1}$ ,
- $\tau$  – (тау) среднее время жизни радиоактивного ядра,  $\tau = 1 / \lambda$ , с;
- $T_{1/2} = 0,693 \tau$  — время, в течение которого распадается в среднем половина исходного количества радиоактивного вещества, с.
- $T_{1/2} = 0,693 \tau = \ln 2 / \lambda = \tau \ln 2$

*Единица измерения активности распад/в секунду (расп/с). В СИ эта единица называется Беккерель (Бк). В практических расчетах используют единицу кюри и её дробные единицы: милликюри и микрокюри.  $1\text{Ки} = 3,7 \cdot 10^{10}\text{Бк}$ .*

- Радиоактивные вещества, находясь в растворенном или взвешенном состоянии в жидкости или газе объемом  $V$  ( $\text{м}^3$ , л), создают определенную концентрацию активности, которая характеризуется удельной активностью, выраженной в кюри на единицу объема среды:
- $C_v = C/V$  Ки/ $\text{м}^3$  (Ки/л). (п.1.32)
- 
- Удельная активность твердых радиоактивных веществ обычно выражается активностью единицы массы:
- $C_m = C/m$  Ки/кг. (п.1.33)

- Удельная активность чистого нуклида с массовым числом  $A$  и периодом полураспада  $T$  (с)

- $$C_m = \frac{6.023 * 10^{26}}{A} * \lambda \frac{\text{Бк}}{\text{кг}} = \frac{1,13 * 10^{16}}{AT} \frac{\text{Ки}}{\text{кг}} \quad (\text{п.1.34})$$

- Поверхностная активность (активность поверхности) — это поток излучения с единицы площади  $S$  ( $\text{м}^2$ ) радиоактивного вещества [ $\text{част}/(\text{м}^2 * \text{с})$ ].
- Следует отличать понятие «загрязненность поверхности», характеризующее собой количество радиоактивного вещества на единице площади ( $\text{Бк}/\text{м}^2$ ,  $\text{Ки}/\text{м}^2$  и др.).

- Активность при смешении двух сред, имеющих соответственно объемы  $V_1$  (л) и  $V_2$  (л) и удельные активности  $C_{V_1}$  (Ки/м<sup>2</sup>) и  $C_{V_2}$  (Ки/м<sup>2</sup>), получаем из соотношения  $C_V (V_1 + V_2) = C_{V_1} V_1 + C_{V_2} V_2$ , равной:
- $C_V = (C_{V_1} V_1 + C_{V_2} V_2) / (V_1 + V_2)$  Ки/м<sup>2</sup>. (п.1.35)
- При сообщении объемов двух сред с различной активностью по изменению удельной активности одной среды можно оценить скорость перемешивания сред (например, течь теплоносителя  $G$  м<sup>3</sup>/ч из одного контура в другой).
- Исходя из соотношения  $C_V (V_2 + \Delta V) = C_{V_1} \Delta V + C_{V_2} V_2$ , получаем:
- $G = \Delta V / t = \frac{V_2}{t} * \frac{C_V - C_{V_2}}{C_{V_1} - C_V}$  м<sup>3</sup>/ч (п.1.36)
- где  $C_{V_1}$  и  $C_{V_2}$  (Ки/м<sup>3</sup>) — удельные активности по данному нуклиду первой и второй сред, имеющих объемы  $V_1$  и  $V_2$  (м<sup>3</sup>),  $C_V$  — удельная активность второй среды через время  $t$  (ч), за которое в нее поступит активное вещество первой среды в объеме  $\Delta V$ .

**В дозиметрии ионизирующих излучений используются следующие понятия, определения и единицы измерения.**

- **Поглощенная доза  $D$  — средняя энергия, переданная излучением веществу в некотором элементарном объеме.** Единицей поглощенной дозы является джоуль на килограмм (Дж/кг), получившая в системе СИ название грей (Гр):
  - $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг} = 100 \text{ рад}$ .
- **Рад — специальная единица поглощенной дозы излучения, равная 100 эрг поглощенной энергии на 1 г вещества.**
- Единица рад служит для измерения поглощенной дозы любого вида излучения для любой среды.
  - $1 \text{ рад} = 100 \text{ эрг/г} = 0,01 \text{ Дж/кг} = 0,01 \text{ Гр}$ .
- **Экспозиционная доза — полный заряд ионов одного знака, возникающих в воздухе при полном торможении всех вторичных электронов, образованных фотонами в малом объеме воздуха.**
- **Единица экспозиционной дозы - Кулон на килограмм (Кл/кг).**

**Специальной единицей в дозиметрии является рентген — доза рентгеновского или  $\gamma$ -излучения, которая в  $1 \text{ см}^3$  воздуха при давлении 760 мм рт. ст. и температуре  $0^\circ\text{C}$  производит ионизацию, соответствующую одной электростатической единице заряда каждого знака ( $2.08 \cdot 10^9$  пар ионов).**

- При дозе 1 Р в  $1 \text{ см}^3$  воздуха поглощается 87 эрг энергии, а в 1 г биологической ткани — 93—95 эрг. Эта единица применяется для  $\gamma$ -излучения с энергией фотонов не выше 3 МэВ:
- $1 \text{ Р} = 0,2850 \text{ Кл/кг}$ .
- Эквивалентная доза Н — величина, введенная для оценки радиационной опасности хронического облучения излучением произвольного состава и определяемая как произведение поглощенной дозы Д на средний коэффициент качества излучения Q в данной ткани:
- $$H (\text{бэр}) = QD (\text{рад}). \quad (\text{п.1.37})$$

**Специальной единицей эквивалентной дозы является бэр — такое количество энергии, поглощенное в 1 г ткани, при котором наблюдается тот же биологический эффект, что и при поглощенной дозе излучения в 1 рад рентгеновского или  $\gamma$ -излучения.**

- **бэр используется для оценки поглощенной дозы от любого вида излучения:**
- $1 \text{ бэр} = 100 \text{ эрг/г}/Q = 1 \text{ рад}/Q = 0,01 \text{ Гр}/Q = 0,01 \text{ Зв}$
- **В СИ единицей эквивалентной дозы является Зиверт:**
- $1 \text{ Зв} = 1 \text{ Гр}/Q = 100 \text{ рад}/Q = 100 \text{ бэр}$ .
- **Безразмерный коэффициент качества Q показывает, во сколько раз отличаются неблагоприятные биологические последствия облучения человека различными видами излучения по сравнению с  $\gamma$ -излучением (табл. 1.2).**
- Он используется только для целей радиационной безопасности при дозах не более 100 бэр.

Таблица 1. 2

**коэффициент качества  $Q$  показывает, во сколько раз отличаются неблагоприятные биологические последствия облучения человека различными видами излучения по сравнению с  $\gamma$ -излучением**

Вид излучения	$Q$	Допустимая мощность дозы			
		бэр/год	бэр/неделя	рад/год	рад/неделя
Рентгеновское излучение, $\gamma$ -кванты и $\beta$ -частицы	1	5,0	0,1	5,0	0,1
Тепловые нейтроны	3	5,0	0,1	1,67	0,033
Нейтроны с энергией 0,1—10 МэВ и протоны	10	5,0	0,1	0,5	0,01
$\alpha$ -частицы с энергией до 10 МэВ и тяжелые ядра отдачи	20	6,0	0,1	0,25	0,005



- **$P_0$**  - Мощность дозы измеряется в

- рад/ч, Р/ч, бэр/ч

- или в производных от них единицах:

- мрад/ч, мР/ч, мбэр/ч, мР/с, мкР/с и т. п.

Соотношения между долевыми единицами:

**1 Р/ч=280 мкР/с, 1 мкР/с= 3,6 мР/ч и др.**

Доза  $D$ , отнесенная к единице времени  $t$ , называется мощностью дозы.

- Если рассматриваемый промежуток времени значительно меньше периода полураспада радиоактивного нуклида, то

$$D = P_0 t \quad P_0 = D/t.$$

# Естественный радиоактивный фон

- *Естественный радиоактивный фон — это мощность дозы ионизирующих излучений для данной местности, создаваемая космическими излучениями и радиоактивностью почвы, сооружений и живых объектов при отсутствии посторонних источников ионизирующих излучений.*
- На земной поверхности на уровне моря для средних широт естественный фон принимают равным  $10^{5*}$  мбэр/год, что соответствует примерно 0,01 мбэр/ч. Мощность дозы только космического излучения (без нейтронной компоненты) составляет 28 мбэр/год, нейтронная компонента создает дополнительную мощность дозы 25 мбэр/год. *С высотой над уровнем моря мощность дозы излучения быстро растет.*
- *Естественный фон внешнего излучения на территории России создает мощность экспозиционной дозы в пределах 4—20 мкР/ч (40—200 мР/год).*

# «Нормы радиационной безопасности НРБ—76» ,

**Устанавливают систему дозовых пределов и правила их применения, предусматривают следующие основные принципы радиационной безопасности:**

- **непревышение установленного основного дозового предела;**
- **исключение всякого необоснованного облучения;**
- **снижение дозы излучения до возможного низкого уровня.**

**Для лиц, постоянно или временно работающих непосредственно с источниками ионизирующих излучений, основными дозовыми пределами являются:**

- **а) предельно допустимая доза (ПДД)—наибольшее значение индивидуальной эквивалентной дозы за год, которое при равномерном воздействии в течение 50 лет не вызовет в состоянии здоровья неблагоприятных изменений, обнаруживаемых современными методами;**

- б) предельно допустимое годовое поступление (ПДП) — Такое I поступление радиоактивных веществ в организм в течение года которое за 50 лет создает в критическом органе эквивалентную дозу, равную 1 ПДД.
- Отличия для различных категорий лиц разных органов человека рассмотрены в НРБ—76. Для лиц, подвергающихся профессиональному внешнему облучению, установлена ПДД всех видов излучения 5 бэр в год, что соответствует при непрерывной работе 0,1 бэр в неделю.
- Предельно допустимой недельной дозе 0,1 бэр ,(100 мбэр в неделю) в зависимости от биологического эффекта воздействия различных видов ионизирующих излучений, учитываемого коэффициентом качества Q (п.1.37), соответствуют мощности дозы, приведенные в табл. 1.2.

Предельно допустимые уровни (ПДУ) внешнего ионизирующего излучения, соответствующие ПДД 100 мбэр в неделю, представлены в табл. 1.3.

Таблица 1.3. Требование безопасности сводится к тому, чтобы суммарное воздействие не превышало одного ПДУ.

Вид излучения	Энергия излучения	Дозы, поток энергии излучения или поток частиц за одну неделю	Предельно допустимая мощность, доза, интенсивность или плотность потока излучения		
			единица измерения	при работе $t=30$ ч в неделю	при работе $t$ ч в неделю
Рентгеновское и $\gamma$ -излучения	До 3 МэВ	100 мР	мР/ч	2,8	100/ $t$
То же	3— $10^4$ МэВ	$250 \cdot 10^{10}$ МэВ/ $m^2$	$10^6$ МэВ/ $(m^2 \cdot c)$	20	700/ $t$
$\beta$ -излучение	До 10 МэВ	$2,5 \cdot 10^{10} \frac{\beta\text{-част}}{m^2}$	$10^6 \frac{\beta\text{-част}}{m^2 \cdot c}$	0,2	7/ $t$
Тепловые нейтроны	0,025 эВ	$100 \cdot 10^{10}$ нейтр/ $m^2$	$10^8 \frac{\text{нейтр}}{m^2 \cdot c}$	7,5	270/ $t$
Медленные нейтроны	0,1 эВ	$72 \cdot 10^{10}$ нейтр/ $m^2$	То же	5,5	200/ $t$
Промежуточные нейтроны	5 кэВ	$82 \cdot 10^{10}$ нейтр/ $m^2$	• •	6,4	230/ $t$
То же	20 кэВ	$40 \cdot 10^{10}$ нейтр/ $m^2$	• •	3,1	110/ $t$
Быстрые нейтроны	10 МэВ	$2,6 \cdot 10^{10}$ нейтр/ $m^2$	• •	0,2	7,2/ $t$
Очень быстрые нейтроны	200 МэВ	$1,3 \cdot 10^{10}$ нейтр/ $m^2$	• •	0,1	3,6/ $t$
Сверхбыстрые нейтроны	$10^4$ МэВ	$0,13 \cdot 10^{10}$ нейтр/ $m^2$	$10^4 \frac{\text{нейтр}}{m^2 \cdot c}$	0,3	11/ $t$

- **1.33** Удельная активность водяного теплоносителя первого контура ЯР равна  $10^{-3}$  Ки/л. Оценить течь ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ) воды первого контура во второй через ПГ, если активность воды второго контура ( $v_{\text{IIк}} = 10 \text{ м}^3$ ) в течение 30 мин увеличилась с  $10^{-5}$  до  $10^{-4}$  Ки/л.
- *Решение.* Согласно (п.1.36):
- $G_{\text{I-IIк}} = 2 \text{ м}^3/\text{ч}$ .
- **1.34** Сколько рентген составляет доза  $\gamma$ -излучения в 1 рад для тела человека?
- *Решение.* Дозе в 1 рад соответствует 100 эрг поглощенной энергии на 1 г биологической ткани, а дозе в 1 Р — 95 эрг/г. Следовательно, дозе  $\gamma$ -излучения в 1 рад соответствует  $100/95 = 1,05 \text{ Р} = 1 \text{ Р}$ .

- **1.35** Доза, поглощенная в биологической ткани при облучении ее тепловыми нейтронами, составляет 0,5 рад. Какой дозе  $\gamma$ -облучения это соответствует по биологическому воздействию?
- *Решение.* Для тепловых нейтронов  $Q=3$  (табл. 1.2). Следовательно, поглощенной дозе тепловых нейтронов 0,5 рад соответствует  $3 \cdot 0,5 = 1,5$  рад  $\gamma$ -излучения.
- **1.36** Определить дозу облучения за 4 ч работы при мощности дозы 0,5 мкР/с.
- *Решение.* Согласно  $D = P_0 t = 0,5 \cdot 4 \cdot 3600 = 7,2$  мР.
- **1.37** Какую в среднем дозу получит человек за 70 лет жизни от естественного фона ионизирующих излучений?
- *Решение.* По формуле  $D = P_0 t$  находим:
- $D = P_0 t = 10^5 \cdot 10^{-3} \cdot 70 = 7$  бэр.



# Основные термины

- **Доза излучения (radiation dose)** — мера воздействия (в области радиационной безопасности) ионизирующего излучения на биологический объект, в частности человека.
- **Дозовые затраты (dose commitments)** — сумма индивидуальных доз излучения, воздействующего на персонал, полученных или планируемых при выполнении работ по эксплуатации, обслуживанию, ремонту, замене или демонтажу оборудования ядерной установки (атомной станции).
- **Коллективная доза излучения (collective radiation dose)** — сумма индивидуальных доз излучения для различных категорий облучаемых лиц за определенный промежуток времени. Измеряется в человеко-зивертах (чел-Зв)

- **Коэффициент качества излучения (quality factor)** — коэффициент  $Q$  для учета биологической эффективности разных видов ионизирующего излучения при определении эквивалентной дозы излучения. Для получения эквивалентной дозы поглощенная доза рассматриваемого излучения должна быть умножена на коэффициент качества. Для рентгеновского, бета- и гамма-излучений коэффициент  $Q = 1$ , протонного и нейтронного излучений (быстрые нейтроны)  $Q = 10$ , альфа-излучения  $Q = 20$
- **Кумулятивная доза (cumulative dose)** — сумма поглощенных доз излучения, полученных рассматриваемым объектом, независимо от того, было ли облучение одно- или многократным
- **Основной дозовый предел (main dose limit)** — основная регламентируемая Нормами радиационной безопасности величина — предельно допустимая доза (ПДД) или предел дозы (ПД)

- **Пороговая доза (threshold dose)** — минимальная доза излучения, вызывающая данный биологический эффект. В отношении биологического воздействия излучения Международная комиссия по радиологической защите и аналогичные национальные комиссии всех стран придерживаются концепции беспороговой дозы
- **Эквивалентная доза излучения (equivalent dose)** — величина, введенная для оценки радиационной опасности хронического облучения человека ионизирующими излучениями и определяемая суммой произведений поглощенных доз отдельных видов излучений на их коэффициенты качества. Единица измерения эквивалентной дозы — зиверт (Зв).

- **Экспозиционная доза (exposure dose)** — количественная характеристика рентгеновского и гамма-излучений, основанная на их ионизирующем действии и выраженная суммарным электрическим зарядом ионов одного знака, образованных в единице объема воздуха. Единицей измерения экспозиционной дозы в СИ является кулон на килограмм (Кл/кг), внесистемная единица экспозиционной дозы — рентген (Р)