# 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:
- $N(t) = N_0 * e^{-\lambda t}$, (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;
- λ, — постоянная распада (вероятность распада ядра в единицу времени), $c^{-1}$ ,
- τ – (тау) среднее время жизни радиоактивного ядра, τ =1/ λ, *с*;
- $T_{1/2}$ =0,693 τ — время, в течение которого распадается в среднем половина исходного количества радиоактивного вещества, с.
- $T_{1/2}$ =0,693 τ = ln2/ λ = τ ln2

*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. 1Ки =3,7*10$^{10}$Бк.*

- Радиоактивные вещества, находясь в растворенном или взвешенном состоянии в жидкости или газе объемом V (м$^3$, л), создают определенную концентрацию активности, которая характеризуется удельной активностью, выраженной в кюри на единицу объема среды:

- $C_v$=C/V Ки/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 А и периодом полураспада Т (с)
- $$Cm = \frac{6.023 * 10^{26}}{A} * \lambda \frac{Бк}{кг} = \frac{1,13 * 10^{16}}{AT} \frac{Ки}{кг}$$ (п.1.34)
- Поверхностная активность (активность поверхности) — это поток излучения с единицы площади S ($м^2$) радиоактивного вещества [част/($м^2$*с)].
- Следует отличать понятие «загрязненность поверхности», характеризующее собой количество радиоактивного вещества на единице площади (Бк/$м^2$, Ки/$м^2$ и др.).

- Активность при смешении двух сред, имеющих соответственно объемы $V_1$ (л) и $V_2$ (л) и удельные активности $C_{V1}$ (Ки/м$^2$) и $C_{V2}$(Ки/м$^2$), получаем из соотношения $C_V (V_1 + V_2) = C_{V1} V_1 + C_{V2} V_2$, равной:
- $C_V = (C_{V1} V_1 + C_{V2} V_2) / (V_1 + V_2)$ Ки/м$^2$. (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$^3$/ч из одного контура в другой).
- Исходя из соотношения $C_V (V_2 + \Delta V) = C_{V1}\Delta V + C_{V2} V_2$, получаем:
- $G = \Delta V/t = \frac{V2}{t} * \frac{C_v - C_{V2}}{C_{v1} - C_V}$ м$^3$/ч (п.1.36)
- где $C_{V1}$ и $C_{V2}$ (Ки/м$^3$) — удельные активности по данному нуклиду первой и второй сред, имеющих объемы $V_1$ и $V_2$ (м$^3$), $C_v$ — 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 Д — 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 Гр=1 Дж/кг=100 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 рад=100 эрг/г=0,01 Дж/кг=0,01 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 γ-излучения, которая в 1 см$^3$ воздуха при давлении 760 мм рт. ст. и температуре 0°С производит ионизацию, соответствующую одной электростатической единице заряда каждого знака (2.08*10$^9$ пар ионов).**

- При дозе 1 Р в 1 см$^3$ воздуха поглощается 87 эрг энергии, а в 1 г биологической ткани — 93—95 эрг. Эта единица применяется для γ-излучения с энергией фотонов не выше 3 МэВ:
- 1 Р=0,2850 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:
- Н (бэр) =QД (рад). (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 γ-излучения.**

- **бэр используется для оценки поглощенной дозы от любого вида излучения:**
- 1 бэр = 100 эрг/г/Q = 1 рад/Q = 0,01 Гр/Q = 0,01 Зв
- **В СИ единицей эквивалентной дозы является Зиверт:**
- 1 Зв = 1 Гр/Q = 100 рад/Q = 100 бэр.
- **Безразмерный коэффициент качества Q показывает, во сколько раз отличаются неблагоприятные биологические последствия облучения человека различными видами излучения по сравнению с γ- 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 γ- излучением***

| Вид излучения | Q | Допустимая мощность дозы | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | бэр/год | бэр/неделя | рад/год | рад/неделя |
| Рентгеновское излучение, γ-кванты и β-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 |
| α-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 Д, отнесенная к единице времени t, называется мощностью дозы.
- Если рассматриваемый промежуток времени значительно меньше периода полураспада радиоактивного нуклида, то

$$Д = P_0 t \qquad P_0 = Д/t.$$

# 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 дозы, интенсивность или плотность потока излучения | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | единица измерения | при работе $t = 36$ ч в неделю | при работе $t$ ч в неделю |
| Рентгеновское и γ-излучения | До 3 МэВ | 100 мР | мР/ч | 2,8 | $100/t$ |
| То же | 3—$10^4$ МэВ | $250 \cdot 10^{10}$ МэВ/м² | $10^6$ МэВ/(м²·с) | 20 | $700/t$ |
| β-излучение | До 10 МэВ | $2{,}5 \cdot 10^{10} \frac{\text{β-част}}{\text{м}^2}$ | $10^6 \frac{\text{β-част}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$ | 0,2 | $7/t$ |
| Тепловые нейтроны | 0,025 эВ | $100 \cdot 10^{10}$ нейтр/м² | $10^6 \frac{\text{нейтр}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$ | 7,5 | $270/t$ |
| Медленные нейтроны | 0,1 эВ | $72 \cdot 10^{10}$ нейтр/м² | То же | 5,5 | $200/t$ |
| Промежуточные нейтроны | 5 кэВ | $82 \cdot 10^{10}$ нейтр/м² | • • | 6,4 | $230/t$ |
| То же | 20 кэВ | $40 \cdot 10^{10}$ нейтр/м² | • • | 3,1 | $110/t$ |
| Быстрые нейтроны | 10 МэВ | $2{,}6 \cdot 10^{10}$ нейтр/м² | • • | 0,2 | $7{,}2/t$ |
| Очень быстрые нейтроны | 200 МэВ | $1{,}3 \cdot 10^{10}$ нейтр/м² | • • | 0,1 | $3{,}6/t$ |
| Сверхбыстрые нейтроны | $10^4$ МэВ | $0{,}13 \cdot 10^{10}$ нейтр/м² | $10^6 \frac{\text{нейтр}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$ | 0,3 | $11/t$ |

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

- **1.35** Доза, поглощенная в биологической ткани при облучении ее тепловыми нейтронами, составляет 0,5 рад. Какой дозе γ -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*0,5=1,5 рад γ -излучения.
- **1.36** Определить дозу облучения за 4 ч работы при мощности дозы 0,5 мкР/с.
- *Решение*. Согласно Д = $P_0t$=0,5*4*3600=7,2 мР.
- **1.37** Какую в среднем дозу получит человек за 70 лет жизни от естественного фона ионизирующих излучений?
- *Решение*. По формуле Д = $P_0t$ находим:
- Д=Pt= $10^5*10^{-3*}70$ = 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 промежутоквремени. 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 Меж-
- дународная 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)