

# Лекция 8. Ядерный реактор как источник ионизирующего излучения.

Одной из существенных особенностей ядерного реактора является ионизирующее излучение, сопровождающее его работу на всех режимах, в том числе после остановки. 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 закону:

$$N(t) = N_0 * e^{-\lambda t} = N_0 * e^{-t/\tau} = N_0 * e^{-(0,693/T) t} = N_0 * 2^{-t/\tau}, \quad (2.10)$$

где  $N_0$ ,  $N(t)$  — начальное и текущее (в момент времени  $t$ ) количество радиоактивного нуклида;  $\lambda$ , — постоянная распада, представляющая собой вероятность распада ядра в единицу времени,  $\text{с}^{-1}$ ,  $\tau$  — среднее время жизни радиоактивного ядра,  $\text{с}$ ;  $T=0,693\tau$  — время, в течение которого распадается в среднем половина исходного количества радиоактивного вещества,  $\text{с}$ .

- 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). (21.27 )
- Удельная активность твердых радиоактивных веществ обычно выражается активностью единицы массы:
- $C_m = C/m$  Ки/кг. (21.28 )
- Удельная активность чистого нуклида с массовым числом  $A$  и периодом полураспада  $T$  (с)
- $Cm = . .$  (21.29 21.30 )
- 
- Поверхностная активность (активность поверхности) — это поток излучения с единицы площади  $S$  ( $\text{м}^2$ ) радиоактивного вещества [част/(( $\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ))]. Следует отличать понятие «загрязненность поверхности», характеризующее собой количество радиоактивного вещества на единице площади (Бк/ $\text{м}^2$ , Ки/ $\text{м}^2$  и др.).
- .

- Активность при смешении двух сред, имеющих соответственно объемы  $V_1$  (л) и  $V_2$  (л) и удельные активности  $C_{V1}$  (Ки/м<sup>2</sup>) и  $C_{V2}$  (Ки/м<sup>2</sup>), 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<sup>2</sup>. (21.31)
- При сообщении объемов двух сред с различной активностью по изменению удельной активности одной среды можно оценить скорость перемешивания сред (например, течь теплоносителя из одного контура в другой). Исходя из соотношения  $C_V (V_2 + \Delta V) = C_{V1} \Delta V + C_{V2} V_2$ , получаем:
- $G = \Delta V / t = \text{м}^3 / \text{ч}$  (21.32)
- 
- где  $C_{V1}$  и  $C_{V2}$  (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

- Поглощенная доза  $D$  — <sup>измерения</sup> 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 облученного вещества. Единица рад может служить 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, которые были образованы фотонами в малом объеме воздуха. Единицей экспозиционной дозы является кулон на килограмм (Кл/кг).
    - Специальной единицей 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, для оценки радиационной опасности хронического облучения излучением произвольного состава и определяемая как произведение поглощенной дозы Д на средний

- $H \text{ (бэр)} = QD \text{ (рад)}$ . (21.33)

коэффициент качества излучения Q в данной ткани;

- 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:

- $1 \text{ бэр} = \frac{100 \text{ эрг/г}}{Q} = \frac{1 \text{ рад}}{Q} = \frac{0,01 \text{ Гр}}{Q} = 0,01 \text{ Зв}$  21.34

- В СИ единицей эквивалентной дозы является зиверт:

- $1 \text{ Зв} = = = 100 \text{ бэр}$ .

- Безразмерный коэффициент качества Q показывает, во сколько раз отличаются неблагоприятные биологические последствия облучения человека различными видами излучения по сравнению с  $\gamma$  - излучением (табл. 21.2). Он используется только для целей радиационной безопасности при дозах не более 100 бэр.

# Таблица 21. 2

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

- Доза  $D$ , отнесенная к единице времени  $t$ , называется мощностью дозы
- $P = dD/dt$ .
- Доза, полученная за время  $t$ , равна  $D = \dots$ . Мощность дозы уменьшается во времени от значения  $P_0(t=0)$  по экспоненциальному закону с периодом полураспада данного нуклида:  $P(t) = P_0 e^{-\lambda t}$ . Доза, полученная за время  $t$ ,
- $D = (P_0/\lambda) (1 - e^{-\lambda t}) = (P_0/\lambda) (1 - 2^{-t/T})$
- Если рассматриваемый промежуток времени значительно меньше периода полураспада радиоактивного нуклида ( $t \ll T$ ), то
- $D = P_0 t$  и  $P = P_0 = D/t$ . (21.35)
- 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:  $1 \text{ Р/ч} = 280 \text{ мкР/с}$ ,  $1 \text{ мкР/с} = 3,6 \text{ мР/ч}$  и др.

- 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 105 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 СССР создает мощность экспозиционной дозы в пределах 4—20 мкР/ч (40—200 мР/год).
- «Нормы радиационной безопасности НРБ—76», устанавливая систему дозовых пределов и правила их применения, предусматривают следующие основные принципы радиационной безопасности:
  - не превышение установленного основного дозового предела;
  - исключение всякого необоснованного облучения;



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 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  $Q$  соответствуют мощности дозы, приведенные в табл .21.2.

Предельно допустимые уровни (ПДУ) внешнего ионизирующего излучения, соответствующие ПДД 100 мбэр в неделю, представлены в табл. 1.3. Для  $E_{\gamma} > 3$  МэВ интенсивность  $\gamma$ -излучения измеряют в МэВ/(м<sup>2</sup>\*с). При воздействии нескольких составляющих облучения

### Таблица 21.3

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 $t=36$ ч в неделю	при работе $t$ ч в неделю
Рентгеновское и $\gamma$ -излучения	До 3 МэВ	100 мР	мР/ч	2,8	100/т
То же	3— $10^4$ МэВ	$250 \cdot 10^{10}$ МэВ/м <sup>2</sup>	$10^4$ МэВ/(м <sup>2</sup> ·с)	20	700/т
$\beta$ -излучение	До 10 МэВ	$2,5 \cdot 10^{10} \frac{\beta\text{-част}}{\text{м}^2}$	$10^4 \frac{\beta\text{-част}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$	0,2	7/т
Тепловые нейтроны	0,025 эВ	$100 \cdot 10^{10}$ нейтр/м <sup>2</sup>	$10^4 \frac{\text{нейтр}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$	7,5	270/т
Медленные нейтроны	0,1 эВ	$72 \cdot 10^{10}$ нейтр/м <sup>2</sup>	То же	5,5	200/т
Промежуточные нейтроны	5 кэВ	$82 \cdot 10^{10}$ нейтр/м <sup>2</sup>	• •	6,4	230/т
То же	20 кэВ	$40 \cdot 10^{10}$ нейтр/м <sup>2</sup>	• •	3,1	110/т
Быстрые нейтроны	10 МэВ	$2,6 \cdot 10^{10}$ нейтр/м <sup>2</sup>	• •	0,2	7,2/т
Очень быстрые нейтроны	200 МэВ	$1,3 \cdot 10^{10}$ нейтр/м <sup>2</sup>	• •	0,1	3,6/т
Сверхбыстрые нейтроны	$10^4$ МэВ	$0,13 \cdot 10^{10}$ нейтр/м <sup>2</sup>	$10^4 \frac{\text{нейтр}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$	0,3	11/т

## Задачи с решениями

- **21.26** Сколько  $^{210}_{84}\text{Po}$  ( $T_{\text{Po-210}} = 138,4$  сут) распадется и останется через 10 сут от 4 мг исходного количества?
- *Решение.* Согласно формуле (2.10), определяем, что при периоде полураспада 138,4 сут через 10 сут останется 3,8 мг  $^{210}_{84}\text{Po}$ . Следовательно, распадается 0,2 мг  $^{210}_{84}\text{Po}$ .
- **21.27** Сколько  $\alpha$ -распадов в секунду претерпевают: а) 1 г  $^{226}_{88}\text{Ra}$  и б) 1 г  $^{238}_{92}\text{U}$ ? ( $T_{\text{Ra-226}} = 1620$  лет;  $T_{\text{U-238}} = 4,5 \cdot 10^9$  лет).
- *Решение.*
- а)  $C_{\text{Ra}} = \lambda N = 3,6 \cdot 10^{10}$  Бк
- Примечание: Менее точное (определенное ранее) значение периода полураспада  $^{226}_{88}\text{Ra}$   $T_{\text{Ra}} = 1590$  лет дает  $C_{\text{Ra}} = 3,7 \cdot 10^{10}$  Бк, которое было принято в качестве единицы измерения активности — кюри;
- б)  $C_{^{238}\text{U}} = 12,41 \cdot 10^3$  Бк = 0,335 мкКи.
- **21.28** Активность образца  $^{24}_{11}\text{Na}$  равна 0,5 Ки. На сколько уменьшится число распадов в минуту через 3 ч? ( $T_{\text{Na}} = 15,06$  ч).
- *Решение.* С учетом соотношения (2.10) уменьшение активности составляет
- $\Delta C(t) = C_0 - C(t) = C_0(1 - 2^{-t/T}) = 24 \cdot 10^{24}$  Бк = 0,065 Ки =  $14,4 \cdot 10^{10}$  расп/мин.

- **21.33** 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 формуле (21.32):
- $G_{\text{I-IIк}} = 2 \text{ м}^3/\text{ч}$ .
- **21.34** 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  $100/95 = 1,05 \text{ Р} = 1 \text{ Р}$ .

- **21.40** Для выполнения операции в зоне повышенной  $\gamma$ -активности необходимо 5 мин. При какой мощности дозы можно выполнить эту, операцию, чтобы не превысить суточную дозу, исходя из шестидневной рабочей недели?
- *Решение.* Исходя из недельной дозы 100 мР, определяем дозу за один день шестидневной рабочей недели:  $100/6=16,7$  мР. Следовательно, чтобы за 5 мин не превысить суточную дозу, работу можно выполнять только при мощности дозы [см.(21.35)]:
- $P \leq 16,7/5=3,34$  мР/мин = 200 мР/ч = 0,2 Р/ч=56 мкР/с.
- **21.41** Мощность дозы  $\gamma$ -излучения составляет 6 мР/ч. В течение какого времени можно работать в этой зоне, чтобы не превысить суточную ПДД, при пятидневной рабочей неделе?
- *Решение.* Исходя из недельной ПДД  $\gamma$ -облучения, равной 100 мР, определяем суточную дозу:
- $100/5= 20$  мР.
- При мощности дозы 6 мР/ч на рабочем месте допустимое время работы в сутки [см.(21.35):
- $t=Д/P=20/6 \approx 3,3$  ч.