

М.А. Киселёв

Курс «Физика и техника ядерных реакторов»

Лекция 4

Физика деления в активной зоне. Реактивность реактора.

6 октября 2016

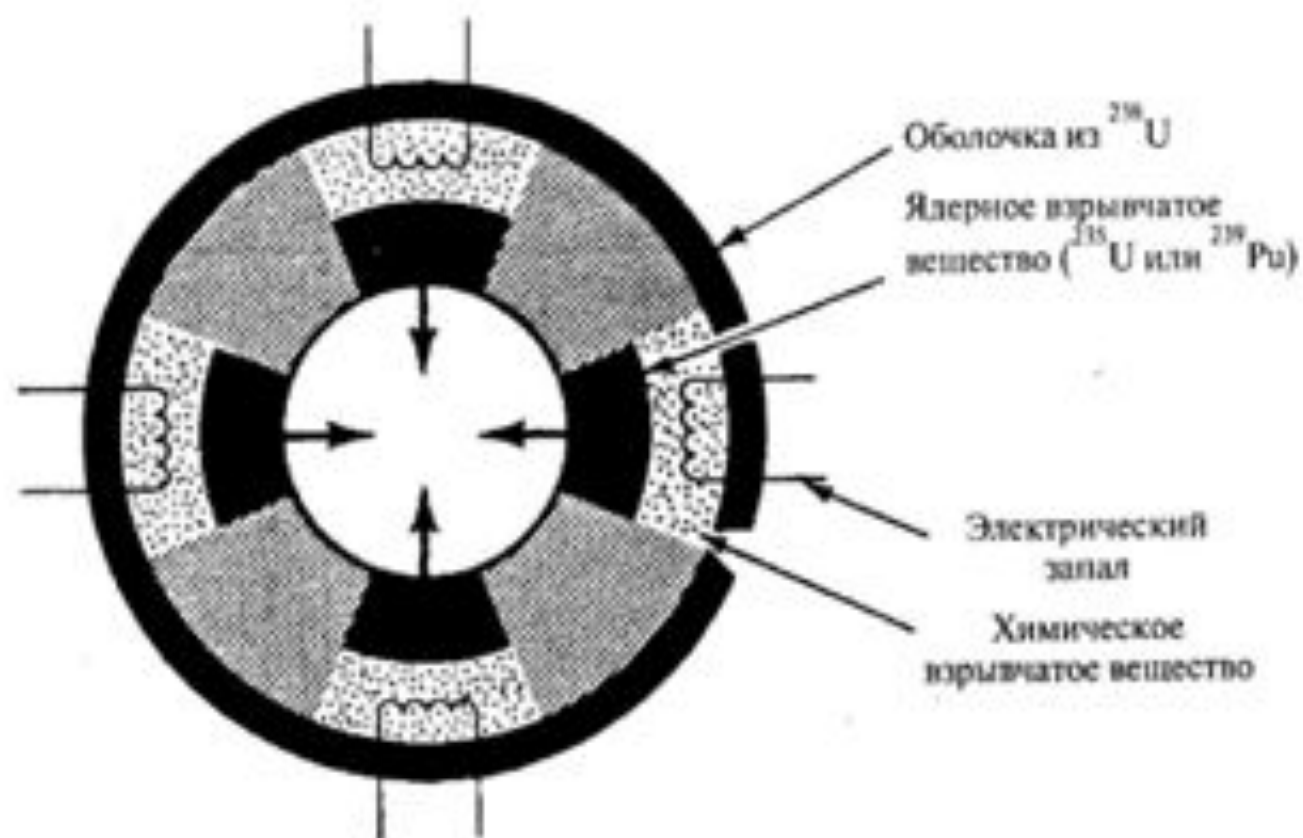
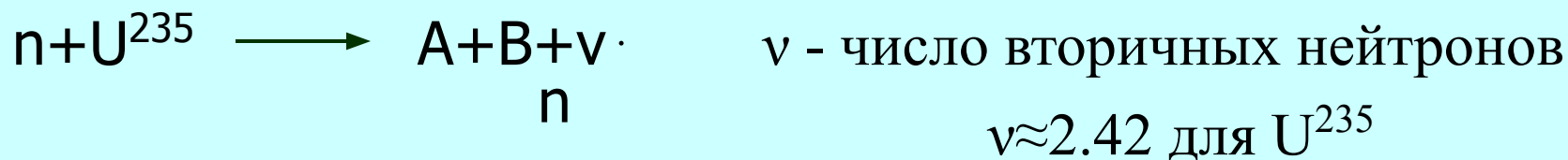
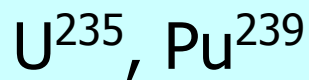


Рис. 8.11. Схема ядерной бомбы

Деление ядер. Основные свойства.



Паразитные процессы:

$$\nu \approx 3.05 \text{ для } Pu^{239}$$



$$\alpha = \frac{\sigma_c}{\sigma_f}$$

σ_f – сечение деления

σ_c – сечение радиационного захвата

σ_a – полное сечение поглощения

$$\eta = \nu \cdot \frac{\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_c} = \nu \cdot \frac{1}{1 + \alpha}$$

- число вторичных нейтронов
- с учетом поглощения

Число вторичных нейтронов с учетом их поглощения

$$\eta = \nu \cdot \frac{\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_c} = \nu \cdot \frac{1}{1 + \alpha}$$

Значения α в зависимости от энергии поглощенного нейтрона

Изотоп	Энергия	α	Изотоп	Энергия	α
^{235}U	Тепловая	0,18	^{239}Pu	Тепловая	0,42
	30 эв	0,65		100 эв	0,81
	100 эв	0,52		1200 эв	0,60
	1200 эв	0,47		15 кэв	0,45
	15 кэв	0,41			

Коэффициент размножения и реактивность реактора

$$k = \frac{\text{число нейтронов в поколении}}{\text{число нейтронов в предыдущем поколении}}$$

$k < 1, \rho < 0$ - подкритический реактор

$k = 1, \rho = 0$ - критический реактор

$k > 1, \rho > 0$ - надкритический реактор

$$\rho = \frac{k - 1}{k} \approx k - 1 \text{ - реактивность}$$

k_{∞} - коэффициент размножения бесконечно большого реактора

$$k_{\infty} > k$$

$$k = k_{\infty} \cdot P_f \cdot P_t$$

P_f и P_t – вероятность того, что быстрый и тепловой нейтрон не покинут реактор

Формула четырех сомножителей описывает в одnogрупповом приближении коэффициент размножения на тепловых нейтронах

$$k_{\infty} = \eta \cdot \varepsilon \cdot p \cdot f$$

$\eta = \nu \cdot \frac{1}{1 + \alpha}$ - зависит от энергии медленных нейтронов

ε - коэффициент размножения на быстрых нейтронах

p – вероятность избежать резонансный захват при замедлении

$f = \frac{\sum_a^{\text{fuel}}}{\sum_a}$ - коэффициент использования тепловых нейтронов

$\sum_a^{\text{fuel}}, \sum_a$ **макроскопическое сечение поглощения теплового нейтрона топливом и полное сечения поглощения (топливо+конструкционные материалы)**

Мгновенные и запаздывающие нейтроны

$\nu = 2.42$ для U^{235}

↗ Мгновенные нейтроны

↘ Запаздывающие нейтроны

Период полураспада, сек	Выход, % (к общему числу вторичных нейтронов)	Кинетическая энергия запаздывающих нейтронов, Мэв
$Br_{35}^{87} \rightarrow 55,7$	0,021	0,25
$I_{53}^{137} \rightarrow 22,7$	0,140	0,56
6,2	0,125	0,43
2,3	0,253	0,62
0,6	0,074	0,42
0,2	0,027	—
	<u>0,640</u>	

$\beta = 0.006$ – доля запаздывающих нейтронов

$\tau = 0.1$ сек- среднее время жизни нейтронов

Увеличение числа нейтронов в мультиплицирующей системе

$$dn = n \cdot (k - 1) = n \cdot \rho \quad \text{Прирост нейтронов за одно поколение}$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{n \cdot \rho}{\tau}$$

$$n(t) = N_o \cdot \exp\left(\frac{\rho \cdot t}{\tau}\right)$$

Формула обратных часов

$$\rho = \frac{\bar{\tau} \cdot s}{\bar{\tau} \cdot s + 1} + \frac{1}{\bar{\tau} \cdot s + 1} \cdot \sum_{i=1}^6 \frac{s \cdot \beta_i}{s + \lambda_i}$$

$\bar{\tau}$ - время жизни нейтрона (поколения)

$s=1/T$, где T — период разгона реактора

β_i λ_i доля и постоянная распада i группы нейтронов

Энергия деления

$$E_f = 931 \cdot [m_U + m_n - (m_1 + m_2 + \nu \cdot m_n)]$$

$$E_f \approx 200 \text{ МэВ}$$

Коэффициент размножения

$$\delta K_{\text{эфф}} = K_{\text{эфф}} - 1$$

$$K_{\text{эфф}} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{n_1 \pm \Delta n}{n_1} = 1 \pm \frac{\Delta n}{n_1} = 1 \pm \delta K_{\text{эфф}}$$

$$\rho = \frac{K_{\text{эфф}} - 1}{K_{\text{эфф}}} = \pm \frac{\delta K_{\text{эфф}}}{K_{\text{эфф}}} = \pm \frac{\Delta n}{n_2}$$

Термализованные нейтроны

$$T_{\text{нг}} \approx T \cdot \left[1 + 1.4 \cdot \frac{\Sigma_a(T)}{\xi \cdot \Sigma_s} \right]$$

$T_{\text{нг}}$ – температура нейтронного газа

T – температура среды

ξ – среднелогарифмический декремент энергии

$\xi \Sigma_s$ – замедляющая способность среды

$E = kT$ Наиболее вероятная энергия нейтронов

$\bar{E} = \frac{3}{2} kT = \frac{1}{2} m \cdot \langle v^2 \rangle = \frac{1}{2} \cdot \frac{h^2}{m \cdot \lambda^2}$ Средняя энергия нейтронов

$$\lambda[\text{см}] = \frac{0.286 \cdot 10^{-8}}{\sqrt{E[\text{эв}]}}$$

Замедление нейтронов

Возраст нейтрона τ (м²) характеризует длину замедления – среднее расстояние по прямой $r_{\text{зам}}$, на которое смешается нейтрон от точки рождения с энергией E_0 до точки, где он замедлится до энергии E .

Для среды с точечным источником

$$\tau = \frac{1}{6} \langle r_{\text{зам}}^2 \rangle = \ln \left(\frac{E_0}{E} \cdot \frac{1}{3\xi\Sigma_s^2 \cdot (1 - \langle \cos \Theta \rangle)} \right)$$

$$\xi = \left\langle \ln \left(\frac{E_1}{E_2} \right) \right\rangle = 1 + \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \frac{A-1}{A+1} \approx \frac{2}{A+2/3}$$

Замедление нейтронов

$$Z = \frac{1}{\xi} \cdot \ln \left(\frac{E_0}{E_T} \right)$$

При замедлении от энергии $E_0 = 2$ Мэв до тепловой $E_T = 0.025$ эв

$$Z = \frac{18.2}{\xi}$$

Для воды $Z=18$, для тяжелой воды - 28, для графита – 91,
для урана – более 2000

$$K_{\text{зам}} = \frac{\xi \Sigma_s}{\Sigma_a} \quad - \text{коэффициент замедления}$$

Диффузия нейтронов

Длина диффузии нейтрона $L(m)$ – мера среднего расстояния по прямой $\langle r_{\text{диф}} \rangle$, на которое смешается нейтрон от точки, где он стал тепловым, до точки поглощения.

Для среды с точечным источником

$$L^2 = \frac{1}{6} \langle r_{\text{диф}}^2 \rangle = \frac{1}{3 \Sigma_a \Sigma_s \cdot (1 - \langle \cos \Theta \rangle)} = \frac{\lambda_a \lambda_{\text{tr}}}{3}$$

M - длина миграции нейтрона – мера среднего расстояния по прямой, на которое смешается нейтрон от точки рождения до точки поглощения

$$M^2 = \tau + L^2$$

Характерные времена

$$t_{\text{зам}} = \frac{2}{\xi \Sigma_s} \cdot \left(\frac{1}{v_T} - \frac{1}{v_o} \right) \approx \frac{2}{\xi \Sigma_s v_T}$$

$$t_{\text{диф}} = \frac{\lambda_a}{v_T} = \frac{1}{\Sigma_a v_T}$$

$$\frac{t_{\text{зам}}}{t_{\text{диф}}} = \frac{2 \Sigma_a}{\xi \Sigma_s} = \frac{2}{K_{\text{зам}}} \ll 1$$

Коэффициент размножения

$$K_{\infty} = \frac{n_2}{n_1} = \nu_{\text{эфф}} \cdot \mu \cdot \phi \cdot \Theta$$

$$\nu_{\text{эфф}} = \nu_f \cdot \frac{\Sigma_f}{\Sigma_f + \Sigma_{\gamma}} \quad \text{эффективный выход нейтронов на один захваченный нейтрон}$$

μ - коэффициент размножения на быстрых нейтронах

ϕ - вероятность избежать резонансный захват в уране-238

Θ - коэффициент использования тепловых нейтронов

Две составляющие коэффициента размножения

$$K_{\text{МГН}} = (1 - \beta) \cdot K_{\text{эфф}}$$

$$K_{\text{зап}} = \beta \cdot K_{\text{эфф}}$$

Учет конечных размеров реактора

$$K_{\text{эфф}} = K_{\infty} \cdot p_{\text{зам}} \cdot p_{\text{диф}} = K_{\infty} \cdot \frac{e^{-B^2\tau}}{1 + B^2L^2}$$

Геометрический параметр В (м⁻¹)

$$B = \frac{\pi}{R + \delta_{\text{эфф}}} \quad \text{Сферический реактор}$$

$$B^2 = \left(\frac{\pi}{H + 2\delta_{\text{эфф}}} \right)^2 + \left(\frac{2.405}{R + \delta_{\text{эфф}}} \right)^2 \quad \text{цилиндрический реактор}$$

Задачи

- Посчитать среднюю скорость тепловых нейтронов в среде с $T=300\text{K}$
- Рассчитать длину волны тепловых нейтронов, $T=300\text{K}$
- Посчитать длину свободного пробега тепловых нейтронов в графите ($\sigma_t=5.6*10^{-24} \text{ см}^{-2}$, $\rho=1.8 \text{ г/см}^3$)