

Основные зависимости и картинки к госэкзамену

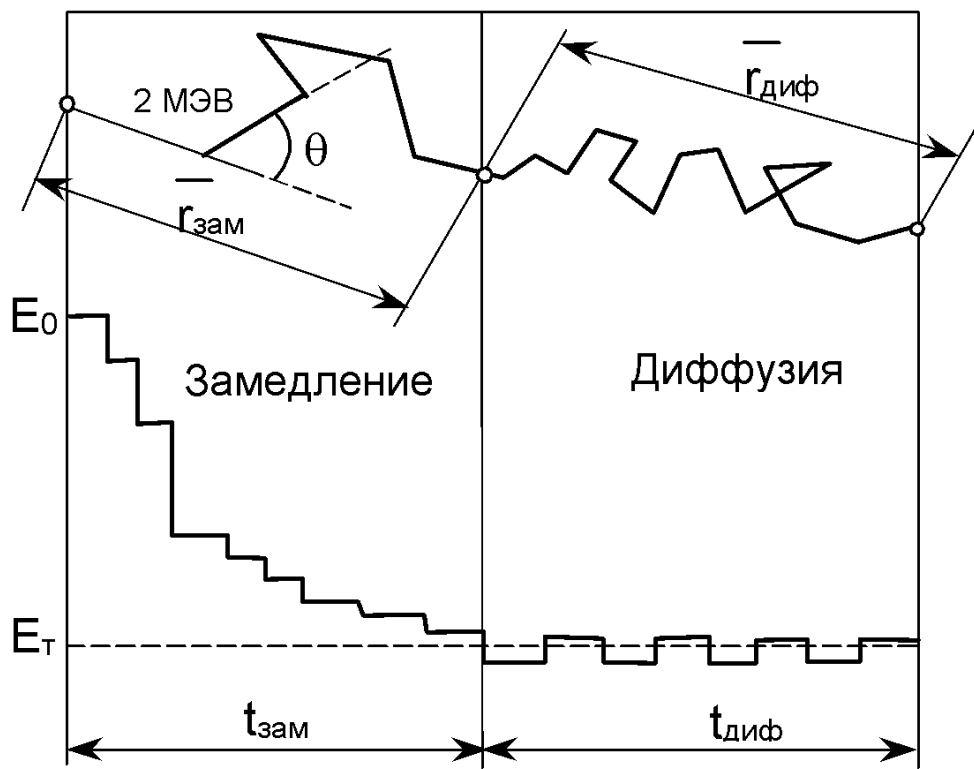
**Баланс нейтронов. Коэффициент размножения.
Реактивность**

$$\frac{d\bar{n}_T}{dt} = \left(\begin{array}{l} \text{скорость генерации} \\ \text{тепловых нейтронов} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{скорость поглощения} \\ \text{тепловых нейтронов} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{скорость утечки} \\ \text{тепловых нейтронов} \end{array} \right)$$

$$D\nabla^2\Phi - \Sigma_a\Phi + S = \frac{\partial n}{\partial t}$$

$$k_{\text{эф}} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{n_1 \pm \Delta n}{n_1} = 1 \pm \frac{\Delta n}{n_1} = 1 \pm \delta k_{\text{эф}}$$

$$\rho = \frac{k_{\text{эф}} - 1}{k_{\text{эф}}} = \pm \frac{\delta k_{\text{эф}}}{k_{\text{эф}}}$$



$$\tau = \frac{1 - 2}{6} r_{зам} = \frac{\ln \frac{E_0}{E}}{3 \cdot \xi \cdot \Sigma_s^2 \cdot (1 - \overline{\cos \theta})}$$

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

$$K_{зам} = \xi \Sigma_s / \Sigma_a,$$

$$L^2 = \frac{1 - 2}{6} r_{зам} = \frac{1}{3} \Sigma_a \cdot \Sigma_s \cdot (1 - \overline{\cos \theta})$$

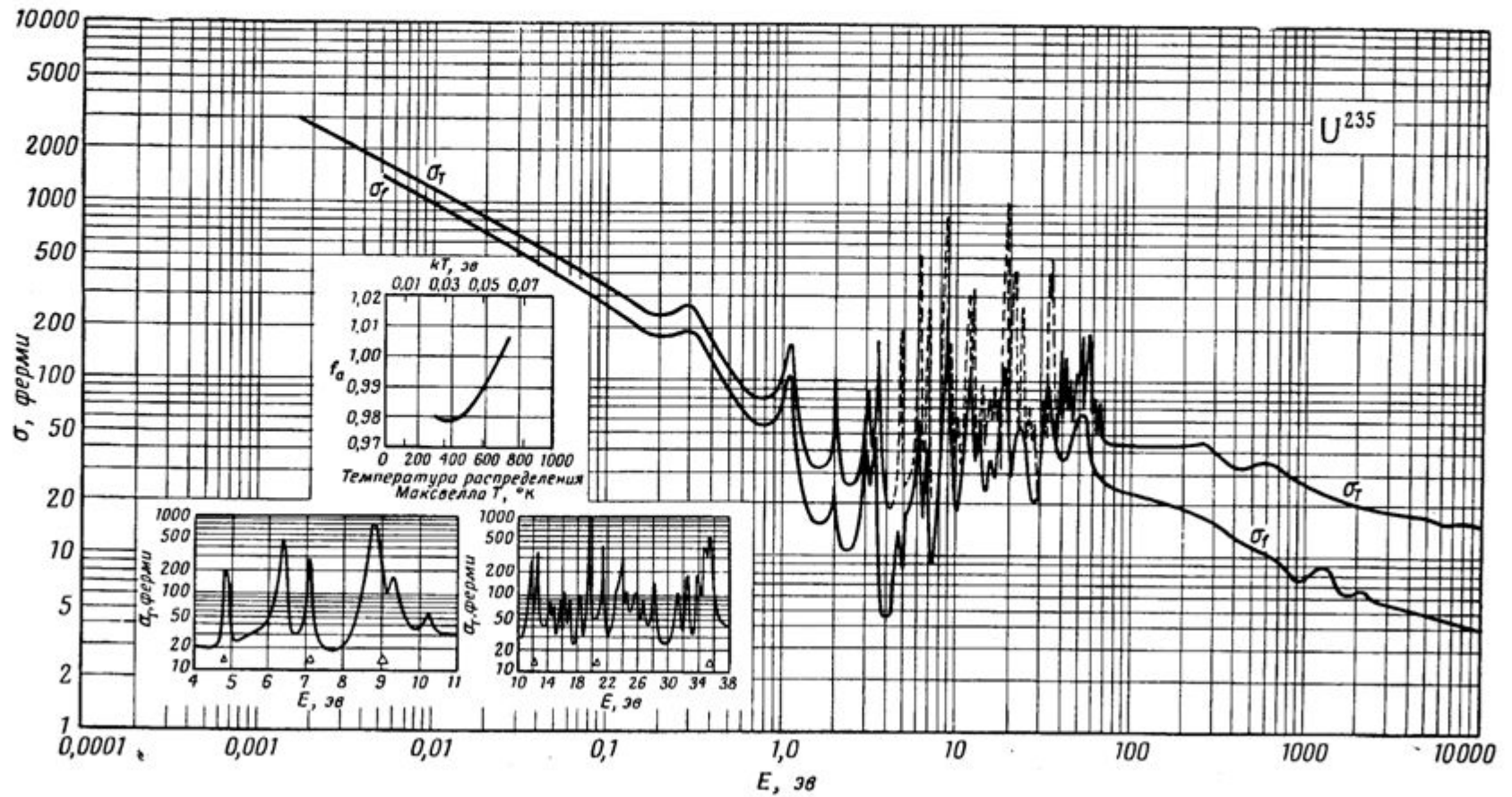
$$M^2 = \tau + L^2$$

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

$$B^2 = \left(\frac{\Pi}{H + 2\delta_{эф}} \right)^2 + \left(\frac{2.405}{R + \delta_{эф}} \right)^2$$

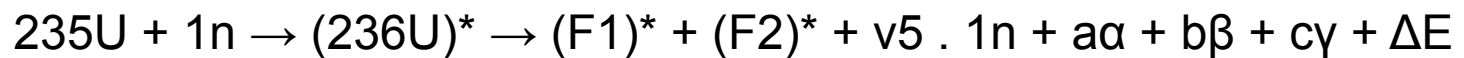
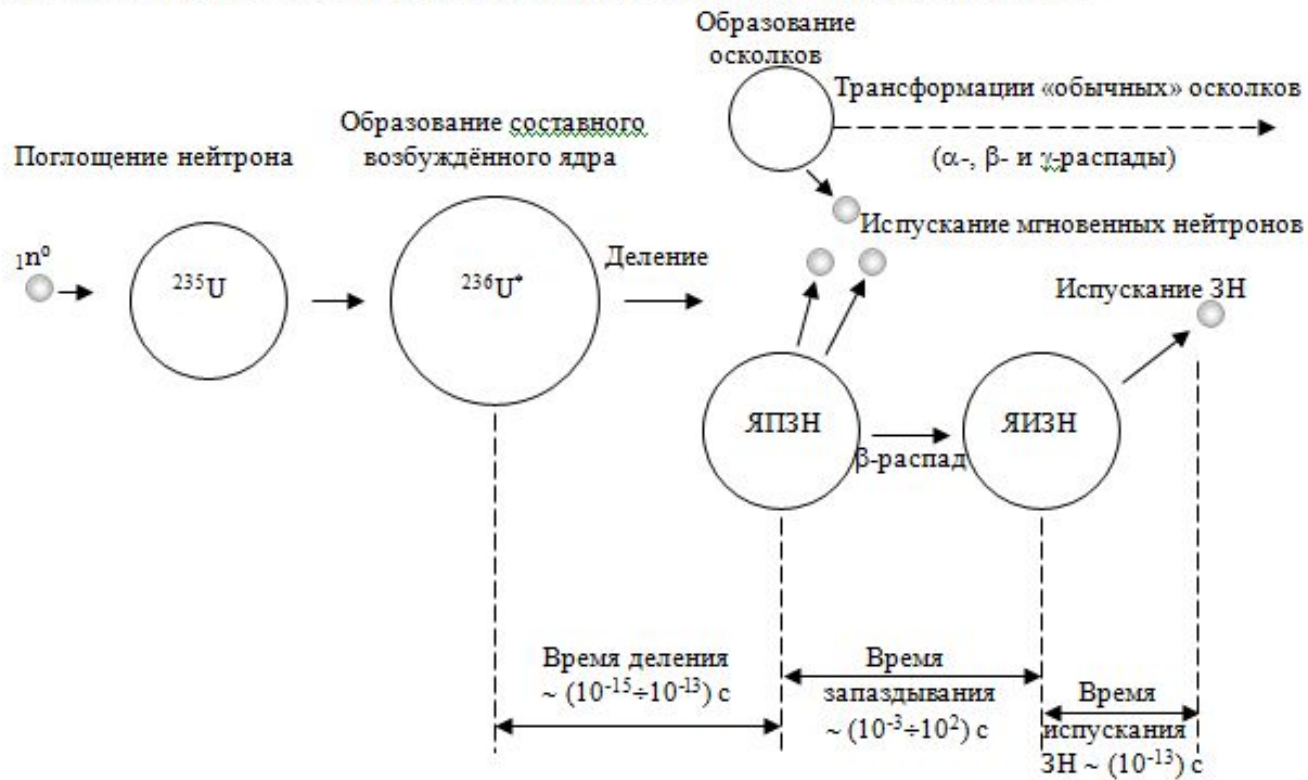
$$K_{\infty} = v_{эф} \cdot \mu \cdot \phi \cdot \theta$$

Ядерные реакции

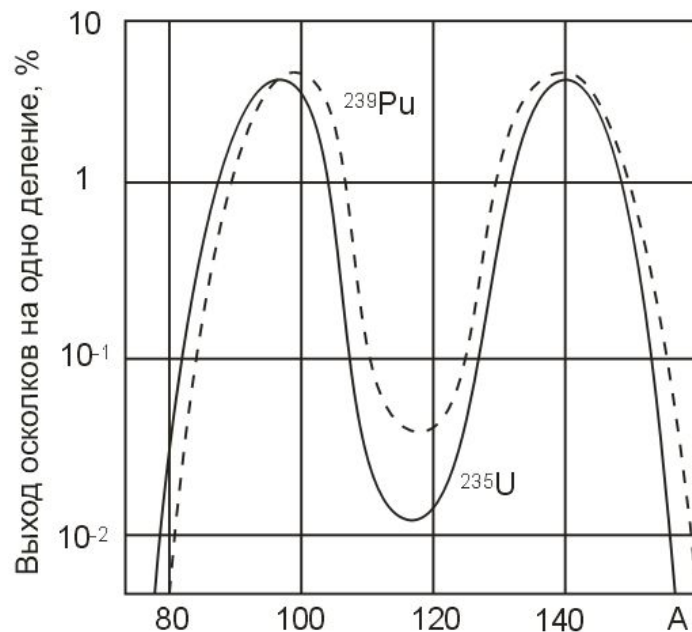


$$\bar{N} = \bar{\Phi} \rho \cdot \sigma_f \cdot E_f \cdot V \quad \Sigma_f = \rho \cdot \sigma_f = \frac{\text{яд}}{\text{см}^3} \cdot \text{см}^2 = \frac{1}{\text{см}} = \text{см}^{-1}$$

Реакция деления

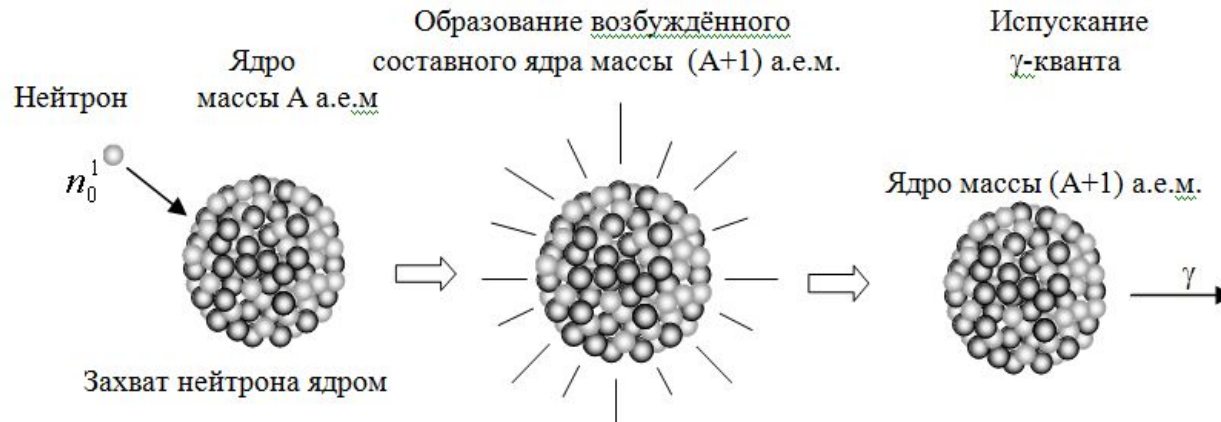


Удельные выходы осколков деления различных атомных масс при делении ядер ^{235}U (сплошная линия) и ^{239}Pu (штриховая линия)

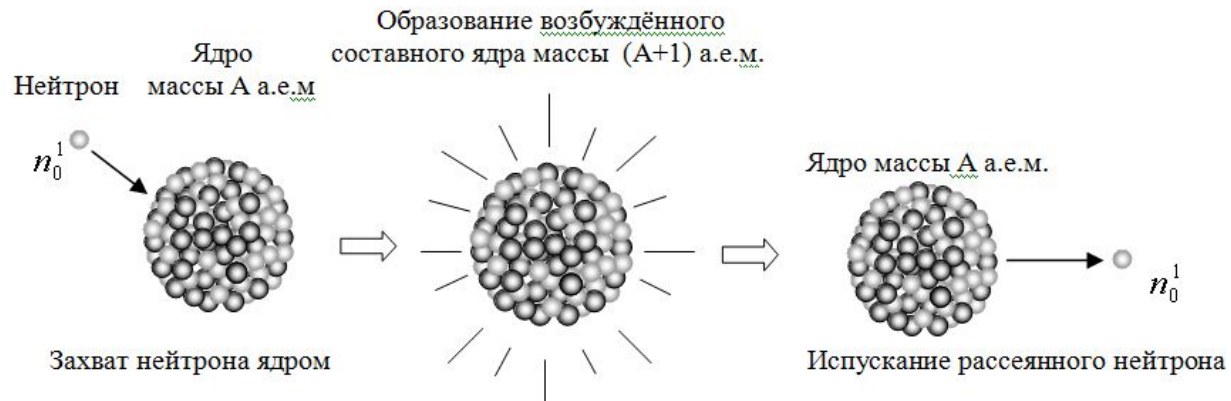


| Носители энергии деления | урана-235 | плутония-239 |
|---|-----------|--------------|
| 1. Кинетическая энергия осколков деления | 166.0 | 171.5 |
| 2. Кинетическая энергия нейтронов деления | 4.9 | 5.8 |
| 3. Энергия мгновенных гамма-квантов | 7.2 | 7.0 |
| 4. Энергия γ -квантов из продуктов деления | 7.2 | 7.0 |
| 5. Кинетическая энергия β -излучения осколков | 9.0 | 9.0 |
| 6. Энергия антинейтрино | 10.0 | 10.0 |
| Итого: | 204.3 МэВ | 210.3 МэВ |

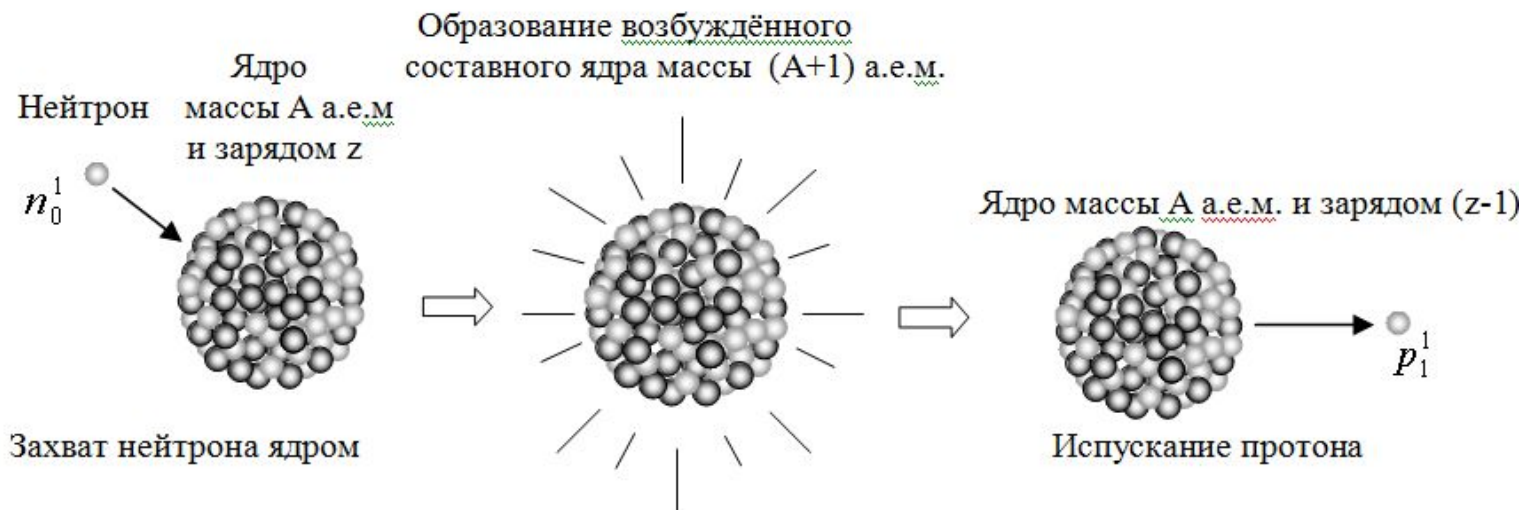
Радиационный захват



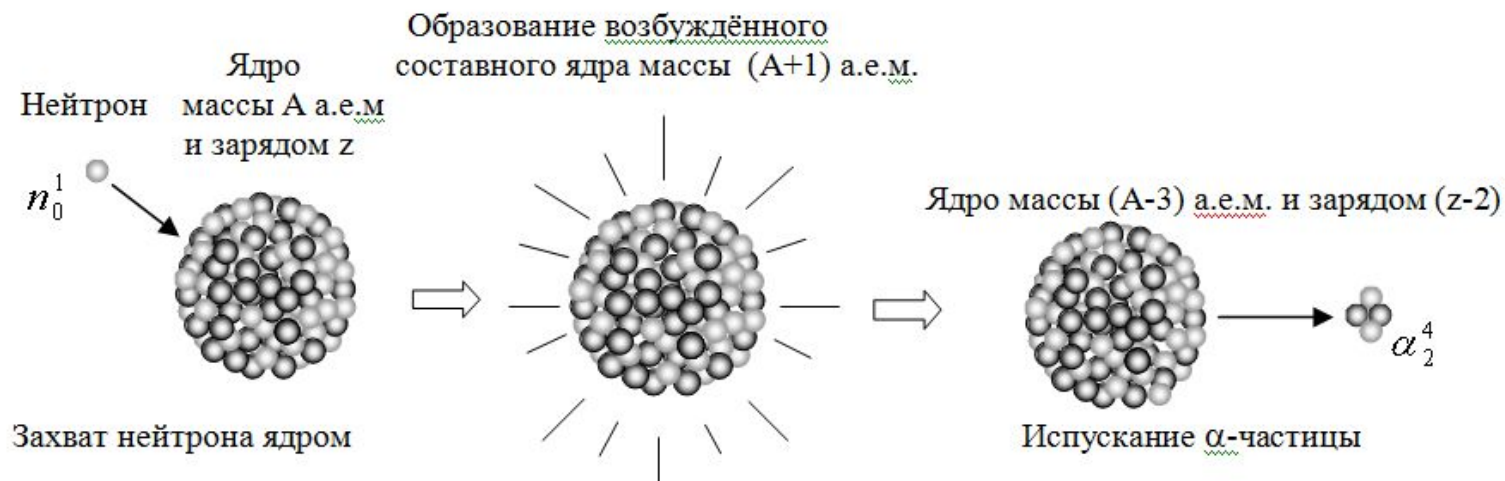
Реакция рассеяния



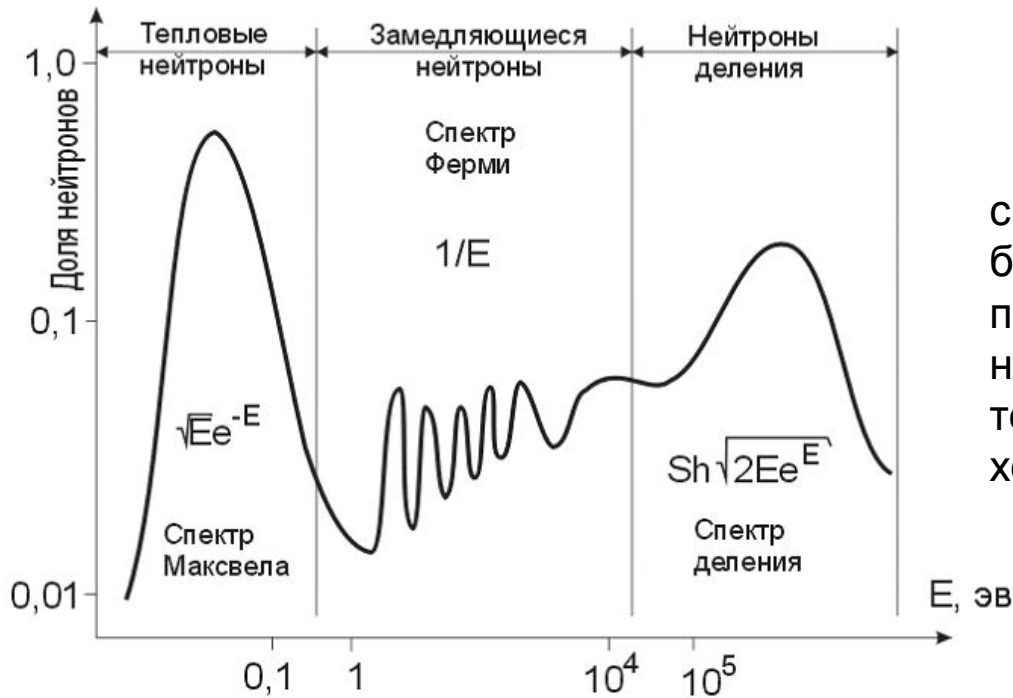
Реакции типа (n,p)



Реакции типа (n, α)



Понятие об энергетическом спектре



сверхбыстрые ($E > 2 \text{ МэВ}$);
 быстрые ($0,2 \text{ МэВ} < E < 2 \text{ МэВ}$);
 промежуточные ($0,5 \text{ кэВ} < E < 0,2 \text{ МэВ}$);
 надтепловые ($0,1 \text{ эВ} < E < 0,5 \text{ кэВ}$);
 тепловые ($E < 0,1 \text{ эВ}$);
 холодные ($E < 5 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}$).

$$T_{н.г.} \approx T(1 + 1,4 \Sigma a(T) / \xi \Sigma s),$$

Замедлители

| Вещество | Плотность, г/см ³ | Замедляющая способность | Коэффициент замедления |
|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| Легкая вода (H ₂ O) | 1 | 1,35 | 61 |
| Тяжелая вода (D ₂ O) | 1,1 | 0,179 | 1900 |
| Бериллий (Be) | 1,85 | 0,155 | 125 |
| Окись бериллия | 2,96 | 0,12 | 170 |
| Графит (C) | 1,6 | 0,064 | 170 |
| Гелий (He) | 0,00018 | 0,009 | 45 |

$$\xi \sum_s \quad \xi = \overline{\ln\left(\frac{E_1}{E_2}\right)} = 1 + \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \frac{A-1}{A+1}$$

$$K_{зам} = \frac{\xi \sum_s}{\sum_a} \quad z = \frac{1}{\xi} \ln \frac{E_1}{E_2} = \left(\frac{A}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{18A} \right) \ln \frac{E_1}{E_2}$$

Мгновенные и запаздывающие нейтроны

Мгновенные

Выход нейтронов

| | |
|------------------|------------------|
| для урана-235 | $\nu_5 = 2.416,$ |
| для плутония-239 | $\nu_9 = 2.862,$ |
| для плутония-241 | $\nu_1 = 2.938$ |

Зависимость от энергии

$$\nu_5(E) = 2.416 + 0.1337 E;$$

$$\nu_9(E) = 2.862 + 0.1357 E.$$

$$\lambda = t_{дел} + t_z + t_{диф}$$

Сравнение спектров

$E_{ср} = 1.935 \text{ МэВ}$ - для ^{235}U

$E_{ср} = 2.00 \text{ МэВ}$ - для ^{239}Pu

Мгновенные и запаздывающие нейтроны

Запаздывающие

| Родона-чальник | Период полураспада | Номер группы | Средний удельный выход группы | Средний период полураспада группы | Абсолютная доля выхода группы |
|-------------------|--------------------|--------------|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| ⁸⁷ Br | 54 с | 1 | 0.00052 | 55.72 с | 0.00021 |
| ¹⁴² Cs | 66 с | 1 | | | |
| ¹³⁷ I | 24.2 с | 2 | 0.00346 | 22.72 с | 0.00140 |
| ⁹³ Br | 15.5 с | 2 | | | |
| ¹³⁶ Te | 20.0 с | 2 | | | |
| ¹³⁸ I | 5.9 с | 3 | 0.00310 | 6.22 с | 0.00126 |
| ⁸⁹ Br | 3.9 с | 3 | | | |
| ¹³⁹ I | 2.7 с | 4 | 0.00624 | 2.30 с | 0.00253 |
| ⁹⁴ Kr | 1.4 с | 4 | | | |
| ¹⁴⁴ Cs | 1.9 с | 4 | | | |
| ¹⁴⁰ I | 0.5 с | 5 | 0.00182 | 0.50 с | 0.00074 |
| ⁹³ Br | 0.16 с | 6 | 0.00066 | 0.18 с | 0.00027 |
| ¹⁴⁵ Cs | 0.19 с | 6 | | | |

а) Доля выхода группы среди всех генерируемых нейтронов

$$\beta_i = \frac{\gamma_i \cdot P_{\beta i}}{V_5} \quad \beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 + \beta_5 + \beta_6.$$

для ядер ^{235}U $\beta_5 = 0.0064,$
 для ядер ^{239}Pu $\beta_9 = 0.0021$

б) Величина начальной кинетической энергии E_i запаздывающих нейтронов.

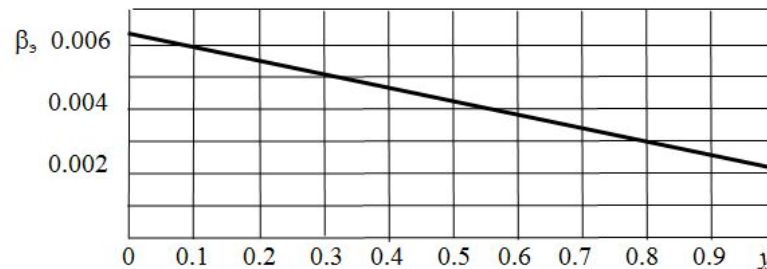
$$\bar{E}_{зн} = \frac{1}{\beta} \sum_{i=1}^6 E_i \cdot \beta_i \approx 0.49 \text{ МэВ}, \quad \gamma = \frac{\beta_{эф}}{\beta} \approx 1 + 20B^2$$

в) Время запаздывания.

$$t_{зани} = \frac{1}{\lambda_i}$$

$$\sum_{i=1}^6 \beta_i t_i = 0,0924 \text{ с}$$

г) Изменение в процессе компани



Управление ядерным реактором.

$$\rho = \frac{k_{\text{эфф}} - 1}{k_{\text{эфф}}} \quad n = n_0 e^{\frac{\delta k t}{e}} \quad \Phi = \Phi_0 e^{\frac{\delta k t}{e}}$$

$$T = \left(\frac{1}{n} \frac{dn}{dt} \right)^{-1} = \frac{e}{\delta k}$$

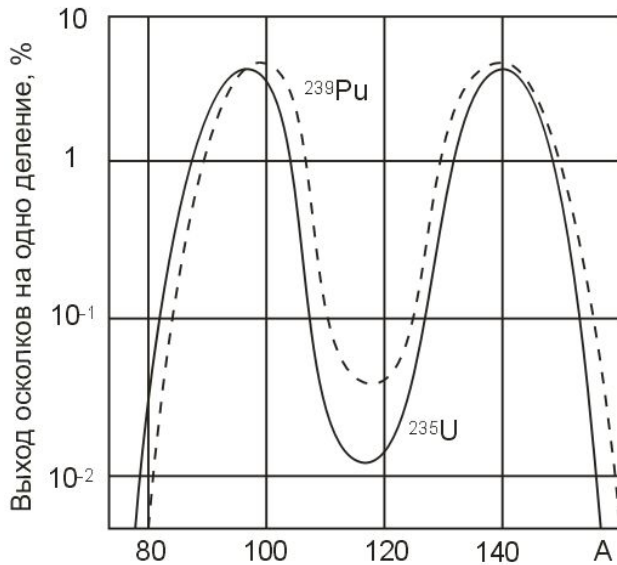
Только мгновенные: $e = t \approx 10^{-3} \text{ c}$ $T = \frac{e}{\delta k} = \frac{10^{-3}}{5 \cdot 10^{-3}} = 0.2 \text{ c}$

$$\Phi = \Phi_0 e^{\frac{t}{T}} = \Phi_0 e^{0.2} = \Phi_0 150$$

Мгновенные +
запаздывающие

$$\bar{e} = e(1 - \beta) + \sum_{i=1}^6 \beta_i (t_i + e) = e + \sum_{i=1}^6 \beta_i t_i \approx 0,1 \text{ c} \quad T = \frac{\bar{e}}{\delta k} \approx 20 \text{ c}$$

Шлакование

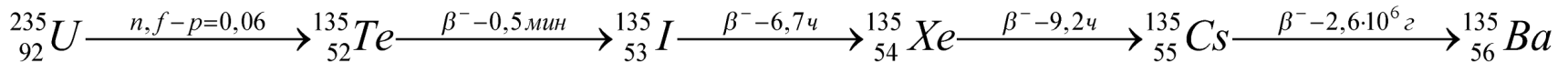


$$\frac{dN_{шл,i}}{dt} = (p_{5,i}N_5\sigma_5^f + p_{9,i}N_9\sigma_9^f)\Phi - N_{шл,i}\sigma_{шл,i}\Phi$$

$$m_{выг} = m_{шл} \approx m_{дел} + m_{\gamma} = 1,05(1 + \alpha) Nt \varepsilon$$

$$N_{шл} = 2N_{дел}^{мон} = \frac{2m_{дел}}{V} \frac{6,02 \cdot 10^{23}}{235} \text{ядер} / \text{см}^3$$

Ксенон – 135

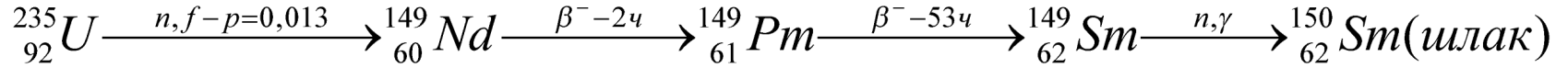


$$\frac{dN_I}{dt} = p_I \Sigma_U^f \Phi - N_I \sigma_I \Phi - \lambda_I N_I$$

$$N_{Xe}(t) = \frac{(p_I + p_{Xe}) \Sigma_U^f \Phi_0}{\lambda_{Xe} + \sigma_{Xe} \Phi_0}$$

$$\frac{dN_{Xe}}{dt} = \lambda_I N_I + p_{Xe} \Sigma_U^f \Phi - N_{Xe} \sigma_{Xe} \Phi - \lambda_{Xe} N_{Xe}$$

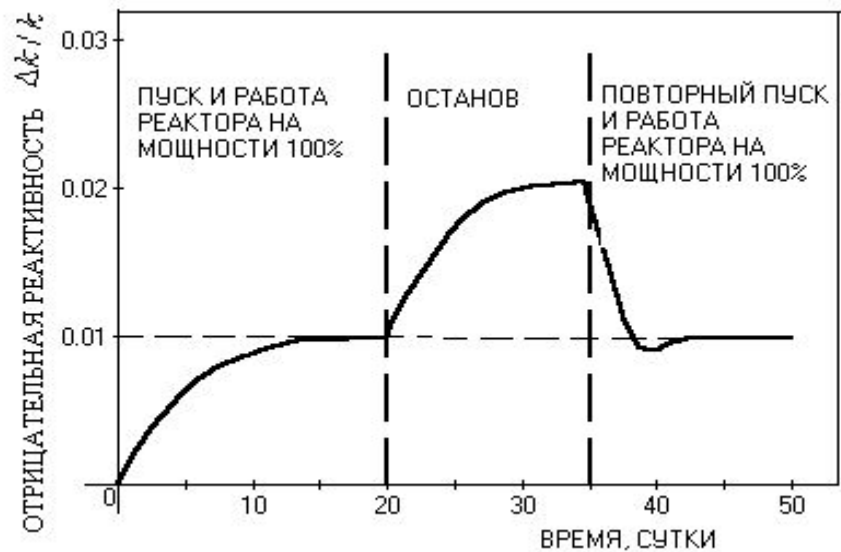
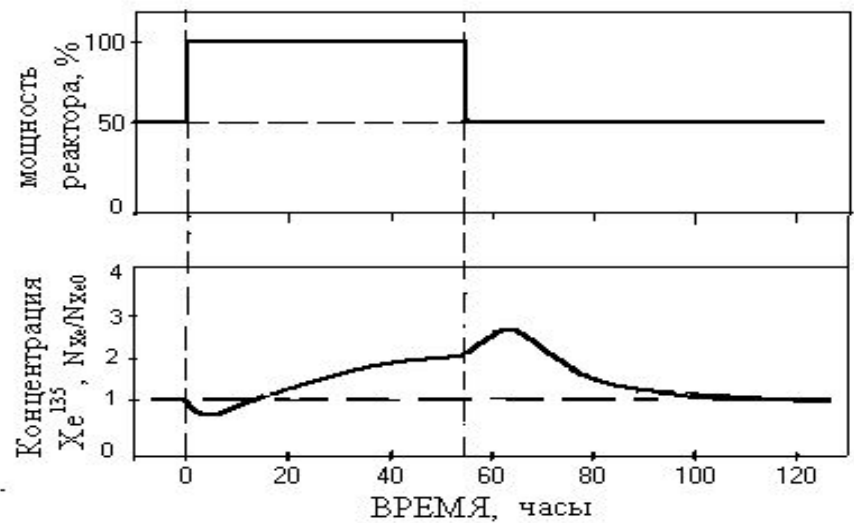
Самарий-149



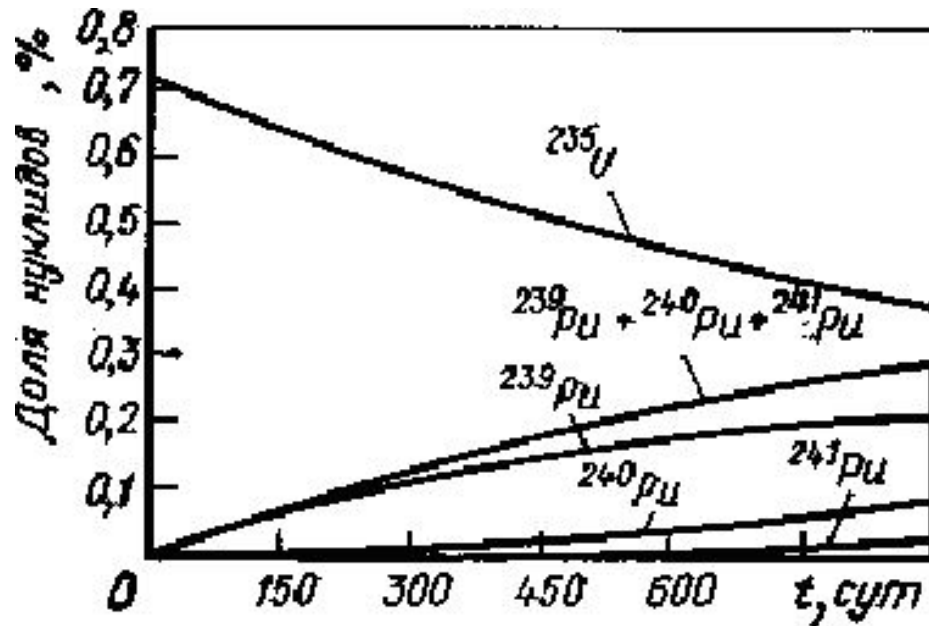
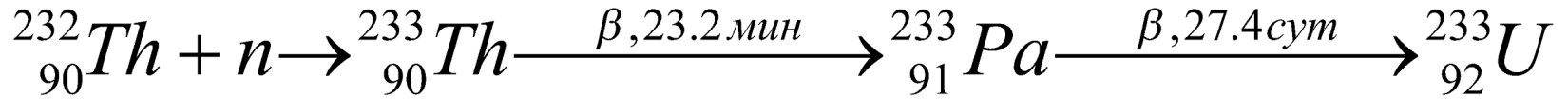
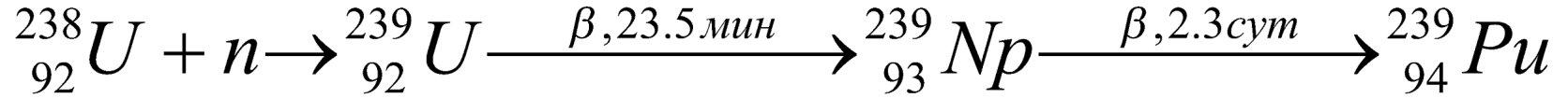
$$\frac{dN_{Pm}}{dt} = p_{Pm} \sum_U^f \Phi - \lambda_{Pm} N_{Pm} \quad N_{Pm}(t) = \frac{p_{Pm} \sum_U^f \Phi_0}{\lambda_{Pm}} [1 - \exp(-\lambda_{Pm} t)]$$

$$\frac{dN_{Sm}}{dt} = \lambda_{Pm} N_{Pm} - N_{Sm} \sigma_{Sm} \Phi \quad N_{Sm,0} = \frac{p_{Pm} \sum_U^f \Phi_0}{\sigma_{Sm}}$$

Влияние на реактивность Xe и Sm



Воспроизводство ядерного топлива



$$KB = \frac{dN_9/dt}{dN_5/dt}$$

Выгорание ядерного топлива

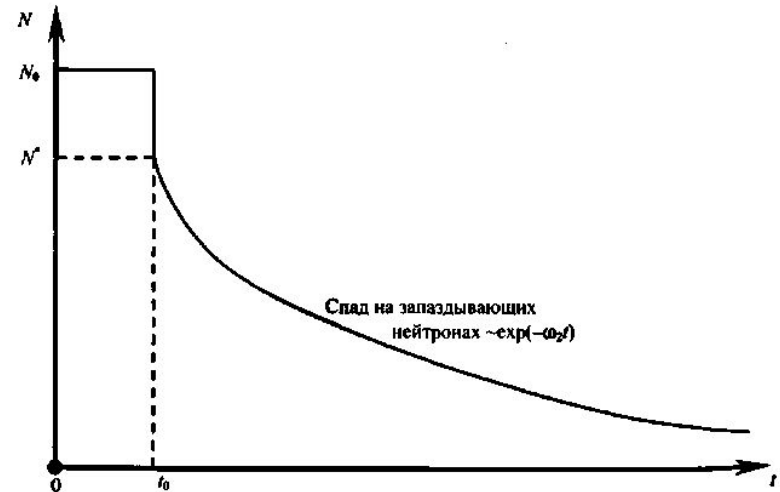
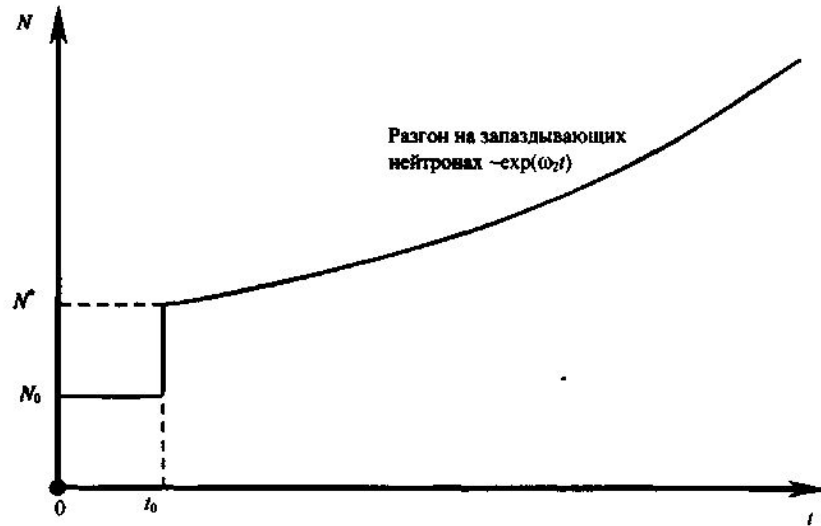
$$x = (mU^{235}/mU) \cdot 100\% \approx (NU^{235}/NU) \cdot 100\%,$$

$$m_U = m_U^{об} \frac{x - x_{отв}}{x_0 - x_{отв}}$$

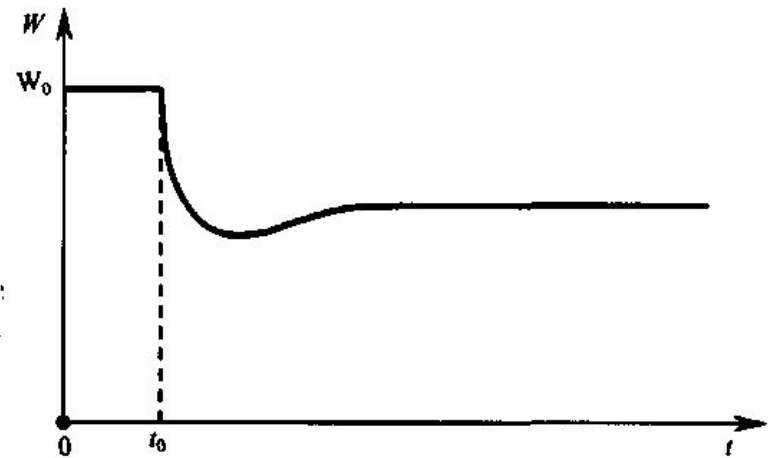
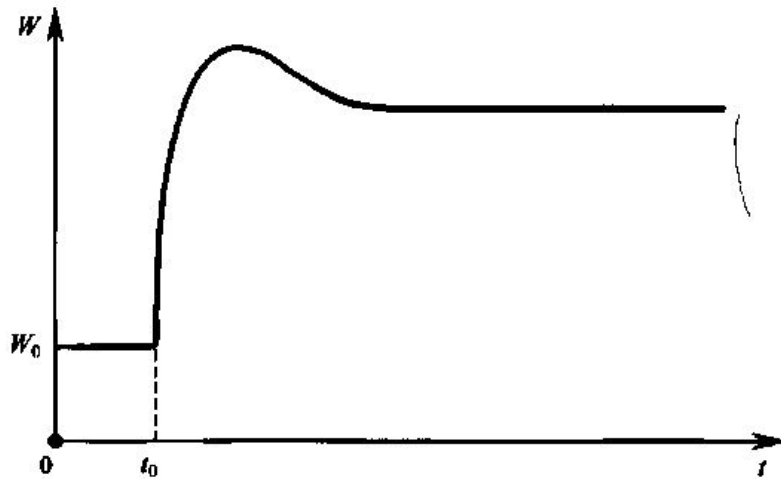
$$\bar{B} = \frac{Q_k}{m_{мон}} = \frac{Nt}{m_{мон}}$$

$$\bar{B} = \frac{Nn}{24m_U} \cdot \tau_{ЯР}$$

Поведение реактора при скачке реактивности



Изменение нейтронной мощности реактора N при положительной реактивности и отрицательной реактивности



Уравнение обратных часов

$$\rho = \frac{l}{T \cdot k_{\text{эфф}}} + \sum_i \cdot \frac{\beta_i}{1 + \lambda_i \cdot T} \approx \frac{l}{T} + \frac{\bar{l}}{\tau_{\text{зан}} + T}$$