

Рис. 8.2. Энергетическая зависимость сечения деления ядер  $^{235}\text{U}$

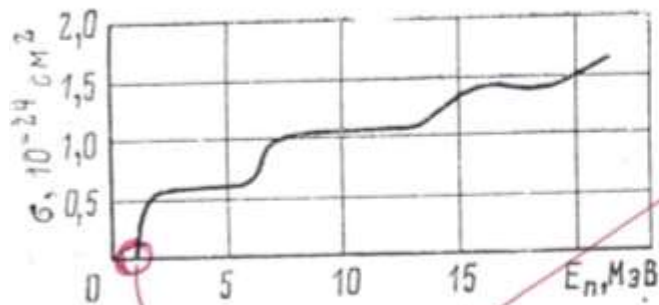


Рис. 8.3. Энергетическая зависимость сечения деления ядер  $^{238}\text{U}$



# 1. Незамедленные нейтроны ( $E_n \approx 2 \text{ МэВ}$ )

Ядро	$\bar{\nu}$	$\Sigma_f$ , барн	$\Sigma_c$ , барн
U-235	2,3	1,2	0,12
U-238	2,3	0,02	0,12

## 1.1. Естественное изотопное отношение

$$\Sigma_f = 0,007 \cdot 1,2 + 0,993 \cdot 0,02 \approx 0,03$$

$$\Sigma_c = 0,007 \cdot 0,12 + 0,993 \cdot 0,12 \approx 0,12$$

$$k_{\text{эфф}}^{(\infty)} = \frac{2,3}{1 + 0,12/0,03} \approx \underline{0,5}; \text{ ЧЯПД?} - \Theta$$

## 2. Замедленные нейтроны ( $E_n = 0,025 \text{ эВ}$ )

Ядро	$\bar{\nu}$	$\sigma_f$ , барн	$\sigma_c$ , барн
U-235	2,3	586	100
U-238	2,3	0	2,7

### 1. Естественное изотопное отношение

$$\Sigma_f = 0,007 \cdot 586 = 5,86$$

$$\Sigma_c = 0,007 \cdot 100 + 0,993 \cdot 2,7 \approx 3,7$$

$$k_{\text{эф}}^{(\infty)} = \frac{2,3}{1 + 3,7/5,86} \approx \underline{1,5!} \text{ ЦЯРД-}\oplus!$$



# 1. Незамедленные нейтроны ( $E_n \approx 2 \text{ МэВ}$ )

Ядро	$\bar{\nu}$	$\sigma_f$ , барн	$\sigma_c$ , барн
U-235	2,3	1,2	0,12
U-238	2,3	0,02	0,12

## 1.2. Чистый U-235

$$\Sigma_f = \sigma_f(\text{U-235}) = 1,2$$

$$\Sigma_c = \sigma_c(\text{U-235}) = 0,12$$

$$k_{\text{эфт}}^{(\infty)} = \frac{2,3}{1 + 0,12/1,2} \approx \underline{2,1!} \text{ ЦЯРЯ} - \oplus!$$



## Основное уравнение размножающих систем



$$n(t) = n_0 \exp \left( \frac{k_{\text{эфф}} - 1}{T_{\text{ж}}} t \right)$$

$n_0$  – начальное количество нейтронов в системе

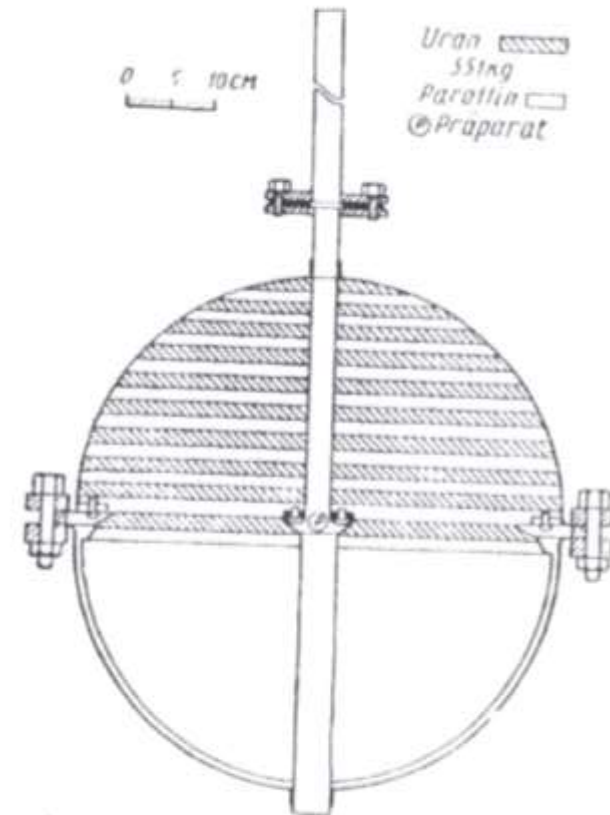
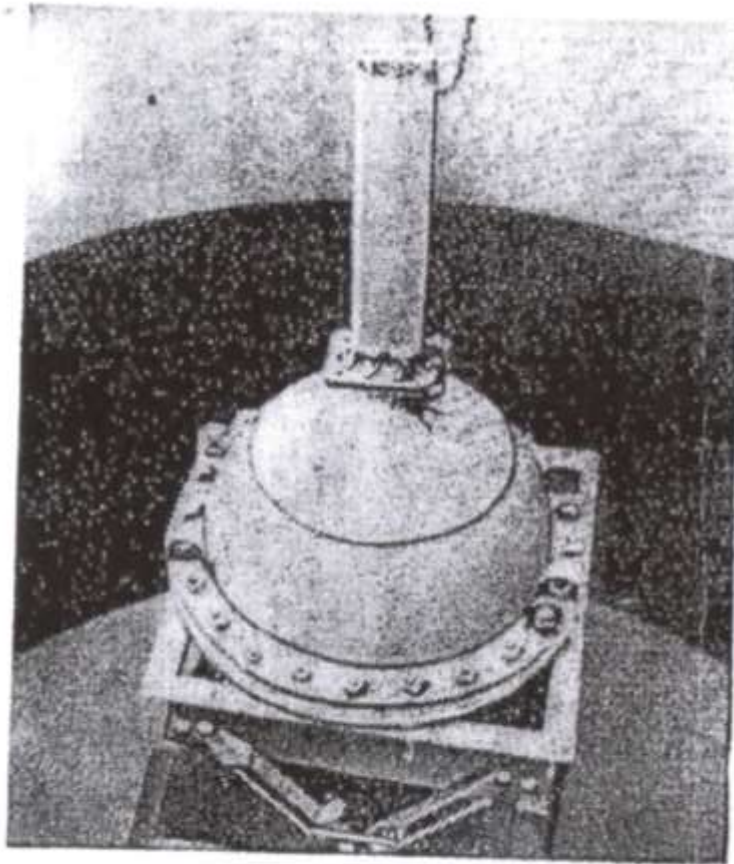
$k_{\text{эфф}}$  – эффективный коэффициент размножения нейтронов

$T_{\text{ж}}$  - время жизни нейтрона в поколении реакции

$k_{\text{эфф}} > 1$  – реакция развивается

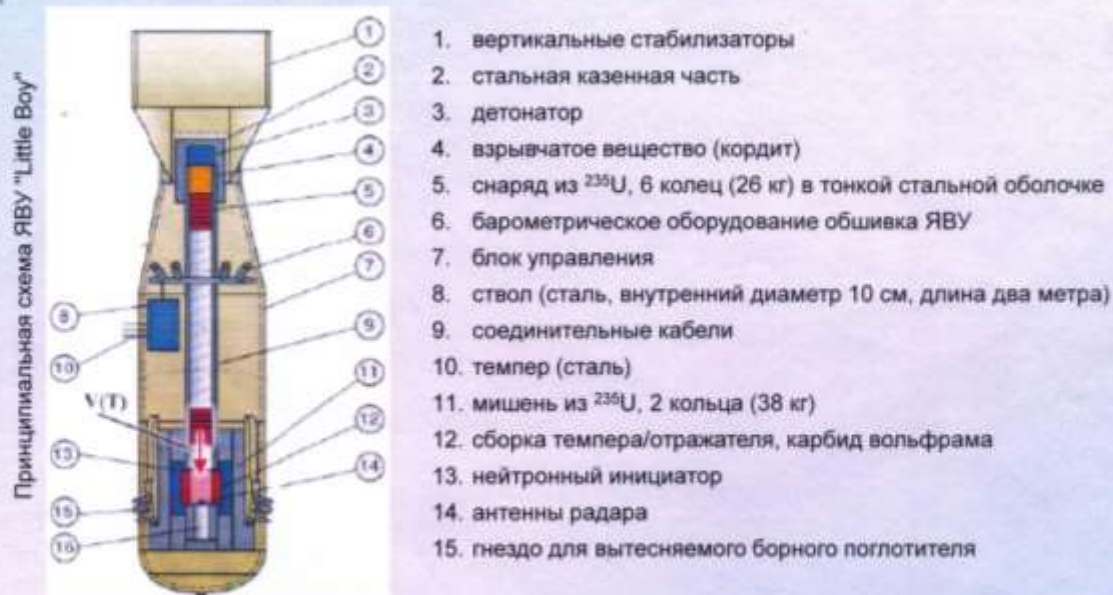
$k_{\text{эфф}} = 0$  – скорость реакции постоянна

$k_{\text{эфф}} < 1$  – реакция затухает



Германская «атомная бомба». Фотография немецкого экспериментального «уранового котла», из которого они намеревались сделать бомбу (слева). Схема экспериментальной «бомбы» из урана и парафина (справа).

Ядерная бомба "Little Boy", сброшенная на Хиросиму, была основана на быстром соединении подкритических масс в надкритическую (ЯВУ ствольного типа). Сближение подкритических масс осуществляется путем подрыва заряда химической взрывчатки.

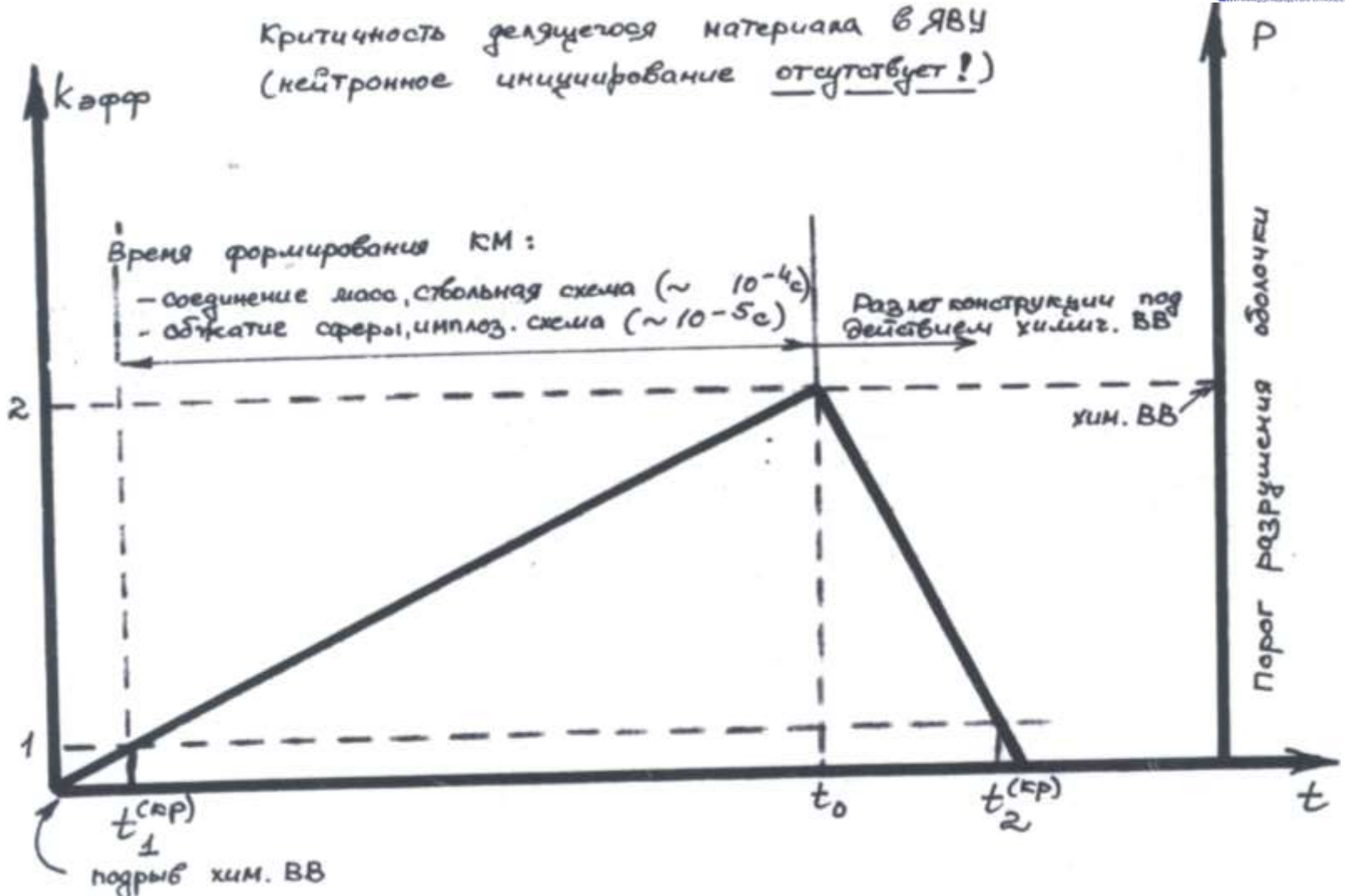


Урановый заряд состоит из двух частей: мишени и "снаряда". Снаряд имеет форму цилиндра диаметром 10 см и высотой 16 см. С помощью химической взрывчатки, в качестве которой может использоваться кордит (бездымный порох), снаряд разгоняется в направлении мишени. Мишень выполнена в виде полого цилиндра диаметром и высотой по 16 см и вмонтирована в темпер из карбида вольфрама, окруженного стальной рубашкой. Темпер играет роль как отражателя нейтронов, так и оболочки, удерживающей сверхкритическую массу урана в компактном состоянии для увеличения энерговыделения.





Критичность действующего материала в ЯВУ  
(нейтронное циклическое отсутствует!)





Основные временные условия работы ЯВУ.

$T_{\text{форм.кМ}}$  - время формирования критической массы.

$T_{\text{форм.кМ}} \sim 10^{-4}$  с (свободная конструкция)  
 $\sim 10^{-5}$  с (импозонная конструкция)

$t_{\text{разруш}}$  - время разрушения конструкции под действием ХВВ.

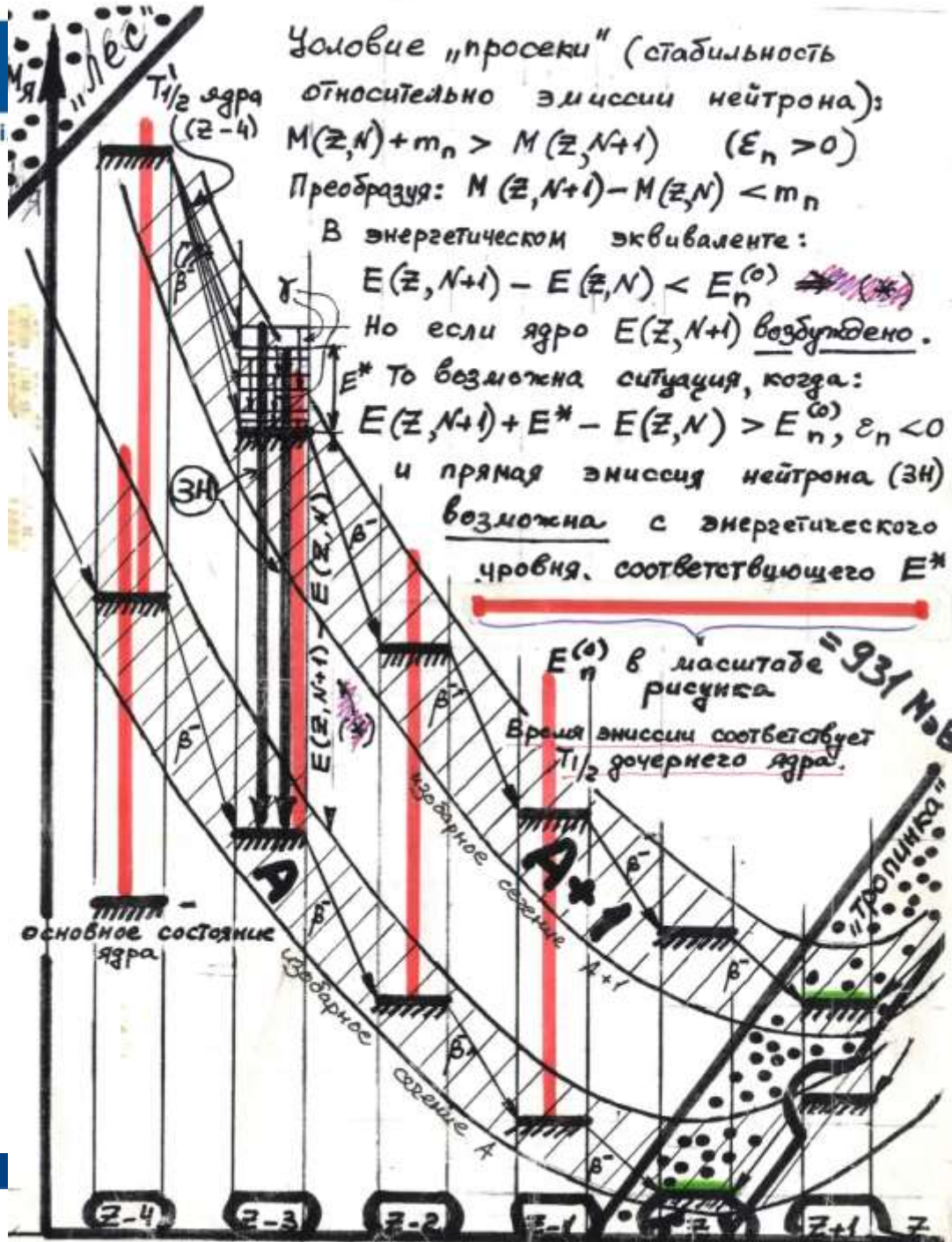
$t_{\text{разр}} \sim v/v_{36} \sim v/10^3 \text{ м/с} ; t_{\text{разр}} \geq T_{\text{форм.кМ}}$

Для свободной конструкции ;  $v \geq 0,1 \text{ м}$

Для импозонной конструкции ;  $v \geq 0,01 \text{ м}$

$t_{\text{энерговид}} \sim T_{\text{те}} \cdot \Lambda \sim 10^{-6} \text{ с} \cdot 50 \sim 5 \cdot 10^{-7} \text{ с}$

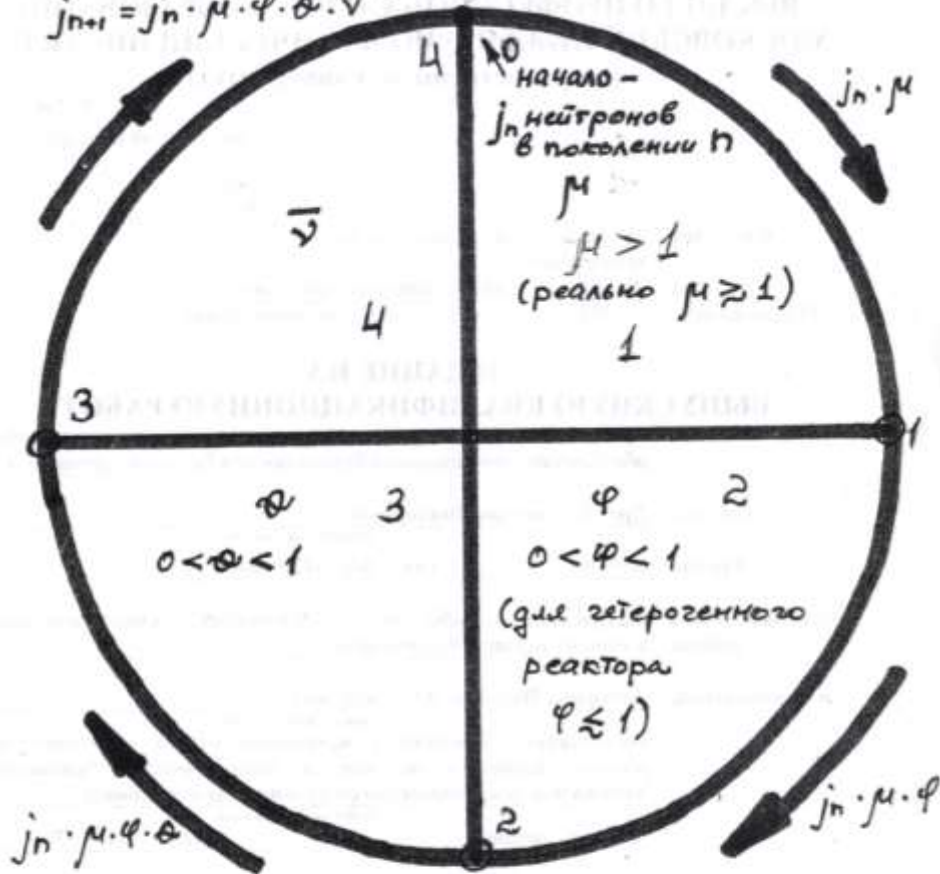
	$T_{\text{форм.кМ}}$	$t_{\text{разруш}}$	$t_{\text{энерговид}}$
$T_{\text{форм.кМ}}$		$T_{\text{форм.кМ}} \leq t_{\text{разруш}}$	$T_{\text{форм.кМ}} \gg t_{\text{энерговид}}$
$t_{\text{разруш}}$	$t_{\text{разруш}} \geq T_{\text{форм.кМ}}$		$t_{\text{разруш}} \gg t_{\text{энерговид}}$
$t_{\text{энерговид}}$	$t_{\text{энерговид}} \ll T_{\text{форм.кМ}}$	$t_{\text{энерговид}} \ll t_{\text{разруш}}$	





### Формула 4-х сомножителей

$$j_{n+1} = j_n \cdot \mu \cdot \varphi \cdot \theta \cdot \bar{\nu}$$



- $\mu$  - размножение на быстрых нейтронах
- $\varphi$  - вероятность избежать радиационного захвата на  $^{238}\text{U}$  в процессе замедления
- $\theta$  - вероятность <sup>избежать</sup> радиационного захвата после замедления (термализации)
- $\bar{\nu}$  - среднее число нейтронов на деление  $^{235}\text{U}$  тепловыми нейтронами.

В поколении  $n+1$ :  $j_{n+1} = j_n \cdot \mu \cdot \varphi \cdot \theta \cdot \bar{\nu}$





Формула четырех сомножителей:

$$j_{n+1} = j_n \cdot \mu \cdot \varphi \cdot \theta \quad j_{n+1}/j_n = k_{эфф}^{(\infty)}$$

$$\text{Тогда: } k_{эфф}^{(\infty)} = \mu \cdot \varphi \cdot \bar{\nu} \frac{\Sigma_f}{\Sigma_f + \Sigma_c'}$$

(индекс " " отражает наличие поглотителя в замедлителе)

Для гетерогенного реактора:

$$\mu \geq 1; \varphi \leq 1; \mu \cdot \varphi \approx 1 \text{ и}$$

$$k_{эфф}^{(\infty)} \approx \bar{\nu} \frac{\Sigma_f}{\Sigma_f + \Sigma_c'}$$

Система констант (сечения - барн)

	Уран		Замедлитель		
	$^{235}\text{U}$	$^{238}\text{U}$	$\text{D}_2\text{O}$	$\text{H}_2\text{O}$	Графит
$\sigma_f^{(th)}$	586	0	0	0	0
$\sigma_c^{(th)}$	100	2,7	$10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-3}$
$\rho_{ст}$	$\sim 0,01$	$\sim 1$	100	100	100

$$\Sigma_f \approx 0,01 \cdot 586 = 5,86$$

$$\Sigma_c' \approx 0,01 \cdot 100 + 1 \cdot 2,7 + 100 \cdot [\sigma_c^{(th)}]_{замедл}$$

(предполагается, что  $(N_s)_{замедл} / (N_s)_U \approx 100$ )

$$\bar{\nu} = 2,4 \text{ (для деления } ^{235}\text{U} \text{ теплыми нейтронами)}$$



## Результаты расчётов



$$k_{\text{эфф}}^{(\infty)} = \frac{9,84}{7,5 + 100 \cdot [\sigma_c^{(th)}]_{\text{замедл}}} \equiv \frac{9,84}{7,5 + X}$$

Тяжелая вода:  $X = 0,1$ ;  $k_{\text{эфф}}^{(\infty)} \approx \underline{1,3}$   
Реактор работоспособен!

Обыкновенная (лёгкая) вода:  
 $X = 9$ ;  $k_{\text{эфф}}^{(\infty)} \approx \underline{0,6}$

Реактор неработоспособен!

Графит:  $X = 0,8$ ;  $k_{\text{эфф}}^{(\infty)} \approx 1,2$

Реактор работоспособен!

Для лёгкой воды, полагая  $k_{\text{эфф}}^{(\infty)} = 1$  и

решая уравнение относительно  $P_{235U}$ ,  
получим граничное значение  
обогащения по  $^{235}U$ :

$$1 = \frac{X \cdot 2,4 \cdot 586}{686 \cdot X + 2,7(1-X) + 100 \cdot 9 \cdot 10^{-2}},$$

откуда  $X = 0,016$  (обогащение  $\sim 1,6\%$ )



## Мировой ядерно-энергетический парк

№ п/п	Тип реактора	Кол-во реакторов	Доля, %	Мощность, % от общей установленной
1	PWR (водо-водяной под давлением)	219	50	57
2	ВВЭР (русский тип PWR)	49	11	9
3	BWR (водо-водяной кипящий)	92	21	22
4	HWR (тяжеловодный – CANDU)	37	8	5
5	GGR (газографитовый – Magnox)	15	3	0,8
6	AGR (усовершенствованный газографитовый)	14	3	2
7	LWGR (канальный водографитовый – RBMK, ЭГП-6)	14	3	3
8	FBR (на быстрых нейтронах – БН-600)	1	0,2	0,2
	<b>Всего</b>	<b>441</b>		



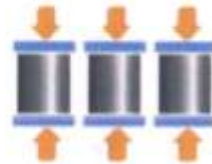
www.mephi.ru



Сжатие - конверсия газа  $UF_6$  в порошок  $UO_2$



Приготовление смеси



Прессование таблеток



Спекание таблеток



Производство циркониевых труб



Снаряжение и сварка



Сборка ТВС

НАЦИ

ИФИ»





[www.mephi.ru](http://www.mephi.ru)



# Топливные таблетки для реактора ВВЭР-1000



Таблетки из диоксида урана

# Схематическое устройство твэла

