



ТЕПЛО ВЫДЕЛЕНИЕ В ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ



Деление U 235

Масса любого ядра меньше суммы масс нуклонов его составляющих

Внутренняя энергия ядра $E = \Delta m \cdot c^2$

Энергия, содержащаяся в ядре:

- энергия, обусловленная ядерными силами, которая делает возможным существование ядра
- поправка на силы типа поверхностного натяжения
- энергия, обусловленная электрическим (кулоновским) отталкиванием

Энергия E для каждого изотопа вычисляется, если известно

$$\Delta m = \sum m_i - m_o$$

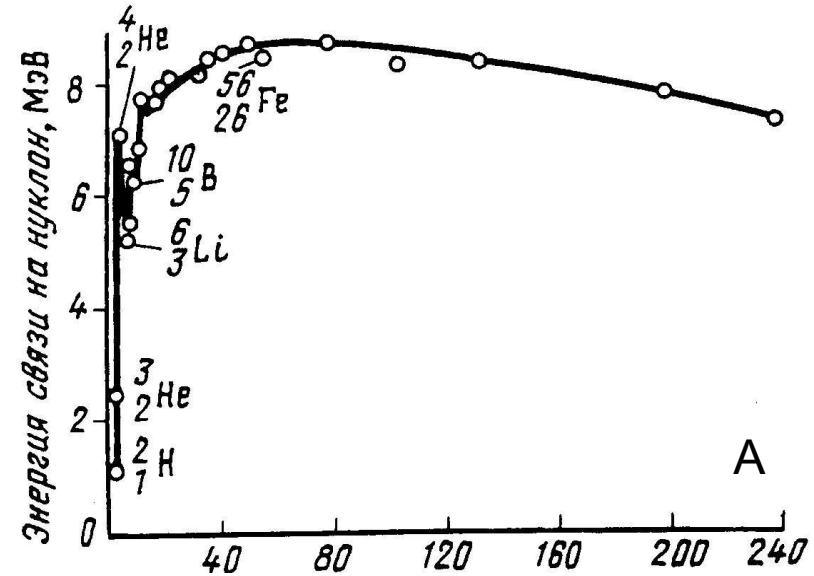
где m_o - масса изотопа; $\sum m_i$ - сумма масс нуклонов, составляющих изотоп

Деление U 235

Два пути для извлечения ядерной энергии:

- соединение легких ядер (синтез);
- расщепление тяжелых ядер на оскол

В обоих случаях ядерная энергия – энергия связи протонов и нейтронов.



Энергия связи, приходящаяся на один нуклон

При сжигании 1кг угля выделяется $3,5 \cdot 10^6$ Дж

При делении 1кг U^{235} - $8,2 \cdot 10^{13}$ Дж

Деление U 235

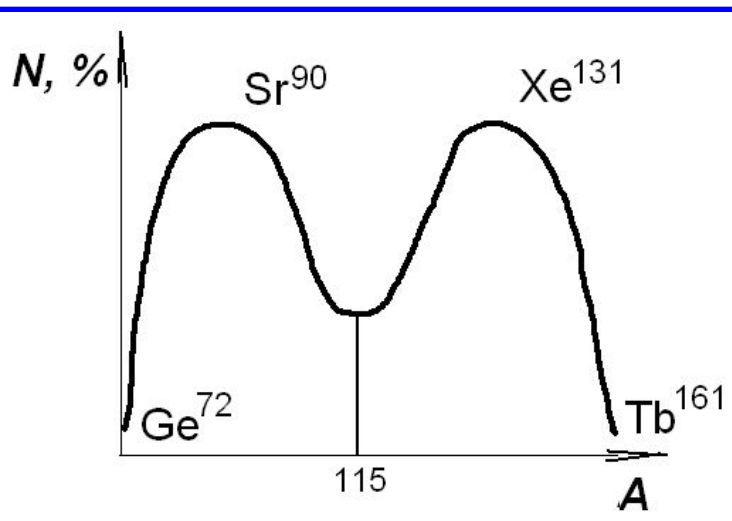
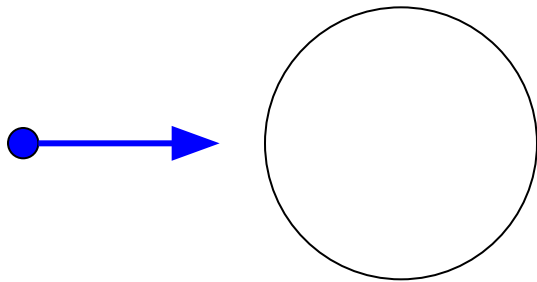
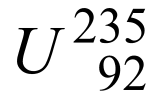
МэВ

- Е кин. осколков деления = 165-167
- Е кин. нейтронов деления = 5
- Энергия мгновенного γ -излучения = 6-7

*выделяется
мгновенно
 10^{-12} с*

- Энергия β -частиц при распаде продуктов деления = 6-8
- Энергия γ -распада продуктов деления = 7-10

*выделяется
постепенно*



Энергия нейтрино = 10-12

*теряется, поскольку
не взаимодействует
с материалами
реактора*

Полная энергия ~200-205 МэВ/дел

Деление U 235

Полная энергия, выделяемая при делении 1 г U²³⁵

$$E = \frac{1}{235} \cdot \underbrace{6,02 \cdot 10^{23}}_{\substack{\text{Число} \\ \text{Авогадро}}} \cdot 200 \cdot \underbrace{1,6 \cdot 10^{-13}}_{\substack{\text{Число МэВ} \\ \text{в 1 Дж}}} = 8,2 \cdot 10^{10} \text{ Дж}$$

- Для обеспечения тепловой мощности 1 МВт в сутки расходуется около 1г топлива (1 Вт соответствует $3 \cdot 10^9$ делений в секунду);
- В реакторах на тепловых нейтронах при мощности 1 МВт в сутки "сгорает" примерно 1,2 г U²³⁵ или 1,5 г Pu²³⁹.

Тепловая мощность реактора, Вт

$$N_T = \frac{\Phi \Sigma_f V_{AZ}}{C}$$

$$N_T = \frac{\Phi \sigma_f N_A M_U}{A C}$$

M_U - масса топлива, г;

Φ - средняя плотность потока нейтронов, $1/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$;

Σ_f - среднее макроскопическое сечение деления, см^{-1} , $\Sigma_f = \sigma_f \frac{N_A}{A} \rho$

ρ - плотность, $\text{г}/\text{см}^3$; σ_f - среднее микроскопическое сечение деления, см^{-2}
(для ^{235}U в тепловой области - $582 \cdot 10^{-24}$; для ^{239}Pu - $742 \cdot 10^{-24} \text{ см}^{-2}$).

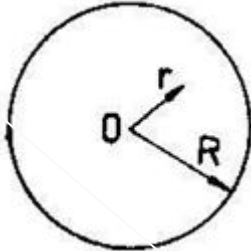
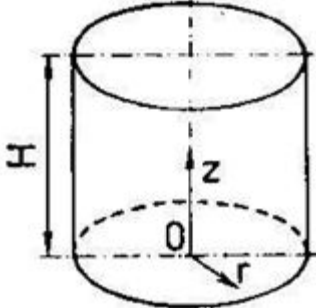
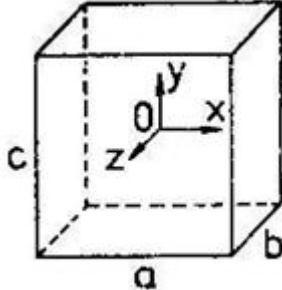
A - число нуклонов в ядре; $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ - число Авогадро;

V_{AZ} - объем активной зоны, см^3 ;

$C = 3,1 \cdot 10^{10}$ - число делений в секунду при мощности 1 Вт


Распределение энерговыведения в реакторе

Активные зоны
разной формы

Ша ρ		r	$\frac{\sin(\pi r/R)}{(\pi r/R)}$
Цилинд ρ		r z	$J_0\left(2,405\frac{r}{R}\right)$ $\sin\left(\frac{\pi z}{H}\right)$
Параллелепипе D		x y z	$\cos\left(\frac{\pi x}{a}\right)$ $\cos\left(\frac{\pi y}{b}\right)$ $\cos\left(\frac{\pi z}{c}\right)$

Распределение энерговыделения в реакторе

цилиндр

$$\Phi(r, z) = \Phi_{max} \cdot J_0 \left(\frac{2,405 \cdot r}{R} \right) \cdot \cos \frac{\pi z}{H}$$


Коэффициенты неравномерности энерговыделения

по радиусу

$$K_r = \frac{q_{max}}{q_r}$$

1,8-2,1

по высоте


$$K_z = \frac{q_{max}}{q_z}$$

1,35-1,5

по объему

$$K_v = K_r \cdot K_z = \frac{q_{max}}{q_v}$$

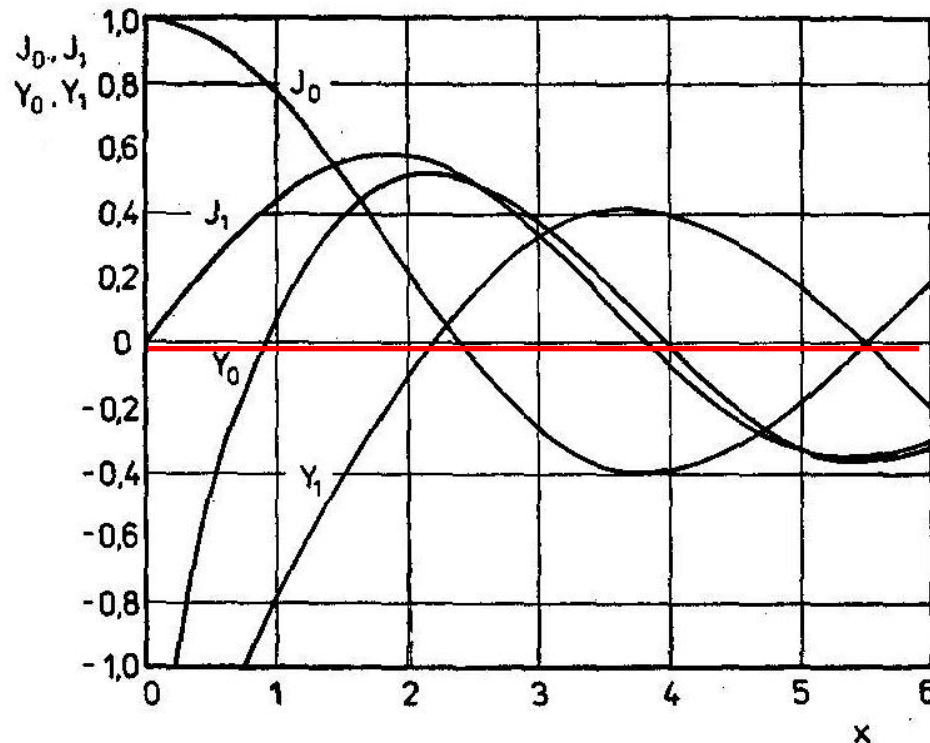
2,5-3,0



Функции Бесселя

$$J_n(x) = \left(\frac{x}{2}\right)^n \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k! \Gamma(n+k+1)} \left(\frac{x}{2}\right)^{2k}$$

$$Y_n(x) = \frac{J_n(x) \cos(n\pi) - J_{-n}(x)}{\sin(n\pi)}$$



Выравнивание энерговыделения

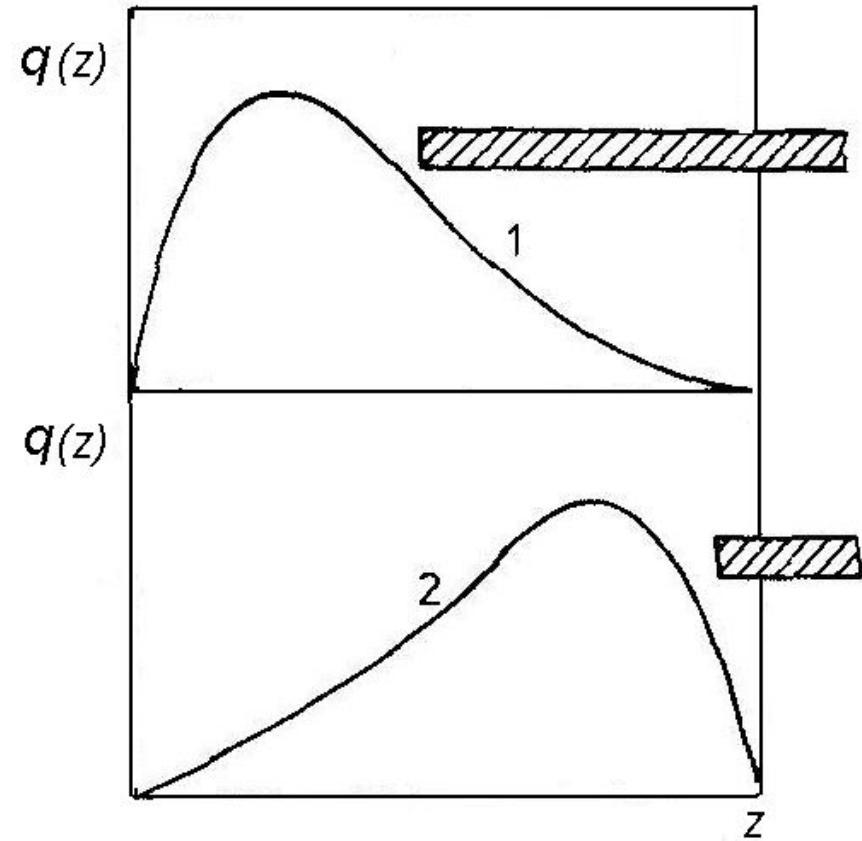
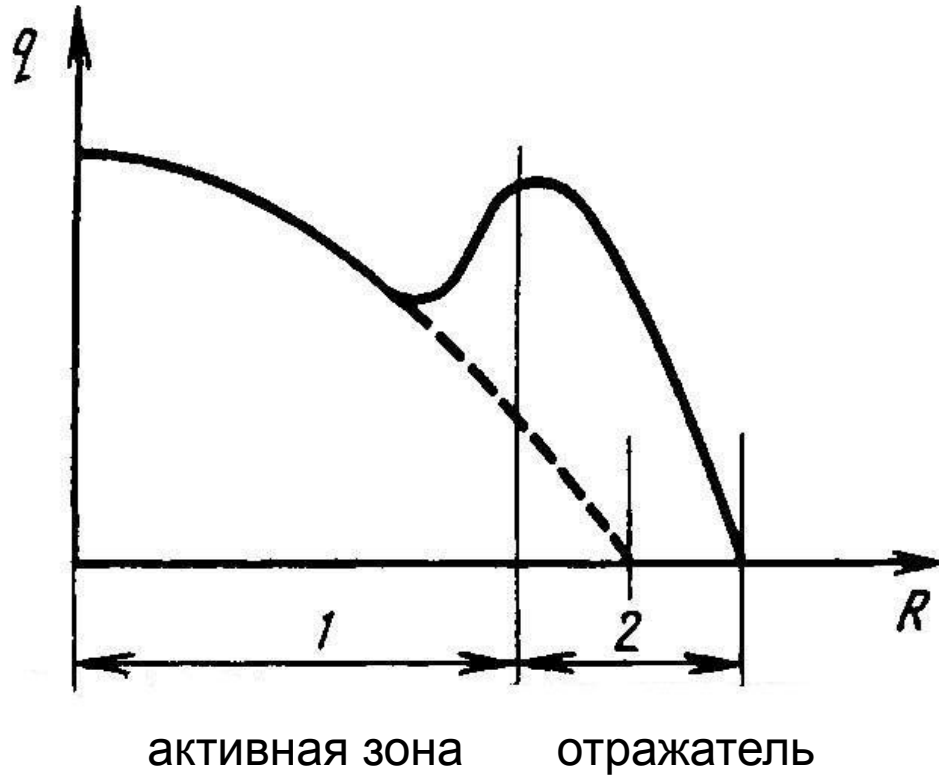
Избежать напряженных условий работы твэлов можно при более равномерном распределении энерговыделения.

Два способа выравнивания энерговыделения:

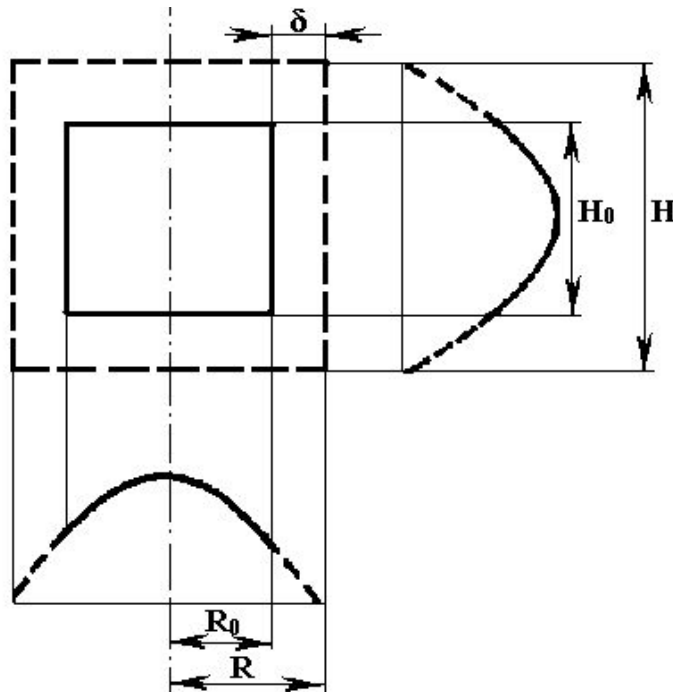
(1) Зонное выравнивание - создание нескольких зон с разным обогащением ^{235}U или перестановка ТВС (свежее топливо загружается на периферию, а частично выгоревшее - в центр).

(2) Выгорающие поглотители (ВП) позволяют выровнять распределение энерговыделения. ВП помещаются в области, где плотность потока нейтронов велика.

Выравнивание энерговыделения



Распределение энерговыделения в реакторе

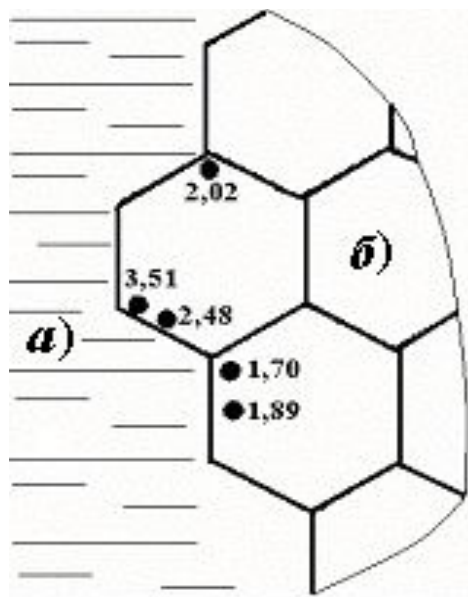


Распределение плотности потока нейтронов (плотности энерговыделения) в активной зоне цилиндрической формы (без отражателя):

δ - экстраполированная добавка

Распределение энерговыделения в реакторе

«Микронеровности» поля энерговыделения



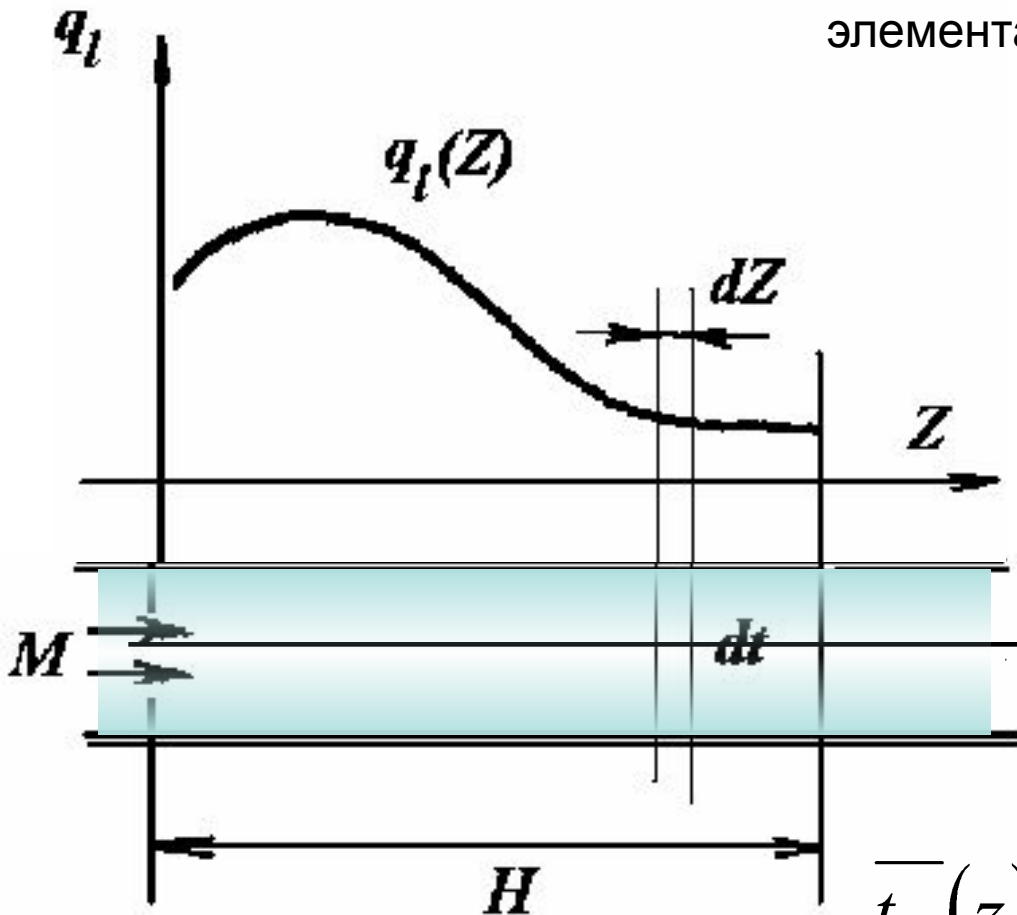
В ТВС, расположенной на границе с отражателем, наблюдается всплеск энерговыделения

Значения коэффициента "микронеровности" энерговыделения в ТВС на границе с отражателем (H₂O):
а – отражатель; б – активная зона

Большие концентрации бора в теплоносителе в начальный период кампании снижают всплеск энерговыделения в ТВС у отражателя. Чтобы снизить неравномерность в конструкции ВВЭР введен пояс из нержавеющей стали, обеспечивающий поглощение тепловых нейтронов и снижающий тепловыделение ряда твэлов.

Распределение температуры в канале с тепловыделением

уравнение баланса тепла для элемента канала длиной dz



$$q_l(z) \cdot dz = M \cdot c_p \cdot dt$$

или

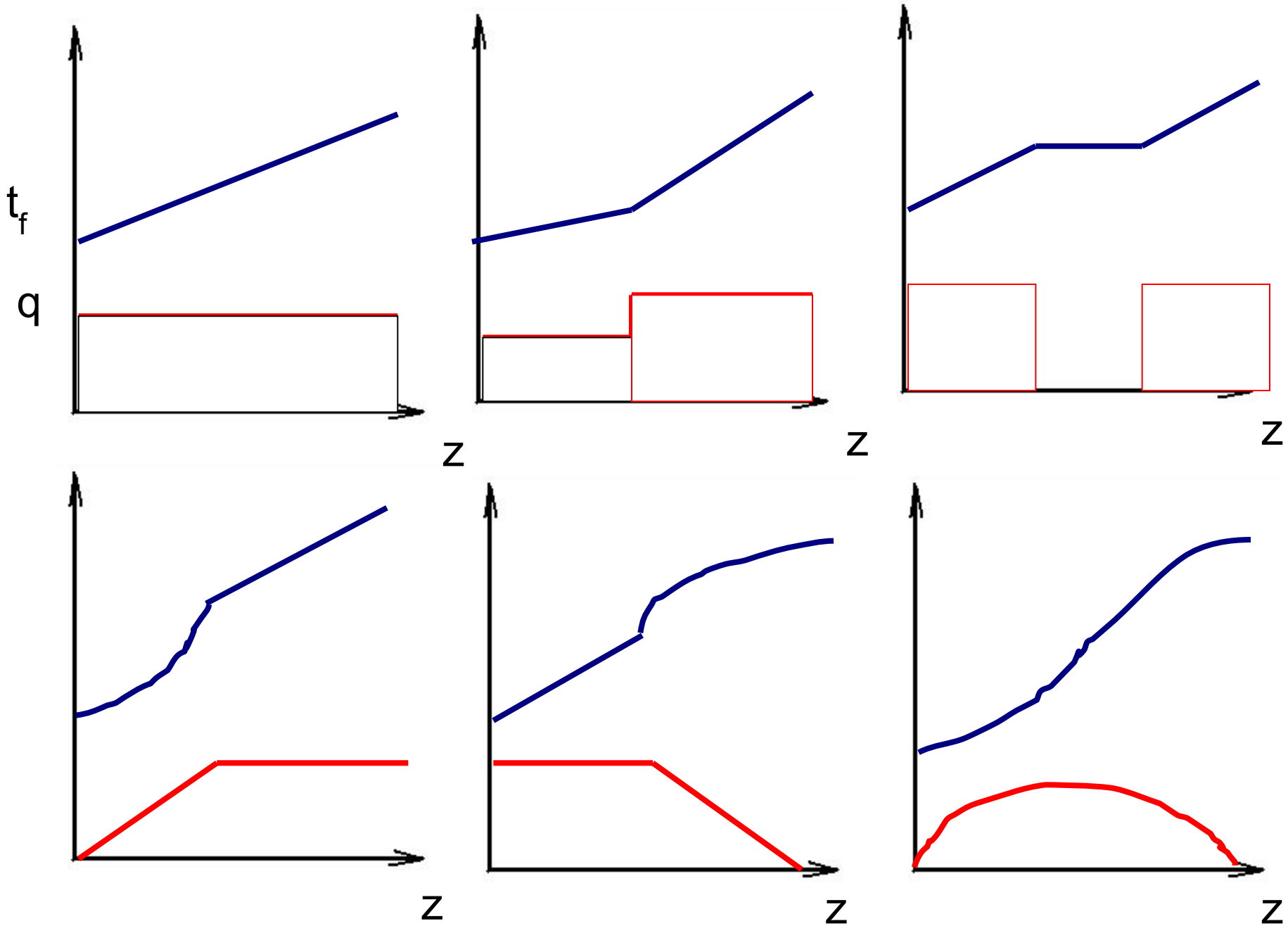
$$q(z) \cdot P \cdot dz = M \cdot c_p \cdot dt$$

$$q_l = q \cdot P$$

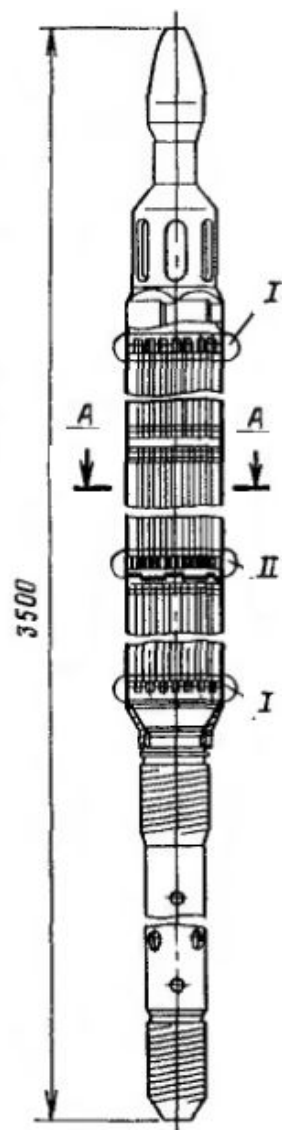
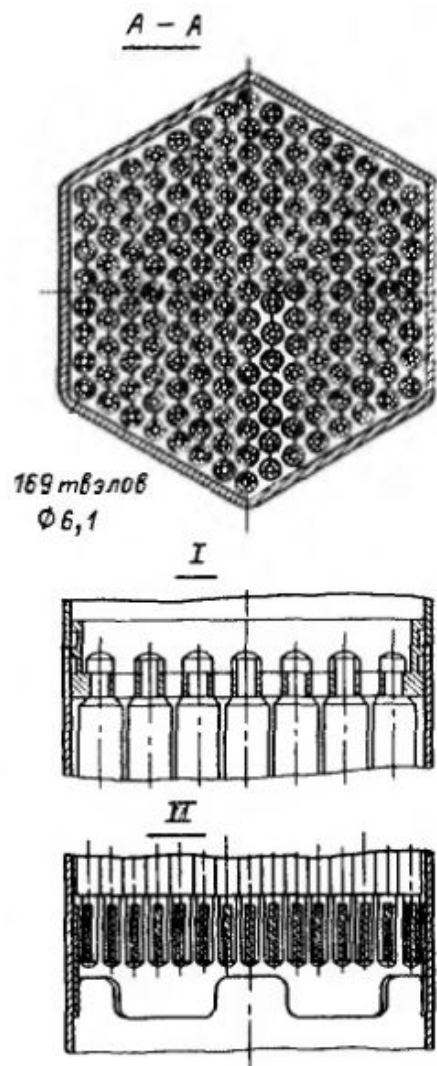
$$dt = \frac{q_l(z)}{M \cdot c_p} dz$$

подогрев теплоносителя на участке от входа до сечения z

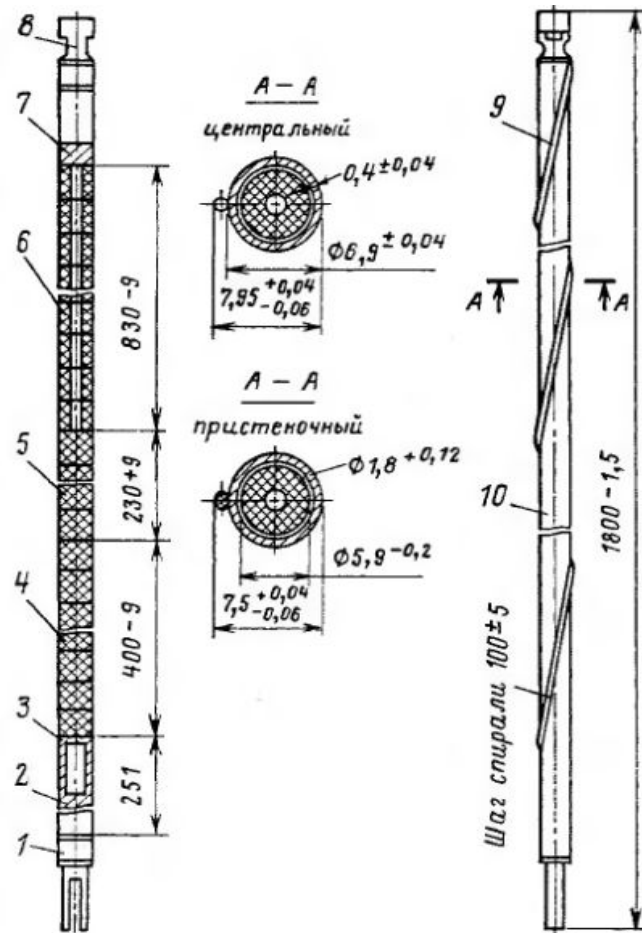
$$\bar{t}_f(z) = t_{ex} + \frac{1}{(M \cdot c_p)} \int_0^z q_l(z) dz$$



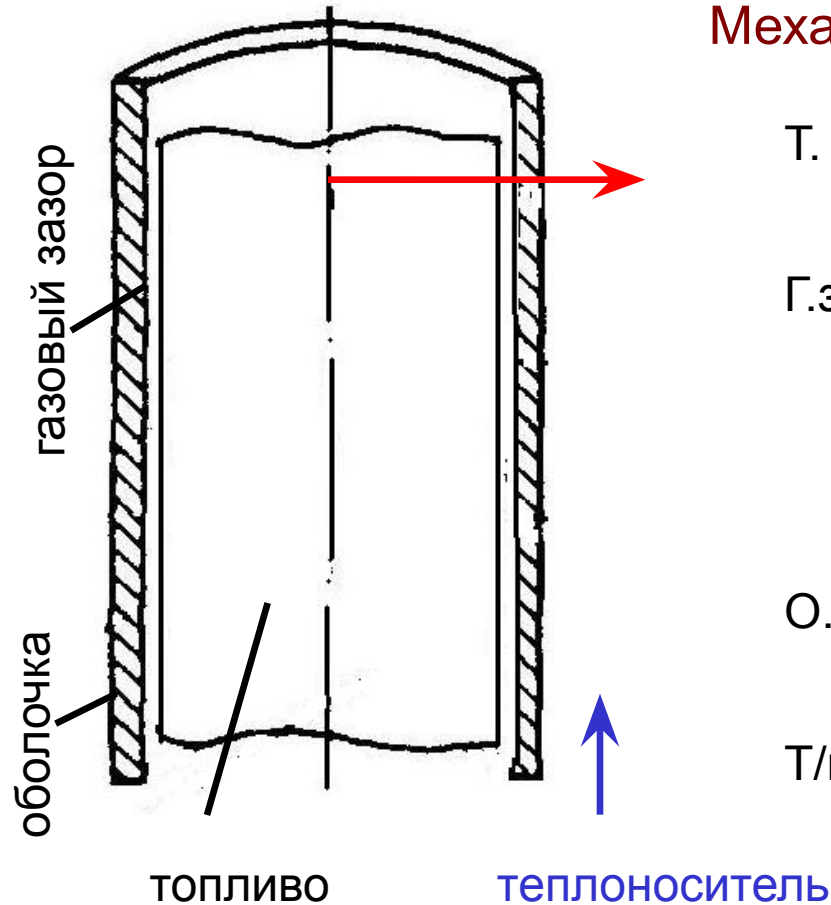
ТВС БН-600



ТВэл БН-350



Тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ)



Механизмы теплообмена в ТВЭЛе:

Т. Теплопроводность с внутренними источниками тепла

Г.з. Сложный ТО:

Теплопроводность

Излучение

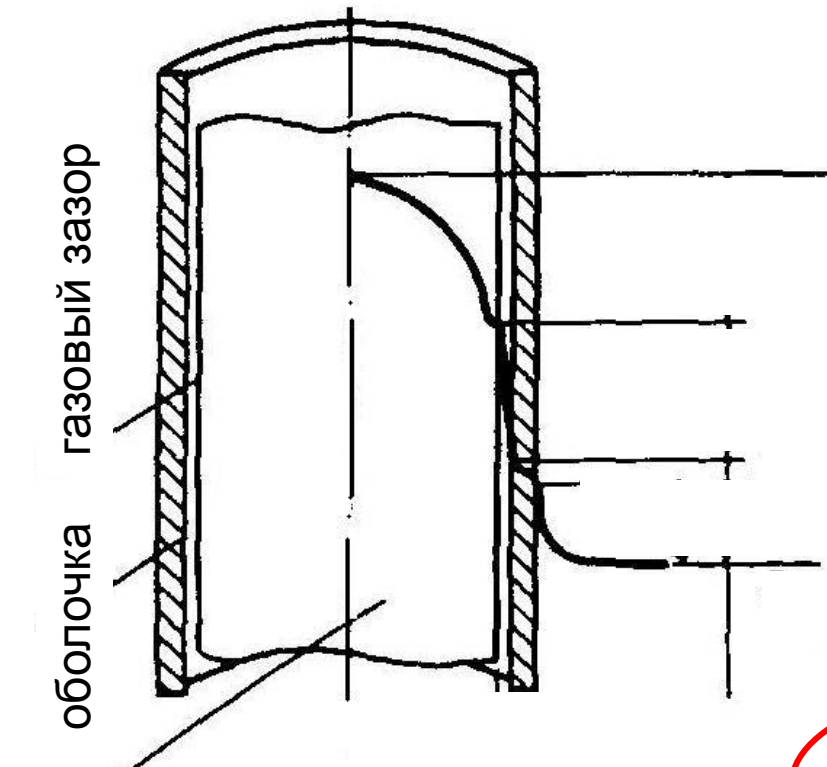
Контактный ТО

.....

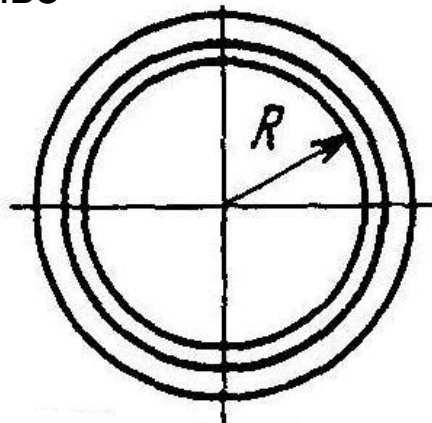
О. Теплопроводность без внутренних источников тепла

Т/нос. Конвективный ТО

Распределение температуры в твэле



ТОПЛИВО



$$\Delta t_T = \frac{q_v(z) R^2}{4\lambda_T}$$

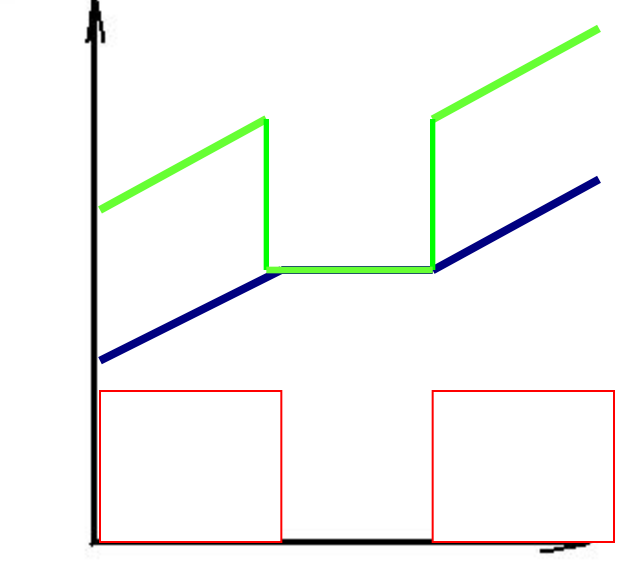
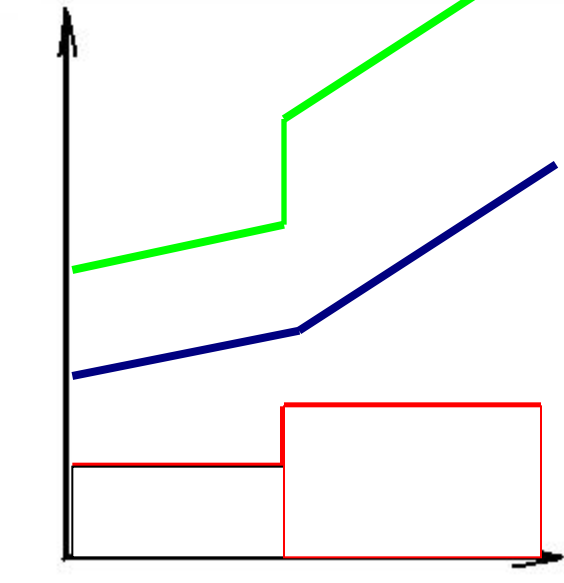
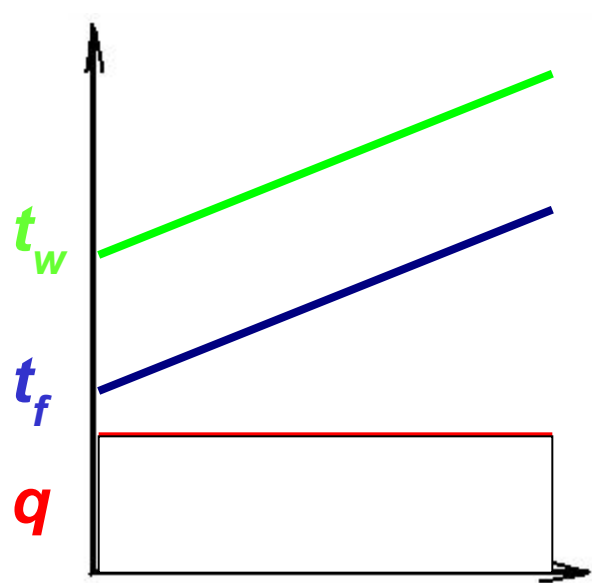
$$\Delta t_3(z) \cong \frac{q(z)}{\kappa} = \frac{q_l(z)}{P\kappa} = \frac{q(z)\delta_3}{\lambda_3}$$

k – коэффициент теплопередачи

$$\Delta t_o(z) \cong \frac{q(z) \cdot \delta_o}{\lambda_o} = \frac{q_l(z) \cdot \delta_o}{P\lambda_o}$$

$$\Delta t_\alpha(z) = \frac{q(z)}{\alpha} = \frac{q_l(z)}{\alpha P} \quad P - \text{периметр}$$

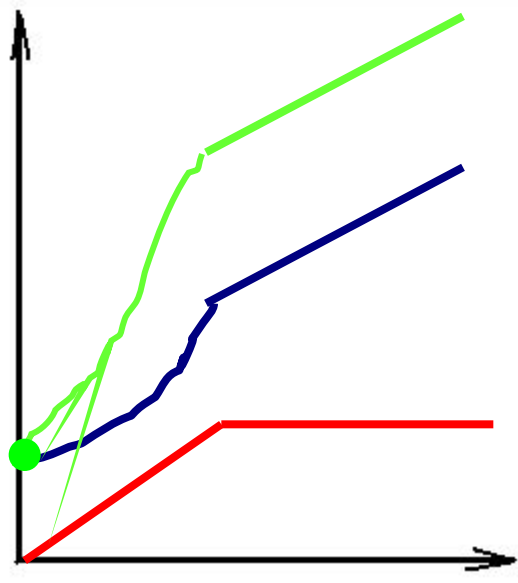
$$t_{\max}(z) = \overline{t_{жс}} + \Delta t_\alpha + \Delta t_o + \Delta t_3 + \Delta t_T$$



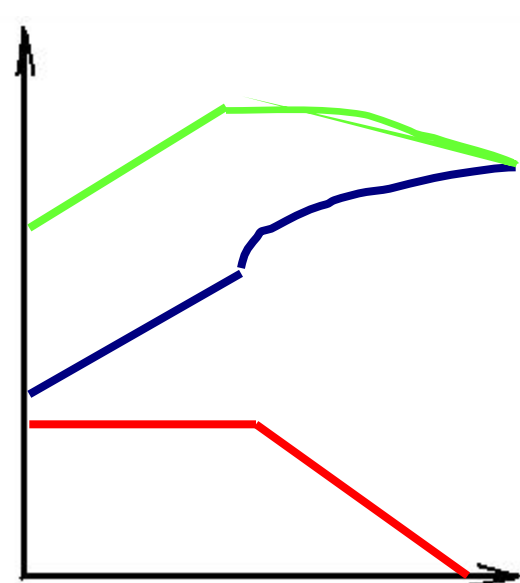
z

z

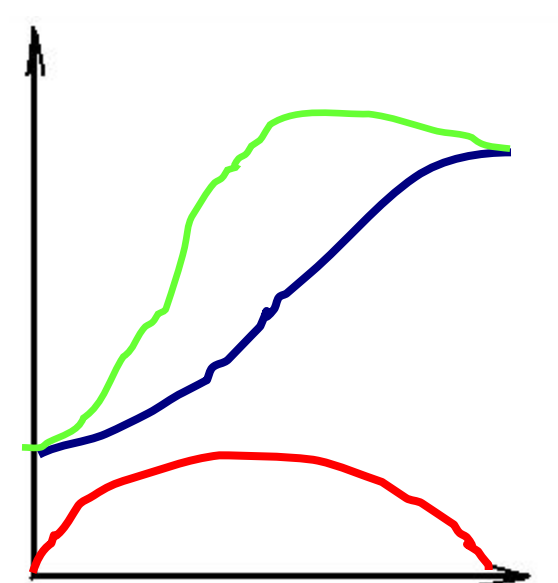
z



z

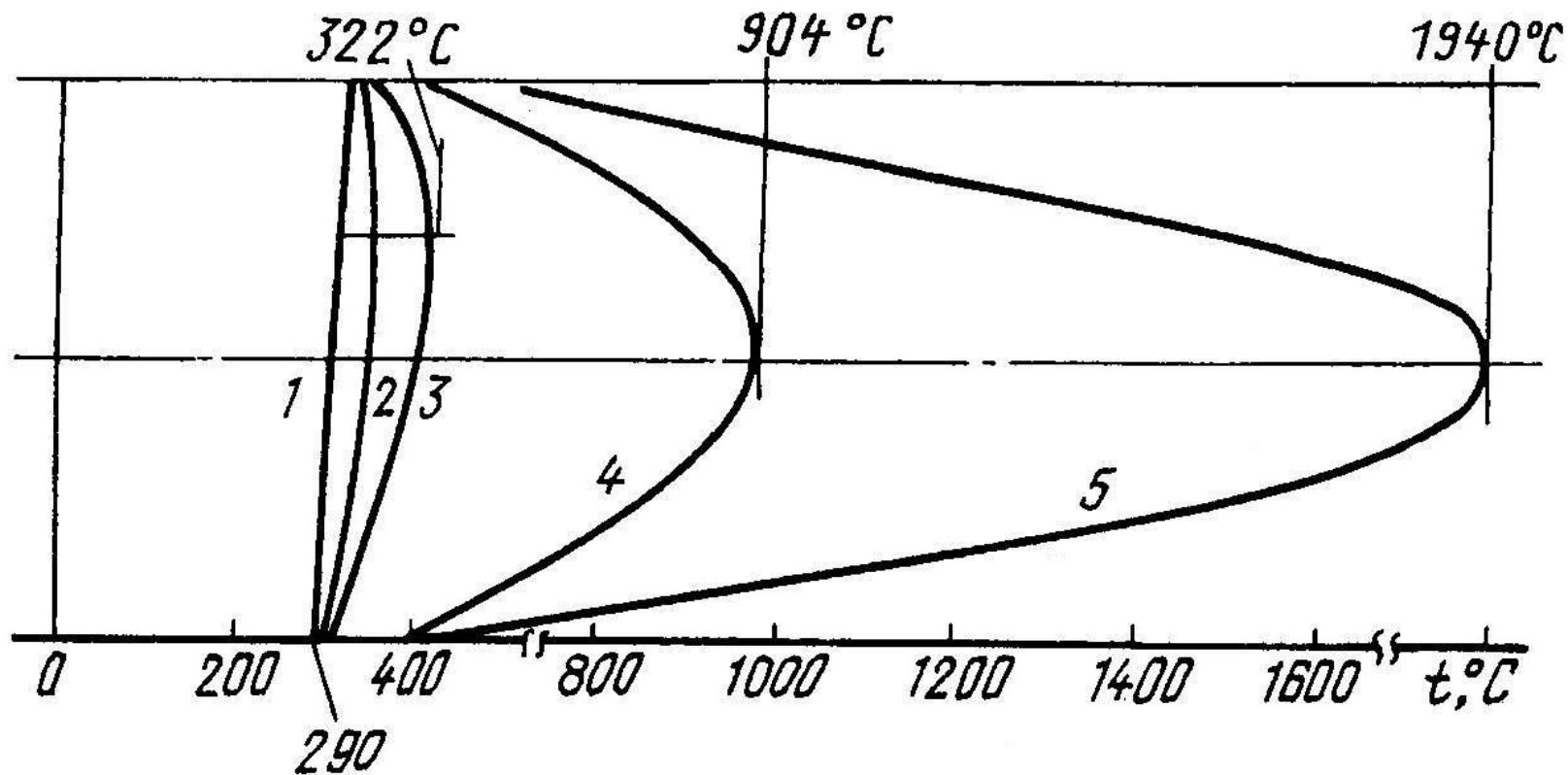


z



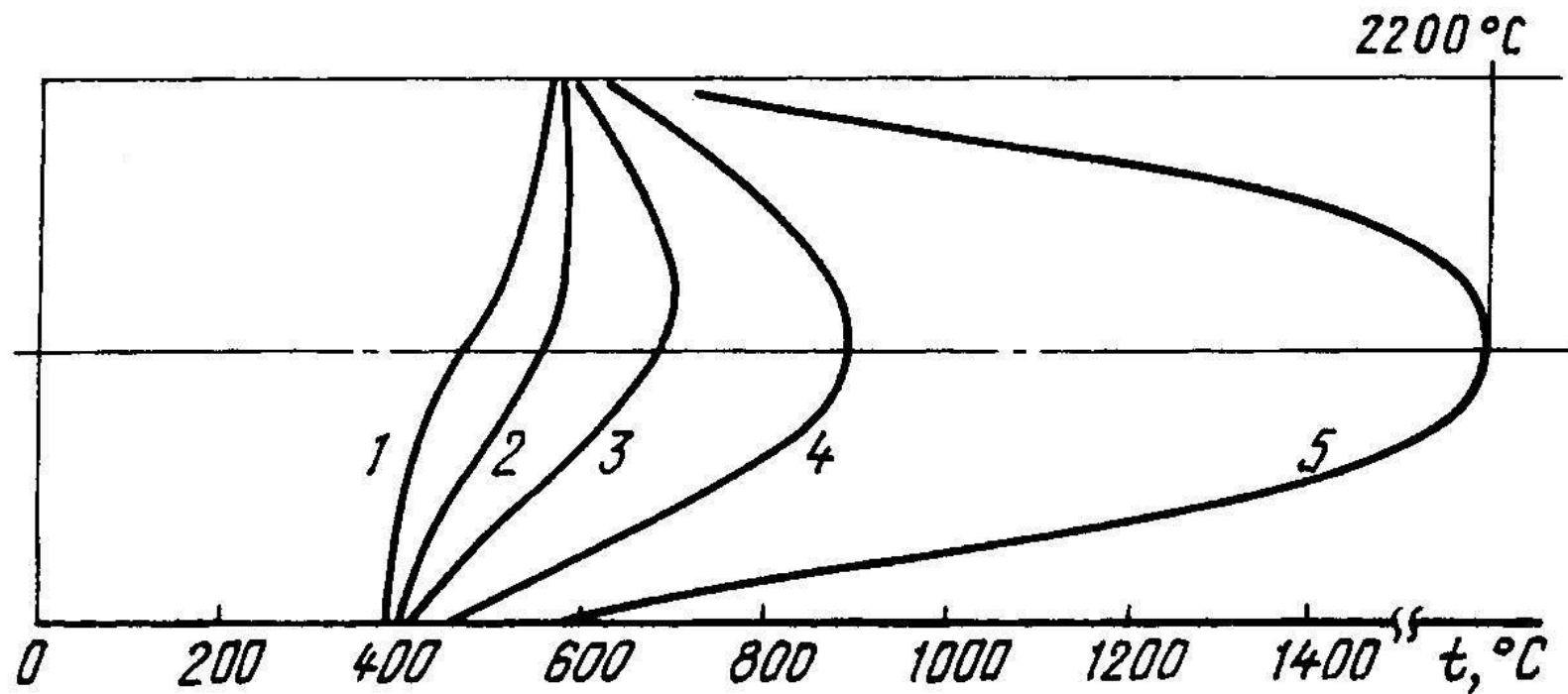
z

Распределение температуры в канале ВВЭР



- 1 – теплоноситель;
- 2 – наружная поверхность оболочки;
- 3 – внутренняя поверхность оболочки;
- 4 – наружная поверхность топливной таблетки;
- 5 – центр таблетки топлива

Распределение температуры в канале БН



- 1 – теплоноситель;
- 2 – наружная поверхность оболочки;
- 3 – внутренняя поверхность оболочки;
- 4 - наружная поверхность топливной таблетки;
- 5 – центр таблетки топлива

Остаточное тепловыделение

Отработанное топливо, выгруженное из реактора, содержит радиоактивные продукты деления и актиноиды, накопившиеся в топливе за время нахождения его в реакторе.

Интенсивность тепловыделения смеси актиноидов и продуктов деления прямо пропорциональна мощности реактора и спадает во времени

$$\frac{N(\tau)}{N_0} \cong 0,1 \tau^{-0,2} - 0,087 \left(\tau + 2 \cdot 10^7 \right)^{-0,2}$$

N_0 - мощность реактора перед остановкой, Вт; T - время после остановки, с.

Время после остановки	$N/N_0, \%$	ВВЭР-1000	РБМК-1000	БН-600
		$N_0=19600$	$N_0=2120$	$N_0=3980$
1 час	1,64	320	34,8	65,3
1 сутки	0,73	143	15,5	29,1
1 месяц	0,23	45,1	4,9	9,2