



# ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЕ 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

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

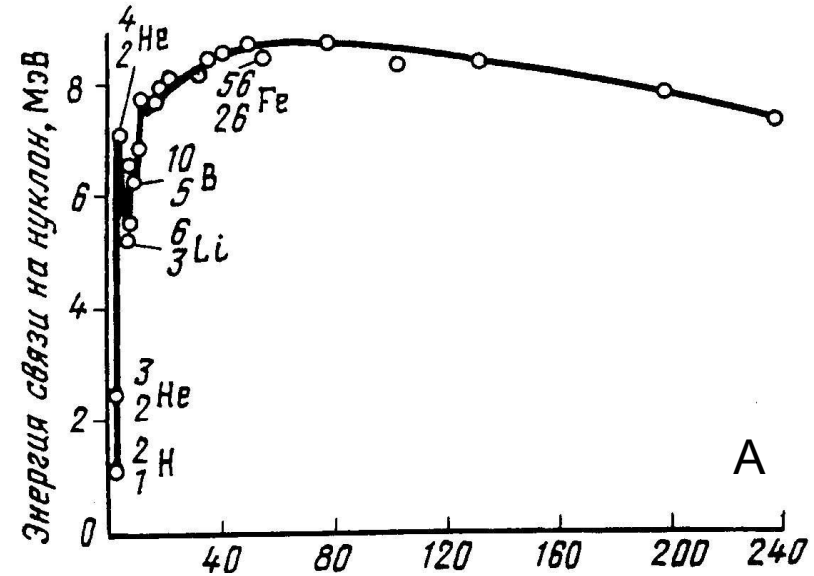
где  $m_o$  - масса изотопа;  $\sum m_i$  - сумма масс нуклонов, составляющих изотоп

# 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  $\text{U}^{235}$  -  $8,2 \cdot 10^{13}$  Дж*

# Деление U 235

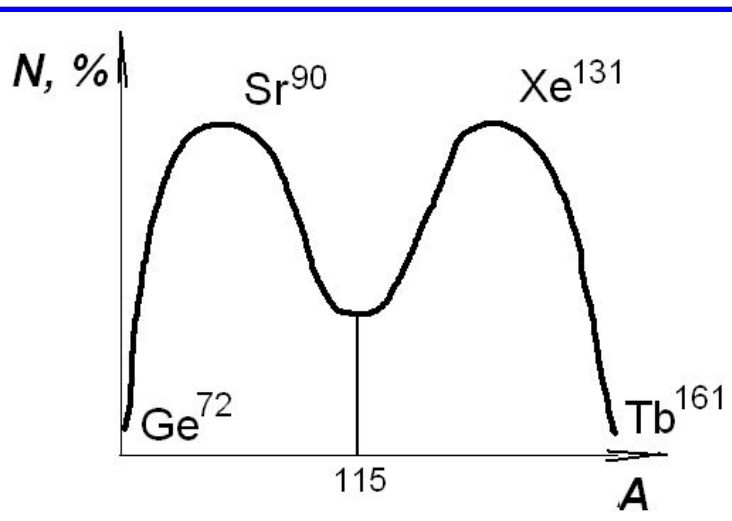
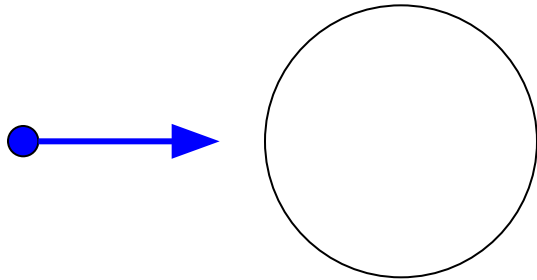
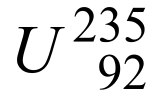
МэВ

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

*выделяется  
мгновенно  
 $10^{-12}$  с*

- Энергия  $\beta$ -частиц при распаде продуктов деления = 6-8
- Энергия  $\gamma$ -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 U<sup>235</sup>

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

---

- 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 U<sup>235</sup> или 1,5 г Pu<sup>239</sup>.

## 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;

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

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

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

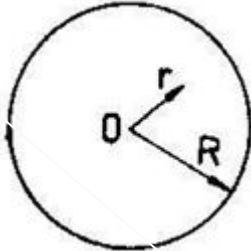
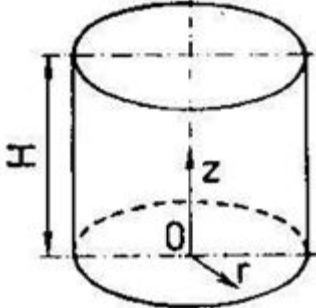
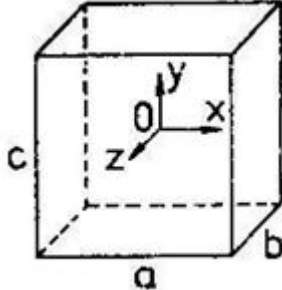
$A$  - число нуклонов в ядре;  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  - число Авогадро;

$V_{AZ}$  - объем активной зоны,  $\text{см}^3$ ;

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


# Распределение энерговыведения в реакторе

Активные зоны  
разной формы

|                       |   |                   |  |
|-----------------------|---|-------------------|--|
| Шар<br>$\rho$         |    | $r$               | $\frac{\sin(\pi r/R)}{(\pi r/R)}$  |
| Цилиндр<br>$\rho$     |   | $r$<br>$z$        | $J_0\left(2,405\frac{r}{R}\right)$<br>$\sin\left(\frac{\pi z}{H}\right)$                                       |
| Параллелепипед<br>$D$ |  | $x$<br>$y$<br>$z$ | $\cos\left(\frac{\pi x}{a}\right)$<br>$\cos\left(\frac{\pi y}{b}\right)$<br>$\cos\left(\frac{\pi z}{c}\right)$ |

# 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

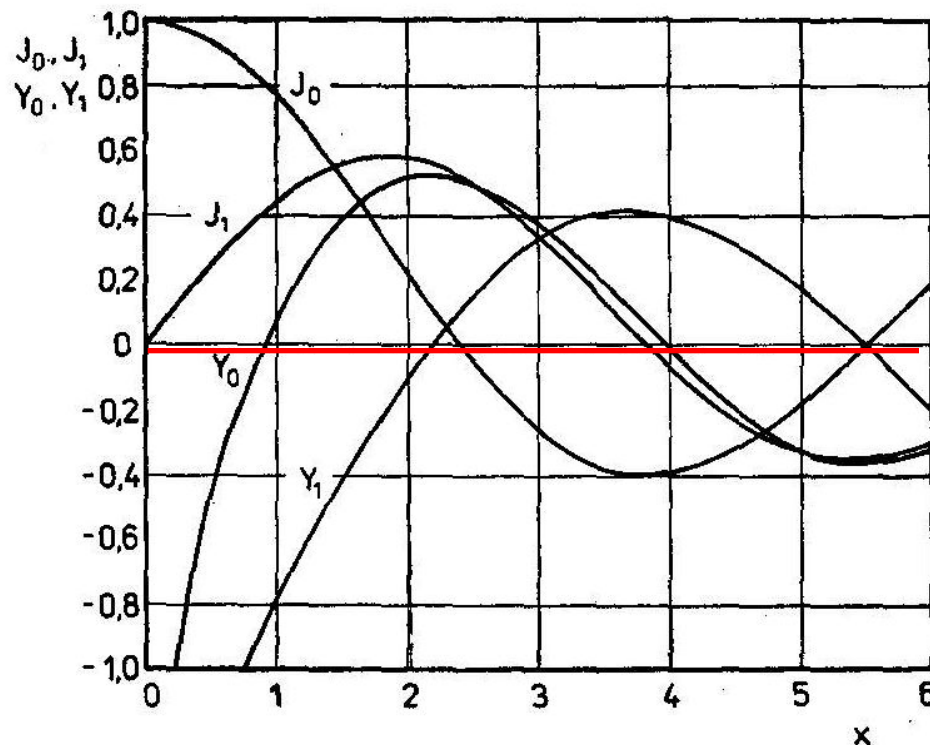




# Функции Бесселя

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

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



## Выравнивание энерговыделения

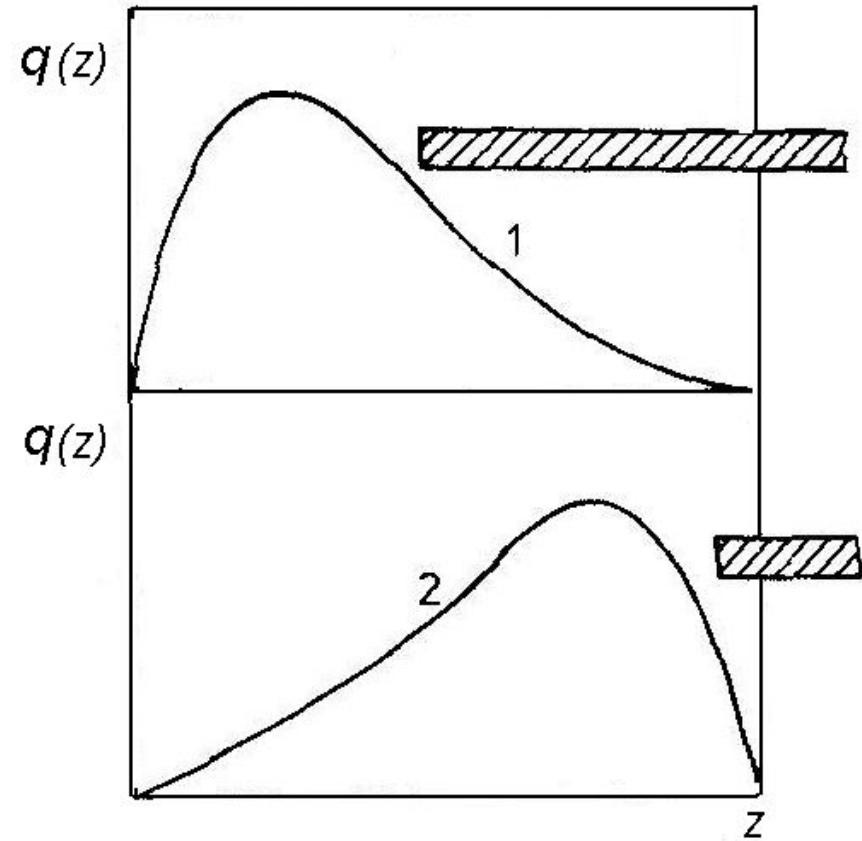
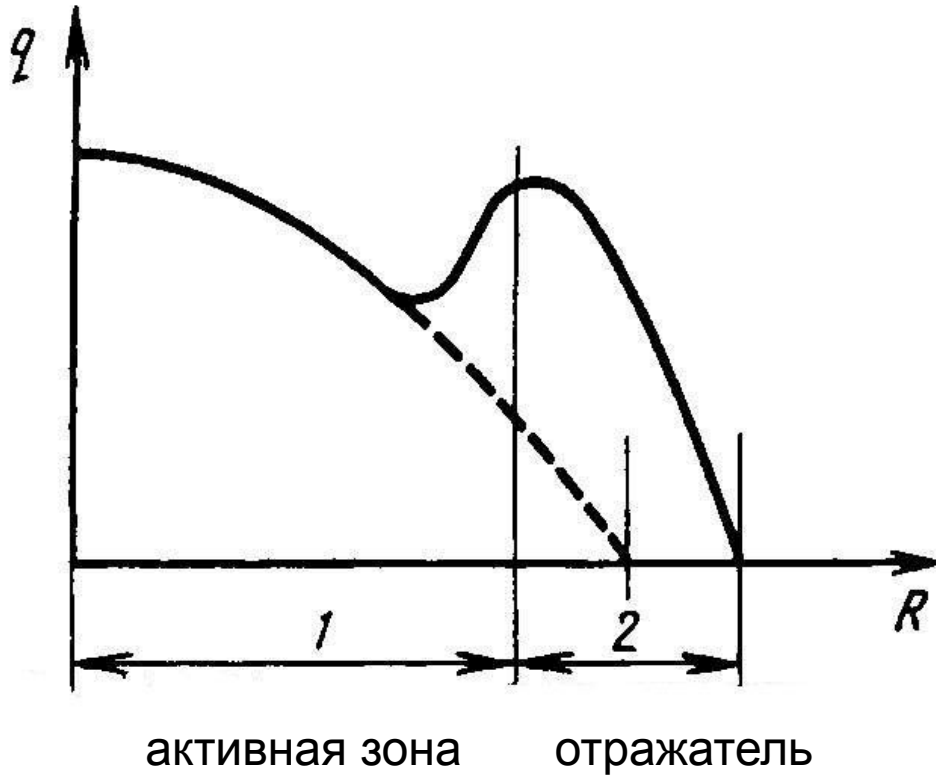
Избежать напряженных условий работы твэлов можно при более равномерном распределении энерговыделения.

Два способа выравнивания энерговыделения:

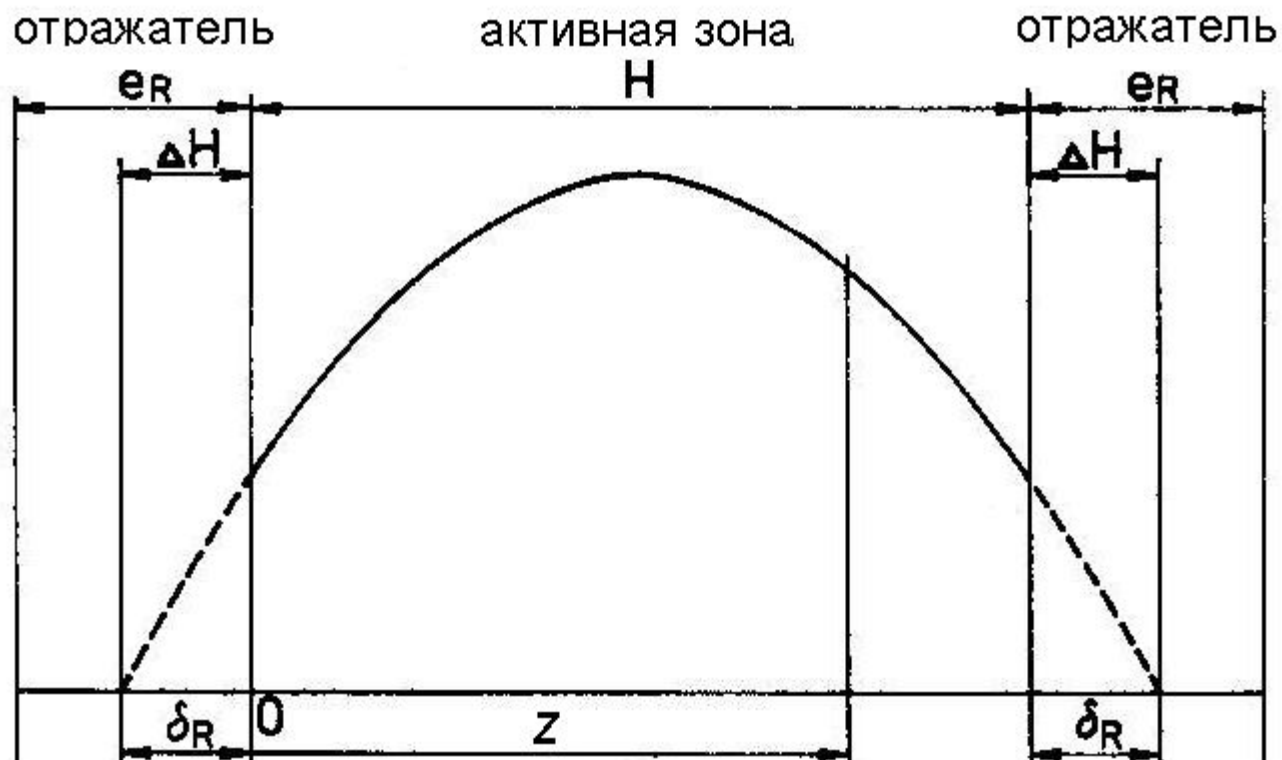
(1) Зонное выравнивание - создание нескольких зон с разным обогащением  $^{235}\text{U}$  или перестановка ТВС (свежее топливо загружается на периферию, а частично выгоревшее - в центр ).

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

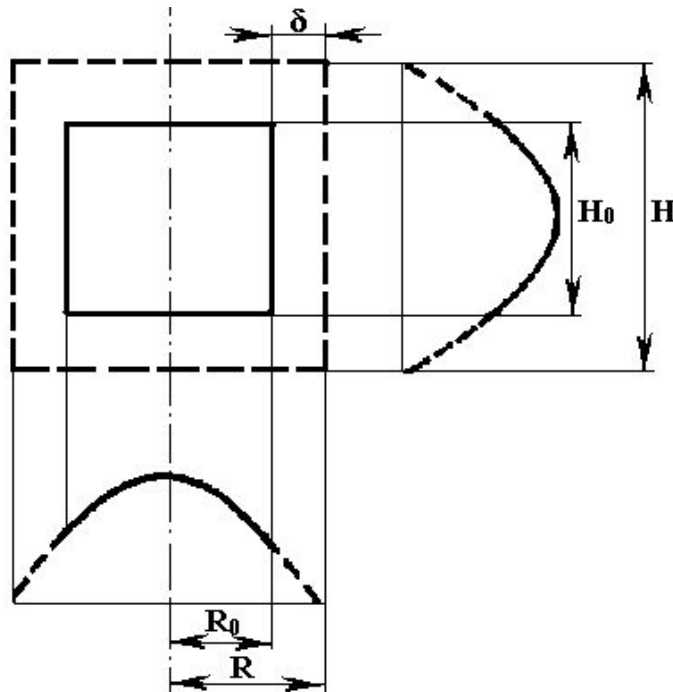
# Выравнивание энерговыделения



# Выравнивание энерговыделения



# Распределение энерговыделения в реакторе

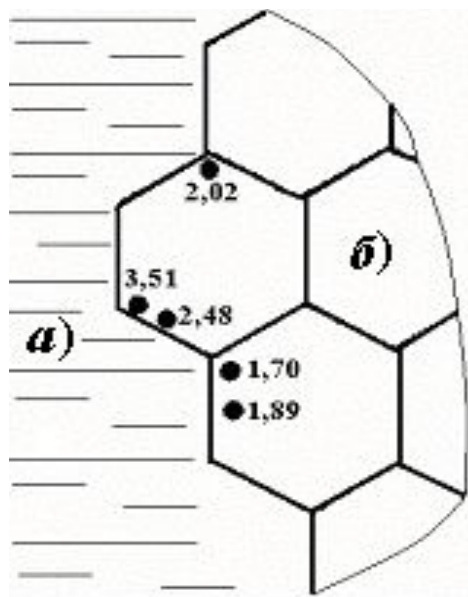


Распределение плотности потока нейтронов (плотности энерговыделения) в активной зоне цилиндрической формы (без отражателя):

$\delta$ - экстраполированная добавка

# Распределение энерговыделения в реакторе

## *«Микронеровности» поля энерговыделения*



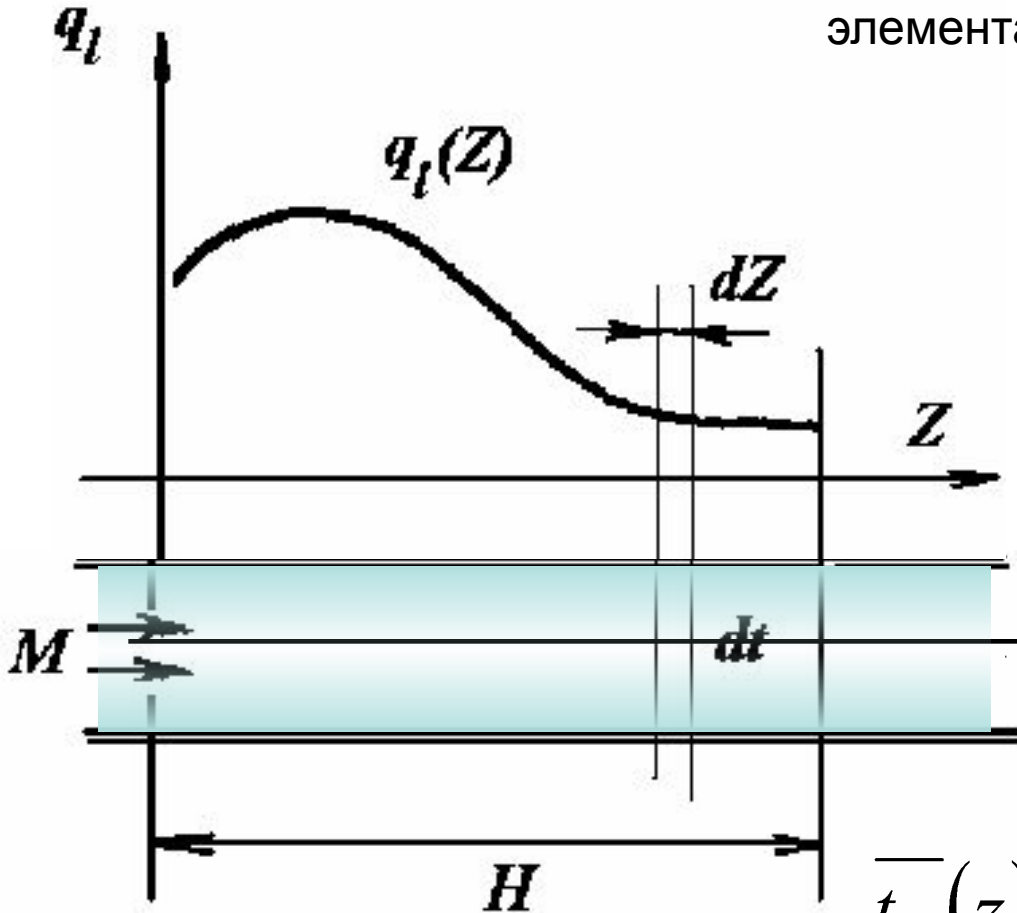
В ТВС, расположенной на границе с отражателем, наблюдается всплеск энерговыделения

Значения коэффициента "микронеровности" энерговыделения в ТВС на границе с отражателем (H<sub>2</sub>O):  
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

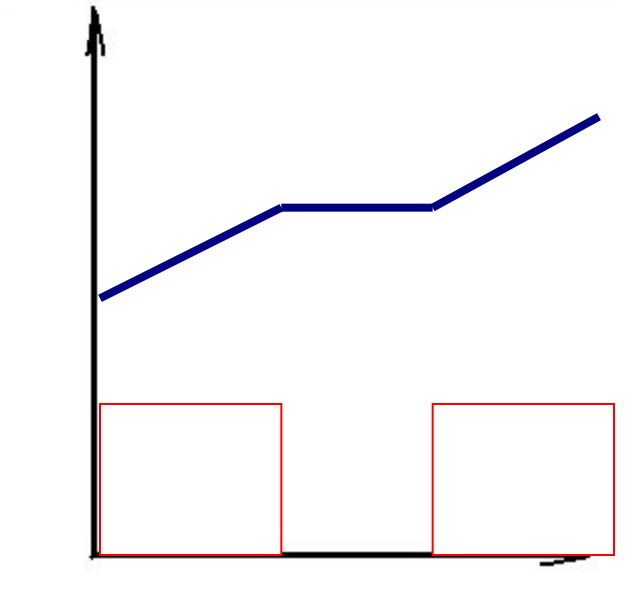
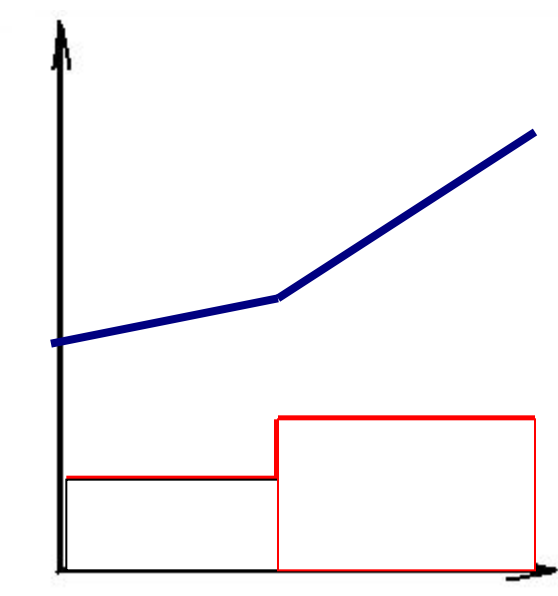
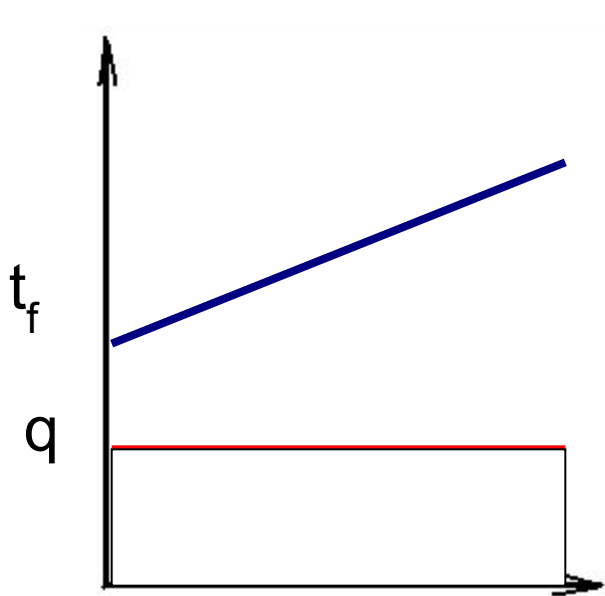
$$q(z) \cdot P \cdot dz = M \cdot c_p \cdot dt$$

$$q_l = q \cdot P$$

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

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

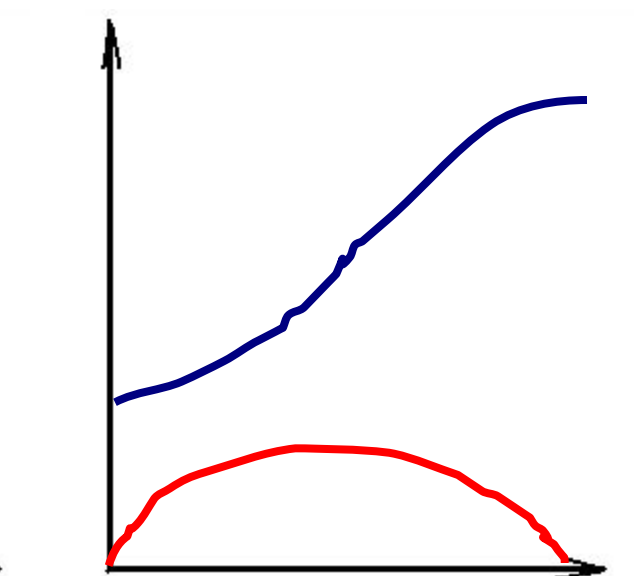
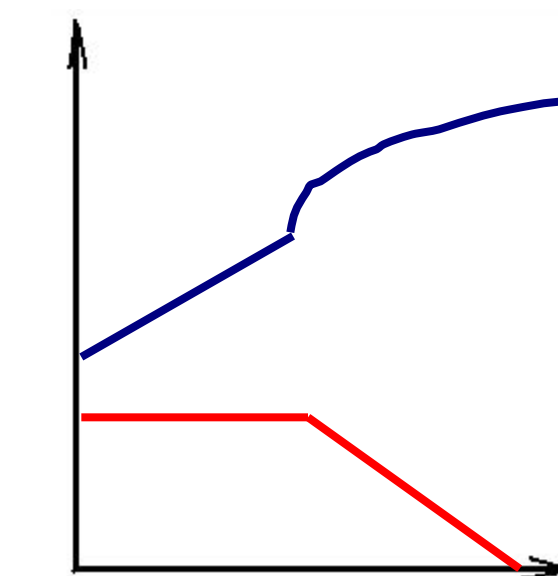
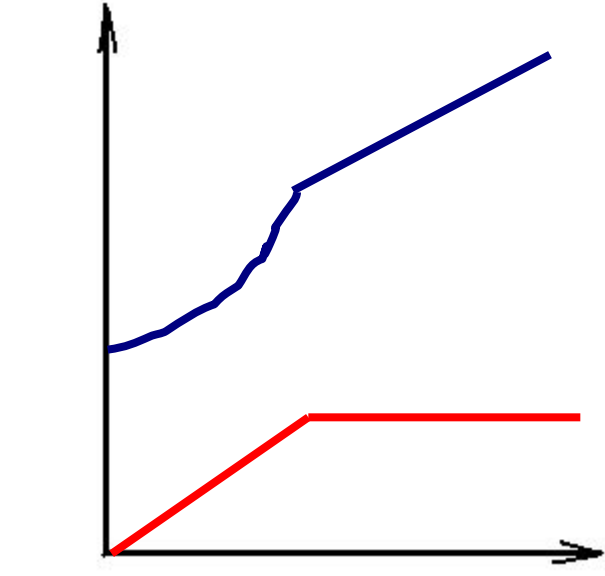
подогрев теплоносителя на участке от входа до сечения  $z$



$z$

$z$

$z$



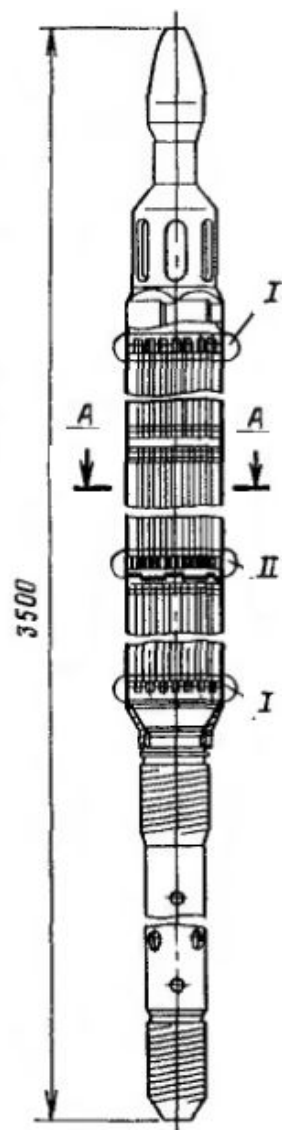
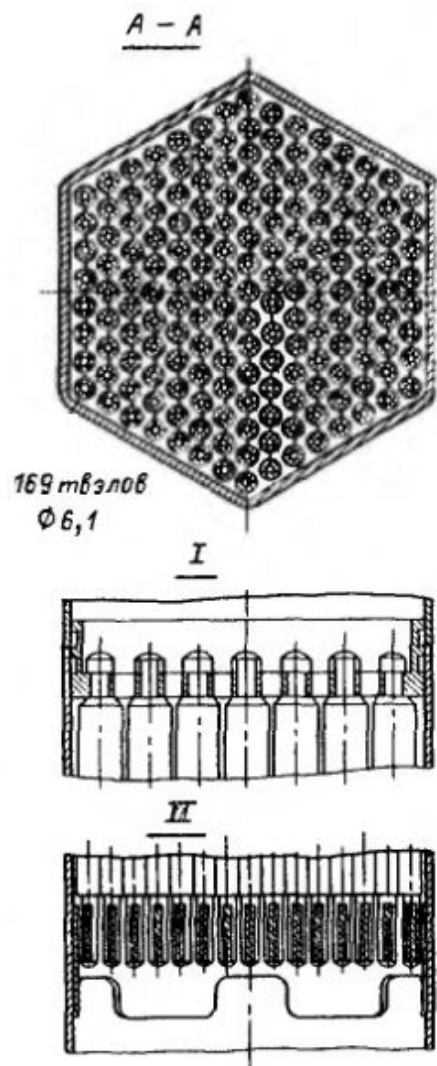
$z$

$z$

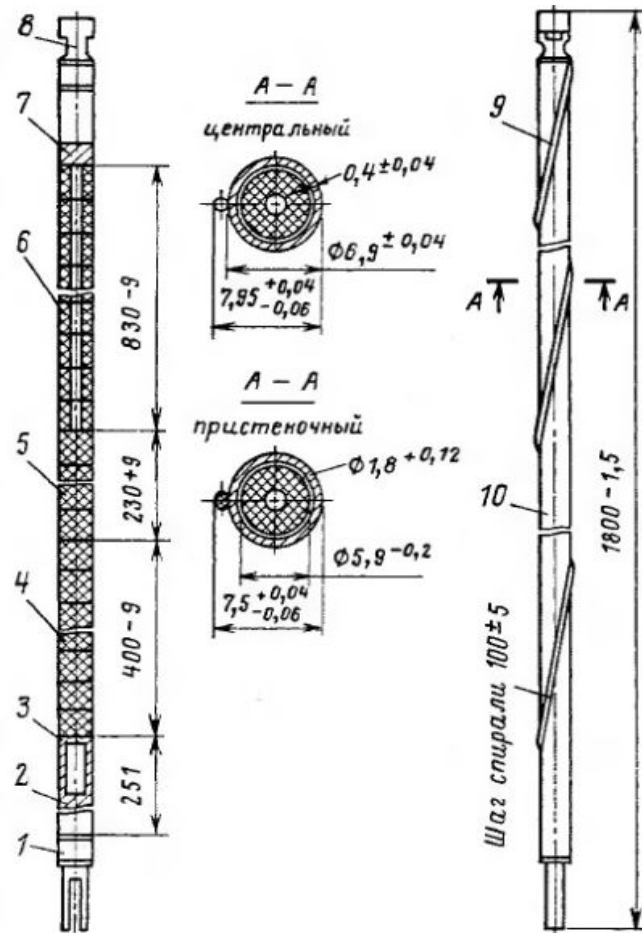
$z$



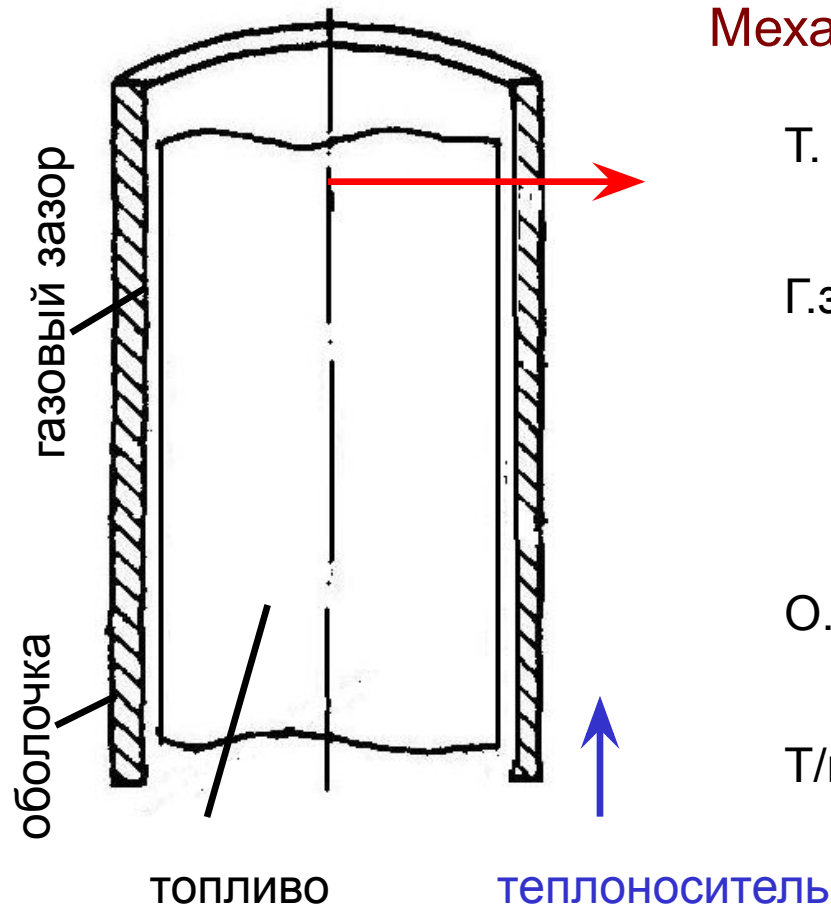
# ТВС БН-600



# ТВэл БН-350



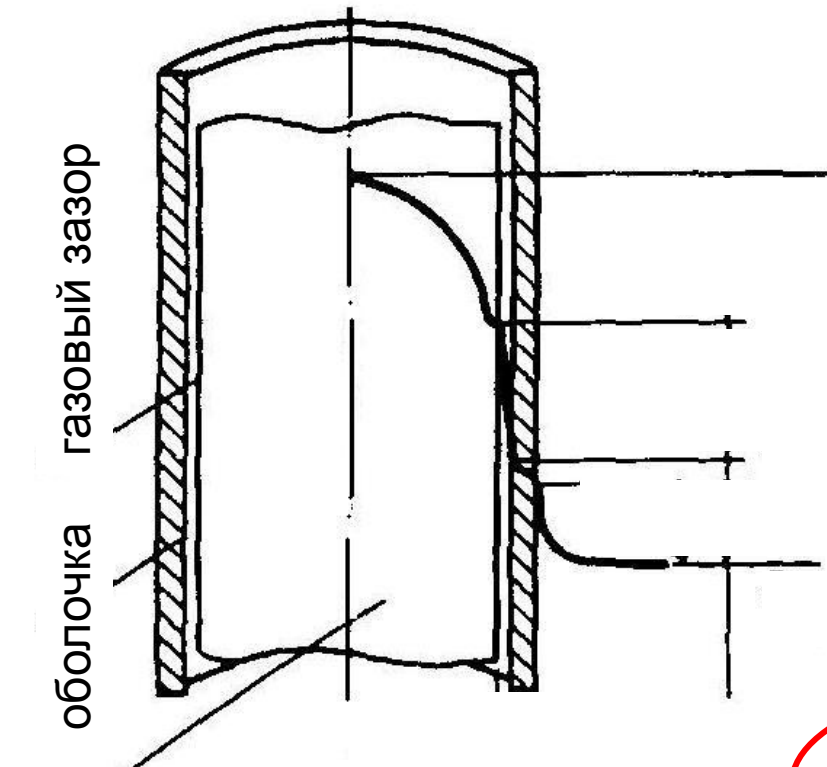
# Тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ)



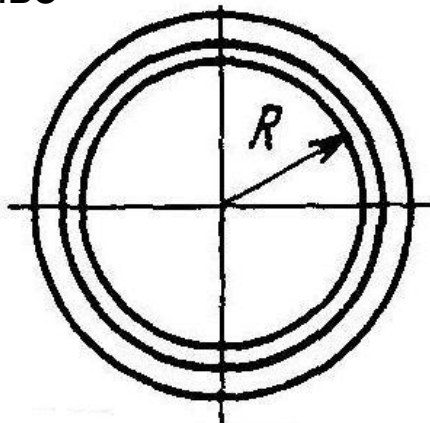
## Механизмы теплообмена в ТВЭЛе:

- 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



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

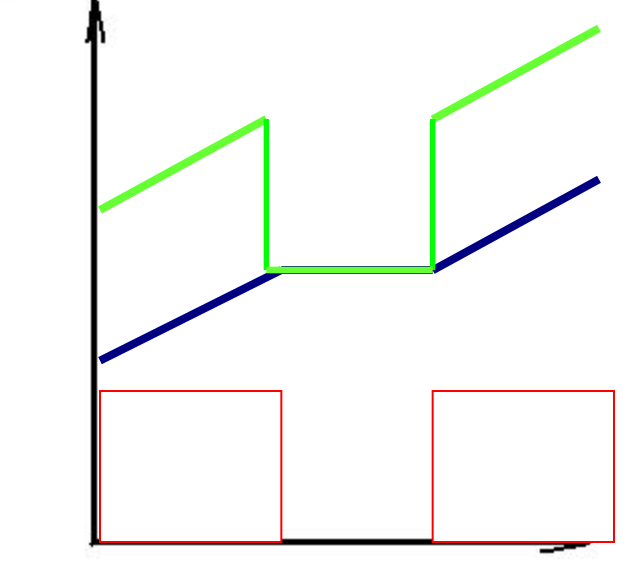
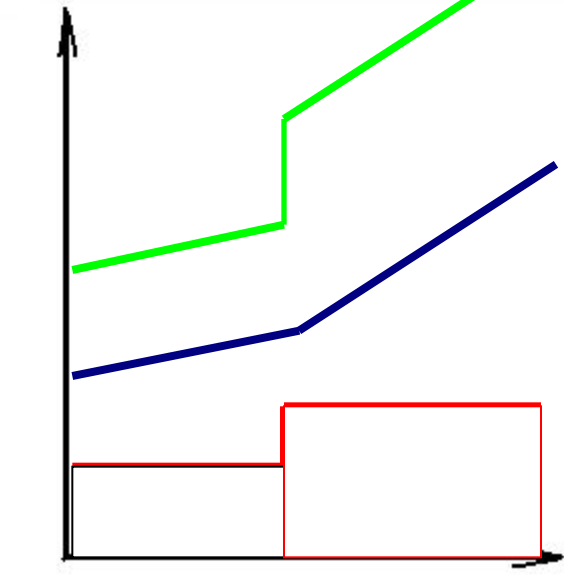
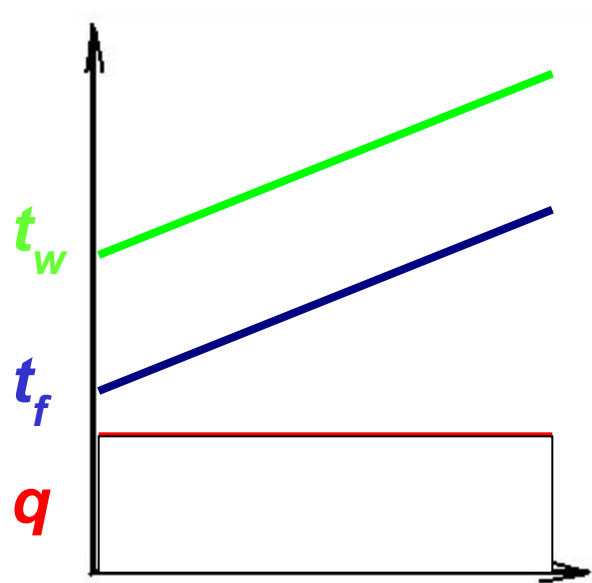
$$\Delta t_3(z) \cong \frac{q(z)}{\kappa} = \frac{q_l(z)}{P\kappa} = \frac{q(z)\delta_3}{\lambda_3}$$

$k$  – коэффициент теплопередачи

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

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

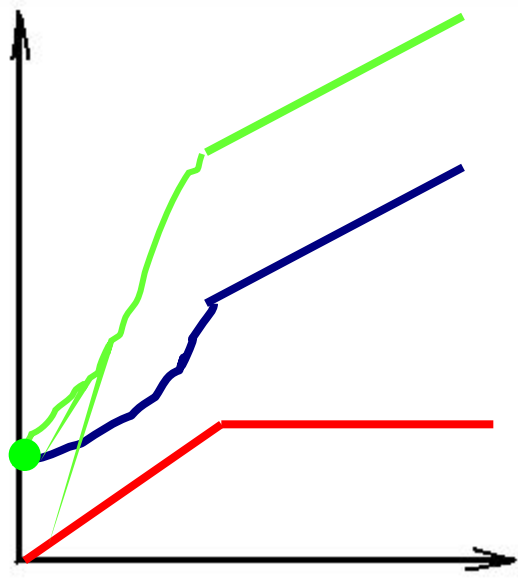
$$t_{\max}(z) = \overline{t_{жс}} + \Delta t_\alpha + \Delta t_o + \Delta t_3 + \Delta t_T$$



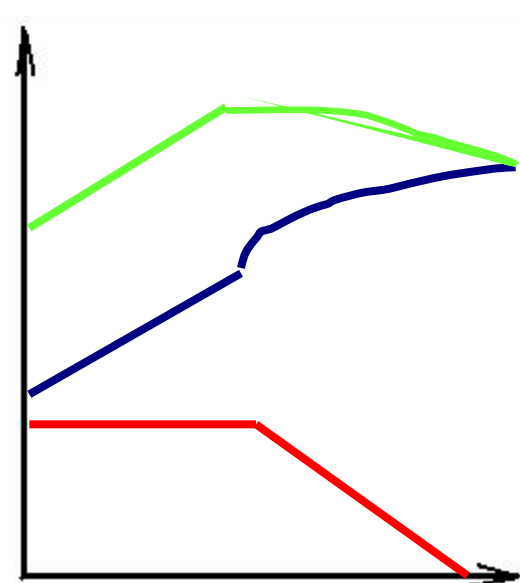
$z$

$z$

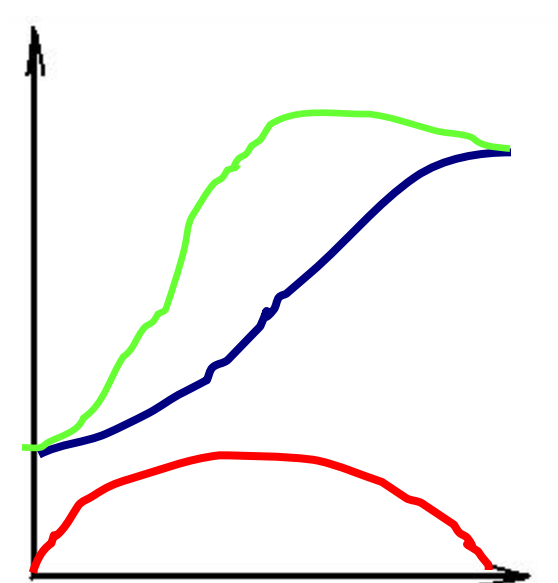
$z$



$z$

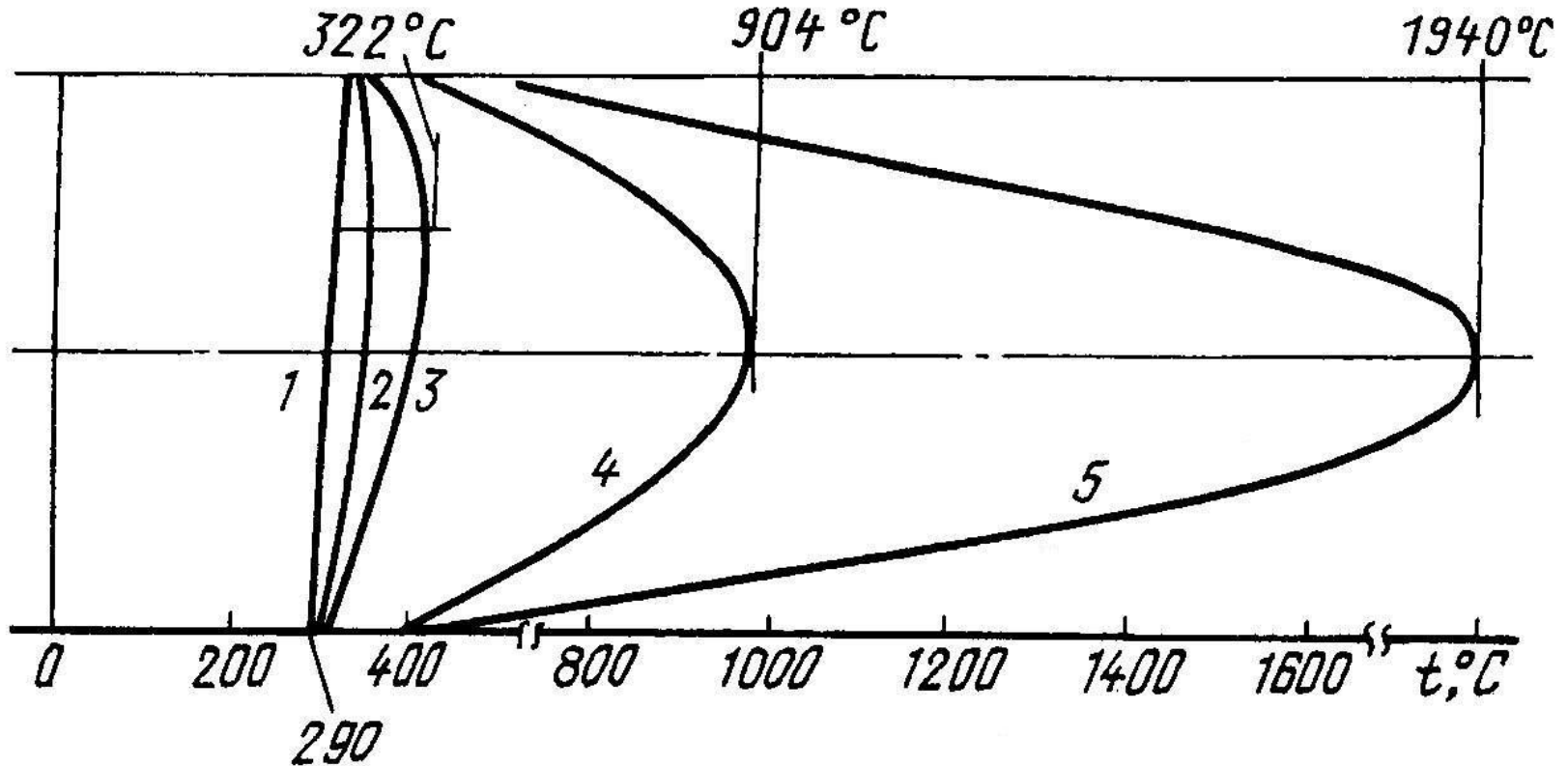


$z$



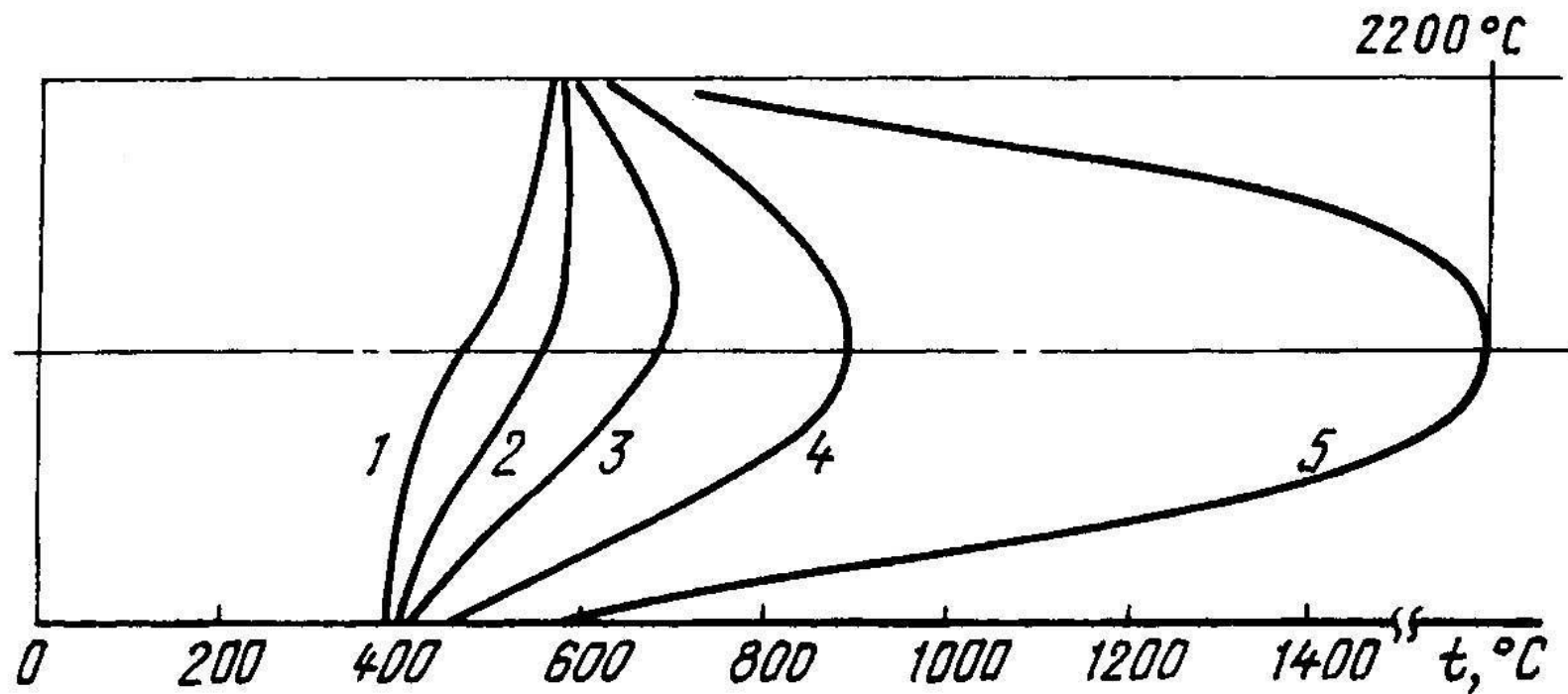
$z$

## 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        |