

# Способы преобразования энергии в полезную работу

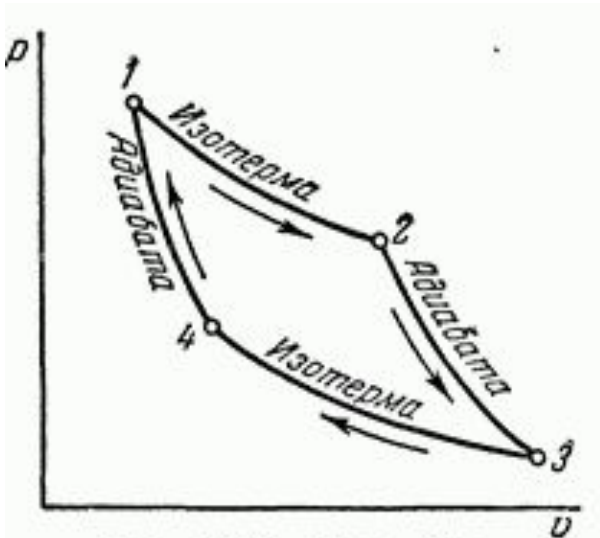
# Коэффициент полезного действия

При преобразовании энергии часть ее теряется. Эффективность передачи энергии характеризуется – КПД.

КПД определяется как отношение полезной работы к подведенной.

$$\eta = E_{\text{пол}} / E_{\text{под}}$$

Теоретически максимальный КПД может быть получен в цикле Карно

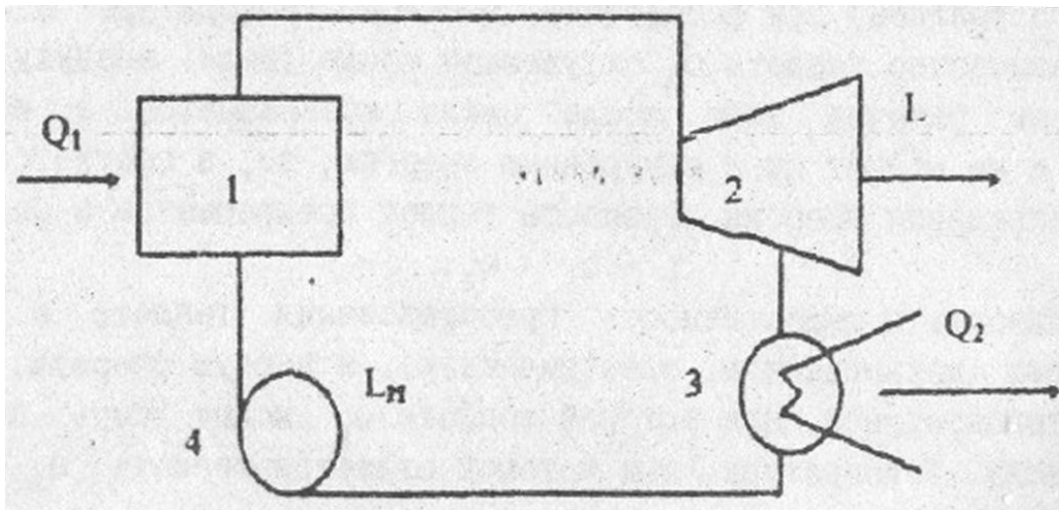


Конструкция ядерного реактора должна быть такой, чтобы температура топлива и соответственно теплоносителя была максимально возможной.

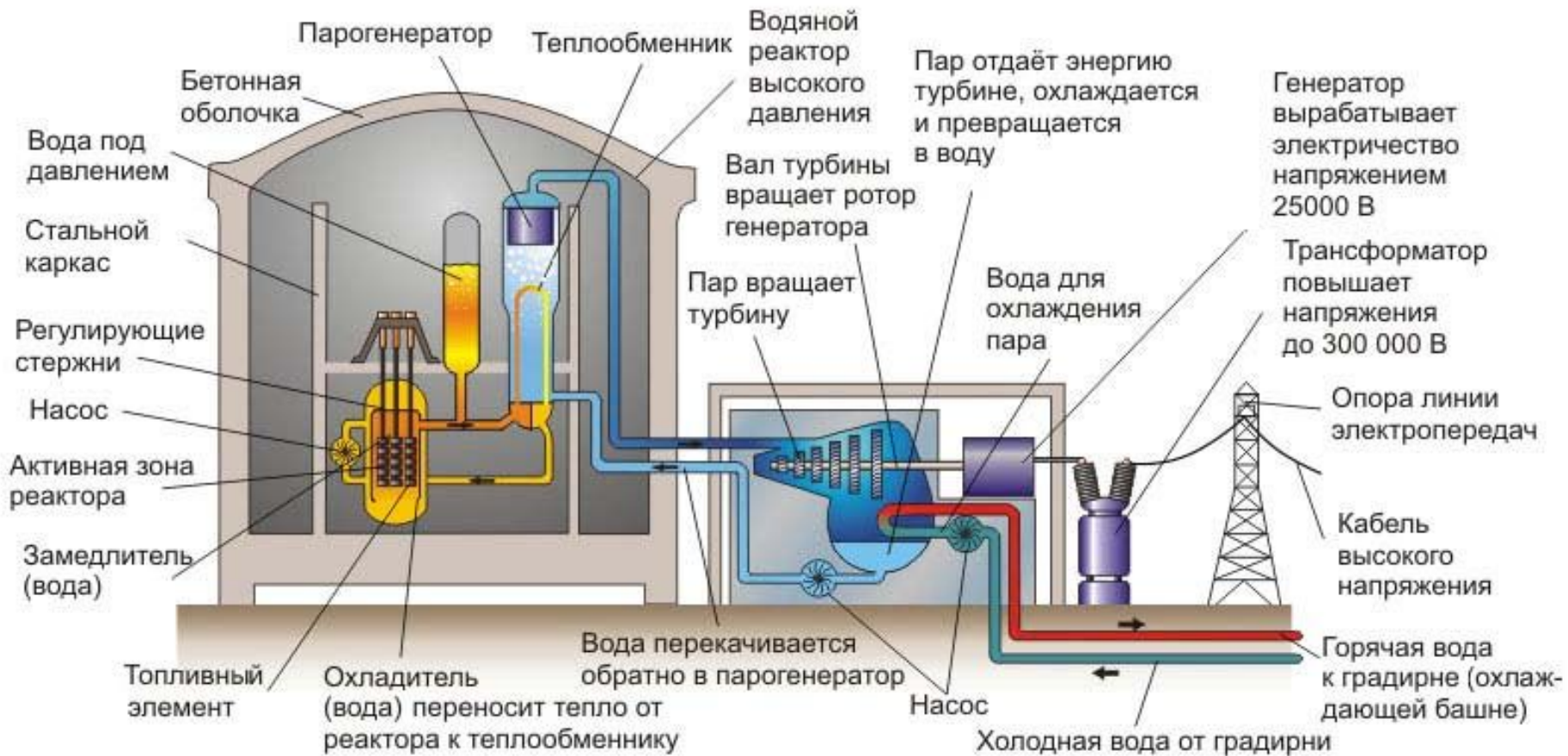
В этом случае эффективность реактора как тепловой машины будет максимальной

# Преобразование теплоты в электроэнергию через механическую работу

На всех АЭС тепловая энергия, получаемая в ядерном топливе, превращается в механическую при расширении пара в турбине, которая в свою очередь вращает электрогенератор.



- 1 – источник  
тепла
- 2 – турбина
- 3 – конденсатор
- 4 - насос



# Прямое преобразование тепла в электричество

Существует два способа прямого преобразования:

- Термоэлектрический
- Термоэмиссионный

Так как исходным видом энергии в устройствах прямого преобразования энергии является теплота, их КПД при получении энергии не может превосходить КПД цикла Карно для того же интервала температур.

# Термоэлектрогенераторы

- **Эффект Пельтье**

Если через спай разнородных проводников пропустить постоянный ток, то в этом спае, в зависимости от направления тока  $I$ , выделяется или поглощается теплота.

$$Q_p = \alpha I T$$

$\alpha$ -коэффициент, зависящий от свойств, выбранных проводников.  
 $T$ - температура спаия.

- **Эффект Зеебека**

Если в цепи, состоящей из двух разнородных проводников спаи находятся при разных температурах, то возникает электродвижущая сила  $E$ , пропорциональная разности температур.

$$E = \alpha(T_1 - T_2)$$

$\alpha$ -коэффициент термо-эдс или коэф. Зеебека

# Типы применяемых термоэлектрогенераторов

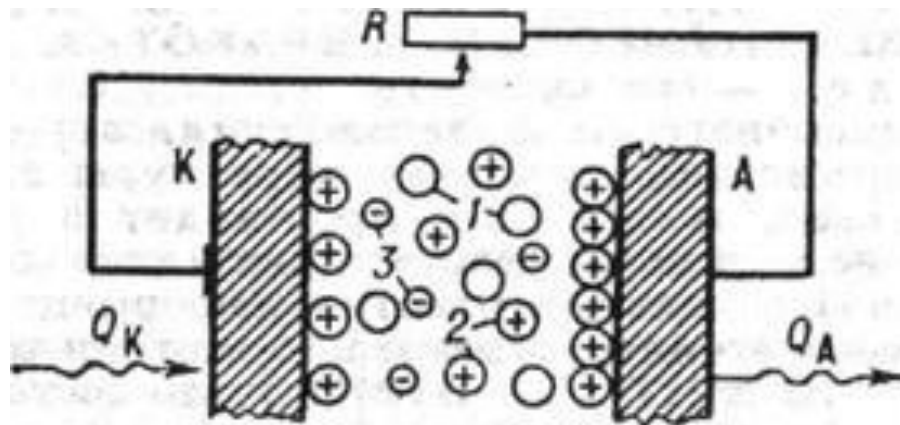
- Топливные: тепло от сжигания топлива (природный газ, нефть, уголь).
- Радиоизотопные: тепло от распада изотопов (распад не контролируется и работа определяется периодом полураспада).
- Атомные: тепло выделяемое в активной зоне реактора.
- Солнечные: тепло от солнечных коллекторов (зеркала, линзы, тепловые трубы).
- Утилизационные: Тепло из любых источников, выделяющих сбросное тепло (выхлопные и печные газы и др).

КПД < 5%

# Термоэмиссионные преобразователи энергии

Термоэмиссия – если какой-либо металл нагреть и поместить в вакуум, то некоторое количество его электронов перейдет в вакуум. Электроны, эмитируемые телом (катодом) можно отбирать, например, размещая рядом с катодом – анод и прикладывая напряжение.

Если поместить в вакуум два электрода из различных металлов, имеющих разные работы выхода, то между ними установится некоторая разность потенциалов.





# Применение термоэмиссионных преобразователей

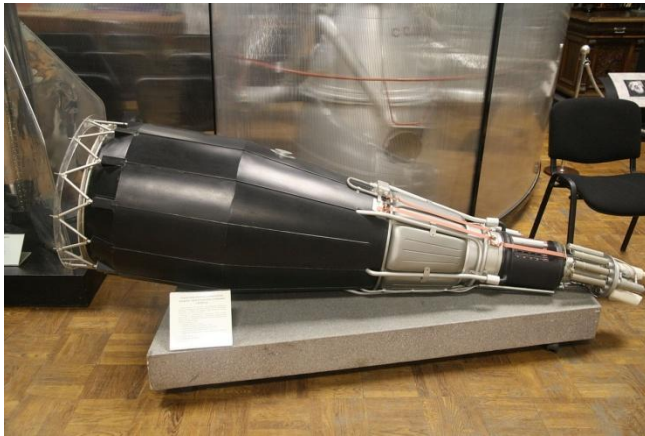


**Бук** – впервые запущен на орбиту в 1970. Электрическая мощность – 3 кВт при тепловой 100 кВт.

Реакторная установка на быстрых нейтронах.

Двухконтурная система ( $T_1$  – 700 С,  $T_2$  – 350 С)

U-235 – 90%, Общая масса урана 30 кг.



**Топаз** – впервые выведен на орбиту 02.02.1987

Топливо UO<sub>2</sub> обогащением 90%.

Тепловая мощность 150 кВт. Электрическая от 5 до 6,6 кВт.

# Другие способы превращения энергии деления в полезную работу

- **Магнитогидродинамический способ**

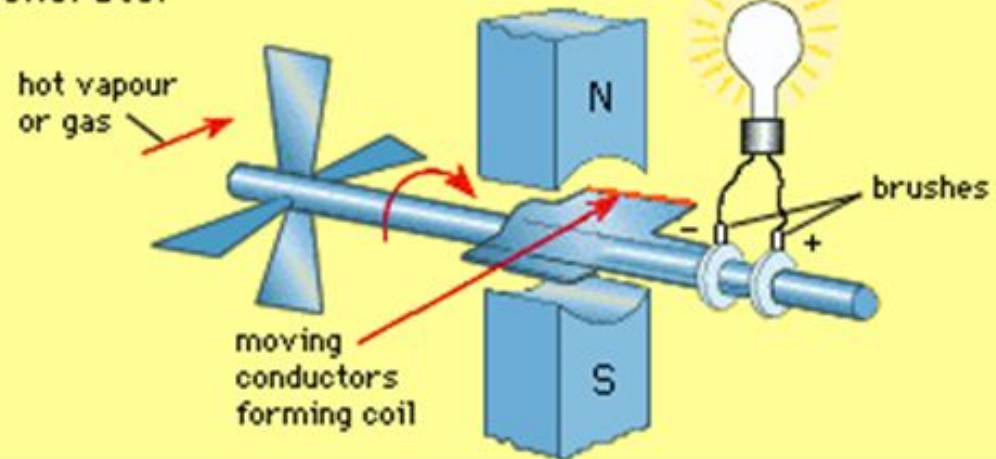
Принципы те же, что и для обычного электромеханического генератора, однако подвижные проводники изготовлены не из твердых материалов, а представляют собой поток электропроводной жидкости или газа.

Принцип работы любого генератора — возникновение тока в проводнике, пересекающем линии магнитного поля (электромагнитная индукция). Кинетическая энергия потока рабочего тела преобразуется, в конечном итоге, в энергию электрического тока.

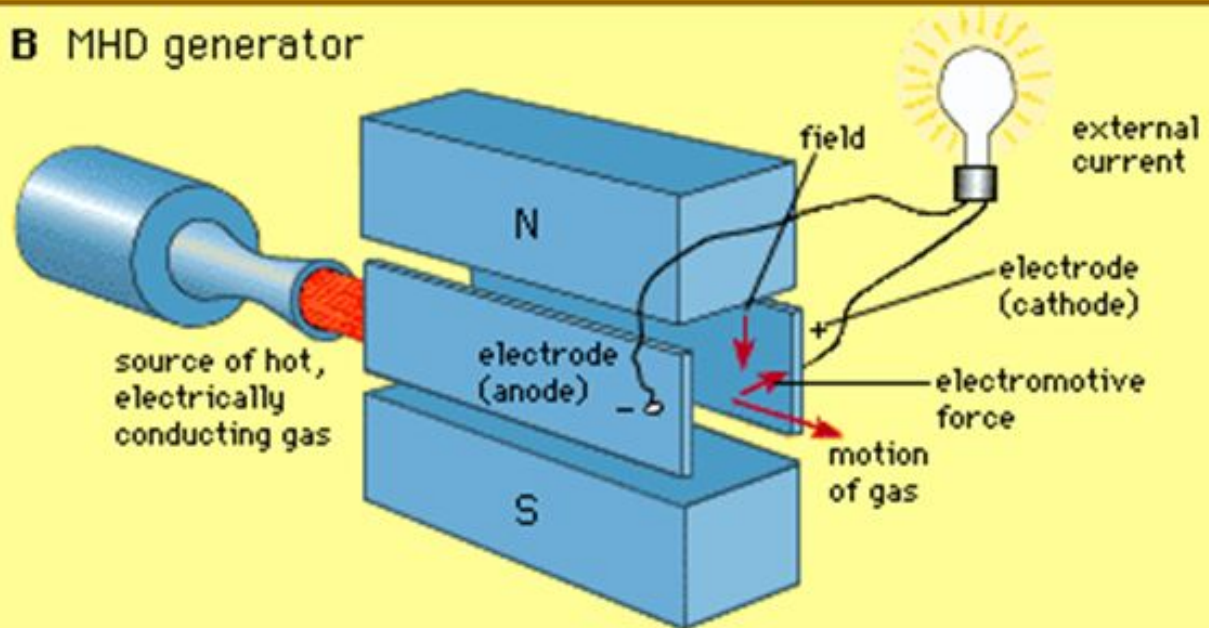
МГД-установки:

1. Плазменные
2. Жидкометаллические

### A Turbogenerator



### B MHD generator



# Варианты использования ядерных реакторов в МГД-установках

- Быстрые реакторы с ЖМТ.

Однако необходима большая скорость ЖМТ. Получить ее с помощью сопла нельзя, т.к. металл несжимаем. Разгон насосом экономически не выгоден.

Варианты: разгон инжекторный способ (частичное испарение) или добавление газа.

- Газоохлаждаемый реактор.

Хорошо сжимаемое рабочее тело. Однако проблемы получения высоких температур рабочего тела и одновременное обеспечение стойкости конструкционных материалов.

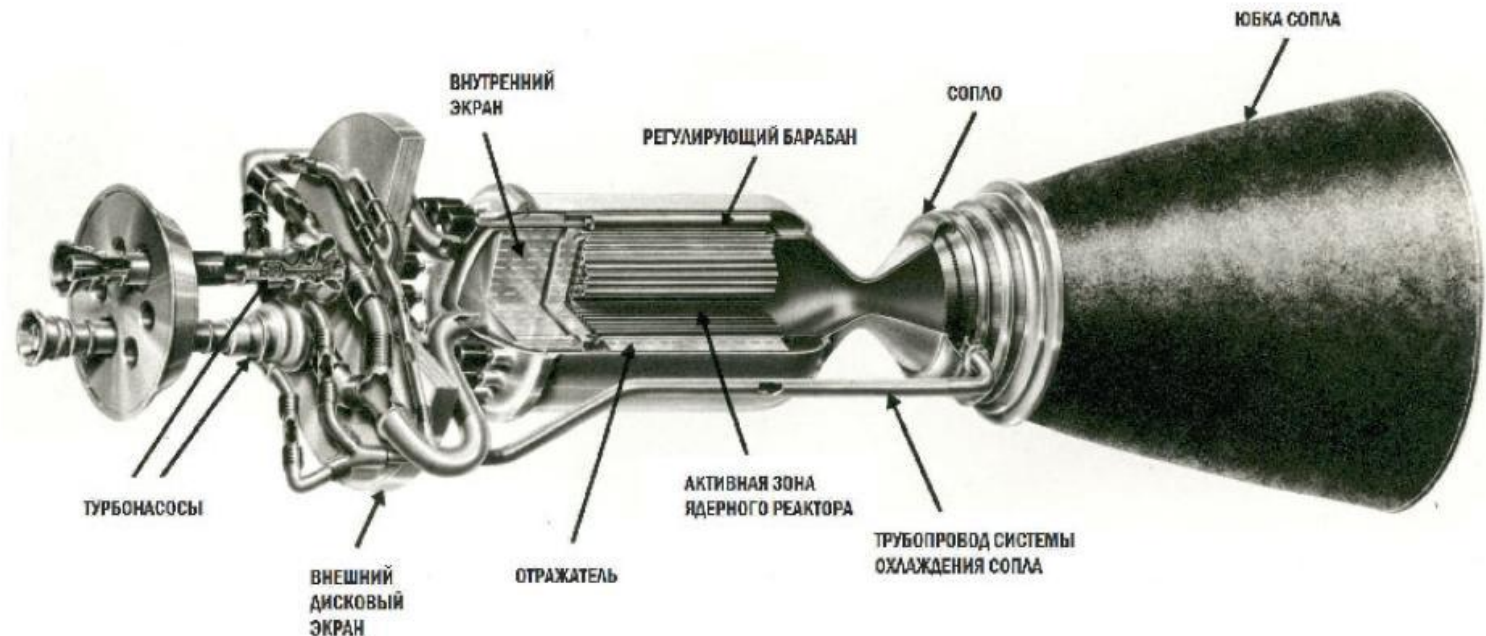
- Газофазный ядерный реактор

В этом случае рабочее тело – само делящееся вещество в газообразном состоянии. Позволяет значительно поднять температуру рабочего тела.

# Другие способы превращения энергии деления в полезную работу (продолжение)

- **Ядерные ракетные двигатели**

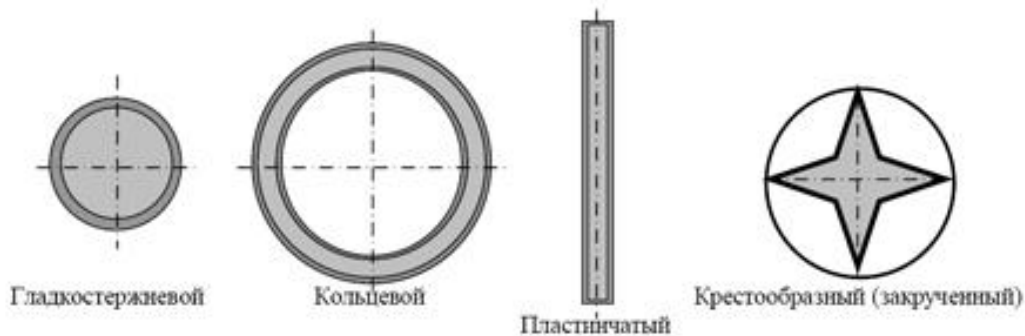
Непосредственно преобразуют теплоту, полученную за счет деления тяжелых ядер в ядерном реакторе в кинетическую энергию движения ракеты.



# Материалы для ядерных реакторов

# Тепловыделяющие элементы

- Стержневой ТВЭЛ
- Пластинчатый
- Кольцевой (омывается теплоносителем с обеих сторон)
- Трубчатый (омывается теплоносителем только внутри)
- Шаровой

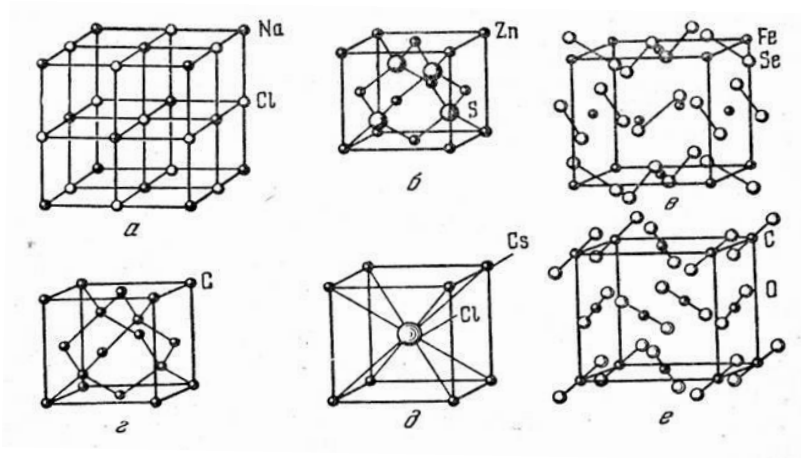


# Ядерное топливо

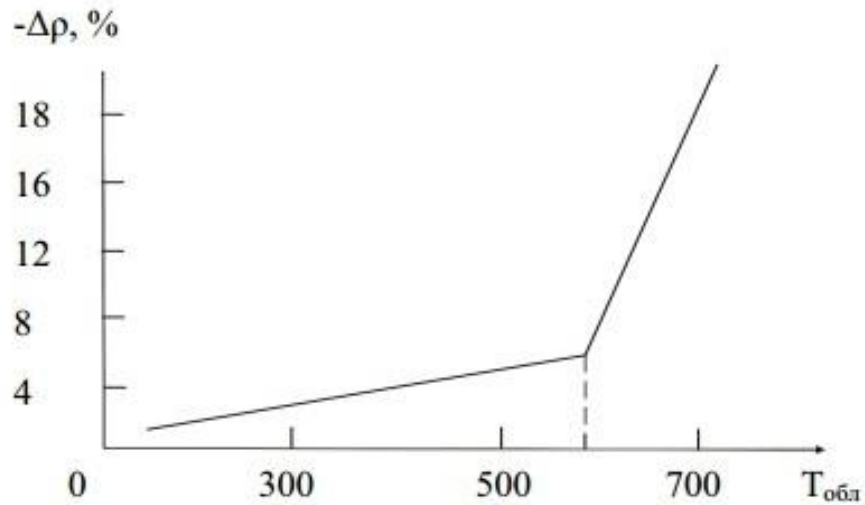
Соединение	Теоретическая плотность, г/см <sup>3</sup>	Температура плавления, °С
UO <sub>2</sub>	10,97	2880
PuO <sub>2</sub>	11,46	2240
UC	13,63	2370
PuC	13,60	1847
UN	14,32	2850
PuN	14,23	2590



# Легирование



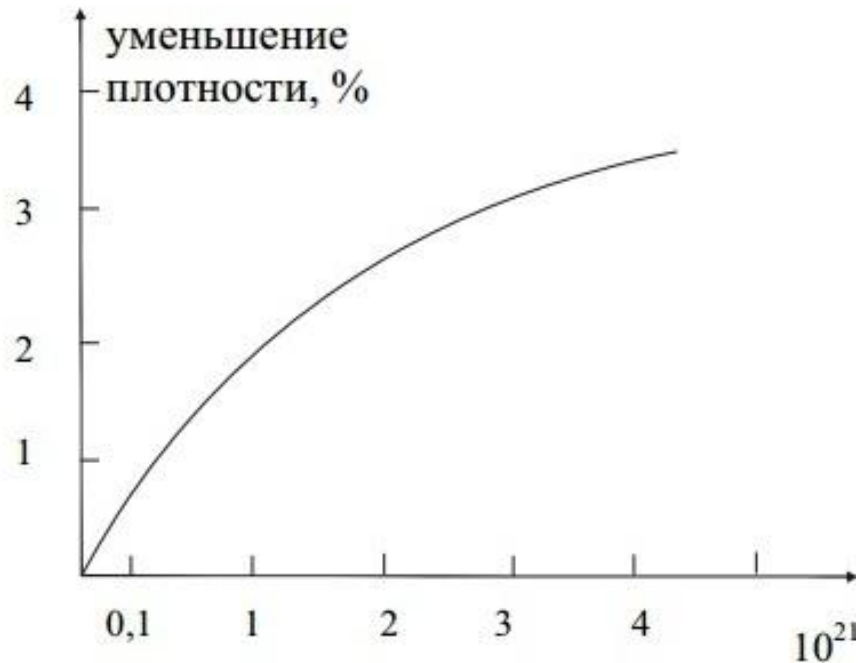
Сохранение кристаллической решетки в заданном температурном диапазоне.  
Например Pu в  $\delta$ -фазе



Уменьшение газового распухания  
U+10%Mo

# Свеллинг

Свеллинг – газовое распухание, вследствие нейтронного облучения. Наблюдается значительное увеличение объема материала за счет выхода таких осколков деления как Kr и Xe.



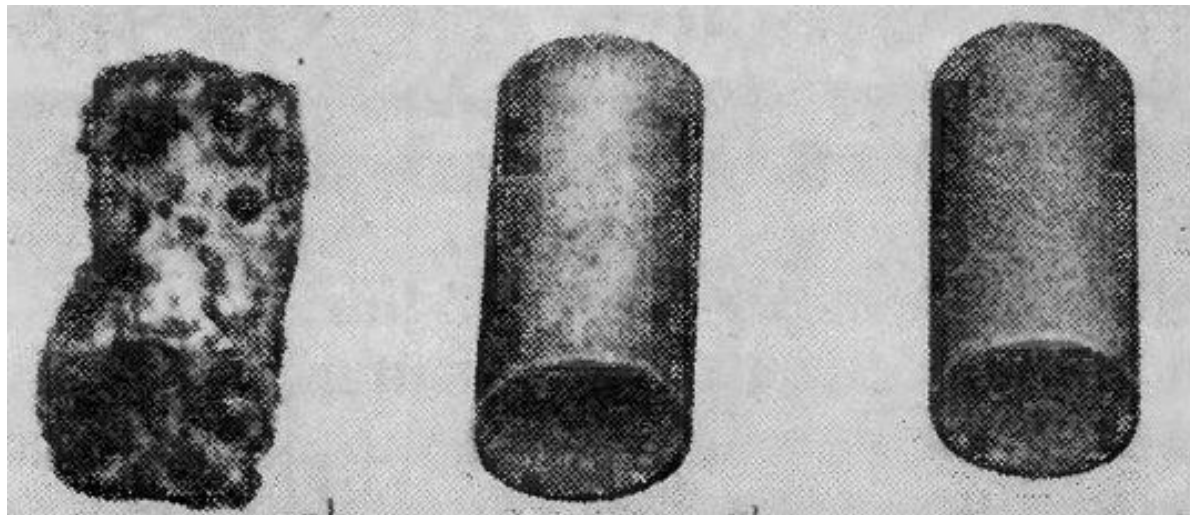
В  $1 \text{ см}^3$  урана при 1% выгорания образуется  $4,73 \text{ см}^3$  инертного газа, находящегося при нормальных условиях

Изменение объема урана при газовом распухании

# Конструкционные материалы

Стали должны быть устойчивы к:

1. Нейтронному потоку и другим видам излучения
2. Высоким температурам
3. Коррозии и эрозии (места сварки, вымывание теплоносителем, воздействие продуктов деления)



# Основные требования к материалам оболочек

- Низкое сечение захвата нейтронов
- Высокая теплопроводность
- Коррозионная и эрозионная стойкость в теплоносителях, совместимость с топливом и продуктами деления
- Хорошие механические свойства (прочность, пластичность, ползучесть)
- Технологичность (возможность изготовления из этой стали, например, труб; свариваемость)
- Экономичность и доступность
- Малоактивируемые стали

# Ферритно-мартенситные стали

Для уменьшения объемного расширения конструкционных материалов рассматриваются металлы с объемно-центрированной решёткой, которые меньше подвержены распуханию, чем материалы с гранецентрированной решеткой.

Преимущества ферритно-мартенситных сталей по сравнению с аустенитными:

1. Теплостойкость ФМС почти в 3 раза выше
2. Меньший коэффициент термического расширения и более высокая теплопроводность;
3. ФМС слабо подвержены распуханию под действием нейтронного облучения

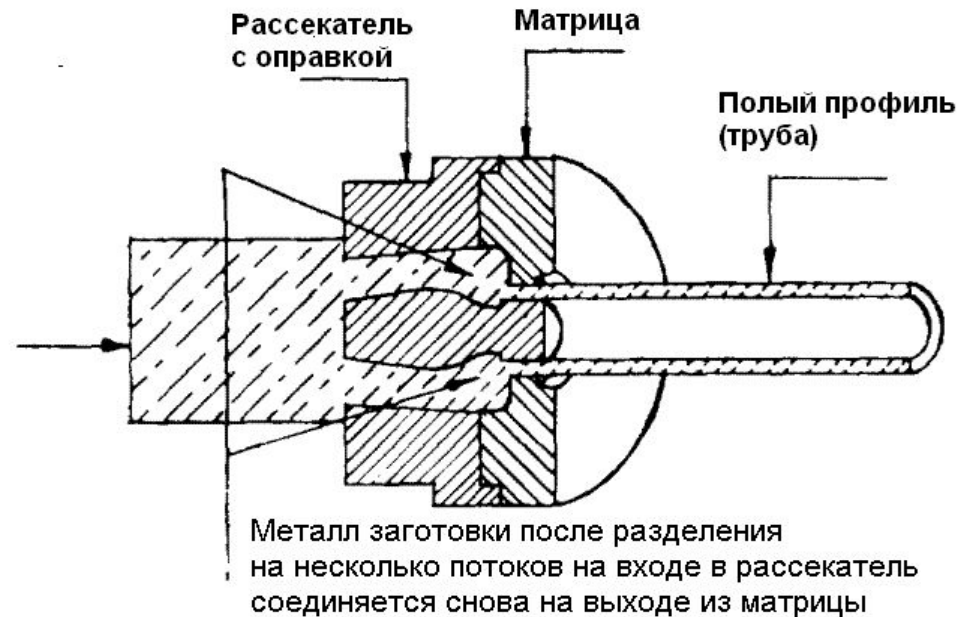


# Создание ДУО-сталей

Изготовление особотонкостенных труб из дисперсно-упрочненных оксидами жаропрочных ФМС на основе методов металлургии распыленных и быстрозакаленных порошков.

Технологические этапы:

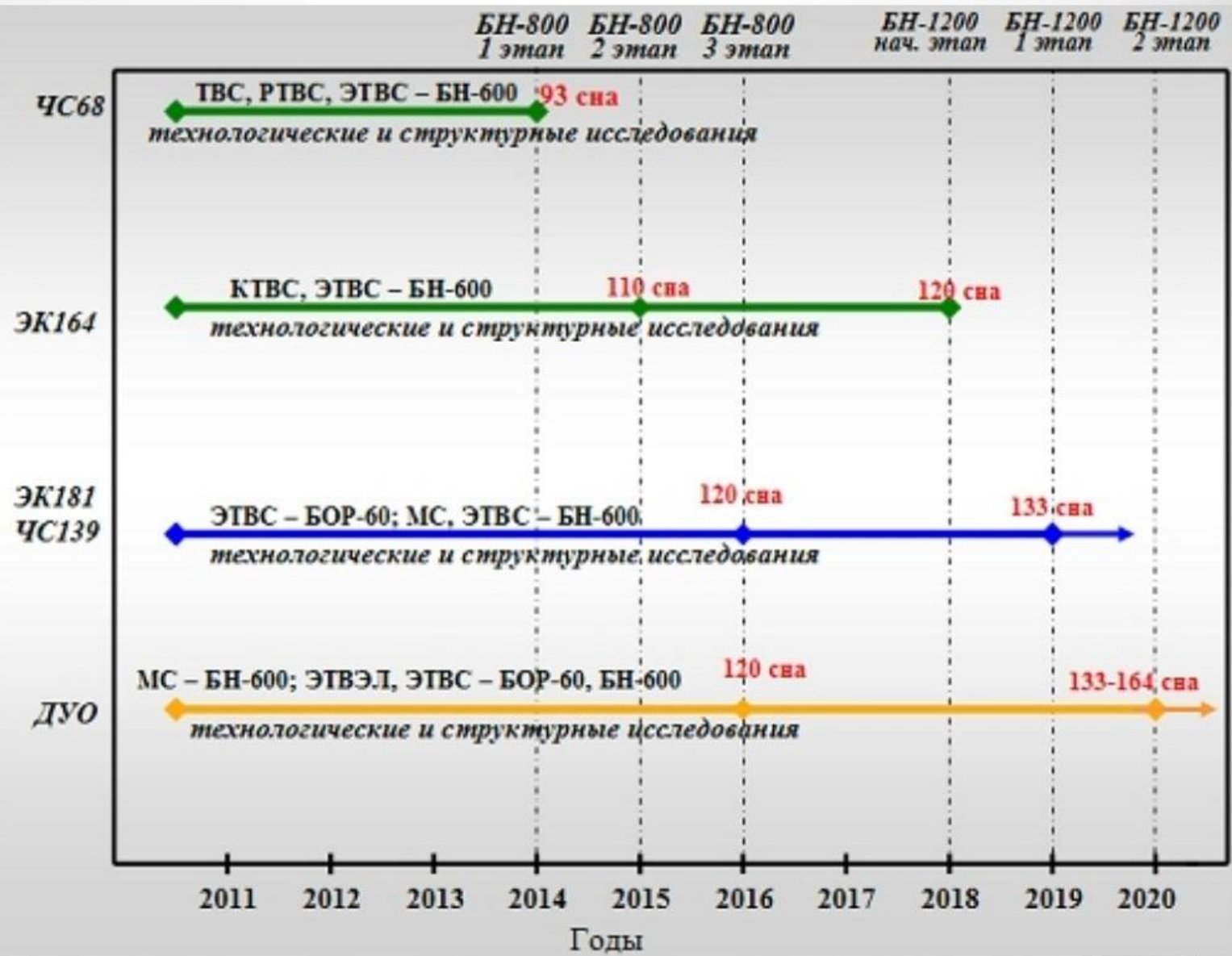
- ✓ Получение порошков
- ✓ Механическое легирование
- ✓ Дегазация порошков
- ✓ Горячая экструзия
- ✓ Обточка заготовок
- ✓ Холодная прокатка и термообработка



Аустенитные  
стали

ФМ  
стали

ДУО  
стали



# Теплоносители

Требования к материалам теплоносителя:

1. Малый захват нейтронов
2. Хорошие теплофизические свойства для обеспечения эфф. КПД
3. Должны быть такими, чтобы расход энергии на прокачку был мал
4. Не должны быть коррозионно и эрозионно активными
5. Мало активироваться излучением реактора
6. Не должны разлагаться под действием излучения
7. Должны обеспечивать безопасную эксплуатацию установок (не взрываться, не быть токсичными)



# Вода

Различают обычную и тяжелую воду.

Вода имеет большую теплоемкость.

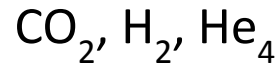
Вода – единственное рабочее тело для турбин паровом цикле.

Можно организовать одноконтурный цикл.

Недостатки:

1. Коррозионно и эрозионно активна.
2. При возникновении трещин уран взаимодействует с водой
3. Низкая температура кипения
4. Не может использоваться в БР, т.к. хороший замедлитель
5. Под действием радиации подвергается радиолизу
6. Активируется в нейтронном потоке

# Газы



## Достоинства:

1. Слабо активируются излучениями реактора. Практически не корродируют.
2. Почти не замедляют нейтроны
3. Дают возможность получать высокие температуры (1000 С), следовательно повышенный КПД

## Недостатки:

1. Имеют низкую теплоемкость и теплоотдачу (нужно иметь высокое давление)
2. Требуют больших затрат энергии на прокачку
3. В тепловых реакторах требуется дополнительно замедлитель

# Жидкие металлы

Na, K, Li, Pb, Bi

Достоинства:

1. Почти не замедляют нейтроны
2. Хорошая теплопроводность
3. Возможность получения больших температур, следовательно КПД выше

Недостатки:

1. Сильно окисляются. Нужны абсолютно герметичные системы
2. Na, K, Li бурно взаимодействуют с водой
3. Требуется система обогрева контура при остановке реактора

# Замедлители

Основная задача – замедлять нейтроны до требуемых энергий

Материал Характеристика	D <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	C	Be
$\xi \Sigma_s$ (см <sup>-1</sup> )	0.1280	1.160	0.0494	0.1561
$\Sigma_a$ (см <sup>-1</sup> )	3.9*10 <sup>-5</sup>	1.9*10 <sup>-2</sup>	2.6*10 <sup>-4</sup>	8.2*10 <sup>-4</sup>
$\xi \Sigma_s / \Sigma_a$	3300	61	190	~190
1 / $\xi \Sigma_s$ (см)	7.8	0.86	20	6

# Поглотитель

Материал	$\sigma_a$ (барн) тепл.нейтр.	Резонансный инт. (барн)	Реакция	T плавл. °C	Примечание
$B^{10}$	3840	-	(n, $\alpha$ )	2300	} Редкозем. элементы
Бор (ест)	755	280	(n, $\alpha$ )	2300	
Cd	2450	-	(n, $\gamma$ )	321	
Hf	105	1800	-"-	2220	
Gd	46000	67	-"-	1350	
Eu	4300	1000	-"-	900	
Sm	5600	1800	-"-	1052	

# Эффекты реактивности

# Эффекты реактивности

$$\rho(t) = \rho_p(t) + \rho_D(t) + \rho_d(t) + \rho_{Na}(t) + \rho_{re}(t) + \rho_{cr}(t) + \rho_{fu}(t) + \rho_{cl}(t) + \dots \quad (5.1)$$

где  $\rho_p(t)$  — внешняя реактивность (для расчетов вводимая пользователем);  $\rho_D(t)$  — реактивность по эффекту Доплера;  $\rho_d(t)$  — реактивность от растяжения топлива и оболочки;  $\rho_{Na}(t)$  — реактивность от плотности теплоносителя или пустот;  $\rho_{re}(t)$  — реактивность от радиального расширения активной зоны;  $\rho_{cr}(t)$  — реактивность от перемещения стержней СУЗ;  $\rho_{fu}(t)$  — реактивность от перемещения топлива;  $\rho_{cl}(t)$  — реактивность от перемещения оболочки.

# Температурный эффект реактивности

Под ТЭР понимают изменения реактивности реактора при однородном изменении температуры реактора.

Температурный коэффициент реактивности – отношение приращения реактивности к приращения температуры.

Разогрев за счет ГЦН.

ТЭР обусловлен изменением:

1. геометрических размеров реактора
2. плотности материалов
3. микроскопическими сечениями взаимодействия
4. Допплер-эффектом



## Составляющие ТЭР

Составляющая	«Энрико Ферми»	БН-600
Мощность (эл.), МВт		600
Объем зоны, л	400	1000
Топливо	Pu	UO <sub>2</sub>
Расширение топлива, $10^{-6} \Delta k / k \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ :		
аксиальное	-5,8	-4,6 *
радиальное	-0,4	-9,0 *
Расширение элементов конструкций, $10^{-6} \Delta k / k \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	-14,1	
Расширение натрия, $10^{-6} \Delta k / k \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ :		
в а. з.	-4,4	-0,4
в экранах	-6,9	
Доплер-эффект, $10^{-6} \Delta k / k \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	-2,5	-9,3
Суммарный ТКР, $10^{-6} \Delta k / k \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	-34,1	-23,3

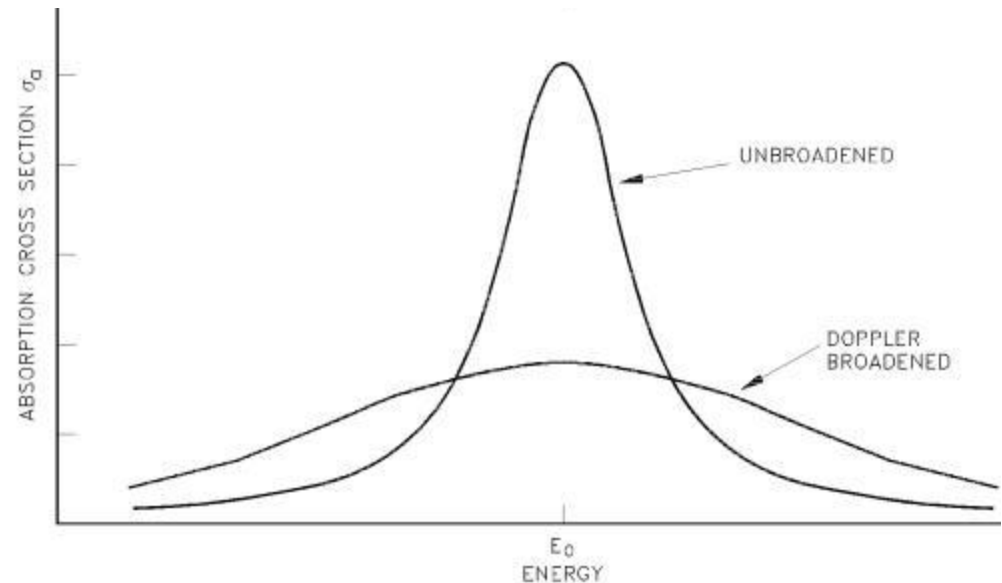
\* С учетом расширения конструкций.

# Доплер-эффект, как составляющая ТЭР

Уширение резонанса (увеличение площади) в сечении взаимодействия нейтрона со средой.

$$\rho = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dk_{ef}}{dT} dT = \int_{T_1}^{T_2} \frac{K_D}{T} dT = K_D \ln \left( \frac{T_2}{T_1} \right)$$

При однородном изменении топлива от  $T_1$  до  $T_2$



# Плотностной эффект реактивности

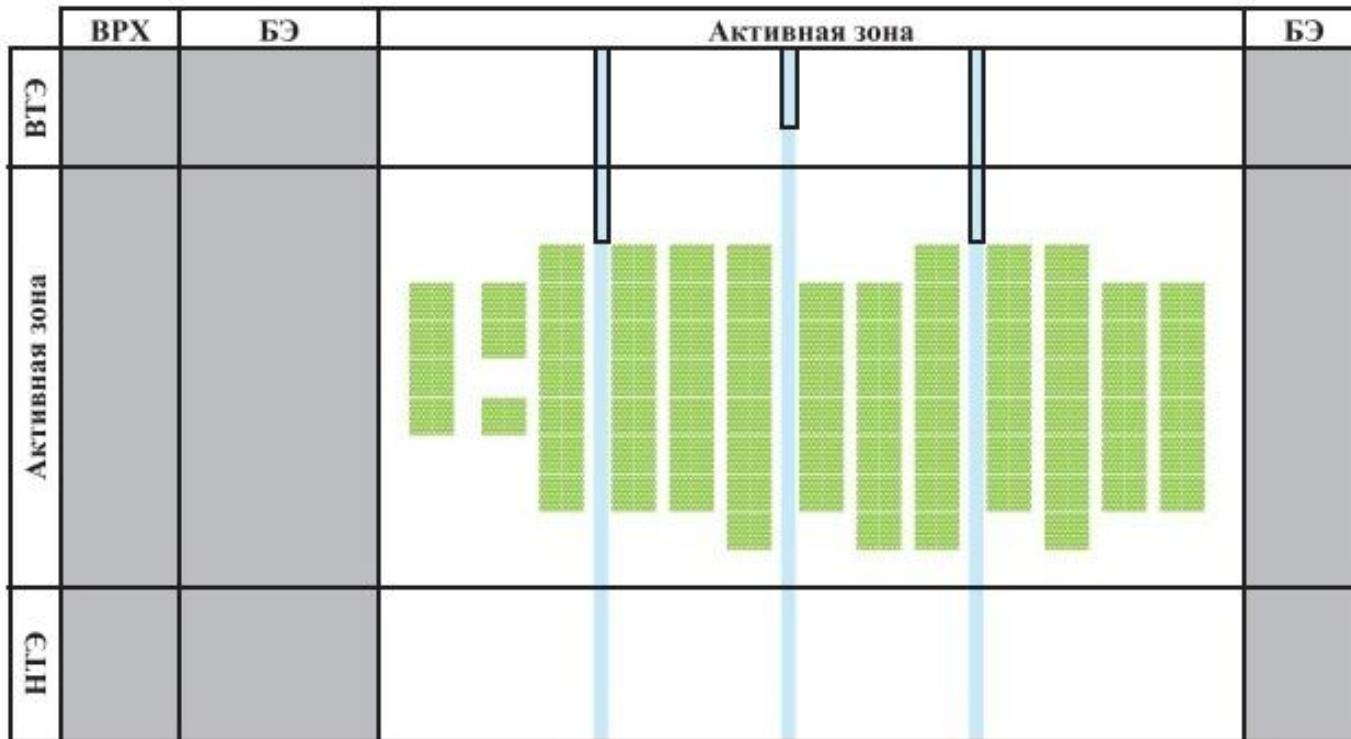
Рассчитывается исходя из изменения плотности теплоносителя соответственно изменению его температуры.

Коэффициент объемного расширения натрия (Т-температура теплоносителя)

$$\gamma_{\text{Na}} = 951,4 - 0,2392T$$

# Пустотный эффект реактивности

НПЭР при удалении из а.з.

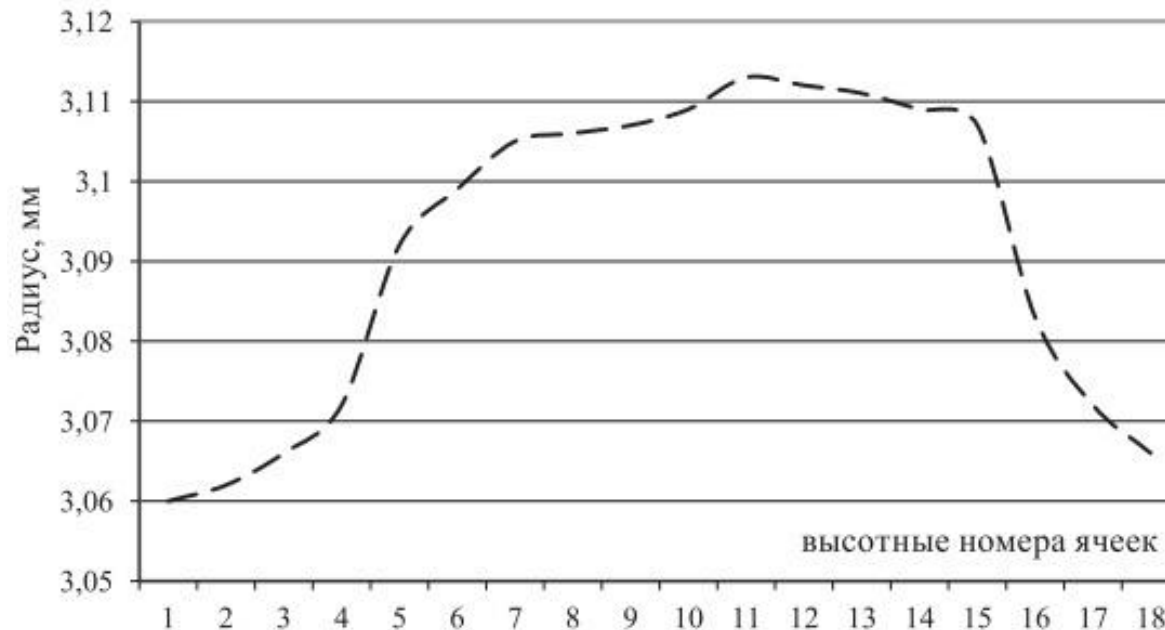


# Температурное расширение активной зоны

Деформации могут привести к изгибу ТВЭЛов и др. конструкций

Расширение: радиальное и аксиальное

Изменение внешнего радиуса топливной таблетки по высоте твэла



# Мощностной эффект реактивности

МКР – отношение приращения реактивности к приращению мощности реактора.

МЭР зависит от тех же параметров, что и ТЭР. Однако при увеличении мощности в реакторе создается неравномерное распределение температур.

МКР зависит от мощности реактора, глубины выгорания, расход теплоносителя, положения органов СУЗ, входной температуре теплоносителя.

Таблица 5.2. Мощностной эффект и его составляющая от радиальной температурной деформации,  $\% \Delta k / k$

Характеристика	EBR-II	БОР-60	БН-600	БН-800
Полный мощностной эффект	-0,26	-0,58	-0,8	-0,76
Составляющая от радиальной деформации	+(0,02—0,07)	-(0—0,18)	-0,09	-0,08

# Барометрический эффект

- изменение реактивности из-за изменения давления в теплоносителе

(при наличии пузырьков газа в натрии может давать видимый эффект)

# Гидродинамический эффект

- связан с изменением скорости движения теплоносителя

При увеличении скорости протекания теплоносителя создаются силы, стремящиеся «развалить» а.з., что создает отрицательный эффект.



# Изменение реактивности из-за выгорания топлива

В стационарно работающем реакторе реактивность изменяется за счет выгорания ядер (потеря реактивности) и образованием новых делящихся ядер (увеличение реактивности)

$KVA=1$  (сколько сгорело ядер, столько же и наработалось)

