



Томский политехнический университет

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА: НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ

Игорь Владимирович Шаманин



ДЕЛЕНИЕ ЯДРА

- Деление ядра — процесс расщепления атомного ядра на два ядра с близкими массами, называемых осколками деления. В результате деления могут возникать и другие продукты реакции: лёгкие ядра (в основном альфа-частицы), нейтроны и гамма-кванты.
- Деление бывает спонтанным (самопроизвольным) и вынужденным (в результате взаимодействия с другими частицами, прежде всего, с нейтронами).
- Деление тяжёлых ядер — экзотермический процесс, в результате которой высвобождается большое количество энергии в виде кинетической энергии продуктов реакции, а также излучения.
- Деление ядер служит источником энергии в ядерных реакторах и ядерном оружии



ВЕРОЯТНОСТЬ РЕАКЦИИ ДЕЛЕНИЯ И ЭНЕРГИЯ НЕЙТРОНА

Что влияет на микроскопическое сечение реакций (вероятность реакций)?

Основной фактор, это энергия нейтрона, которую он имеет перед столкновением с ядром.

Нейтроны, сталкивающиеся с ядрами, обладают различной энергией.

В физике ядерного реактора принята единица измерения энергии –

мегаэлектрон-вольт [МэВ]

$1 \text{ МэВ} = 1.602 \times 10^{-13} \text{ Дж}$ ($1 \text{ МэВ} = 1\ 000\ 000 \text{ эВ}$).

В зависимости от энергии принято делить нейтроны на группы:

тепловые

энергия движения которых соизмерима энергией теплового движения атомов среды **$E < 0.5 \text{ эВ}$** .

замедляющиеся

энергия которых лежит в диапазоне от **0.5 эВ** до **2000 эВ** .

быстрые

$E > 2000 \text{ эВ}$.



ДЕЛЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ЯДЕР

Деление под действием
тепловых нейтронов

Нечётно-чётные ядра
 ${}_1p^1(\text{чёт.}) {}_0n^1(\text{нечёт.})$

Деление под действием
быстрых нейтронов

Чётно-чётные ядра
 ${}_1p^1(\text{чёт.}) {}_0n^1(\text{чёт.})$

Спонтанное деление

Чётно-чётные ядра

${}_{92}\text{U}^{233}$, ${}_{92}\text{U}^{235}$, ${}_{94}\text{Pu}^{239}$ – нечётно-чётные ядра

${}_{92}\text{U}^{238}$ – чётно-чётное ядро



ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР U^{235} И U^{238}

Основным видом топлива в ядерных реакторах является смесь изотопов урана
Изотоп U^{235} – ядерное горючее реакторов на тепловых нейтронах

Изотоп U^{238} – сырьевой (воспроизводящий) нуклид (изотоп)

В результате исследований было установлено, что деление изотопа урана ^{238}U возможно только нейтронами с энергией большей 1 МэВ, но вероятность деления (сечение реакции деления), при таких энергиях в 4 раза меньше чем захвата или рассеяния.

Другими словами из 5 нейтронов столкнувшихся с ядром ^{238}U , только 1 вызовет деление.

При меньших энергиях возможны только радиационный захват или рассеяние. Причем при энергиях 7 эВ - 200 эВ сечение захвата очень сильно возрастает (Резонансный захват). Нейтроны поглощаются без деления и выбывают из цепной реакции.

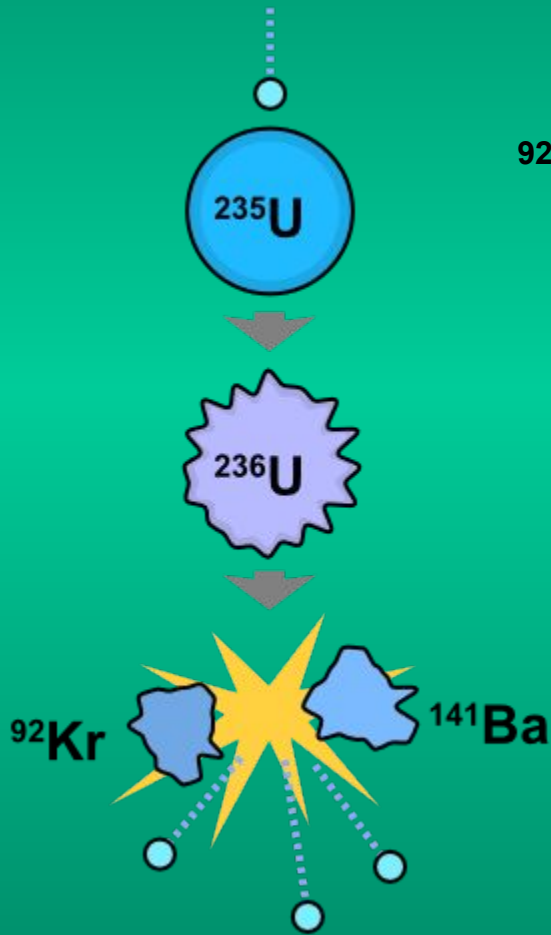
Для изотопа урана ^{235}U деление возможно нейтронами любых энергий, однако вероятность деления (сечение реакции деления) для тепловых нейтронов в 100 раз больше чем для быстрых нейтронов с энергией 5 - 6 МэВ.



ДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМ НЕЙТРОНОМ

^{236}U – «составное» ядро
(энергия возбуждения ядра велика)

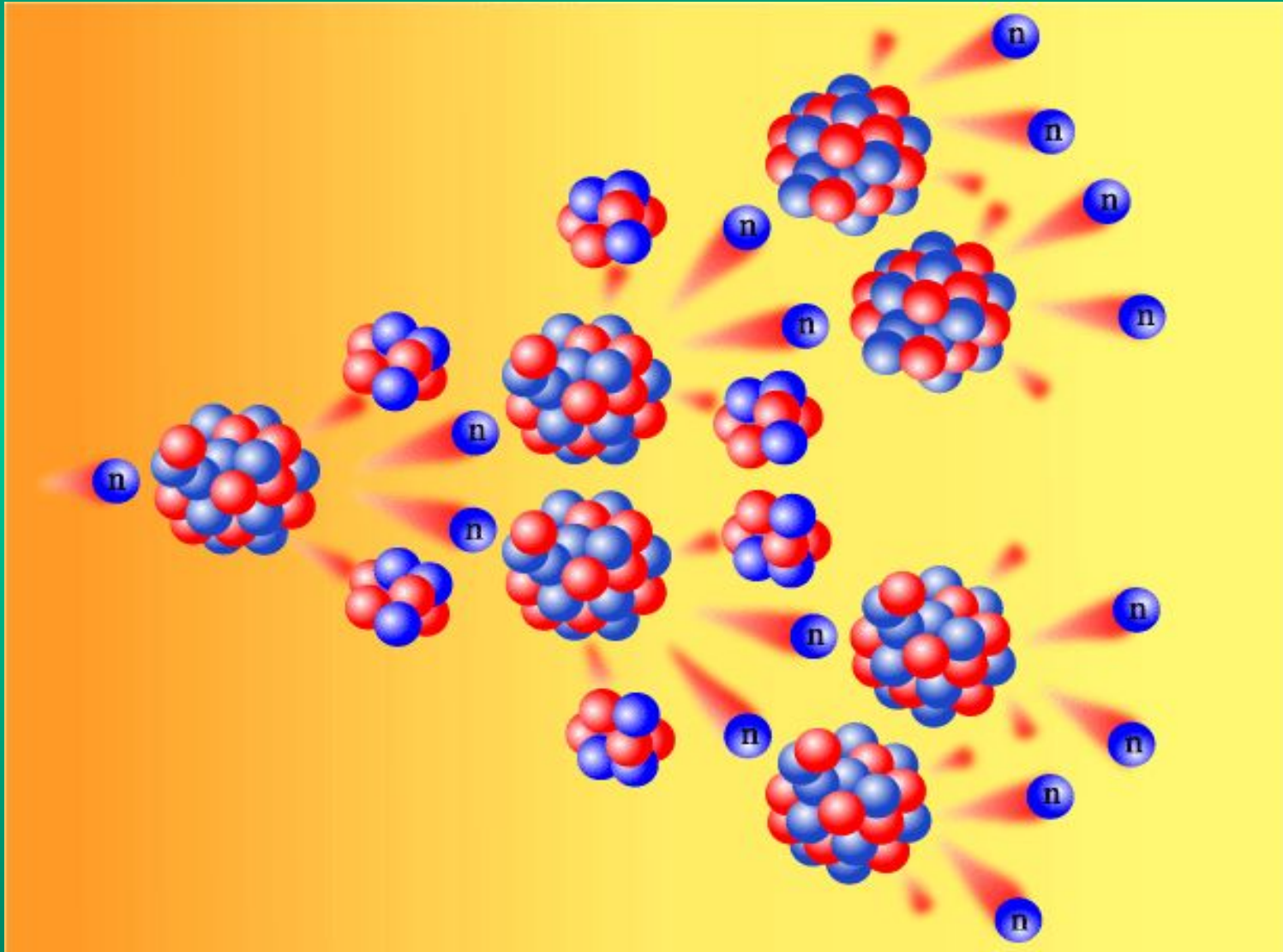
^{92}Kr и ^{141}Ba – осколки (продукты) деления
(высокоэнергетические тяжелые заряженные частицы)



Ядро	U^{233}	U^{235}	Pu^{239}
$\bar{\nu}_f$	2,49	2,42	2,87
$E_f, \text{МэВ}$	198,5	204,3	210,3
$E_{\text{оск}}, \text{МэВ}$	160,5	166,0	171,5

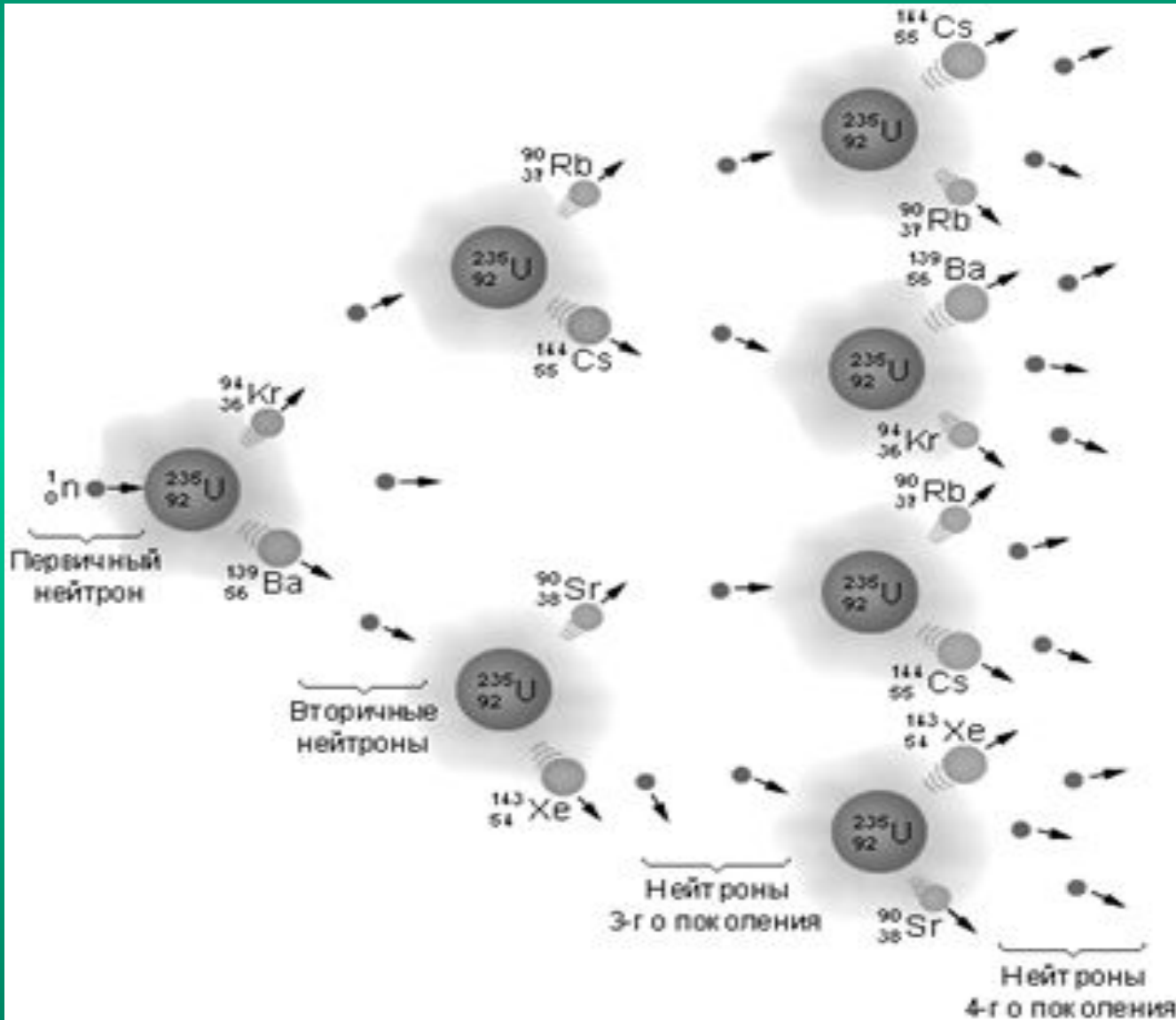


ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ ДЕЛЕНИЯ





ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР U^{235}





УПРАВЛЕНИЕ ЯДЕРНЫМ РЕАКТОРОМ (коэффициент размножения)

Коэффициент размножения нейтронов k — отношение числа нейтронов последующего поколения к числу в предшествующем поколении во всём объеме размножающей нейтроны среды (активной зоны ядерного реактора). В общем случае, этот коэффициент может быть найден с помощью **формулы четырёх сомножителей**:

$$k_0 = \mu\phi\theta\eta$$

, где

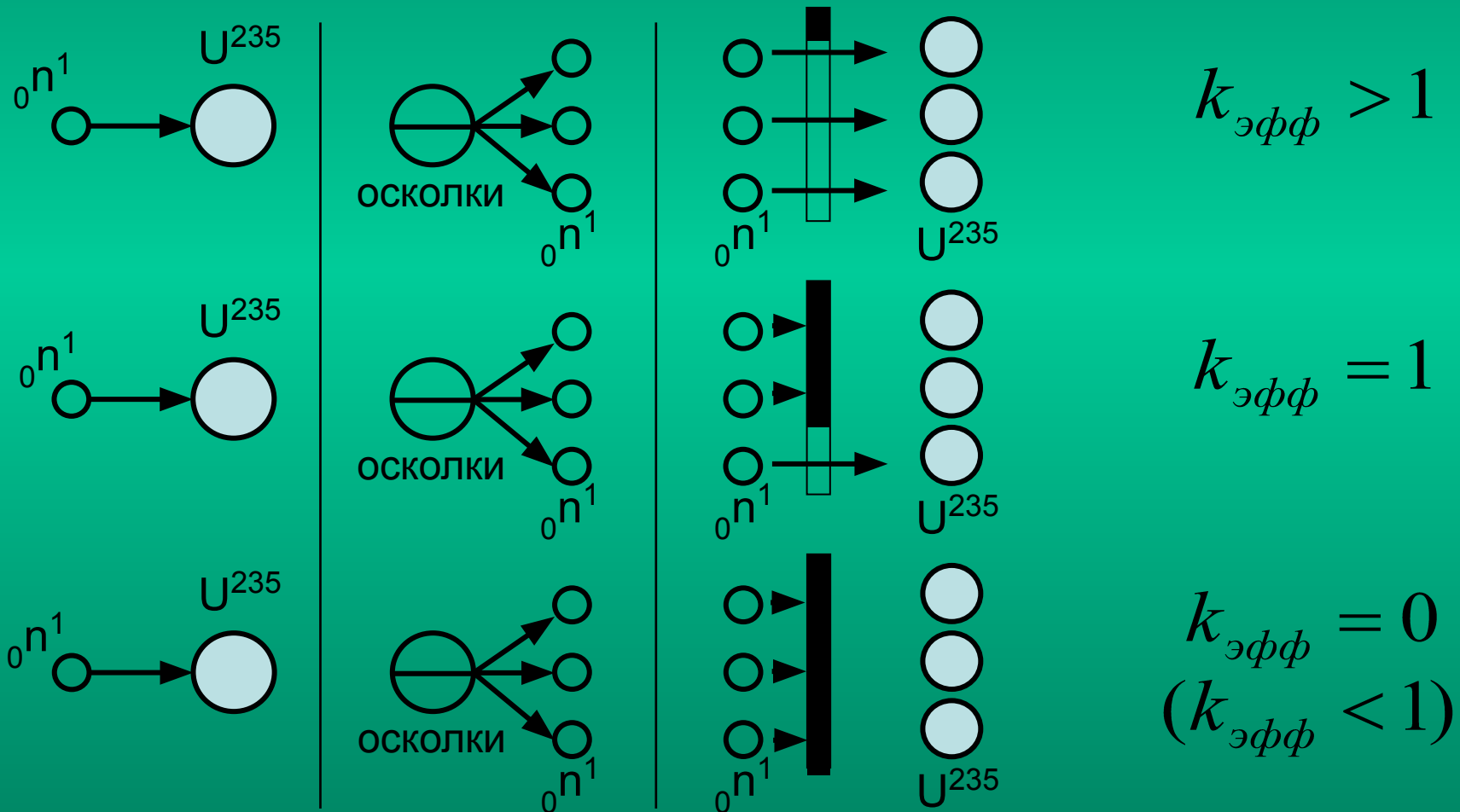
- k_0 — коэффициент размножения в бесконечной среде;
- μ — Коэффициент размножения на быстрых нейтронах;
- ϕ — Вероятность избежать резонансного захвата;
- θ — Коэффициент использования тепловых нейтронов;
- η — Выход нейтронов на одно поглощение.



УПРАВЛЕНИЕ ЯДЕРНЫМ РЕАКТОРОМ (стержни управления)

Эффективный к-нт размножения $k_{эфф} = k_0 \cdot P$

P – утечка нейтронов из активной зоны конечных размеров





ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ ДЕЛЕНИЯ (возможность осуществления)

Реакция деления в смеси изотопов урана ^{238}U и ^{235}U .

В отдельных актах деления энергия рождающихся нейтронов может принимать значения от 100 эВ до 10 МэВ.

Средняя энергия нейтронов деления составляет около 2 МэВ.

Нейтроны с такой энергией, могут разделить изотопы ^{238}U , но на 1 нейтрон, вызвавший деление ^{238}U , придется четыре захваченных без деления

(поглощение без деления в 4 раза более вероятно, чем поглощение с делением)

в результате деления возникает в среднем 2,5 нейтрона следовательно, коэффициент размножения $K_{эф} = (4+1)/2.5 = 0.5$ - реакция затухающая.

Можно сделать вывод, что при наличии только одного изотопа ^{238}U осуществить цепную реакцию невозможно.



ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ ДЕЛЕНИЯ (рассеяние нейтронов)

Средняя энергия нейтронов деления составляет около 2 МэВ

В результате рассеяния на **тяжелых** ядрах они потеряют часть своей энергии (замедлятся)

Чем ниже их энергия, тем больше эффективное сечение деления для изотопа ^{235}U

Однако в процессе замедления в какой-то момент времени энергия нейтронов будет находиться в диапазоне 7 эВ - 200 эВ, где сечение захвата для ядер ^{238}U очень сильно возрастает (резонансное поглощение).

Поэтому до тепловой энергии, где вероятность деления ^{235}U максимальна, сможет замедлиться лишь малая часть нейтронов.

В естественном уране количество изотопа ^{235}U составляет 0.7 % остальное ^{238}U



ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ ДЕЛЕНИЯ (способы осуществления)

Способ 1 - Для осуществления ЦРД необходимо произвести обогащение - увеличить концентрацию изотопа ^{235}U таким образом, чтобы нейтроны после рождения сталкивались с ядрами ^{235}U чаще, чем с ядрами ^{238}U . В этом случае мы можем осуществить цепную реакцию деления на быстрых нейтронах в тяжелой замедляющей среде.

Способ 2 - Использование замедлителя, например воды. Если нейтрон после рождения столкнется с ядром водорода, то он “сбросит” часть своей энергии, после нескольких столкновений (около 14) его энергия снизится до уровня тепловой, где вероятность деления ^{235}U максимальна.

В этом случае мы можем получить цепную реакцию в смеси изотопов урана с меньшим обогащением по ^{235}U .



ТЕПЛОВЫЕ И БЫСТРЫЕ РЕАКТОРЫ

Реакторы, в которых большинство актов деления вызвано быстрыми нейтронами, называют реакторами **на быстрых нейтронах**.

Реакторы, в которых большинство актов деления вызвано тепловыми нейтронами называют реакторами **на тепловых нейтронах**. В таких реакторах обязательно используется замедлитель.

В качестве замедлителей обычно используют:

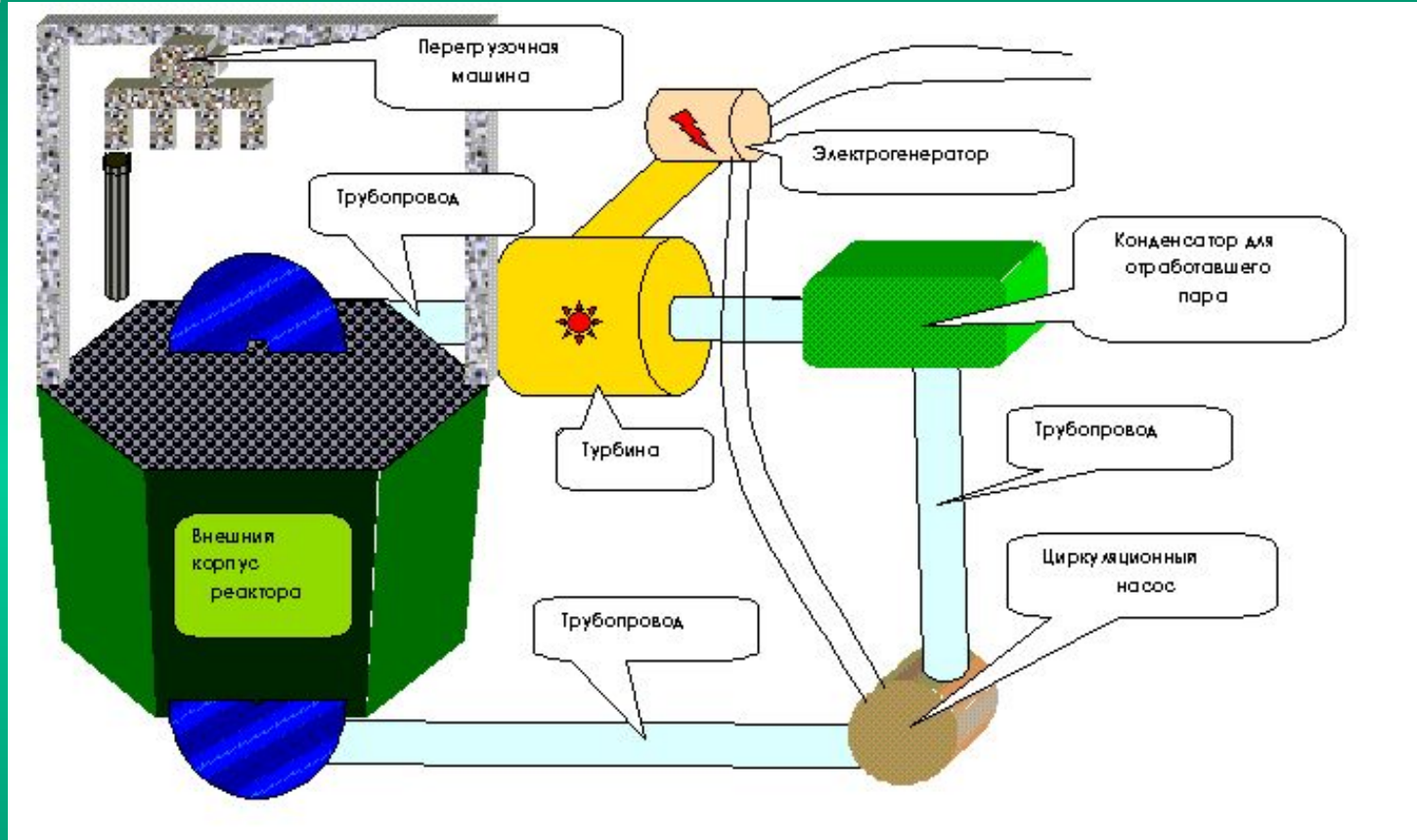
Воду (H_2O) - реакторы типа PWR, ВВЭР.

Тяжелую воду (D_2O) - реакторы типа CANDU

Графит - реакторы типа РБМК, Magnox, HTGR.



АЭС НА БАЗЕ КАНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА



Активная зона («графитовая кладка»): высота 8м; диаметр 12м.

Замедлитель – графит.

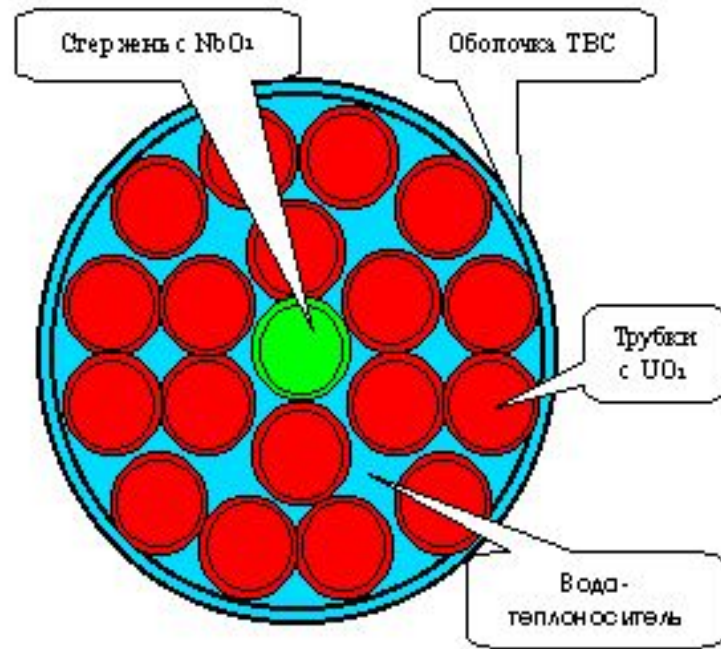
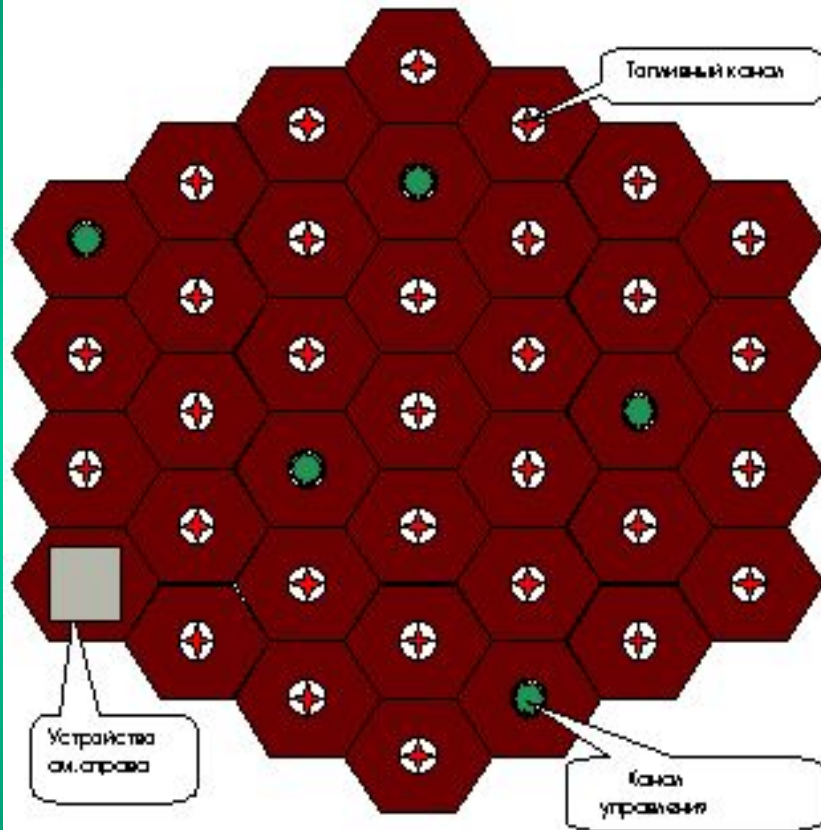
РБМК – одноконтурная схема; теплоноситель-вода;

кипение воды на выходе из активной зоны (наверху)

В активной зоне РБМК-1000 около 5 тонн U^{235} в составе топлива.



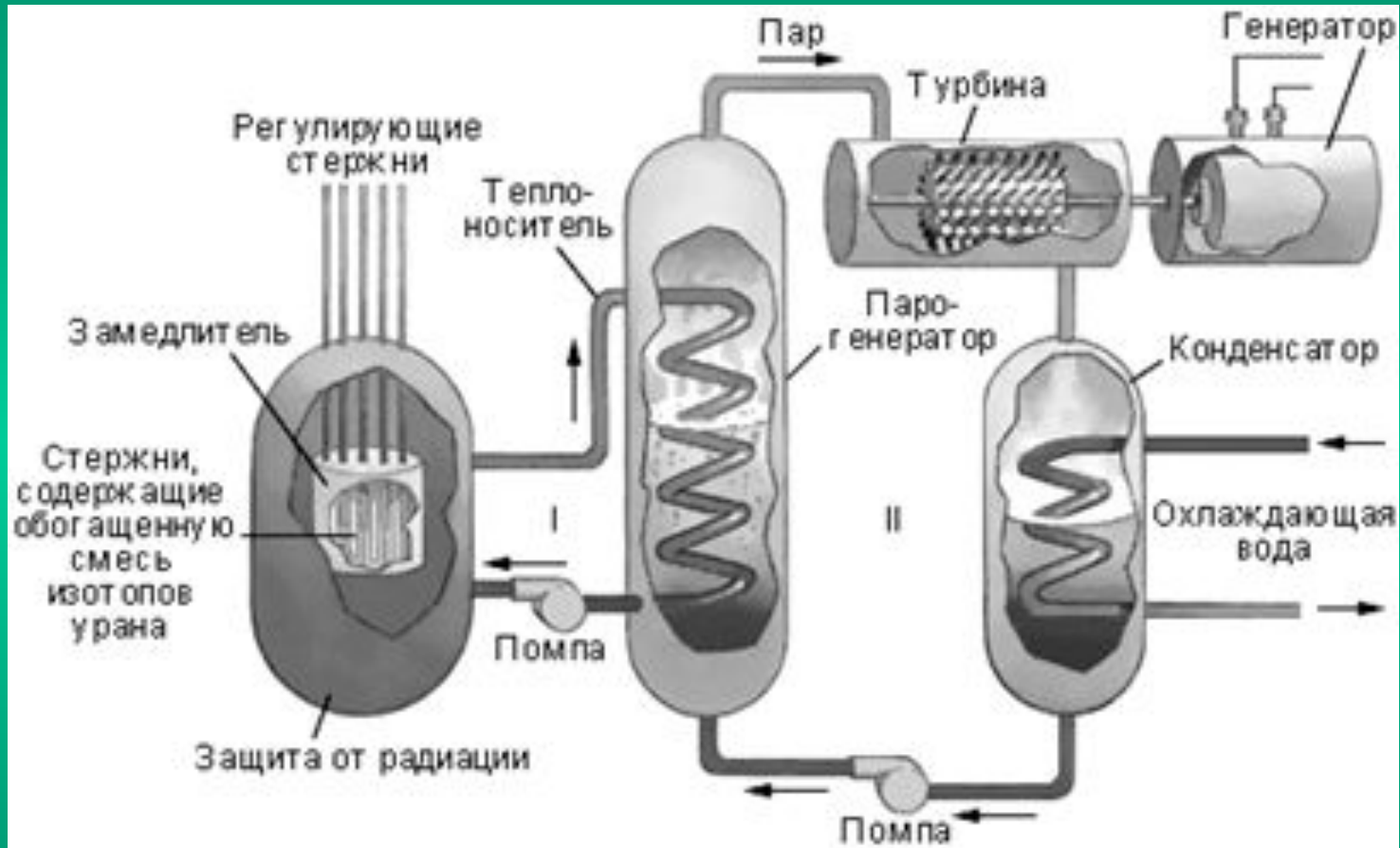
АКТИВНАЯ ЗОНА КАНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА



Слева - фрагмент активной зоны. Вверху - одна топливная кассета. Вид сверху.



АЭС НА БАЗЕ КОРПУСНОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

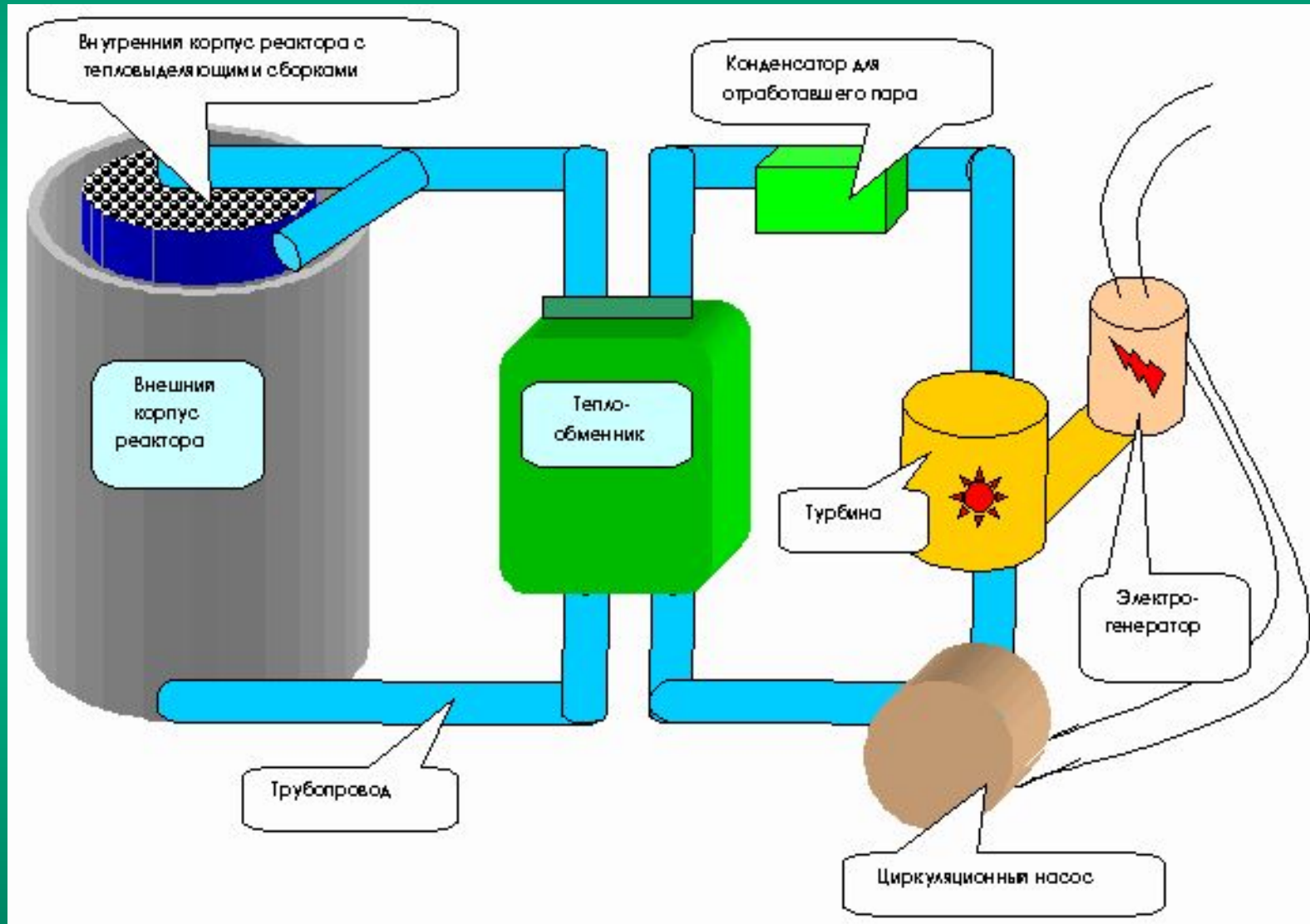


Двухконтурная схема

В случае если теплоноситель – вода, давление в 1-ом контуре велико (нет кипения)
Реакторы **ВВЭР, PWR**

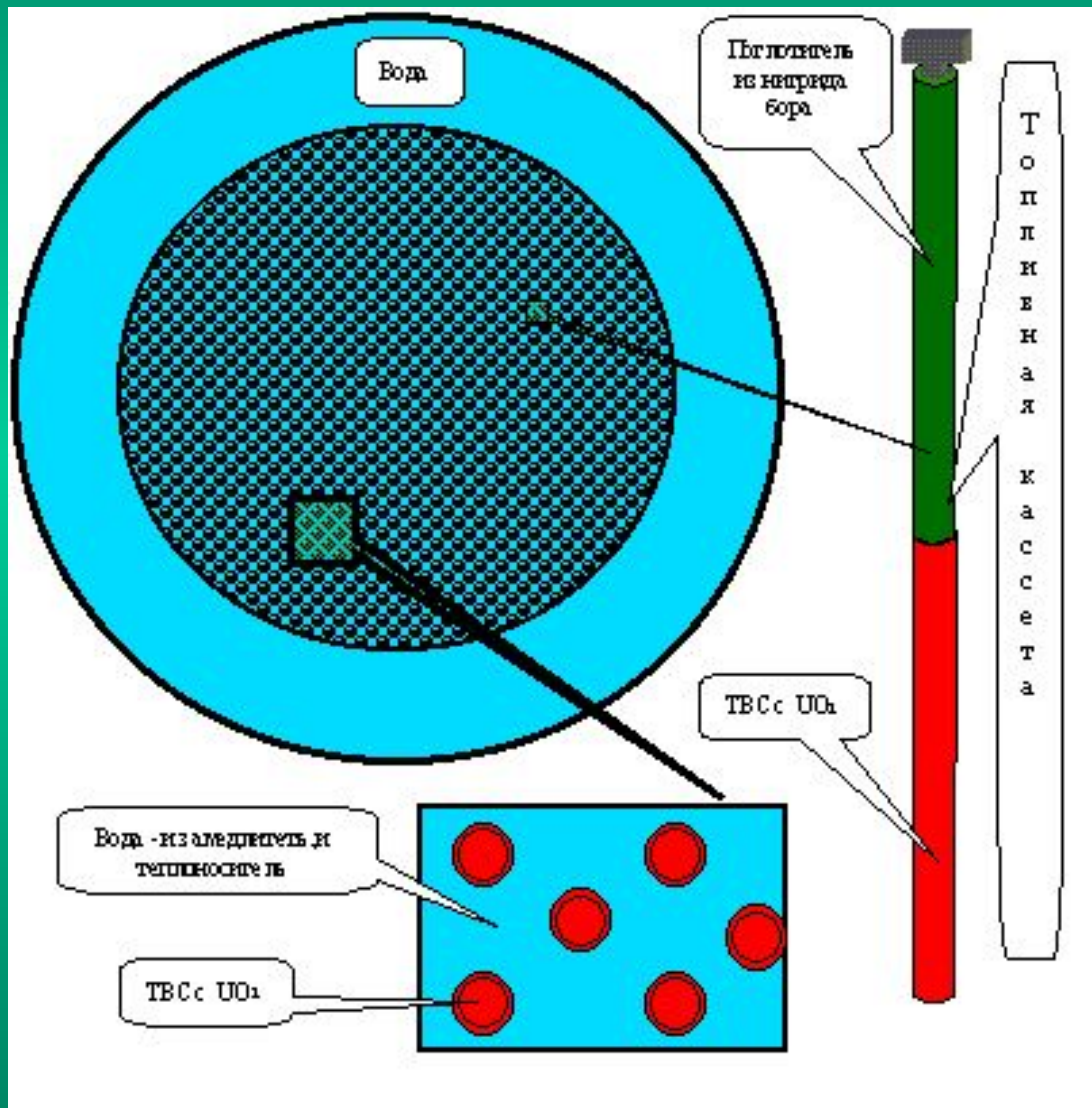


АЭС НА БАЗЕ ВОДО-ВОДЯНОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА





АКТИВНАЯ ЗОНА РЕАКТОРА ВВЭР



«Тесная решётка» ТВЭлов в ТВС

Вода – замедлитель и
(одновременно) теплоноситель



АКТИВНАЯ ЗОНА

Активная зона ядерного реактора — пространство, в котором происходит контролируемая цепная реакция деления ядер тяжёлых изотопов урана или плутония. В ходе цепной реакции выделяется энергия в виде нейтронного и γ -излучения, β -распада, кинетической энергии осколков деления.



СОСТАВ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

В состав активной зоны входят:

- **Ядерное топливо** (Основой ЯТ является ядерное горючее — делящееся вещество)
- **Замедлитель** (в реакторах на тепловых нейтронах)
- **Теплоноситель**, передающий образующееся тепло за пределы реактора, например для привода электрических генераторов.
- **Устройства системы управления и защиты реактора (СУЗ)**

Делящееся вещество может быть конструктивно отделено от замедлителя и других элементов активной зоны (**гетерогенный реактор**), либо быть в смеси с ними (**гомогенный реактор**).



ЗАМЕДЛИТЕЛЬ НЕЙТРОНОВ

В качестве замедлителя используют следующие вещества:

- Вода (Легководный реактор, Водо-водяной реактор);
- Тяжёлая вода;
- Графит (Графито-водный реактор, Графито-газовый реактор);
- Бериллий;
- Органические жидкости.

Физические свойства некоторых материалов замедлителей

Свойство	H ₂ O	D ₂ O	Be	C
Макроскопическое сечение поглощения Σ_a (тепловые), м ⁻¹	1,7	0,0080	0,13	0,036
Микроскопическое сечение рассеяния σ_s (надтепловые), б	49	10,6	5,9	4,7
ξ	0,927	0,510	0,209	0,158
$\xi \cdot \Sigma_s$ (надтепловые) / Σ_a (тепловые)	62	5860	138	166

Качество замедлителя уменьшается в порядке D₂O>C>Be>H₂O.



ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ

В качестве теплоносителя применяются:

- Вода (Легководный реактор, Водо-водяной реактор);
- Водяной пар (Кипящий реактор);
- Тяжёлая вода;
- Органические жидкости (Реактор с органическим теплоносителем);
- Гелий (Высокотемпературный реактор);
- Углекислый газ;
- Жидкие металлы (преимущественно натрий) (Реактор с жидкометаллическим теплоносителем, в т.ч. реакторы на быстрых нейтронах).



ОТРАЖАТЕЛЬ

Снаружи активная зона окружается отражателем для нейтронов, состоящим, как правило, из того же вещества, что и замедлитель.

Наличие отражателя необходимо для повышения эффективности использования ядерного топлива и “улучшения” других нейтронно-физических параметров реактора, так как отражатель возвращает назад в зону часть вылетевших из активной зоны нейтронов.

Отражатель уменьшает утечку нейтронов из активной зоны
(увеличивает $k_{эфф}$)



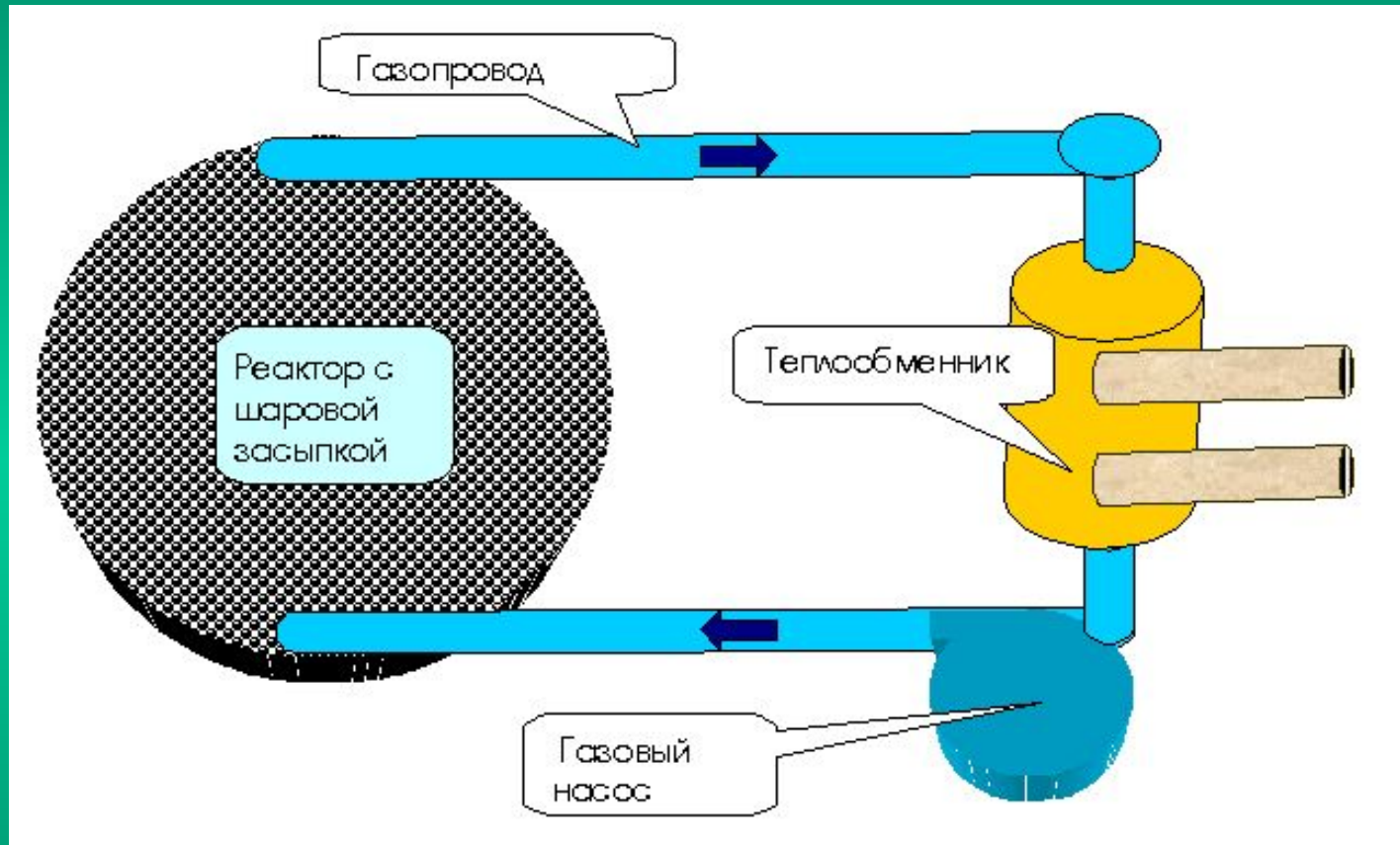
БАЛАНС ЭНЕРГИИ, ВЫДЕЛЯЮЩЕЙСЯ ПРИ ДЕЛЕНИИ ЯДЕР U^{235}

- Кинетическая энергия осколков деления 82.0%
- Кинетическая энергия нейтронов деления 2.5%
- Энергия излучения γ -квантов 5.3%
- Энергия излучения β -распада 3.4%
- Энергия излучения, возникающего при захвате нейтронов без деления 1.5%
- Энергия нейтрино 5.3%

Кинетическая энергия осколков деления ядер является основной частью выделяющейся энергии. Практически все осколки деления остаются в объеме таблеток ядерного топлива, теряя всю свою кинетическую энергию. Материал таблеток нагревается и эта энергия может быть отведена в виде тепла от тепловыделяющих элементов (ТВЭл) ядерного реактора.



РЕАКТОР С ШАРОВЫМИ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

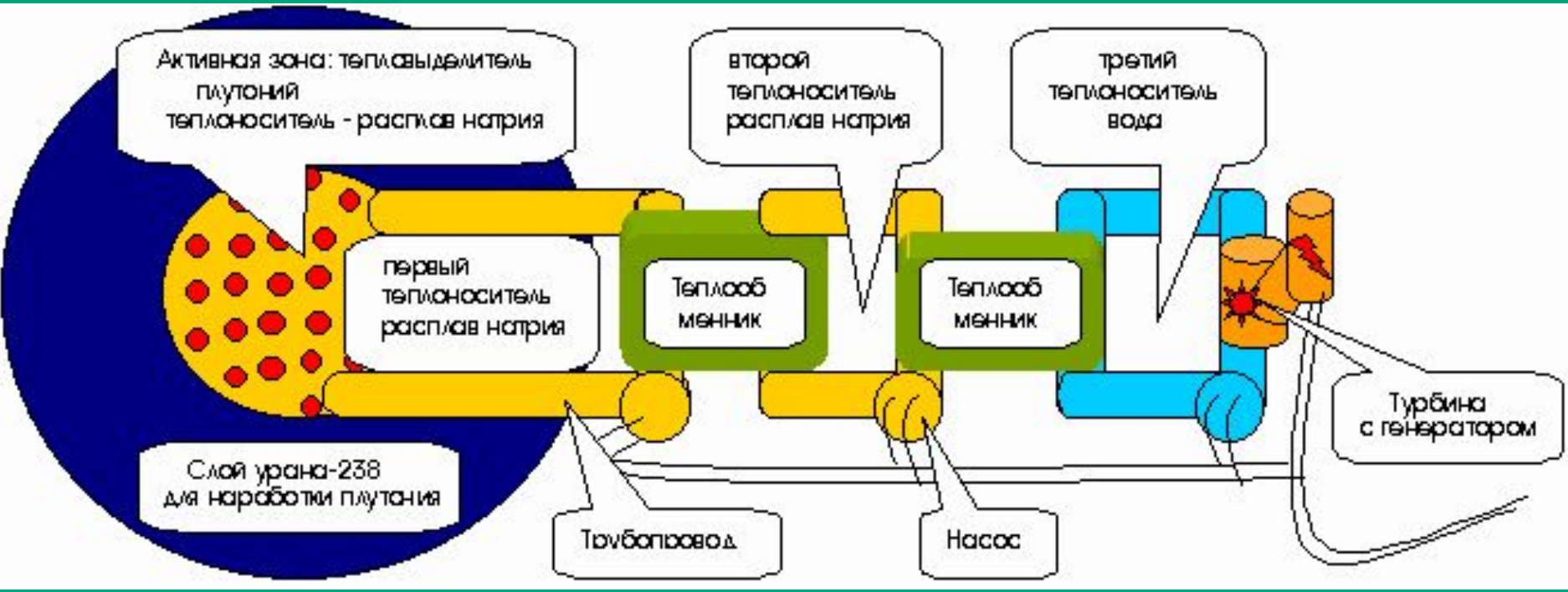


Теплоноситель – гелий (1000°C)

Топливо (Coated Particles) диспергировано в графитовую матрицу (шары $d=6\text{см}$)

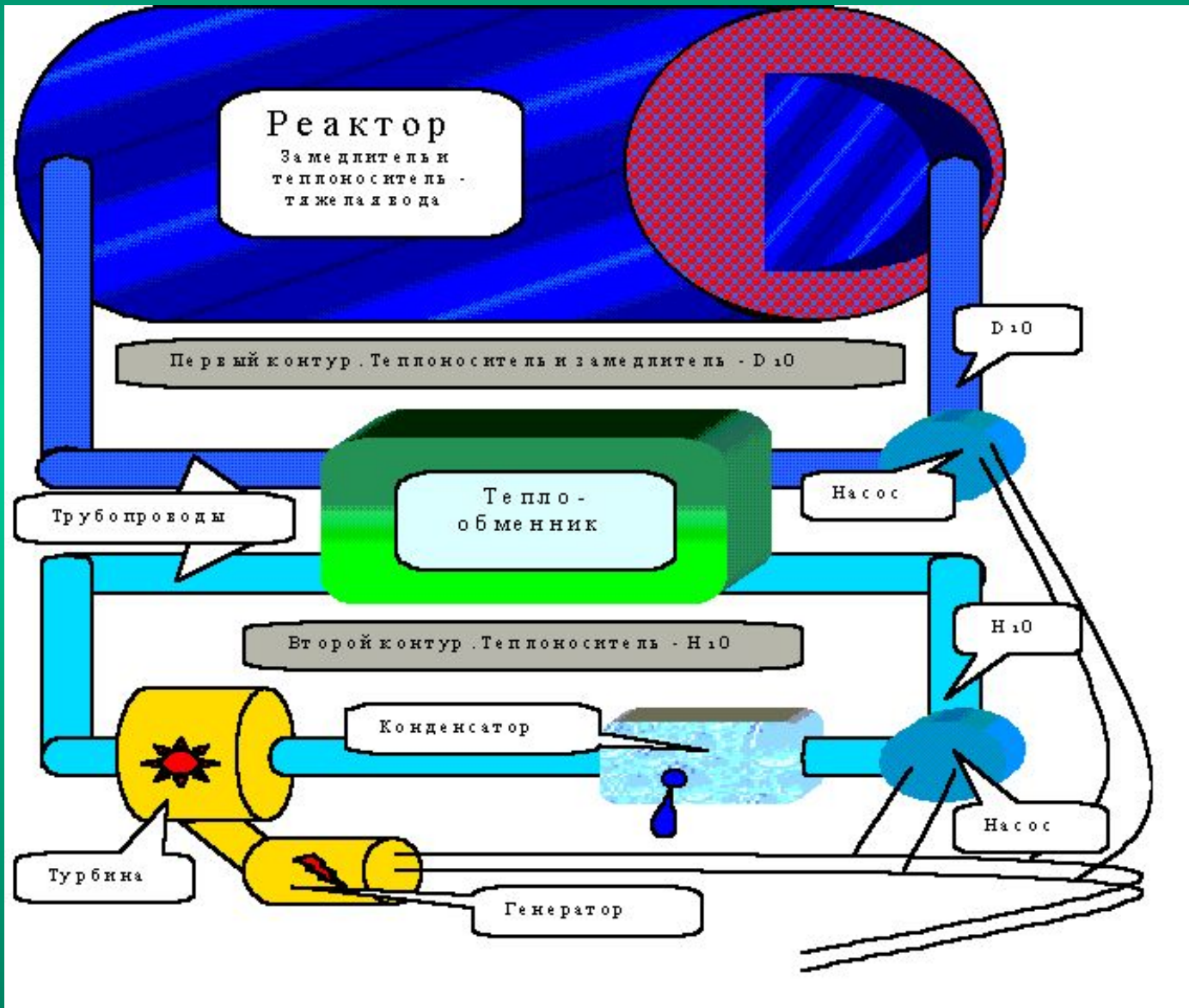


АЭС НА БАЗЕ «БЫСТРОГО» ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА



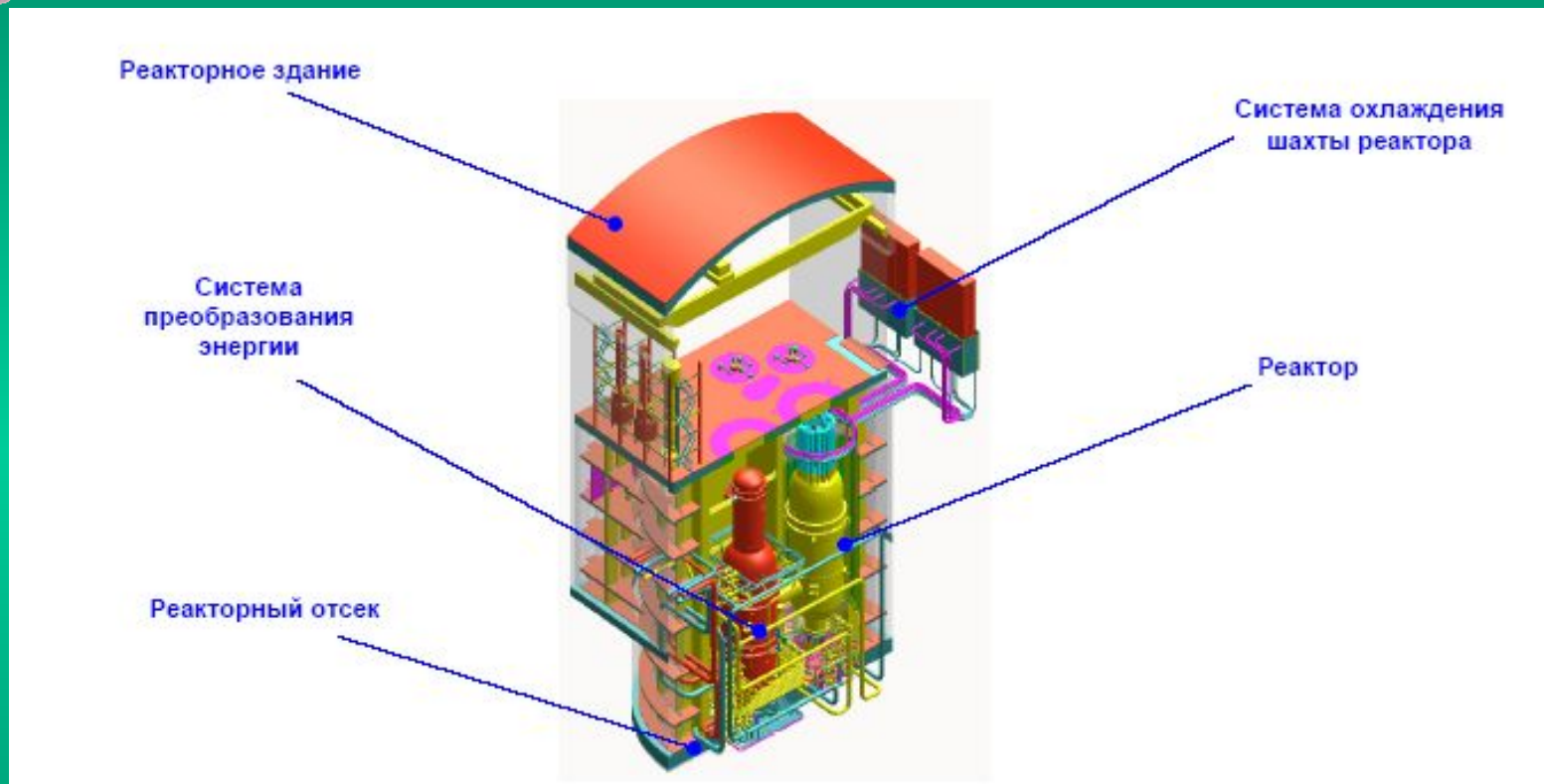


АЭС НА БАЗЕ ТЯЖЕЛОВОДНОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА





ЭНЕРГОБЛОК НА БАЗЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА С ГАЗОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ (ГЕЛИЙ)



Реакторы ГТ-МГР; МГР-Т

Назначение:

- Генерация электричества (газовая турбина)
- Генерация высокопотенциального тепла
- Генерация водорода (паровая конверсия природного газа)



ЦИРКУЛЯЦИЯ ГЕЛИЯ В ВТГР

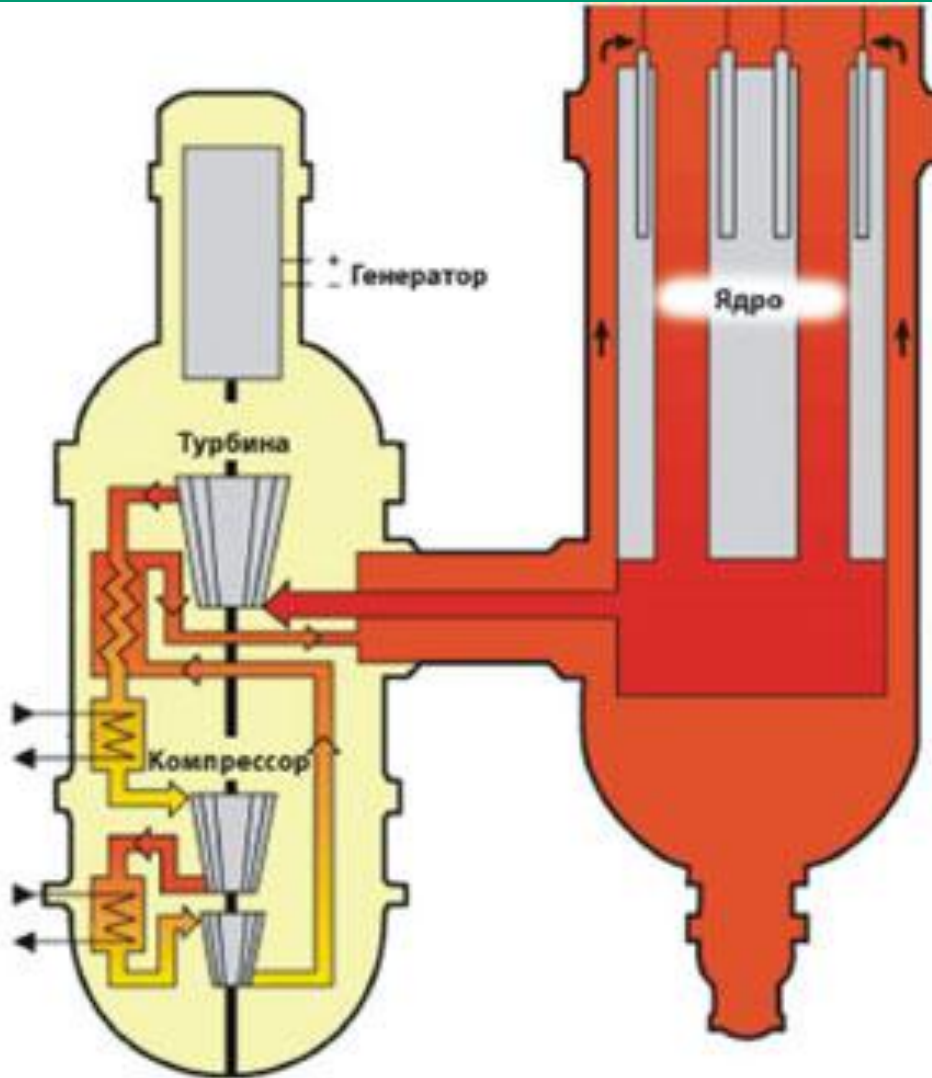
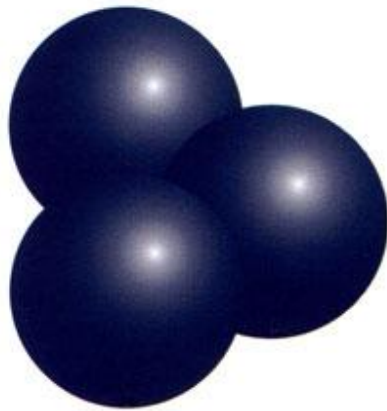


Схема циркуляцији (иллюстрация с сайта gt-mhr.ga.com)

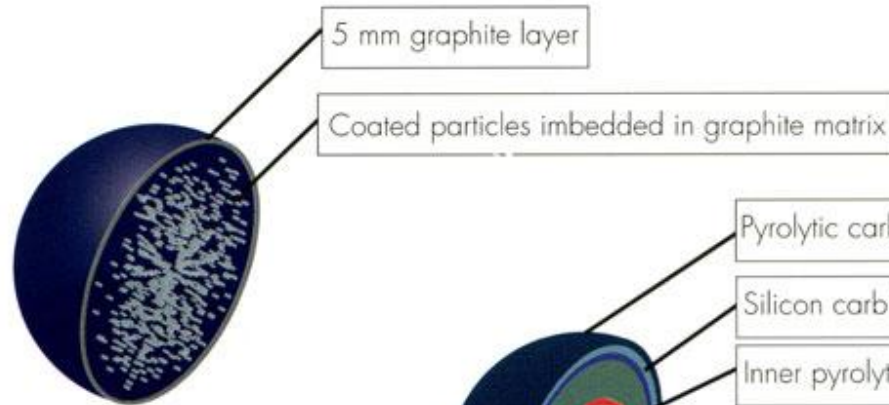


ШАРОВОЙ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИЙ ЭЛЕМЕНТ

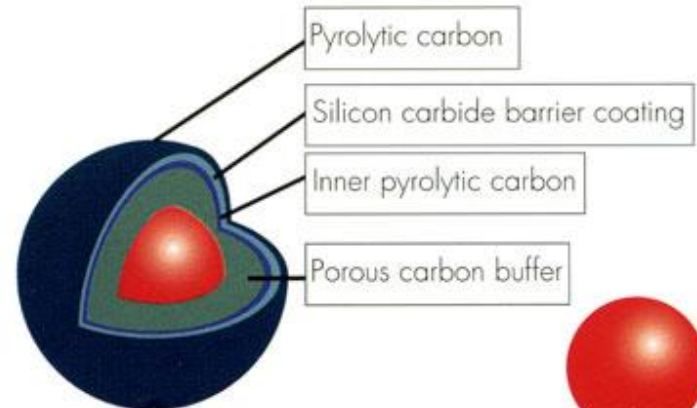
Fuel element design for PBMR.



Diameter 60 mm
Fuel sphere



Half section



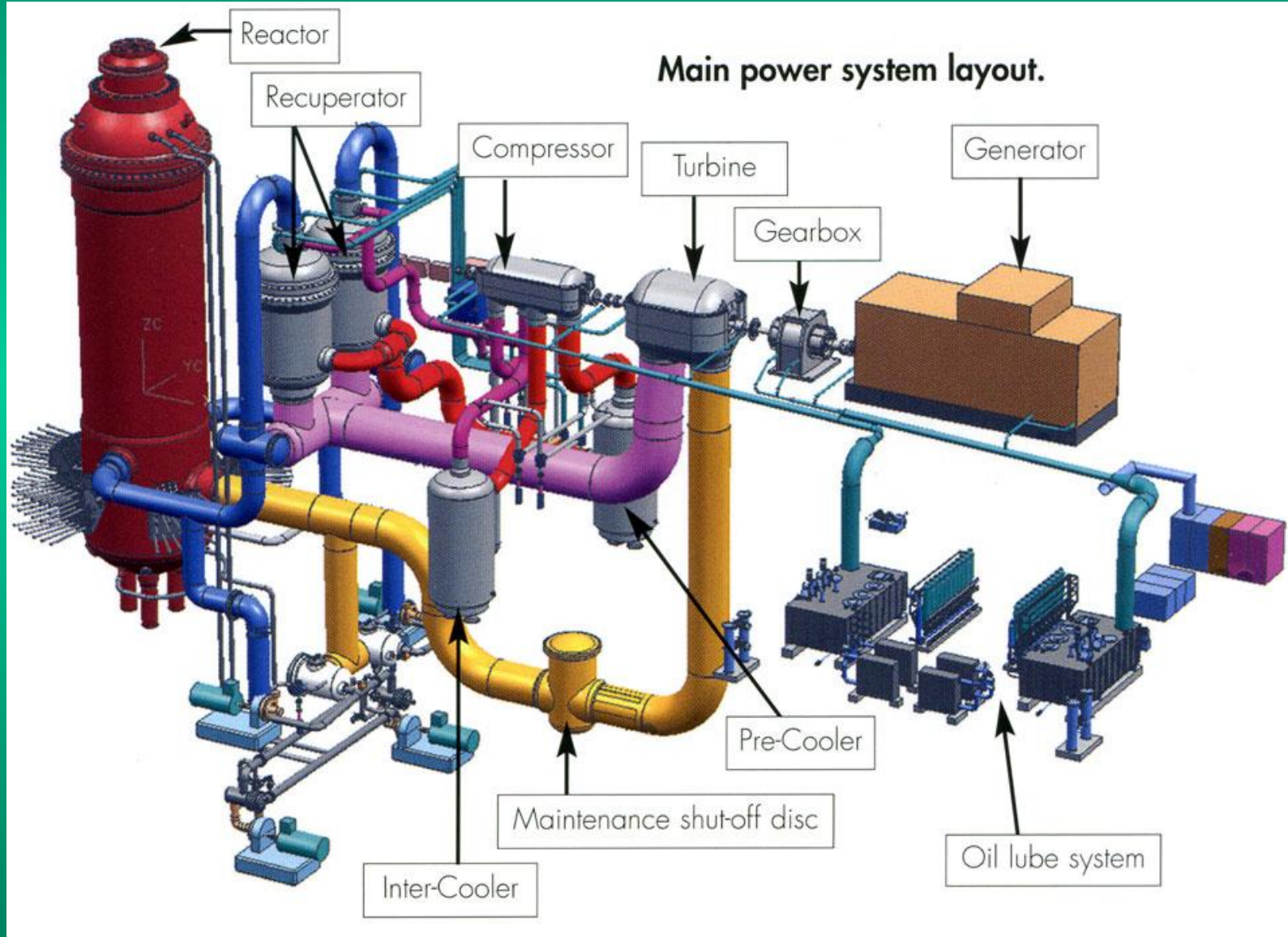
Diameter 0.92 mm
Coated particle



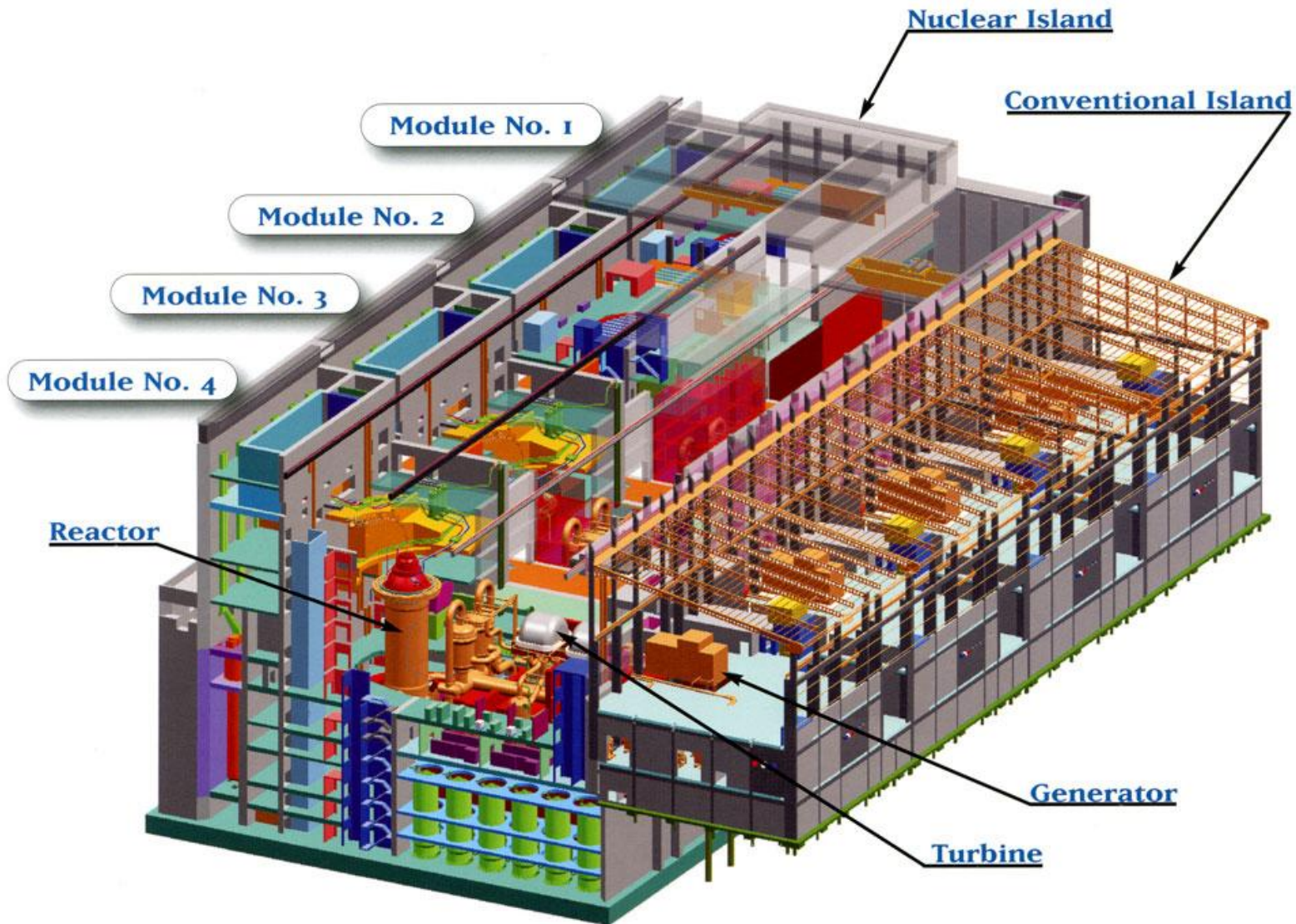
Diameter 0.5 mm
Uranium dioxide
Fuel



АЭС НА БАЗЕ PBMR



ЧЕТЫРЕХМОДУЛЬНАЯ КОНФИГУРАЦИЯ АЭС НА БАЗЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ





ПОЛУЧЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ВОДОРОДА

При окислении метана на никелевом катализаторе возможны следующие основные реакции:



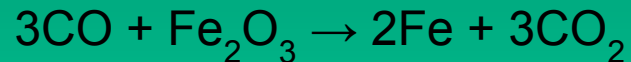
Высокотемпературную конверсию осуществляют в отсутствие катализаторов при температурах 1350—1450 °С и давлениях до 30—35 *кгс/см²*, или 3—3,5 *Мн/м²*; при этом происходит почти полное окисление метана и др. углеводородов кислородом до СО и Н₂.

СО и Н₂ легко разделяются.



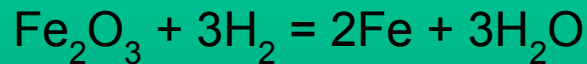
ПОЛУЧЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ВОДОРОДА

Восстановление железа из руды:



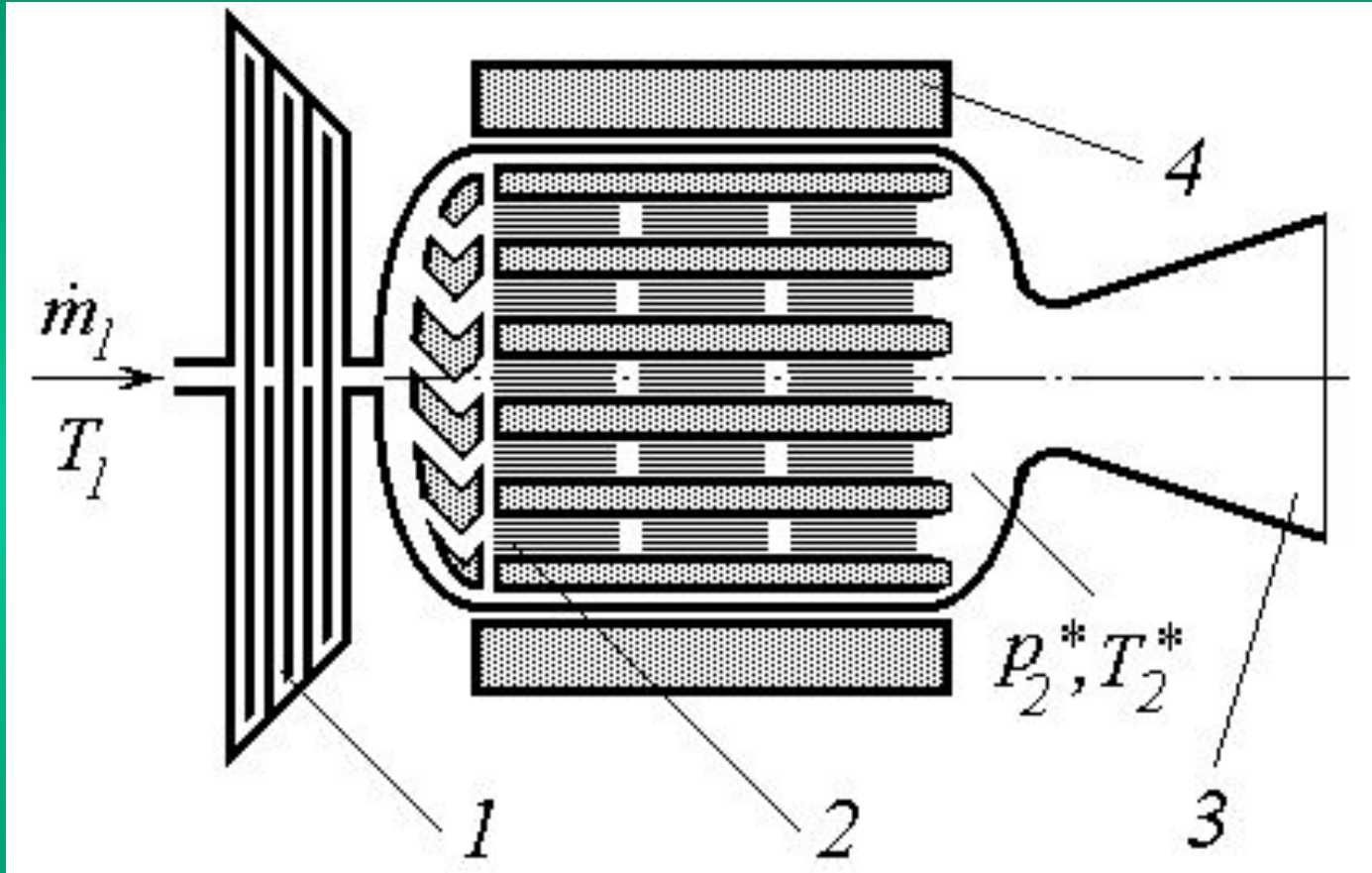
Водород способен восстанавливать многие металлы из их оксидов (такие, как железо (Fe), никель (Ni), свинец (Pb), вольфрам (W), медь (Cu) и др.).

Так, при нагревании до температуры 400-450°C и выше происходит восстановление железа (Fe) водородом из его любого оксида, например:





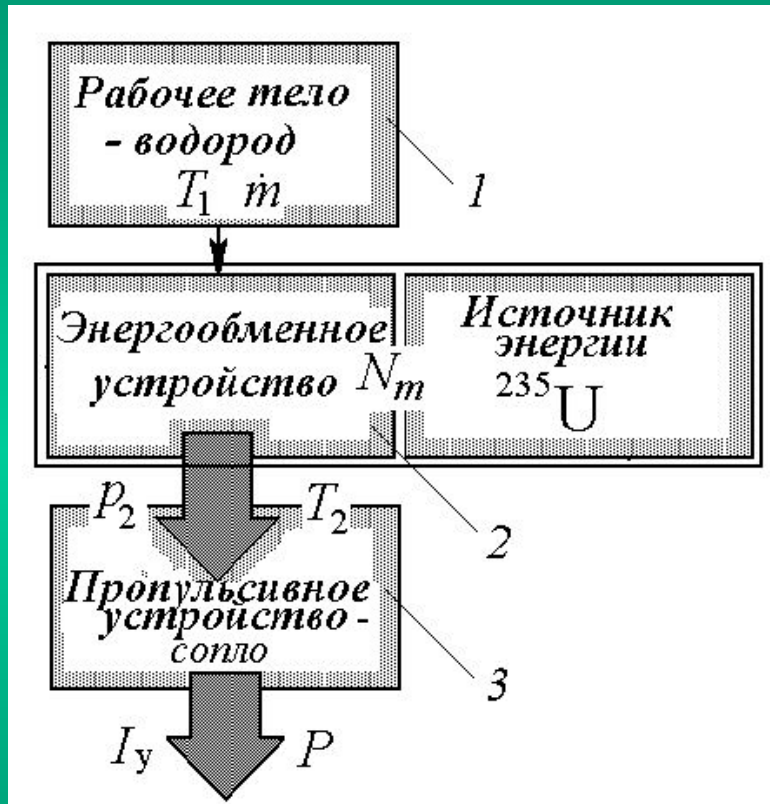
ЯДЕРНЫЙ РАКЕТНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ (МАРШЕВЫЙ)



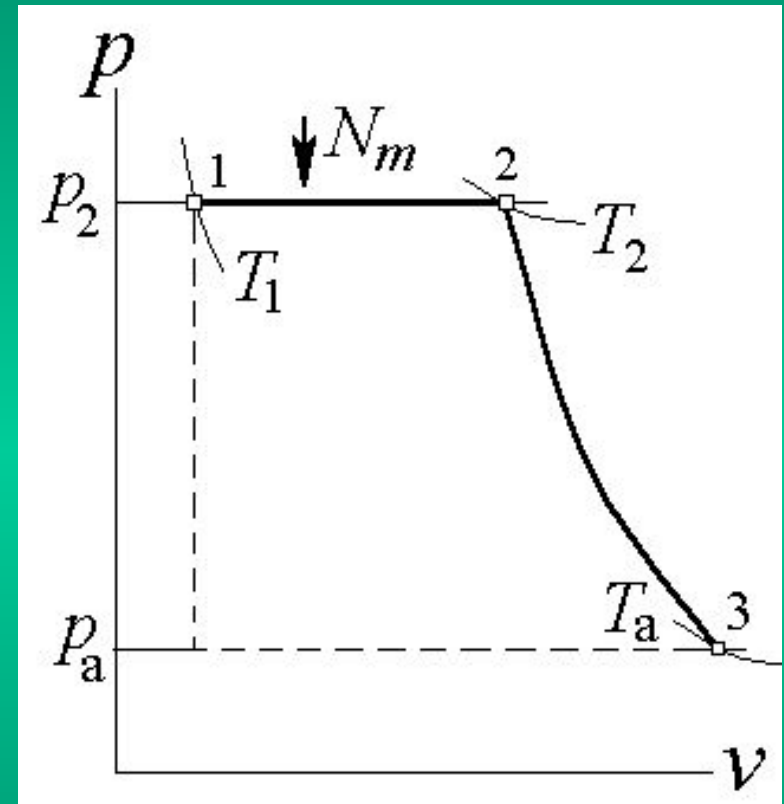
- 1- теньевая радиационная защита
- 2- активная зона
- 3- сопло
- 4- боковой отражатель нейтронов (Be)



ЯДЕРНЫЙ РАКЕТНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ (МАРШЕВЫЙ)



Составляющие



T-D цикл ЯРД

- 1- блок с рабочим телом (жидкий H_2)
- 2- ядерный реактор (канальная компоновка)
- 3- сопло



ИСПЫТАННЫЕ ЯРД



Nerva 3 (США)



Россия



ХИМИЧЕСКИЙ (ЖИДКОСТНОЙ) РАКЕТНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ И ЯДЕРНЫЙ РАКЕТНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Ракетные двигатели

а) химический б) ядерный

1- бак с жидким окислителем

2- бак с жидким горючим

3- бак с жидким водородом

4- насос

5- камера сгорания

6- сопло

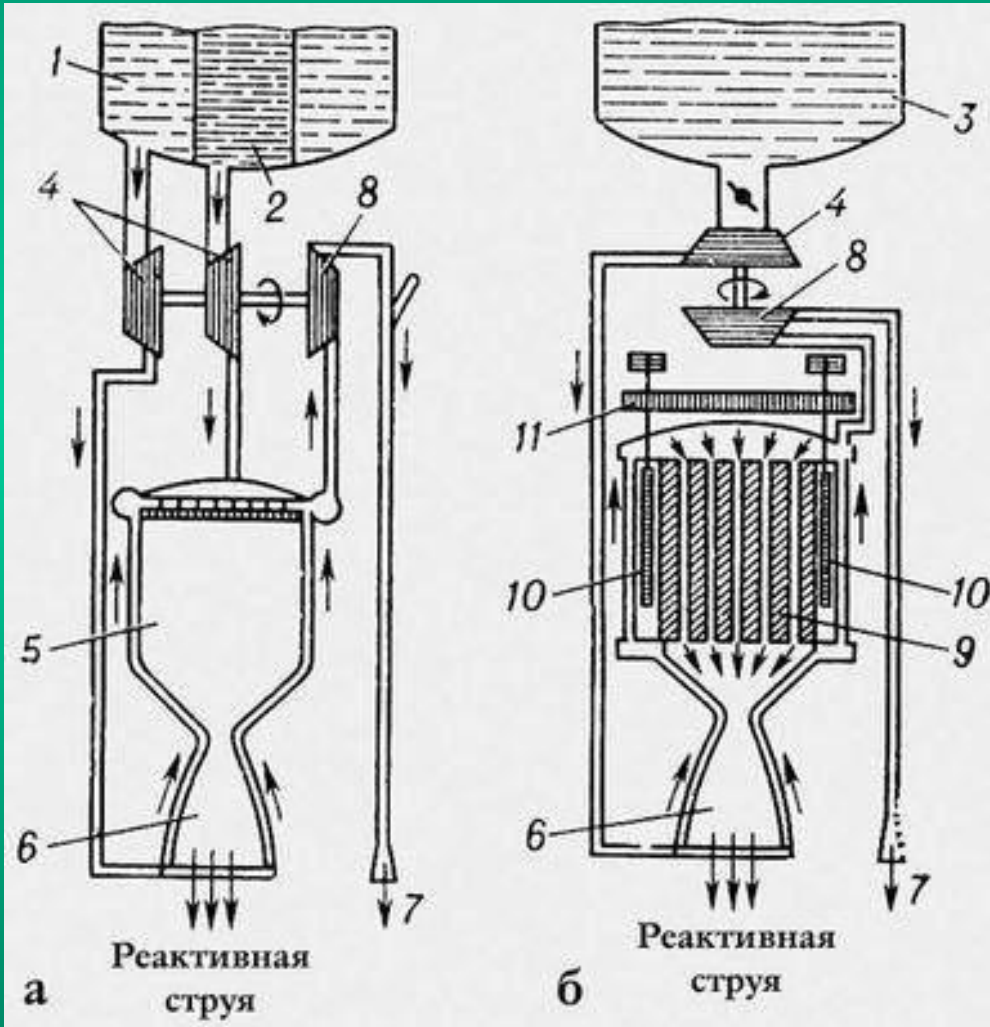
7- выхлоп газов из турбины

8- турбина

9- ТВЭЛы

10- стержни СУЗ

11- теневая защита





УРАНОВЫЙ И ТОРИЕВЫЙ ЯТЦ

U^{238} и Th^{232} – сырьевые (воспроизводящие) нуклиды

$U^{238} + U^{235}$ – ядерное топливо

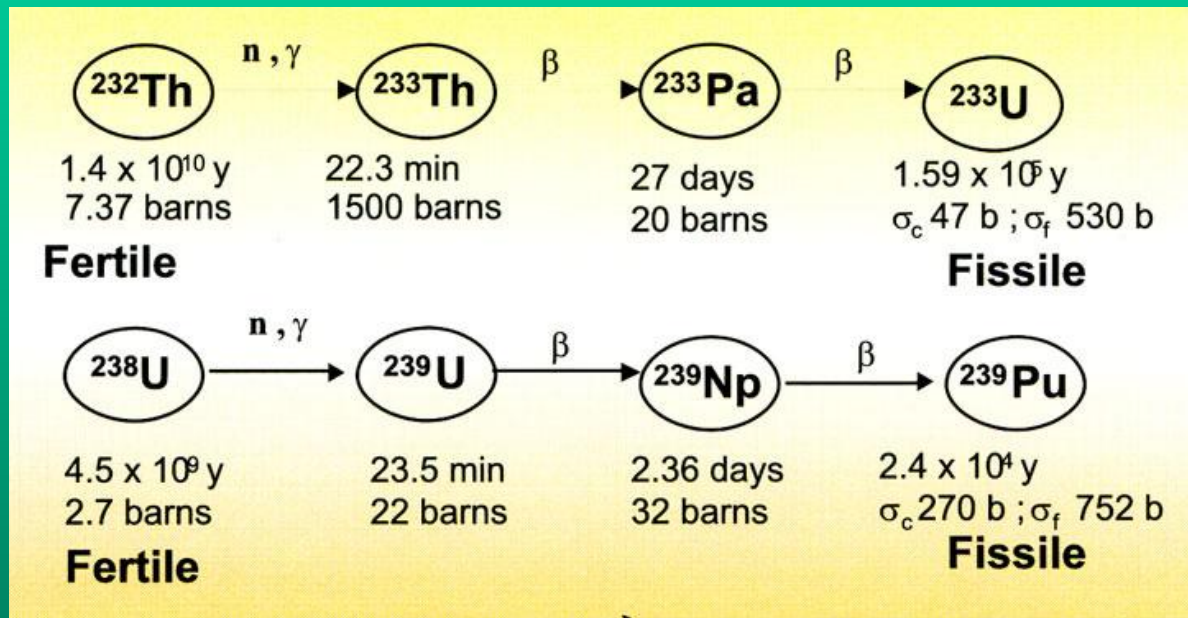
$Th^{232} + U^{235}(Pu^{239})$ – ядерное топливо

«запал»



накопление выгорание

$Th^{232} + U^{233}$ – ядерное топливо





ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ЯТЦ

