

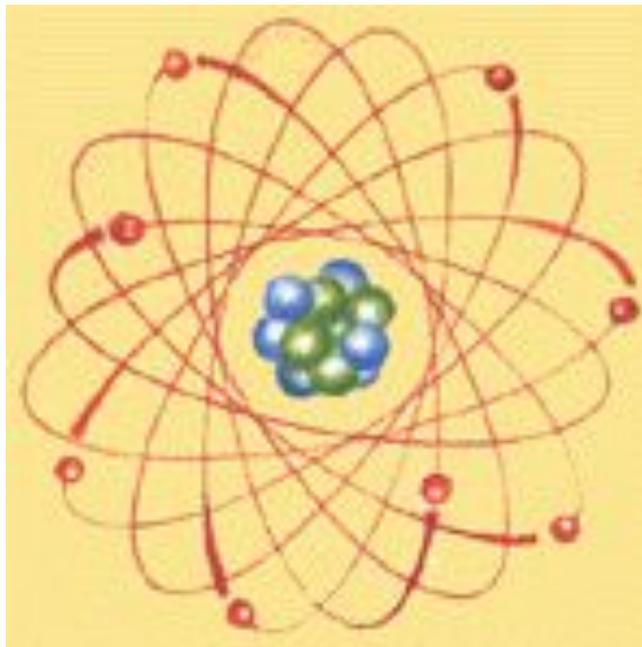
# СТРОЕНИЕ МАТЕРИИ

**Молекулы** - это наименьшие частицы вещества, сохраняющие все его физические свойства. В состав молекул входят **атомы** различных химических элементов.

Количество веществ, состоящих из атомов, ограничено периодической системой элементов (таблицей Менделеева). Химические элементы состоят из атомов одного типа.

**Атом**, мельчайшая частица химического элемента, состоит из положительно заряженного "тяжелого" **ядра** и вращающихся вокруг него **электронов**.

## Планетарная модель атома



Если принять **массу ядра водорода за 1**, то масса электрона равна  $1/1850$ , т.е. в 1850 раз меньше. Почти вся масса сосредоточена в ядре.

В ядерной физике используется относительная единица измерения для заряда равная  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл (кулон). Эта наименьшая порция заряда называется **элементарным зарядом (e)**. Тогда заряд электрона равен -1 (минус единица).

**Ядра** разных химических элементов отличаются **зарядом**.

Заряд ядра химического элемента соответствует его номеру в периодической таблице Менделеева.

## ЯДРА

**Ядра атомов** образованы совокупностью **положительно заряженных протонов** и **нейтральных нейтронов**. Эти частицы называются также **нуклонами**.

**Протон (p)** - наименьшая устойчивая частица, имеющая положительный заряд, по абсолютной величине равный заряду электрона (плюс единица).

**Нейтрон (n)** - частица с массой приблизительно равной массе протона, не имеющая электрического заряда.

| Частица                    | Масса, кг              | Заряд, Кл (Электрон)       |
|----------------------------|------------------------|----------------------------|
| Протон (p <sup>+</sup> )   | $1,673 \cdot 10^{-27}$ | $+1,6 \cdot 10^{-19}(+1)$  |
| Нейтрон (n)                | $1,675 \cdot 10^{-27}$ | 0                          |
| Электрон (e <sup>-</sup> ) | $9,109 \cdot 10^{-31}$ | $-1,6 \cdot 10^{-19} (-1)$ |

Ядро элемента X обозначают как  ${}^A_Z X$ , например, уран  ${}^{235}_{92}U$ , где

**A - массовое число ядра** (в атомных единицах массы), равное суммарному числу протонов и нейтронов ( $1 \text{ а.е.м} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$  – одна двенадцатая массы изотопа углерода с массовым числом 12),

**Z - заряд ядра**, определяющий атомный номер ядра (равен числу протонов).

Поскольку Z определяет число протонов, а A - число нуклонов в ядре, то число нейтронов в атомном ядре  $N=A - Z$ .

# ИЗОТОПЫ

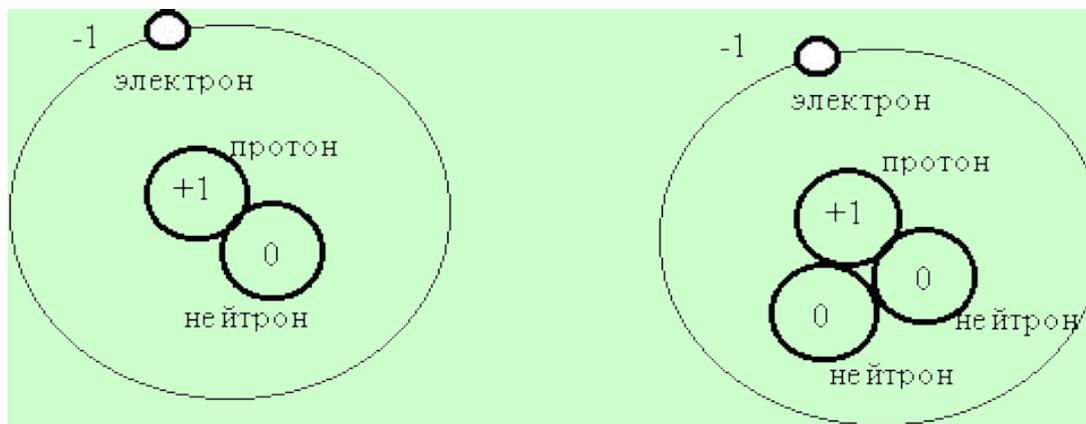
**Изотопами химического элемента** называются атомы, имеющие **одинаковый заряд ядра** (число протонов), но **разную массу** (число нейтронов).

Практически любой элемент имеет **несколько изотопов**. Кроме **стабильных изотопов**, большинство элементов имеют и **нестабильные изотопы**, для которых характерно ограниченное время жизни.

В природе уран встречается в виде двух изотопов с массами 238 а.е.м и 235 а.е.м. ( $^{238}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$ ). Причем доля последнего ( $^{235}\text{U}$ ) составляет всего 0,714%, а именно этот изотоп является топливом для большинства современных энергетических реакторов.

**Водород**, ядро которого состоит из одного протона, имеет изотопы **дейтерий** и **тритий**, в ядрах которых имеются соответственно **один и два нейтрона**.

## Атомы изотопов водорода



а) Дейтерий

б) Тритий

# РАДИОАКТИВНЫЙ РАСПАД

**Явление радиоактивности**, или спонтанного распада ядер некоторых веществ (уран, торий, радий и др.), - самопроизвольное (естественным образом) испускание энергии (в виде лучей или частиц) в окружающее пространство.

**Радиоактивность** - свойство испускать потоки заряженных альфа-, бета- и нейтральных гамма- частиц.  **$\alpha$ -частицы** представляют собой ядра гелия,  **$\beta$ -частицы** - электроны, а  **$\gamma$ -частицы** - поток квантов света (электромагнитное излучение с очень малой длиной волны).

Атомное ядро, испускающее  $\gamma$ -кванты,  $\alpha$ -,  $\beta$ - или другие частицы, называется **радиоактивным ядром**. В природе существует **272 стабильных атомных ядра**. Все остальные ядра радиоактивны и называются **радиоизотопами**.

**Радиоактивный распад** - это самопроизвольное превращение одного изотопа в другой (возможно даже в изотоп другого элемента) сопровождающийся сбросом энергии ядра в окружающие пространство в виде  $\alpha$ - или  $\beta$ -частиц, нейтронов или  $\gamma$ -квантов.

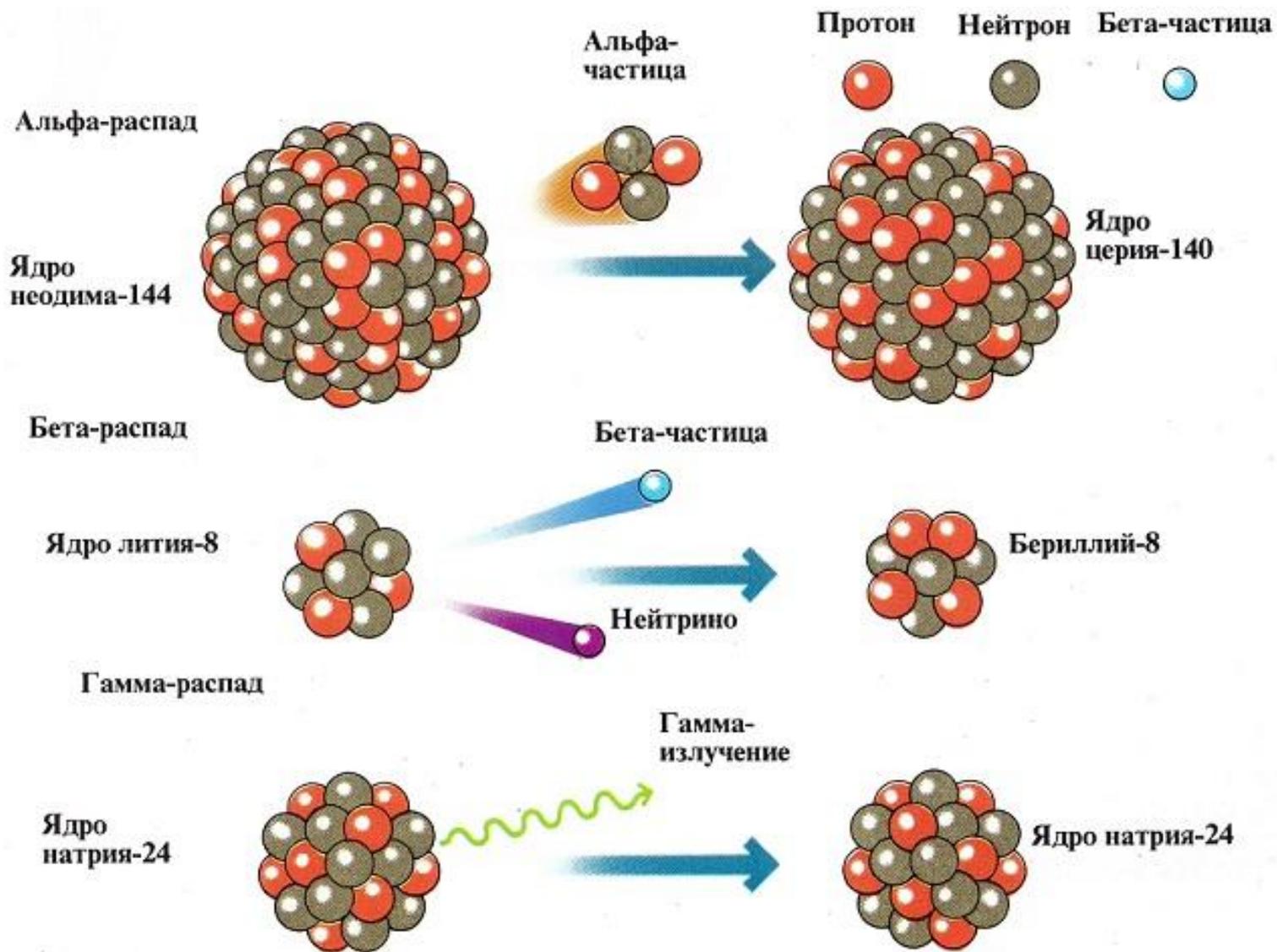
## Виды радиоактивного распада

Все типы распада можно разделить на три группы:

- Подобные  $\alpha$ -распаду. Это кластерный распад, протонная эмиссия, нейтронная эмиссия и другие. Во всех случаях происходит "откалывание" части нуклонов от ядра.
- Подобные  $\beta$ -распаду. Это  $\beta^-$  распад,  $\beta^+$  распад, двойные  $\beta$  распады. В них распад происходит за счёт слабого взаимодействия.
- Подобные  $\gamma$ -распаду. Это  $\gamma$ -распад (изомерный переход) и внутренняя конверсия. Здесь происходит изомерный переход ядра с эмиссией фотона.

| Название распада   |                   | Описание   | Дочернее ядро                          | Эмиссия                            |
|--|-------------------|--|--|------------------------------------|
| <b>Нуклонная эмиссия</b>                                     |                   |  |  |                                    |
| Альфа распад   | $\alpha$          | От ядра отделяется $\alpha$ -частица - ядро атома гелия-4.   | (A-4, Z-2)                             | ${}^4\text{He}$                    |
| Протонная эмиссия  | p                 | Отделяется 1-2 нуклона. Характерен для лёгких ядер с большим избытком протонов или нейтронов.  | (A-1, Z-1)                             | p                                  |
| Двойной протонный распад                                     | 2p                |  | (A-2, Z-2)                             | 2p                                 |
| Нейтронная эмиссия   | n                 |  | (A-1, Z)                               | n                                  |
| Двойной нейтронный распад                                    | 2n                |  | (A-4, Z)                               | 2n                                 |
| Кластерный распад  | KL                | Отделяется кластер - ядро тяжелее ${}^4\text{He}$ , но намного легче дочернего ядра.   | (A-A <sub>x</sub> , Z-Z <sub>x</sub> ) | (A <sub>x</sub> , Z <sub>x</sub> ) |
| Спонтанное деление   | SF                | Ядро делятся примерно пополам. Характерно для тяжёлых ядер (трансурановых)   | 2(~A/2, ~Z/2)                          | 2-5n                               |
| <b>Различные <math>\beta</math>-распады</b>                  |                   |  |  |                                    |
| Бета минус распад  | $\beta^-$         | Нейтрон распадается за счёт слабого вз. с испусканием электрона: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$   | (A, Z+1)                               | $e^-; \nu$                         |
| Бета плюс распад (позитронная эмиссия)                       | $\beta^+$         | Обратный процесс. Протон распадается на Нейтрон: $p \rightarrow n + e^+ + \nu$   | (A, Z-1)                               | $e^+; \nu$                         |
| Электронный захват   | $\epsilon$        | Происходит захват электрона из электронной оболочки атома: $p + e^- \rightarrow n + \nu$   | (A, Z-1)                               | $\nu$                              |
| Бета минус распад с переходом в зп. оболочку <sup>(en)</sup> |                   | Иногда электрону не хватает энергии выйти из атома, и он переходит в электронную оболочку атома.   |  |                                    |
| Двойной бета минус распад                                    | $2\beta^-$        | Происходит два распада нейтрона одновременно.  | (A, Z+2)                               | $2e^-; 2\nu$                       |
| Двойной бета плюс распад                                     | $2\beta^+$        |  | (A, Z-2)                               | $2e^+; 2\nu$                       |
| Двойной электронный захват                                   | 2 $\epsilon$      | Происходит два распада протона одновременно. Каждый распад может быть либо позитронной эмиссией, либо электронным захватом.  | (A, Z-2)                               | 2 $\nu$                            |
| Электронный захват с эмиссией позитрона                      | $\epsilon\beta^+$ |  | (A, Z-2)                               | $e^+; 2\nu$                        |
| Без нейтринный двойной бета-распад                           | 0 $\nu 2\beta$    | Предполагаемый распад, в ходе которого две частицы нейтрино реагируют с самоуничтожением.  | (A, Z+2)                               | $2e^-$                             |
| <b>Изомерный переход</b>                                     |                   |  |  |                                    |
| Гамма-распад   | $\gamma$          | Ядро переходит из возбуждённого состояния в основное.  | (A, Z)                                 | $\gamma$                           |
| Внутренняя конверсия   | IC                | Испущенный $\gamma$ -квант поглощается электроном из зп. оболочки атома. Он либо переходит на новый уровень, либо становится свободным ( <i>конверсионный электрон</i> ) | (A, Z)                                 | $e^-$                              |

# ВИДЫ РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА

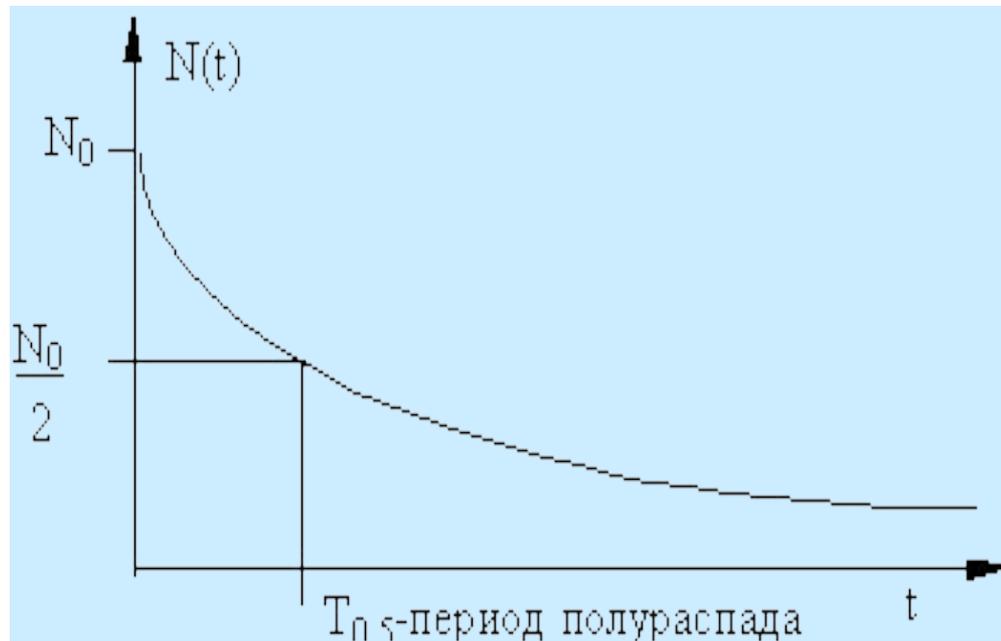


## ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА

Каждый изотоп обладает своим значением постоянной радиоактивного распада. Если известно количество ядер изотопа в начальный момент времени  $N_0$  и постоянная распада этих ядер  $\lambda$ , то для любого момента времени  $t$  можно определить количество ядер  $N(t)$  по формуле:

$$N(t) = N_0 \times e^{-\lambda t}$$

Графически закон радиоактивного распада можно представить в виде графика, где по оси ординат отложено количество ядер  $N(t)$ , а по оси абсцисс – время  $t$ .



За характеристику радиоактивного распада принят так называемый **период полураспада** - время, в течение которого распадается половина исходного количества ядер.

Для каждого изотопа существует свое время полураспада. Период полураспада для одних изотопов составляет тысячные доли секунды, для других тысячи и миллиарды лет.

Интенсивность радиоактивного распада измеряется в единицах, называемых "беккерель" (Бк)

1 Бк = 1 распад/1 сек; 1 кюри =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк = 37 ГБк

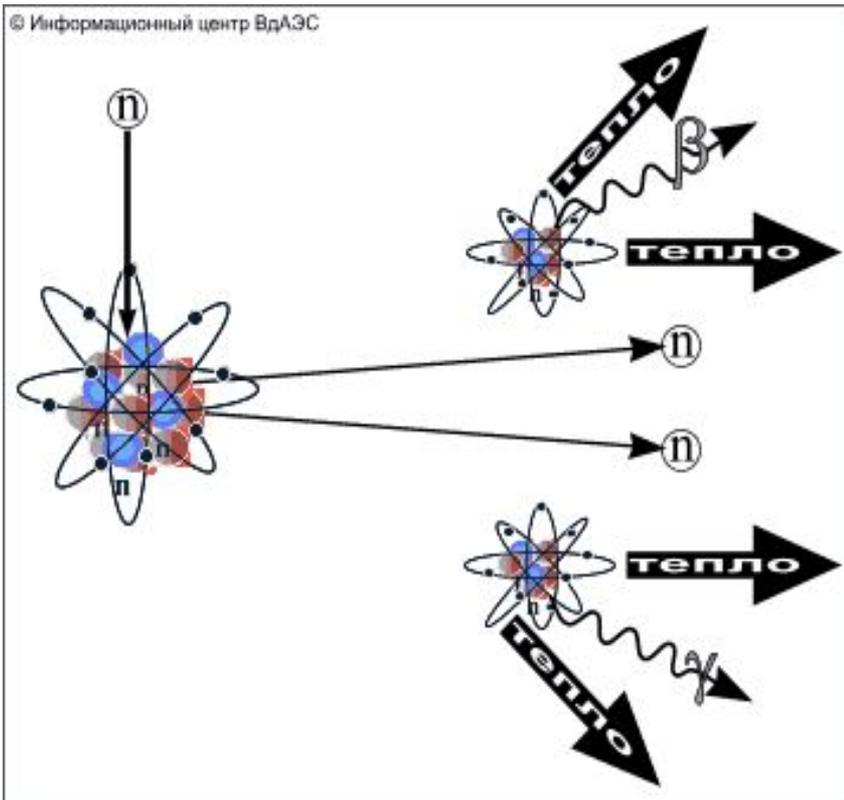
## ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

**Естественный радиоактивный распад** веществ ускорить нельзя. Его энергию невозможно использовать в практических целях из-за большой протяженности во времени.

**Ядерная реакция** (открыта в 1939 г.) - это процесс превращения ядер в результате их взаимодействия с элементарными частицами или с другими ядрами.

**Основное отличие** ядерных реакций от самопроизвольного радиоактивного распада заключается в участии в процессе кроме ядра еще и других частиц.

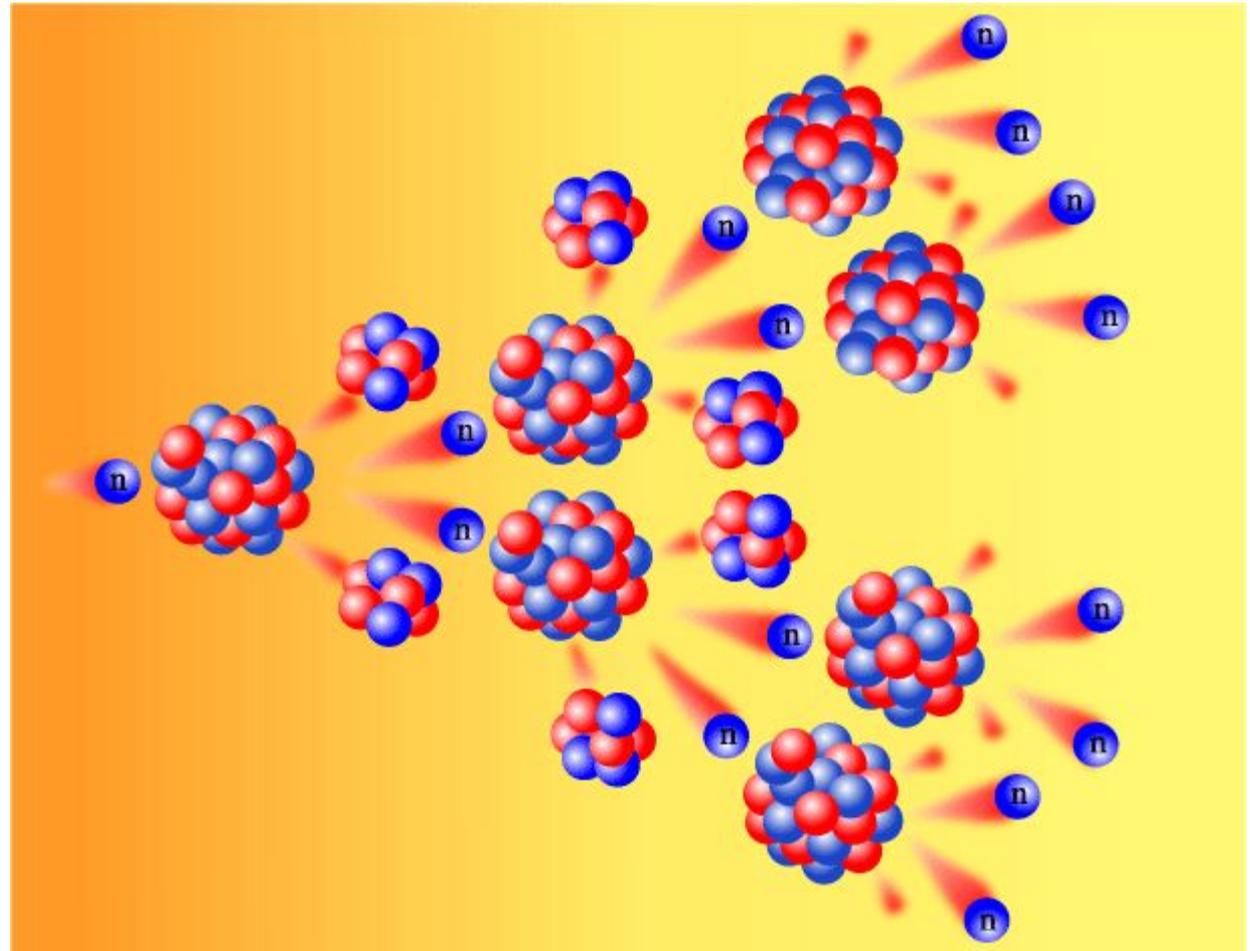
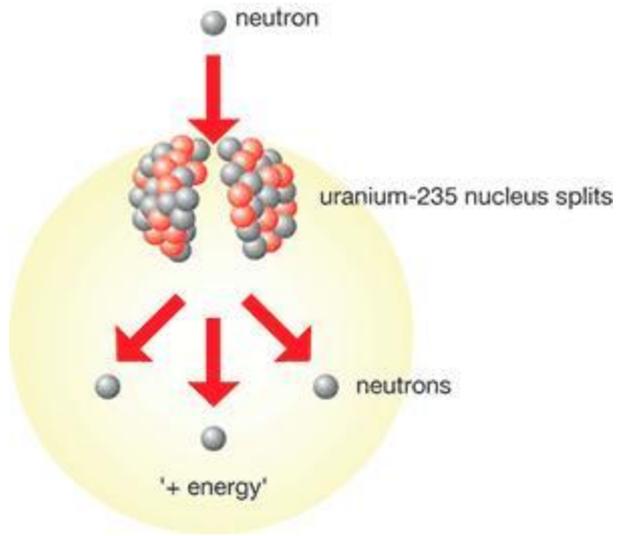
**Реакции деления тяжелых ядер** происходят при захвате нейтронов с образованием осколков деления (Kr-криптон, Cs-цезий, I-йод, Xe-ксенон, Ce-церий, Sr-стронций и др.).



При распаде ядра **потенциальная энергия** связи ядра преобразуется в **кинетическую энергию** разлетающихся осколков деления. При торможении осколков о соседние атомы возникает **тепловая энергия (тепло)** в **шесть миллионов раз** большая, чем при сгорании угля такой же массы. Осколки деления испускают гамма-кванты и бета-частицы (**сопутствующее радиоактивное излучение**).

Поглощение топливом и окружающими материалами гамма-излучения и бета-частиц также приводит к **выделению тепла**.

# ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ



## ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ ДЕЛЕНИЯ

Для реализации **самоподдерживающейся реакции деления** необходимо, чтобы хотя бы один из нейтронов, полученный в результате первого акта деления, вызвал второй акт деления.

Нейтроны, вызвавшие первые акты деления, называют **нейтронами первого поколения**, вторые – **нейтронами второго поколения**.

Реакции деления характеризуются **коэффициентом размножения  $K_{эфф}$** , который представляет собой отношение количества нейтронов второго поколения к количеству нейтронов первого поколения:

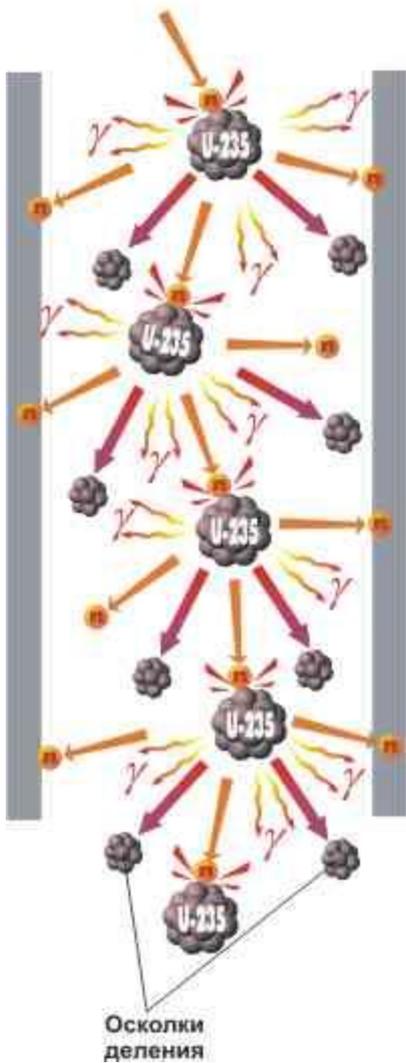
- при  $K_{эфф} < 1$  реакция деления затухает.
- при  $K_{эфф} = 1$  реакция деления происходит на постоянной мощности (нормальный режим работы реактора).
- при  $K_{эфф} > 1$  реакция деления разгоняется (увеличение мощности)

**Нейтроны**, сталкивающиеся с ядрами, **обладают различной энергией**. В физике принята единица измерения энергии - мега электрон-вольт  $1 \text{ МэВ} = 1\,000\,000 \text{ эВ} = 1,602 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$ .

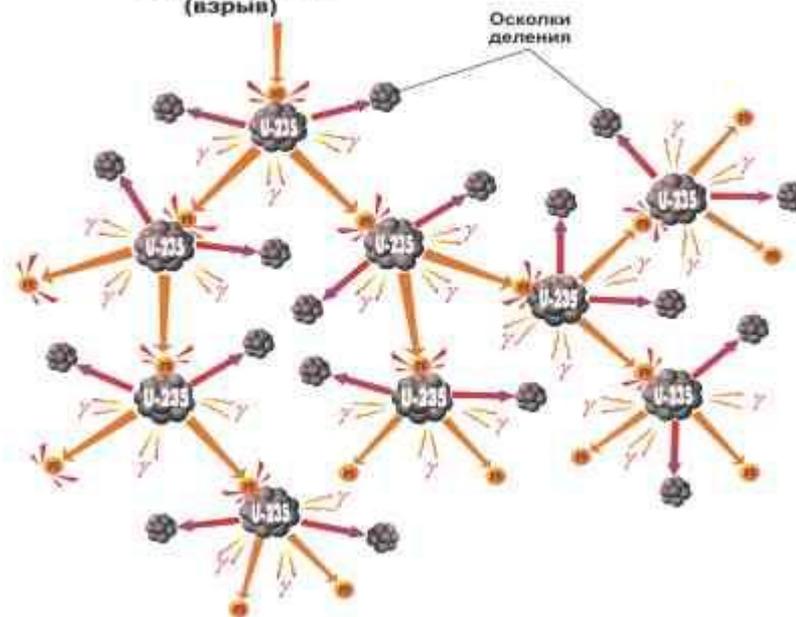
**В зависимости от энергии принято делить нейтроны на группы:**

- **тепловые нейтроны**, энергия движения которых соизмерима с энергией теплового движения среды  $E < 0,5 \text{ эВ}$ .
- **замедляющиеся нейтроны**, энергия которых лежит в диапазоне от  $0,5 \text{ эВ}$  до  $2000 \text{ эВ}$ .
- **быстрые нейтроны** с энергией  $E = 0,10 - 10 \text{ МэВ}$ .

**Линейная  
(управляемая)  
реакция**



**Неуправляемая  
цепная реакция  
(взрыв)**



## УПРАВЛЕНИЕ ЦЕПНОЙ РЕАКЦИЕЙ ДЕЛЕНИЯ

**Необходимым условием** для осуществления практической реализации цепной реакции деления, является наличие критической массы делящейся среды.

**Критическая масса** - минимальная масса делящейся среды, при которой в ней возможна самоподдерживающаяся цепная реакция деления.

**Критические размеры** - минимальные размеры делящейся среды, при которых в ней возможна самоподдерживающаяся цепная реакция деления.

**Однако наличие критической массы не является единственным условием. Получив критическую массу делящегося вещества, можно получить атомную бомбу, вместо атомной станции, если не сможем управлять цепной реакцией деления.**

**Процесс управления цепной реакцией** сводится, в конечном счете, к изменению коэффициента размножения  $K_{эфф}$ .

На практике пользуются не коэффициентом размножения, а производной от него величиной - реактивностью. **Реактивность** - это отклонение коэффициента размножения от единицы отнесенное к коэффициенту размножения:

$$\rho = \frac{K_{эфф} - 1}{K_{эфф}}$$

При увеличении коэффициента размножения  $K_{эфф}$  говорят о **внесенной положительной реактивности**, при уменьшении - о **внесенной отрицательной реактивности**.

# СХЕМА ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

**Ядерный реактор** - это техническая установка, в которой осуществляется **самоподдерживающаяся цепная реакция деления тяжелых ядер** с освобождением ядерной энергии.

В процессе ядерных реакций происходят **превращения одних химических элементов в другие**.

**Ядерный реактор** состоит из **активной зоны, отражателя нейтронов, тепловой защиты** и других элементов, размещенных в прочном **герметическом корпусе реактора**, выполняемом из сталей специальных марок.

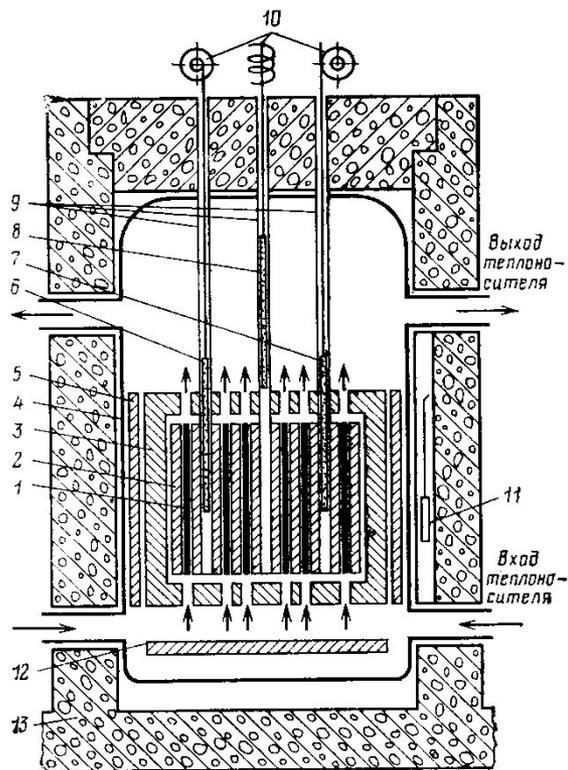


Рис. 3.19. Принципиальная схема ядерного энергетического реактора

- 1 – Технологические каналы
- 2 - Замедлитель
- 3 – Отражатель нейтронов
- 4 – Герметичный корпус
- 5 – Боковой тепловой экран
- 6, 7, 8 – Подвижные управляющие стержни
- 9 – Каналы СУЗ
- 10 – Привод СУЗ
- 11 – Ионизационная камера
- 12 – Торцевой тепловой экран
- 13 – Биологическая защита

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КАНАЛЫ АКТИВНОЙ ЗОНЫ



*Активная зона* представляет собой набор *технологических каналов*, каждый из которых окружен *замедлителем нейтронов* (реакторы на тепловых нейтронах).

## ЗАМЕДЛИТЕЛИ НЕЙТРОНОВ-1

**Замедлитель** в реакторах на тепловых нейтронах - это вещество, при взаимодействии с атомами которого **нейтрон наиболее заметно снижает свою скорость**. Соответственно увеличивается вероятность деления ядерного горючего.

Важной характеристикой замедлителя является его **способность поглощать нейтроны**, которая характеризуется **сечением поглощения**.

**Замедлителями** могут быть:

- **обычная и тяжелая вода,**
- **графит**
- **бериллий** (для исследовательских реакторов).

## ЗАМЕДЛИТЕЛИ НЕЙТРОНОВ-2

Наилучшим замедлителем нейтронов могла бы оказаться **обычная вода** – вещество, содержащее много атомов водорода  ${}_1^1\text{H}$ . Однако, атомы  ${}_1^1\text{H}$  способны захватывать нейтроны.

Ядра другого изотопа водорода – **дейтерия**  ${}_1^2\text{H}$  - такой тенденции практически не проявляют. Поэтому в качестве замедлителя в реакторах эффективнее использовать **тяжелую воду**  $\text{D}_2\text{O}$ .

Другим часто используемым замедлителем нейтронов является **графит**.

В современных реакторах в качестве замедлителя (и одновременно в качестве теплоносителя) используют специально очищенную **воду с добавками бора**.

Если замедлителем является **графит**, то реактор способен работать **на природном уране** (0,7% урана-235) из-за малого поглощения нейтронов.

Если замедлитель - **вода**, то реактор обязательно работает **на обогащенном топливе** (2-4% урана-235), так как вода хорошо поглощает нейтроны.

## ОТРАЖАТЕЛЬ НЕЙТРОНОВ И ТЕПЛОВАЯ ЗАЩИТА

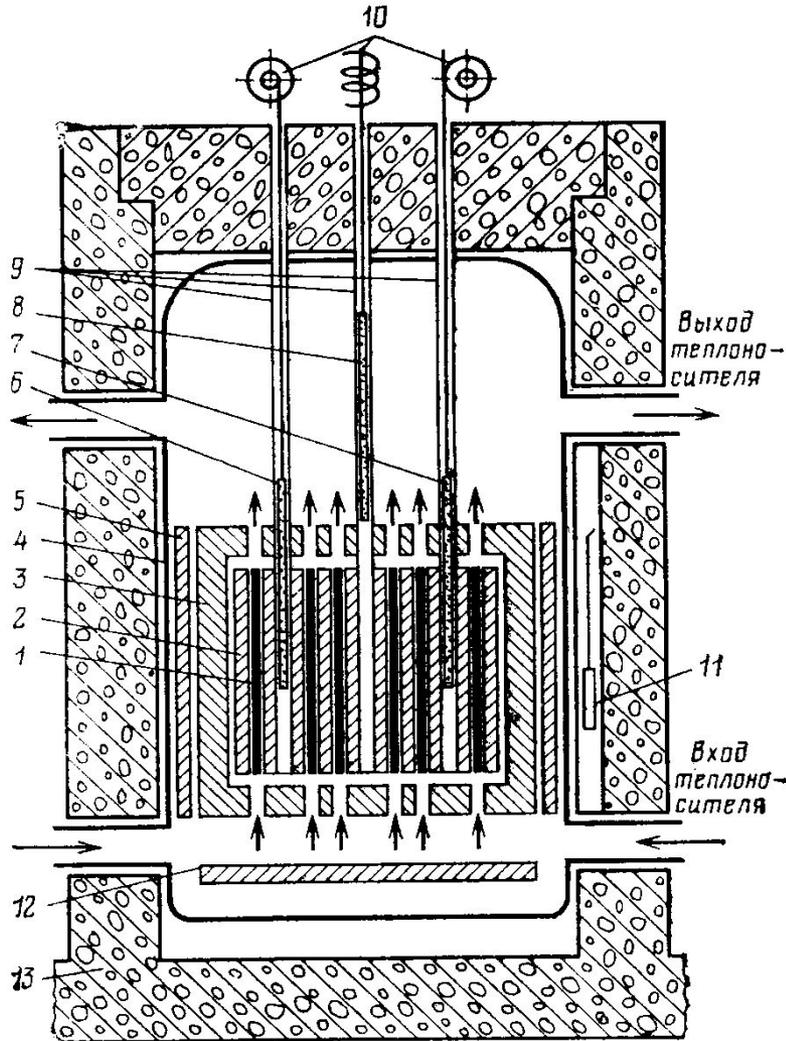


Рис. 3.19. Принципиальная схема ядерного энергетического реактора

Для уменьшения утечки нейтронов из активной зоны реактора она окружена **отражателем нейтронов (3)**.

**Отражатель** изготавливается из **графита** или **бериллия** (как и замедлитель).

Отражатель выравнивает плотности нейтронов и энерговыделения по объему активной зоны.

Отражатель нагревается за счет энергии замедляющихся и поглощаемых нейтронов и гамма-квантов, поэтому предусматривается его охлаждение.

Для уменьшения излучения и чрезмерного нагрева реактора применяется **тепловая защита (5, 12)**.

Тепловая защита выполняется из **стальных листов или специальных материалов**, содержащих поглотители нейтронов, например, бор.

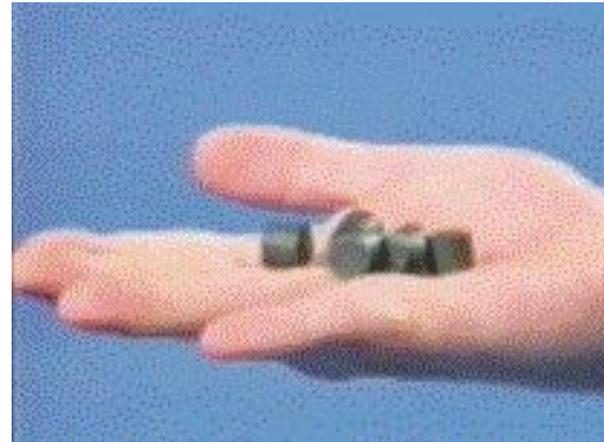
Часто тепловая защита совмещается в единой конструкции с отражателем нейтронов.



## ЯДЕРНОЕ ТОПЛИВО

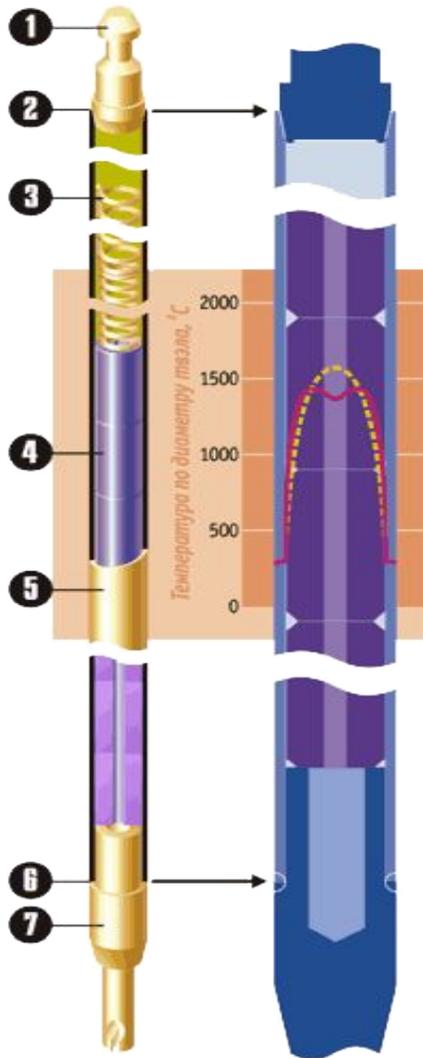
В качестве **топлива ядерных реакторов** могут использоваться:

- **естественный уран**, в котором концентрация урана-235 составляет 0,7 %,
- **"обогащенный" уран**, т.е. уран, в котором концентрация изотопов **урана-235** достигает 2 - 4 % или более,
- **плутоний-239** (плутоний-239 в принципе может тоже использоваться для нужд ядерной энергетики, но в настоящее время он является одним из основных компонентов начинки атомных бомб)



**Типичное топливо реакторов** - окись урана  $UO_2$  в виде спеченных таблеток диаметром 9-10 мм, заключенных в цилиндрическую защитную оболочку из циркониевого (с примесью ниобия) сплава.

## Тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ)



### ТВЭЛ обеспечивает:

- **удержание** топлива и продуктов его деления (твердые вещества и газы) от проникновения в теплоноситель;
- **телопередачу** от топливной таблетки к теплоносителю через оболочку ТВЭЛ.

- 1 - верхняя концевая заглушка
- 2 - верхний сварочный шов
- 3 - фиксатор топлива (пружина)
- 4 - топливный сердечник
- 5 - трубчатая оболочка
- 6 - нижний сварочный шов
- 7 - нижняя концевая заглушка

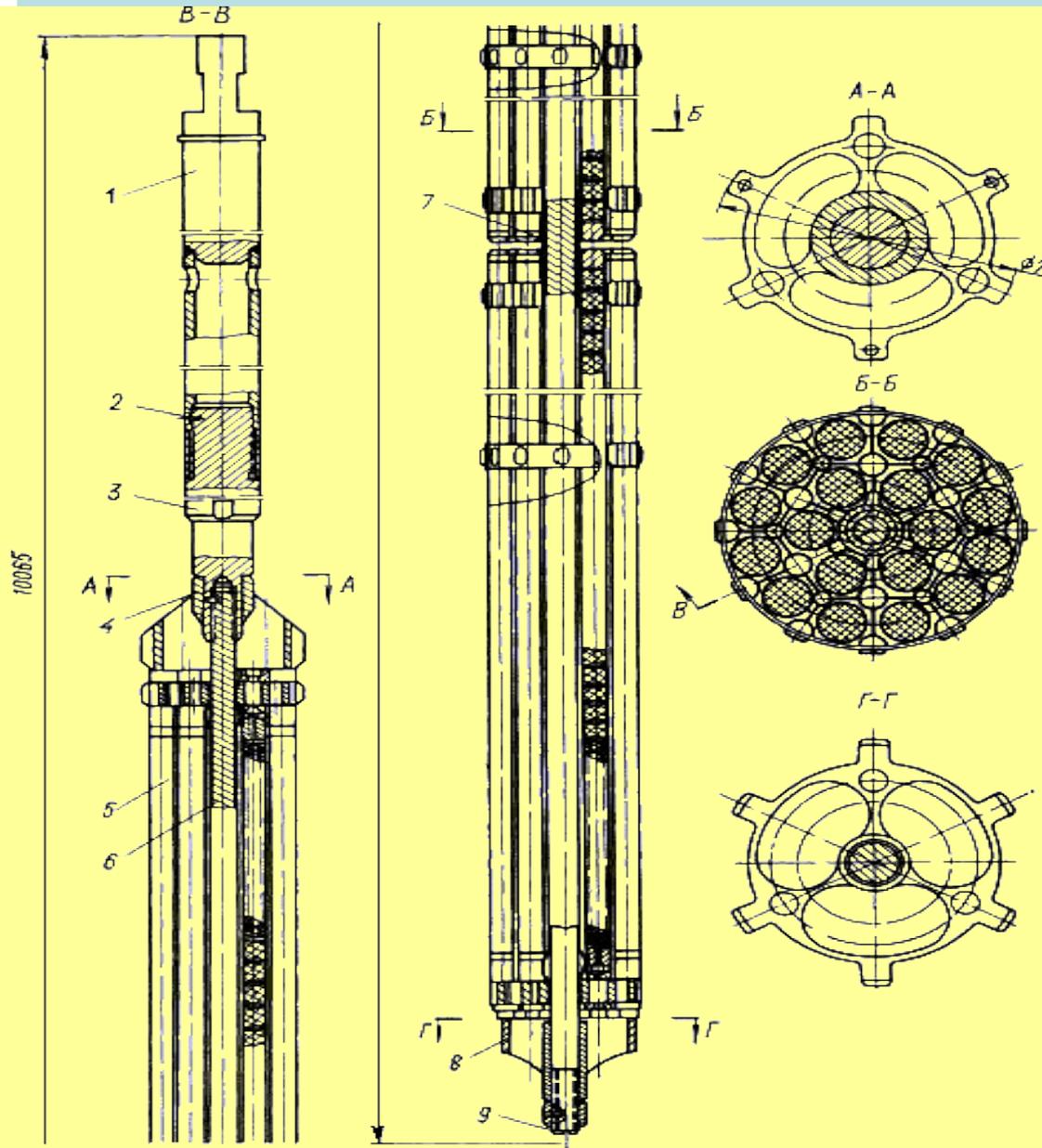
# ОБЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ТВЭЛам

- простота конструкции;
- механическая устойчивость и прочность в потоке теплоносителя, обеспечивающая сохранение размеров и герметичности;
- малое поглощение нейтронов материалом твэла;
- отсутствие взаимодействия ядерного топлива и продуктов деления с теплоносителем и замедлителем при рабочих температурах;
- максимальная интенсивность отвода теплоты теплоносителем от всей поверхности твэла;
- большая глубина выгорания ядерного топлива и высокую степень удержания продуктов деления;
- высокая радиационная стойкость;
- относительно низкая стоимость;
- надежная герметичность оболочек твэлов должна сохраняться в течение всего срока работы активной зоны (3 -5 лет) и последующего хранения отработавших твэлов до отправки на переработку (1 -3 года).

## Технические характеристики ТВЭЛ

| Параметр                              | Значение                                    |
|---------------------------------------|---|
| Длина, мм                             | 3837  |
| Длина топливного сердечника, мм       | 3530  |
| Наружный диаметр оболочки, мм         | 9,1   |
| Толщина стенки оболочки, не менее, мм | 0,63  |
| Материал оболочки                     | Zr+1%Nb                                     |
| Топливо                               | Таблетки из $UO_2$ с центральным отверстием |
| Диаметр отверстия таблетки, мм        | 2,35  |
| Масса урана в топливе, г              | 1270  |
| Обогащение топлива при перегрузках, % | 1,6; 3,3; 3,6; 4,4                          |
| Фиксатор топливного сердечника        | Пружина из хромоникелевого сплава           |
| Нижний сварной шов                    | Электронно-лучевая сварка                   |
| Верхний сварной шов                   | Контактно-стыковая сварка                   |

# Тепловыделяющая сборка реактора типа РБМК-1000



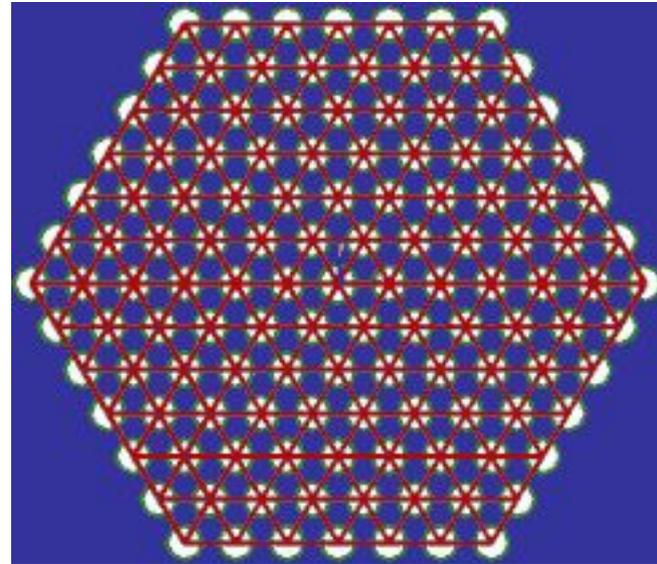
Для обеспечения необходимой жесткости стержневых ТВЭЛов, а также в целях организации направленного потока теплоносителя, упрощения монтажа, транспортировки и перезарядки активной зоны ТВЭЛы в количестве десятков – сотен штук объединяют в группы – так называемые тепловыделяющие сборки или ТВС.

ТВЭЛы в ТВС жестко связаны между собой с помощью двух концевых и нескольких дистанционирующих решеток, устанавливаемых с определенным шагом по высоте ТВС. Основные конструктивные особенности конструкции ТВС связаны, прежде всего, с формой ее поперечного сечения, которая может быть прямоугольной, круглой или шестигранной.

# ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩАЯ СБОРКА (ТВС) ВВЭР



## Сечение ТВС



## Элементы ТВС:

- верхняя концевая деталь (головка)
- дистанционирующие решетки
- металлические стержни из бора или кадмия
- нижняя концевая деталь (хвостовик)

*В отличие от ТВС РБМК-1000 ТВС ВВЭР-1000 - гексагональное (шестигранное) сечение.*

# ТЕПЛОНОСИТЕЛЬ

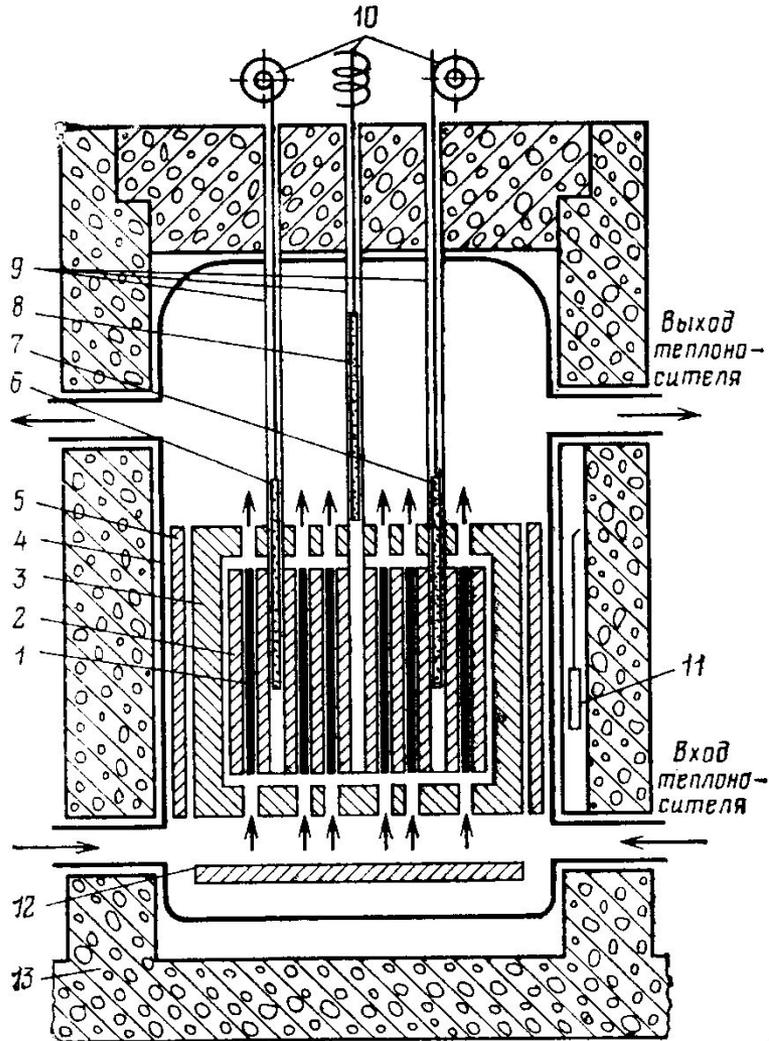


Рис. 3.19. Принципиальная схема ядерного энергетического реактора

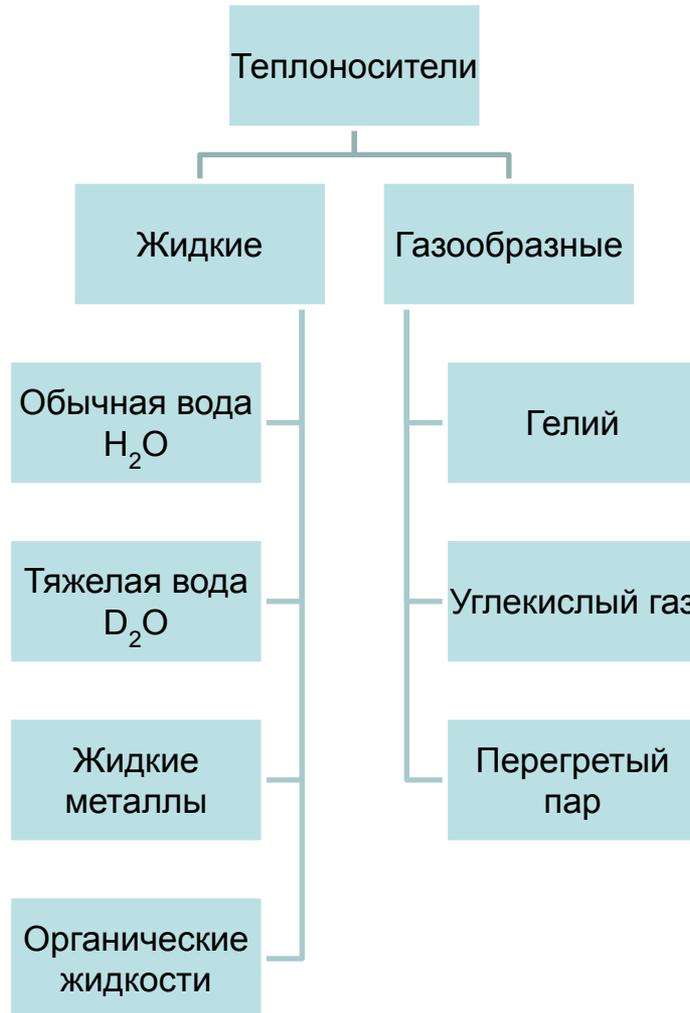
При работе реактора в ТВЭЛх, а также во всех конструктивных элементах реактора **выделяется тепло**.

Это связано прежде всего с торможением осколков деления, их бета- и гамма- излучением, и, наконец, с замедлением быстрых нейтронов.

Для **отвода теплоты** из активной зоны реактора вдоль ТВС внутри технологических каналов **движется теплоноситель**, который воспринимает тепло ядерных превращений.

Холодный теплоноситель для охлаждения активной зоны подается через нижний патрубок и проходит сквозь ТВС снизу вверх.

# ТЕПЛОНОСИТЕЛИ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ



## **ТРЕБОВАНИЯ К ТЕПЛОСИТЕЛЯМ**

### **Общими требованиями ко всем теплоносителям являются:**

- высокая теплоёмкость и теплопроводность;
- малая вязкость;
- малая коррозионная агрессивность и коррозионное воздействие по отношению к конструкционным материалам;
- высокая температура кипения и низкая температура плавления;
- высокая термическая и радиационная стойкость;
- малое сечение поглощения тепловых нейтронов;
- взрывобезопасность, негорючесть и нетоксичность;
- слабая активация;
- малая стоимость.

## СРАВНЕНИЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ

*Вода  $H_2O$  - наиболее распространенный теплоноситель в энергетических реакторах.*

Имеет большую теплоемкость, не требует больших расходов, но требует повышенного давления.

*Тяжелая вода  $D_2O$  является наилучшим теплоносителем и замедлителем.*

- Обладает такими же высокими теплопередающими свойствами, что и обычная вода.
- Имеет чрезвычайно малое сечение поглощения тепловых нейтронов и поэтому реакторы с тяжеловодным замедлителем и теплоносителем **могут работать на природном уране.**
- Ввиду **высокой стоимости** и некоторых негативных эффектов (повышенное радиационное воздействие) не получила широкого распространения.

*Жидкие металлы (жидкий натрий и сплав натрия с калием) под давлением 5-8 атм используются в реакторах БН.*

- Слабо замедляют и поглощают нейтроны,
- Имеют низкую стоимость и обладают высокими теплопередающими свойствами.
- Основные недостатки: **высокая активация нейтронами** и способность **вступать в бурную химическую реакцию с водой**, что требует дополнительных мер по обеспечению безопасности.

*Органические теплоносители (в основном углеводороды-полифенилы) нашли ограниченное применение в реакторах на тепловых нейтронах.*

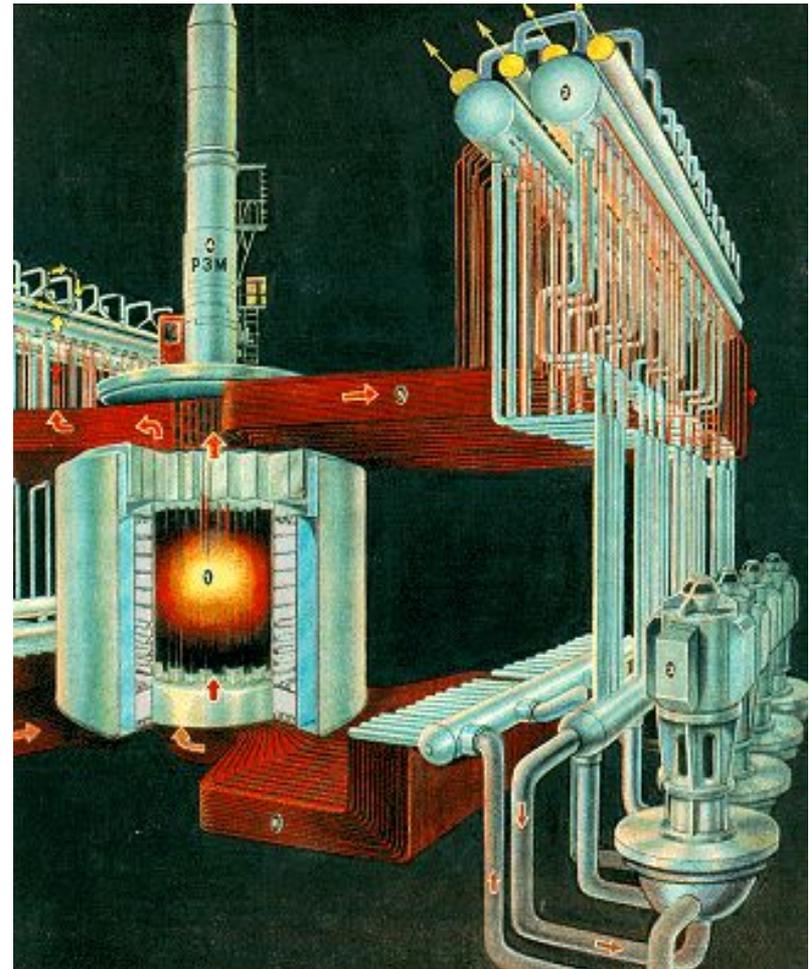
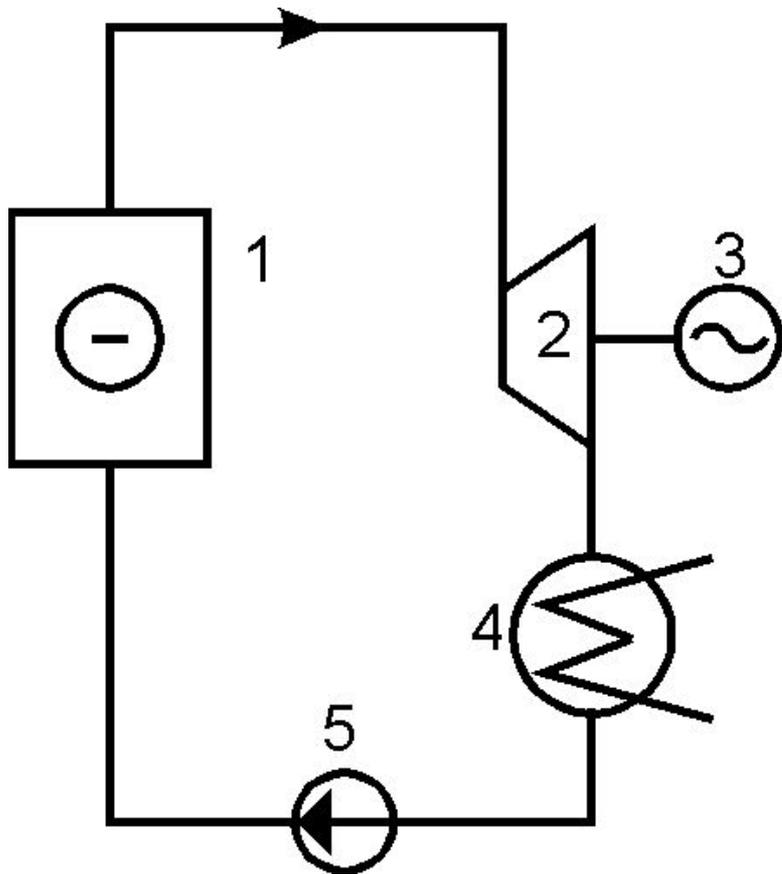
- Основное достоинство – более высокие, чем у воды, температуры кипения (температура теплоносителя на выходе около 350-400°C при давлениях не выше 2 МПа).
- Основной недостаток – **радиационная и термическая нестабильность.**

*Газовые теплоносители (гелий, углекислый газ, перегретый водяной пар и др.) достаточно доступны и стабильны.*

- Слабо поглощают и замедляют нейтроны, мало активизируются.
- Максимальная температура газовых теплоносителей ограничивается только свойствами материалов активной зоны, что дает **возможность повысить термический КПД цикла.**
- Недостатки - существенно худшие, чем у воды **теплопередающие свойства**, что требует увеличения площадей теплообмена и расхода прокачиваемого через активную зону газа.

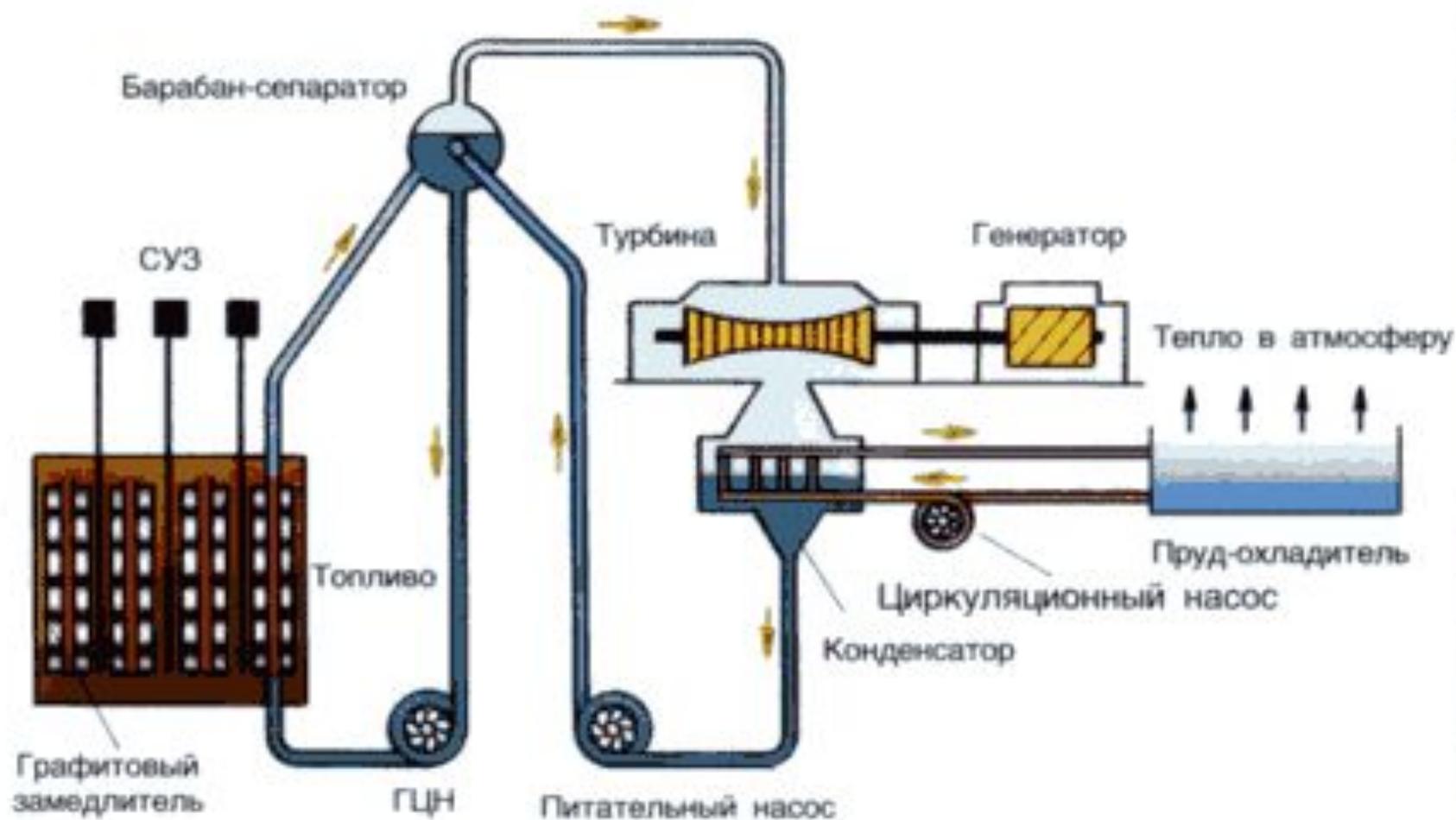
# Принципиальные тепловые схемы АЭС

## Одноконтурная АЭС



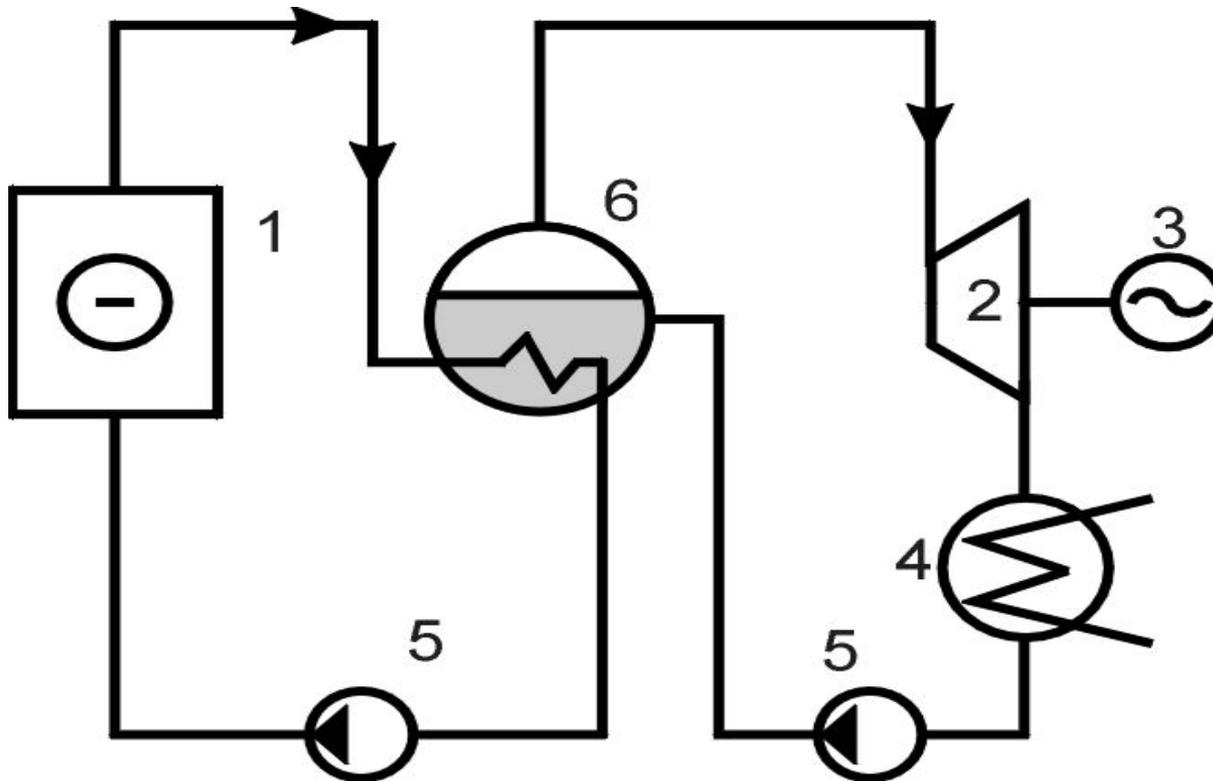
1 - реактор; 2 - паровая турбина; 3 - электрический генератор;  
4 - конденсатор; 5 - насос; 6 - парогенератор; 7 - промежуточный теплообменник

## АЭС с реактором РБМК

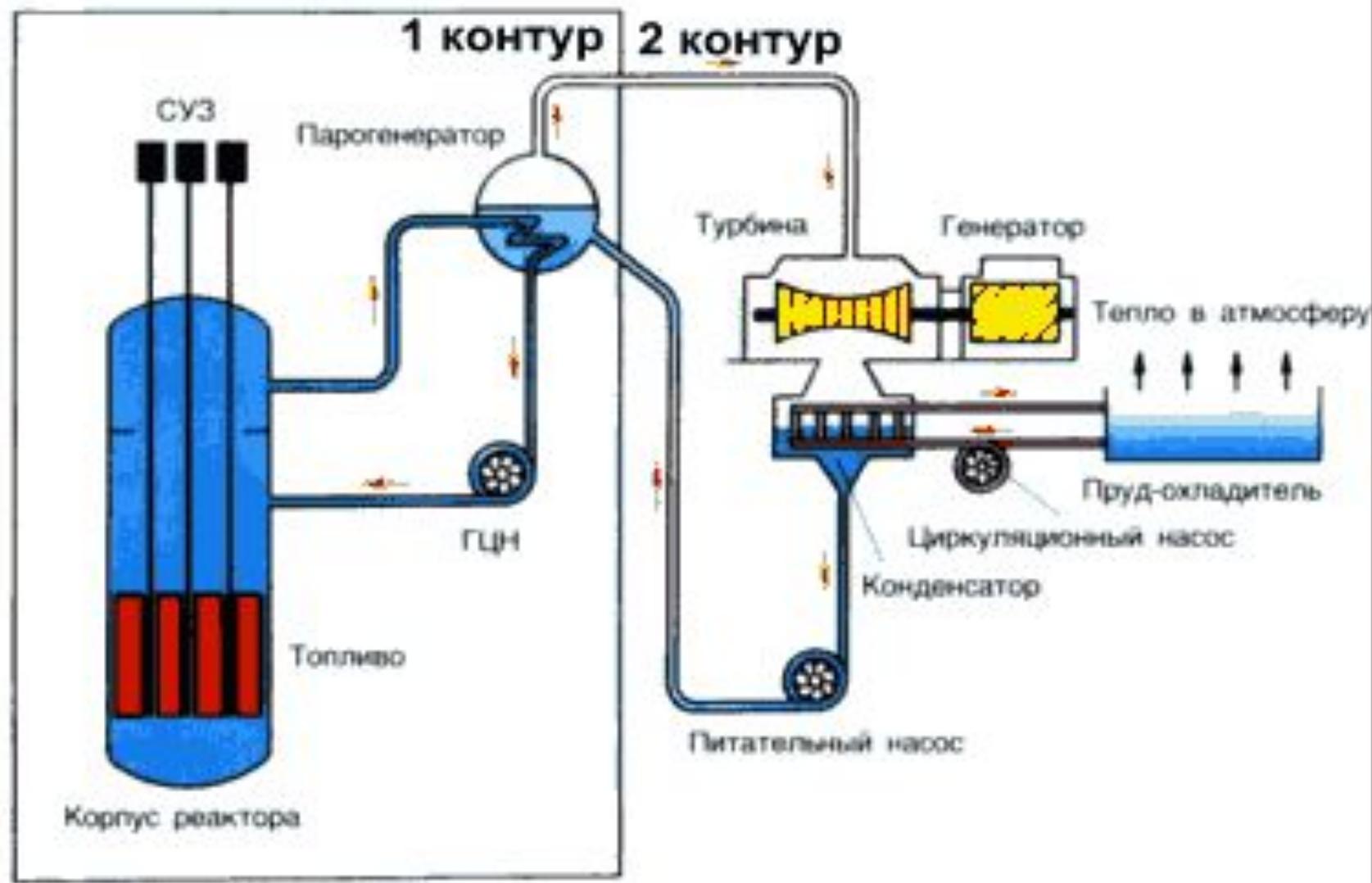


# Принципиальные тепловые схемы АЭС

## Двухконтурная АЭС



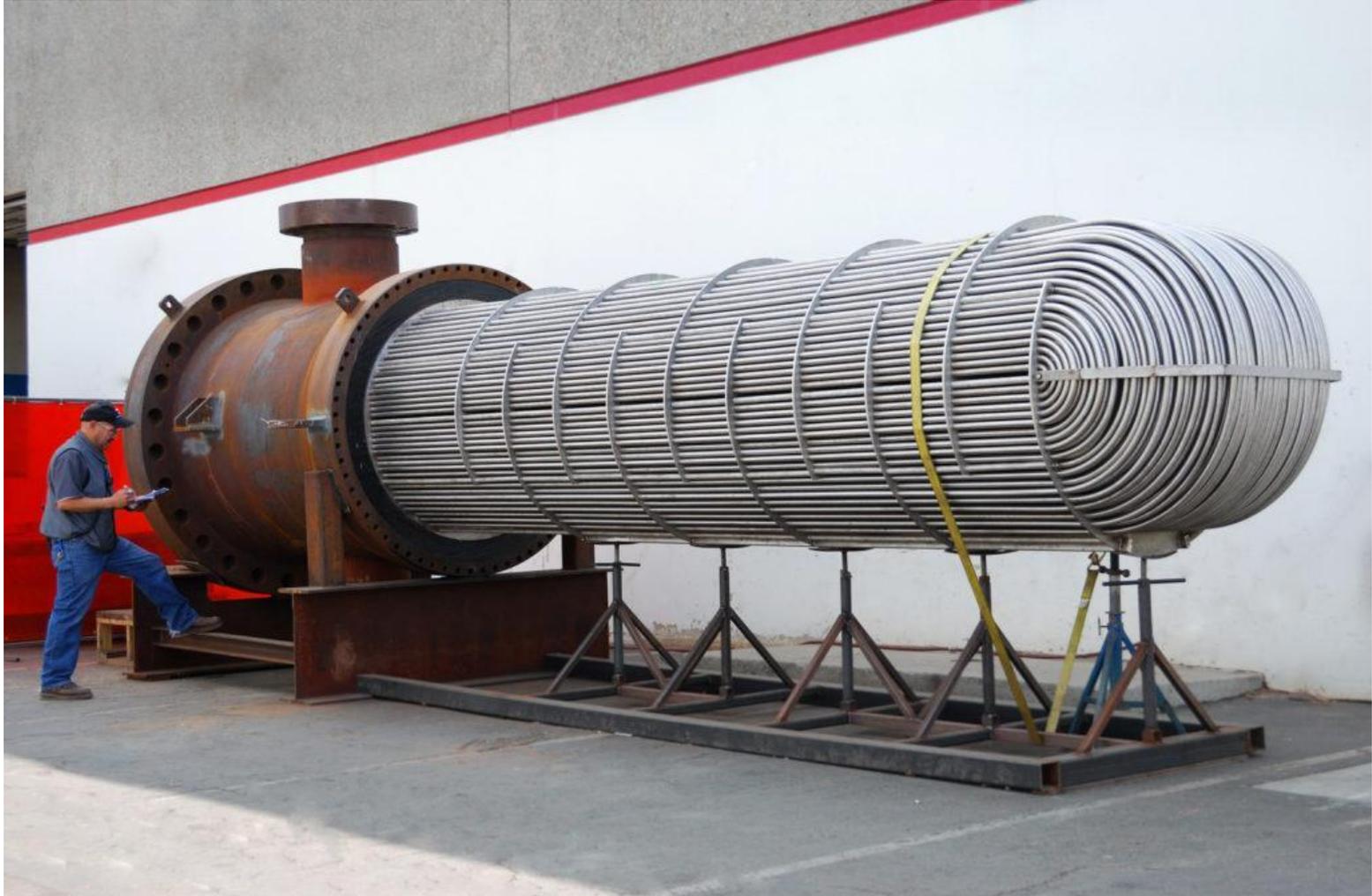
1 - реактор; 2 - паровая турбина; 3 - электрический генератор;  
4 - конденсатор; 5 - насос; 6 - парогенератор;



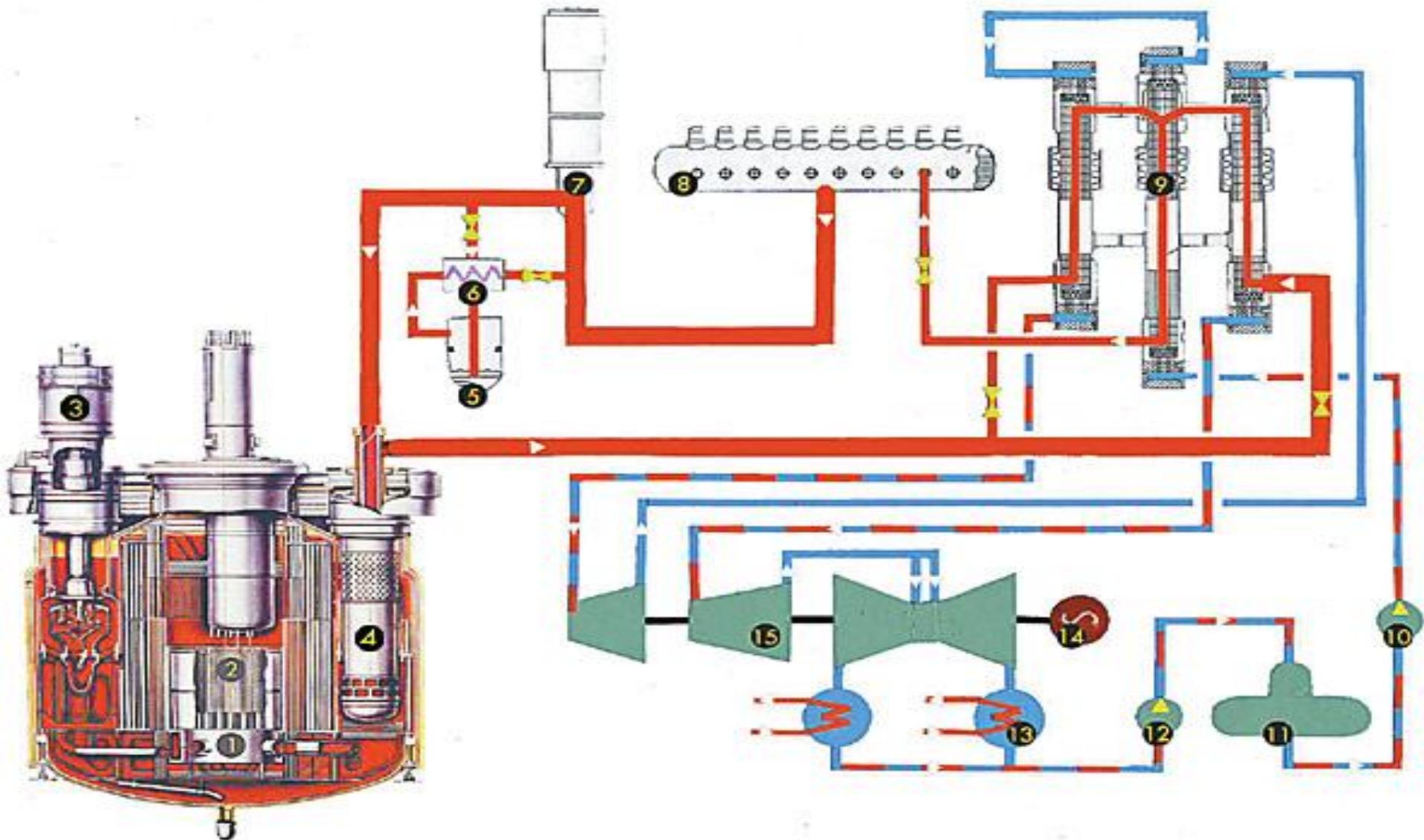
# Парогенератор АЭС









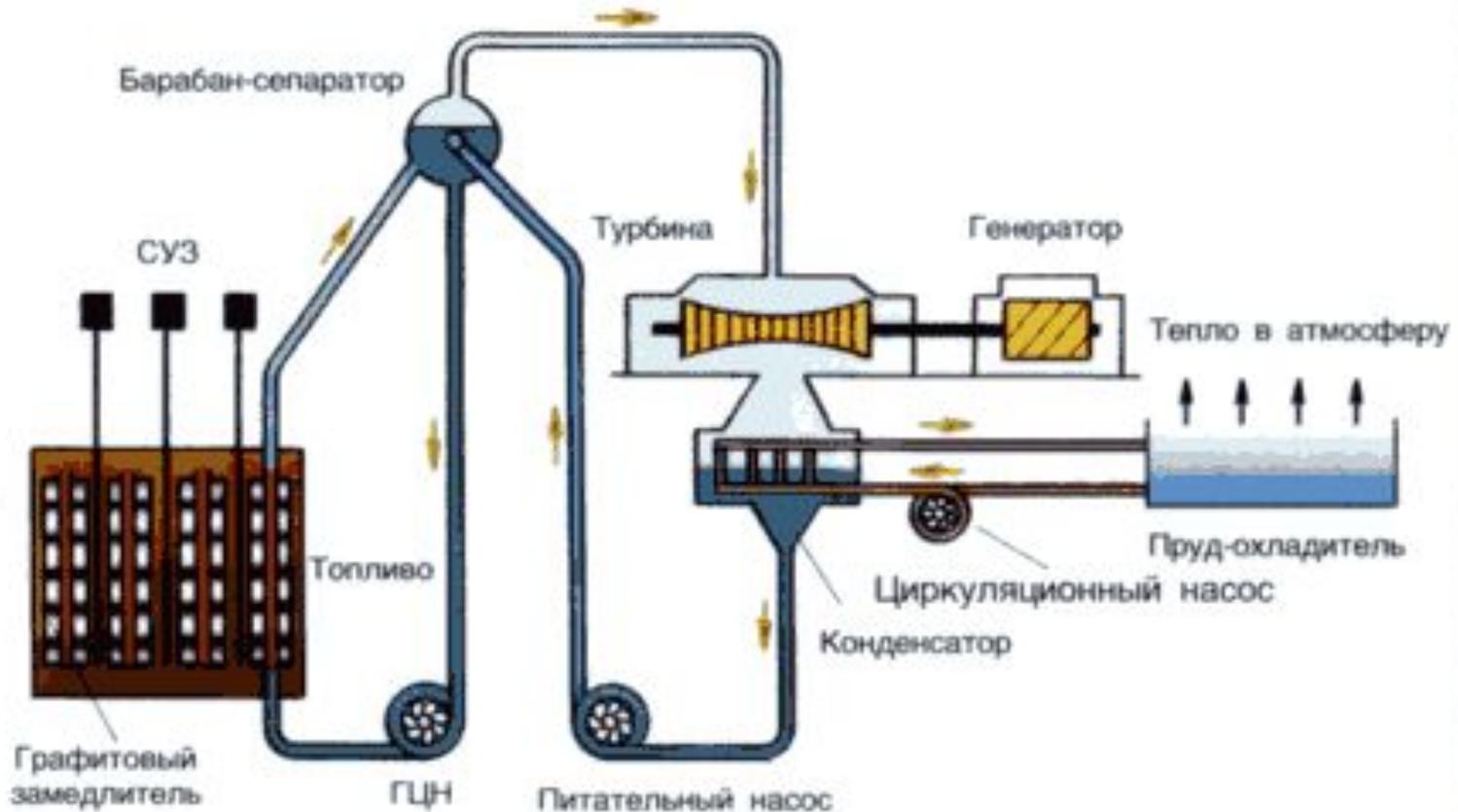


1 - напорная камера теплоносителя; 2 - активная зона реактора;  
 3 - насос первого натриевого контура; 4 - промежуточный теплообменник;  
 5 - фильтр системы очистки натрия; 6 - рекуператор; 7 - насос второго контура;  
 8 - буферная емкость; 9 - парогенератор; 10 - питательный насос; 11 - деаэратор;  
 12 - конденсатный насос; 13 - конденсатор; 14 - турбогенератор; 15 - турбина

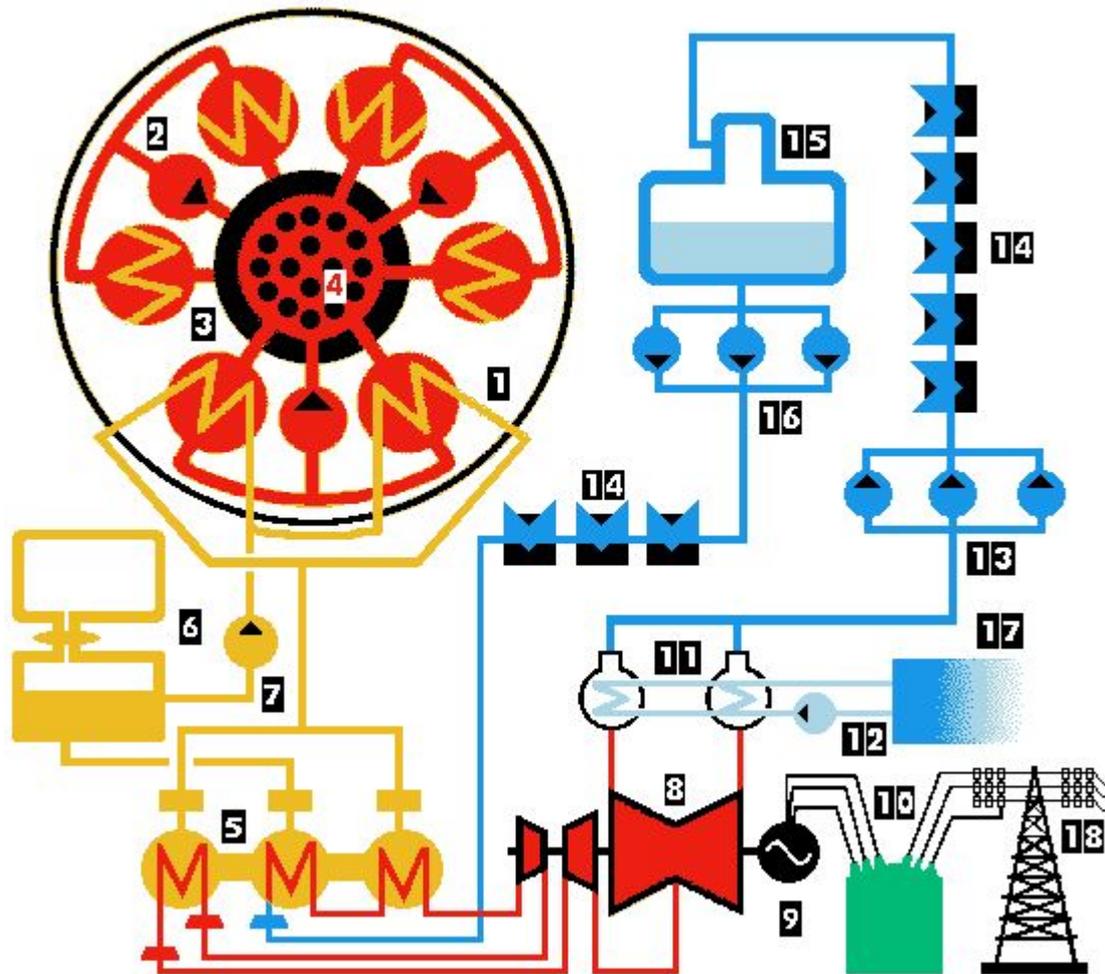
# СХЕМА ОДНОКОНТУРНОЙ АЭС С ГРАФИТОВЫМ РЕАКТОРОМ

© Информационный центр ВдАЭС

## АЭС с реактором РБМК

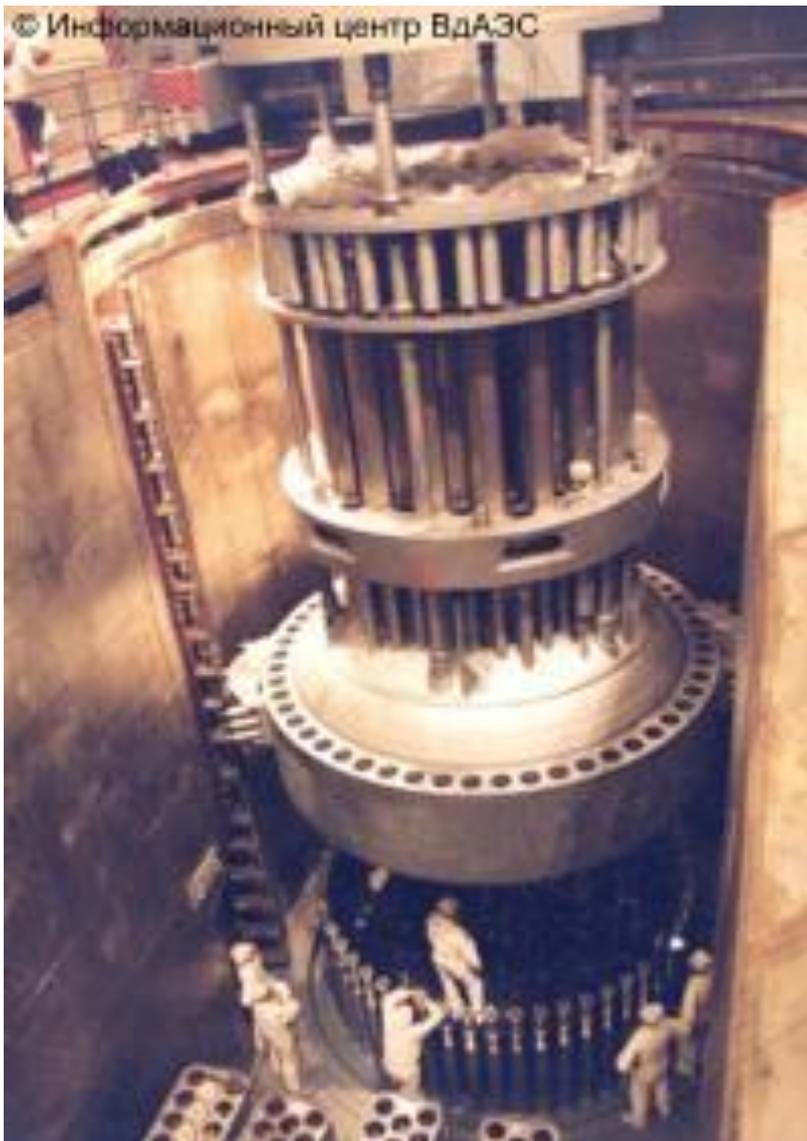


## ТЕПЛОВАЯ СХЕМА ЭНЕРГБЛОКА С РЕАКТОРОМ БН



- 1 - Реактор;
- 2 - Главный циркуляционный насос 1 контура;
- 3 - Промежуточный теплообменник;
- 4 - Тепловыделяющие сборки;
- 5 - Парогенератор;
- 6 - Буферная и сборная ёмкости;
- 7 - Главный циркуляционный насос 2 контура;
- 8 - Турбоустановка;
- 9 - Генератор;
- 10 - Трансформатор;
- 11 - Конденсаторы;
- 12 - Циркуляционные насосы;
- 13 - Конденсатные насосы;
- 14 - Подогреватели;
- 15 - Деаэратор;
- 16 - Питательные насосы;
- 17 - Пруд-охладитель;
- 18 - Отпуск электроэнергии потребителю.

# СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ РЕАКТОРА



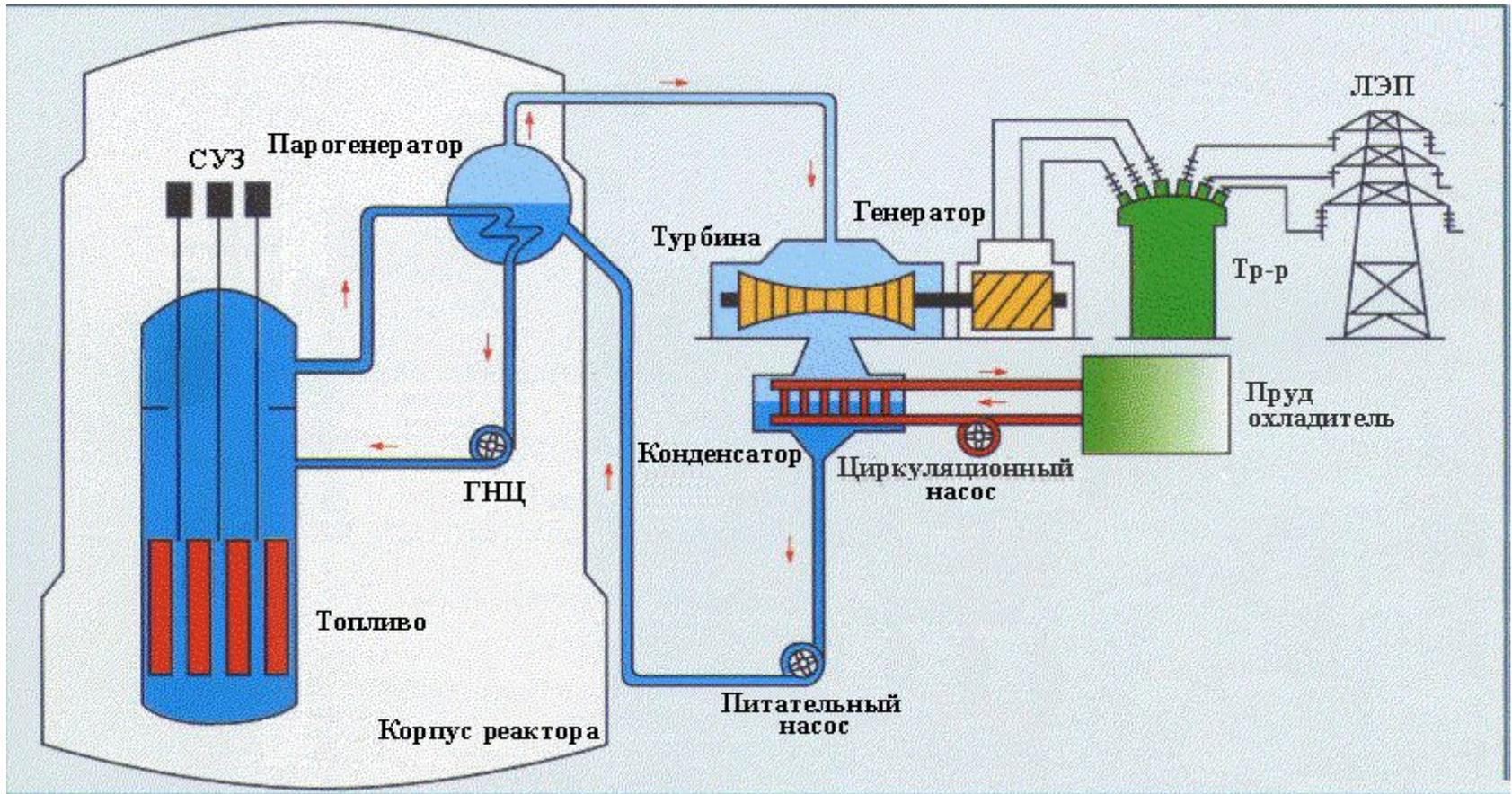
## Система управления и защиты (СУЗ) служит:

- для пуска и останова реактора,
- поддержания заданной мощности,
- регулирования мощности,
- аварийного останова реактора.

## СУЗ состоит из:

- *компенсирующих систем* (для компенсации изменений реактивности в связи с выгоранием топлива и переходом от холодного состояния реактора к рабочему),
- *регулирующих стержней* (для поддержания или регулирования мощности реактора),
- *стержней аварийной защиты* (для быстрого прекращения реакции деления)

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ (СУЗ)



## ТИПЫ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

В настоящее время в мире существует *несколько типов ядерных энергетических реакторов*:

- реакторы на тепловых нейтронах с обычной водой в качестве замедлителя (РБМК, *под давлением* – ВВЭР и PWR, *кипящие* – ВК и BWR);
- реакторы на тепловых нейтронах с тяжелой водой в качестве замедлителя и обычной водой в качестве теплоносителя (ТВР - HWR);
- реактор на тепловых нейтронах высокотемпературные, охлаждаемые газовым теплоносителем (ВТГР - HTGR);
- реакторы на быстрых нейтронах (БН - LMFBR).

В России исторически получили распространение два типа реакторов – **ВВЭР** (Кольская, Калининская, Балаковская, Нововоронежская, Волгодонская АЭС) и **РБМК** (в России - Смоленская, Ленинградская, Курская АЭС, а также Чернобыльская и Игналинская АЭС).

Реактор на быстрых нейтронах **типа БН** используется на Белоярской атомной станции БАЭС.

Кипящие водо-водяные реакторы **типа ВК** в России для получения энергии не используются (только в качестве исследовательского образца).