

## 1.2. Ядерная энергетика и её роль в энергетическом балансе страны и мира

### Определение

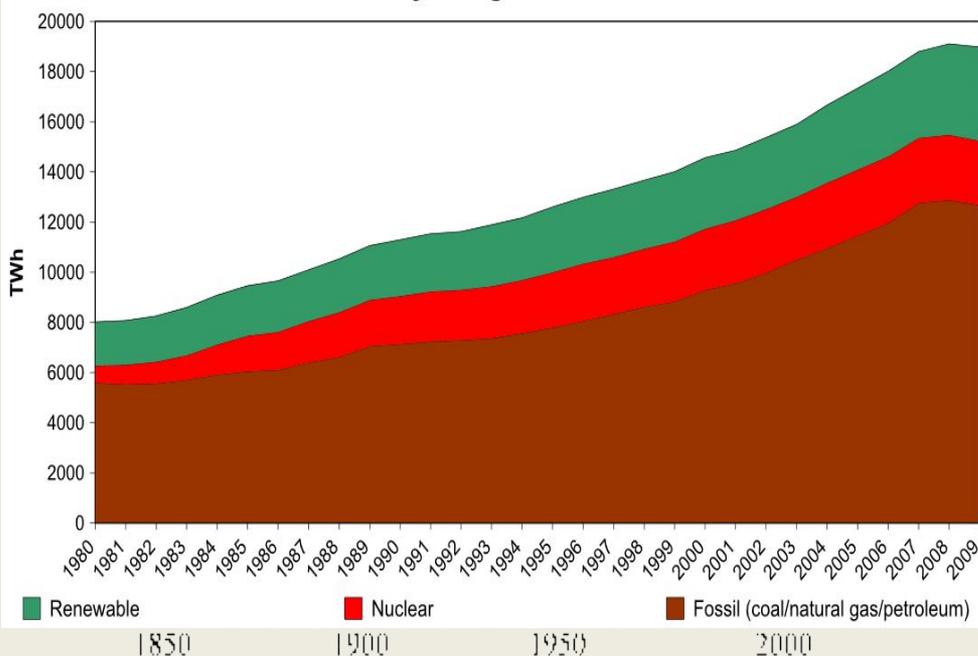
Ядерная (атомная) энергетика — это отрасль энергетики, предполагающая производство электрической, тепловой и других видов энергии путём преобразования энергии деления или синтеза ядер.

- Обычно для получения ядерной энергии используют цепную ядерную реакцию деления ядер урана-235 или плутония. Ядра делятся при попадании в них нейтрона, при этом получают новые нейтроны и осколки деления. Эти нейтроны и осколки деления обладают большой кинетической энергией. В результате столкновений осколков с другими атомами эта кинетическая энергия преобразуется в тепло.

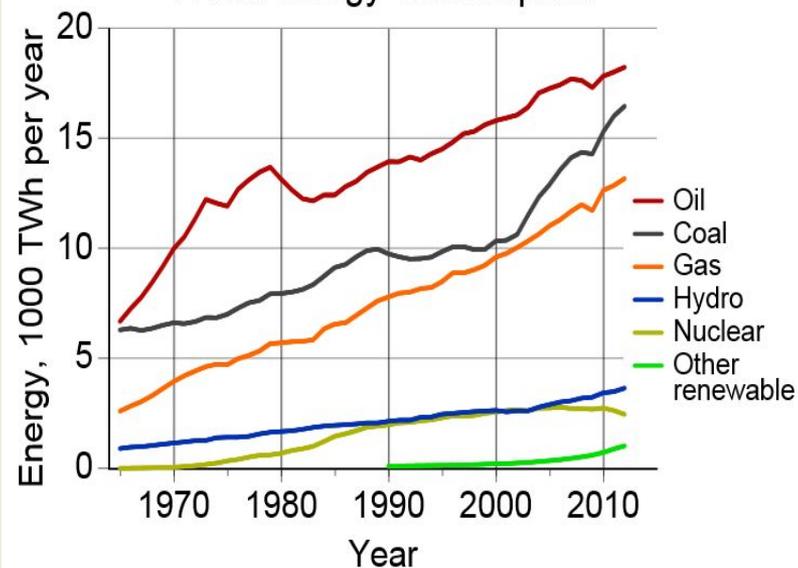
## 1.2. Роль ядерной энергетики в энергетическом балансе страны и мира

**Преамбула.** Мировое производство топлива сегодня составляет примерно  $5 \times 10^{20}$  Дж в год. Это соответствует  $12 \times 10^9$  тонн условного топлива (уголь, 7000 ккал/кг). Потребление энергии в мире растёт — на 2,3 процента ежегодно, то есть удваиваясь каждые 30 лет. Структура ископаемого топлива потребления: 45 % — нефть, 25 % — газ (природный), 16 % — уголь, 14 % — ядерное топливо.

Annual electricity net generation in the world



World energy consumption

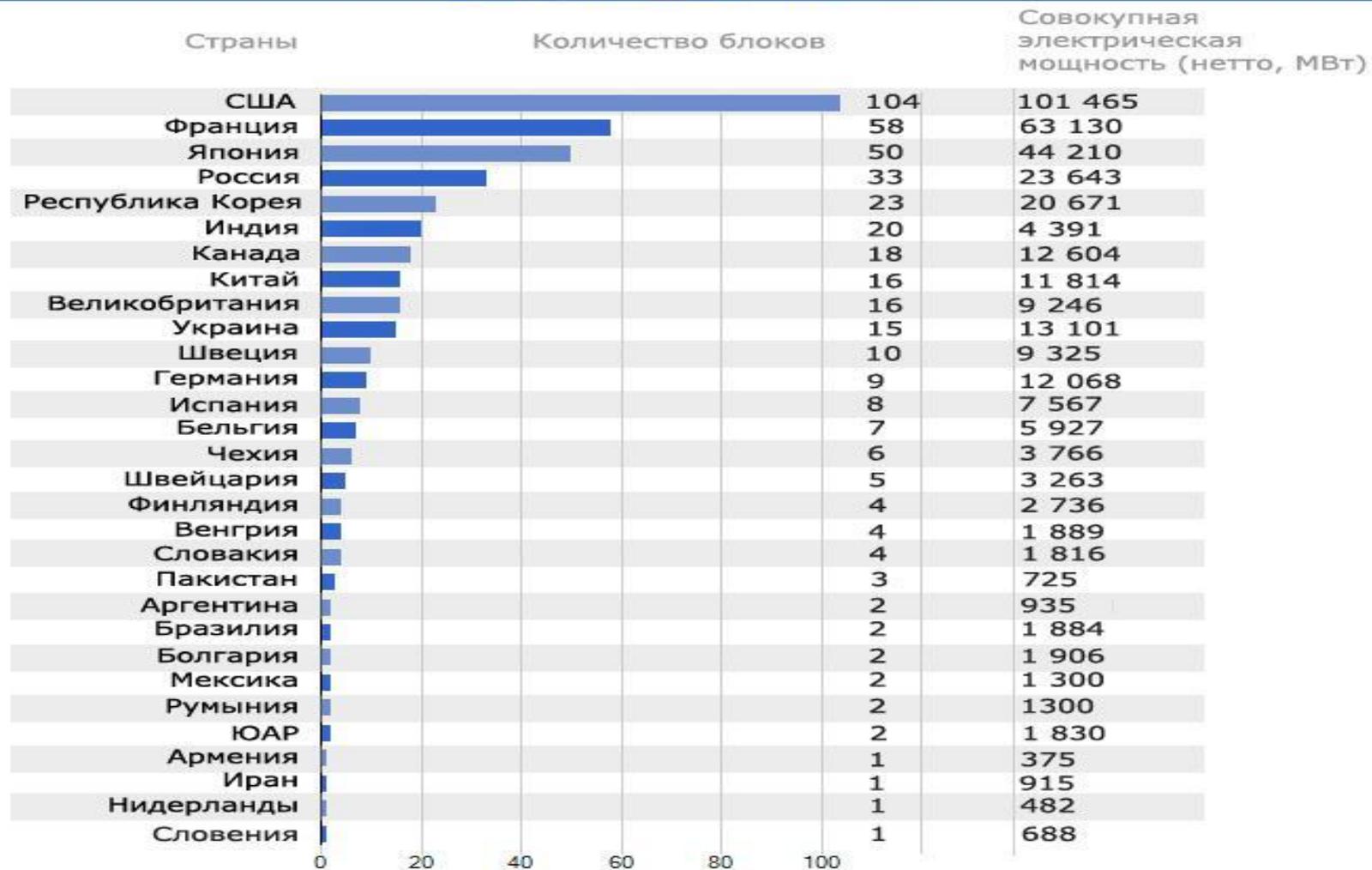


## 1.2. Роль ядерной энергетики в энергетическом балансе страны и мира

- Можно считать, что в любой области энергетики первичным источником является ядерная энергия (например, энергия солнечных ядерных реакций в гидро- и тепловых электростанциях, энергия радиоактивного распада в геотермальных электростанциях и т.д.).
- К ядерной энергетике относится лишь использование управляемых реакций в ядерных реакторах.
- Ядерная энергия производится в атомных электрических станциях, используется на атомных ледоколах, атомных подводных лодках;
- программа создания ядерного двигателя для космических кораблей;
- предпринимались попытки создать ядерный двигатель для самолётов.

# Мировая ядерная энергетика (2012)

## Действующие реакторы



Всего - 435 реакторов, которые производят 370 003 МВт электроэнергии

## Тема 1. Основные задачи, понятия и терминология курса

Крупнейшая в мире АЭС — это Kashiwazaki Kariva (Япония) мощностью 8200 МВт (7 реакторов типа BWR установленной мощностью 110—1356 МВт).

Самая крупная в Европе — Запорожская АЭС (Украина) мощностью 6000 МВт (6 реакторов ВВЭР-1000). В России наибольшую мощность имеют Балаковская, Ленинградская, Калининская и Курская АЭС (по 4 реактора мощностью 1000 МВт каждый).

Осуществляется строительство Нововоронежской АЭС-2, Ленинградской АЭС-2, Балтийской АЭС, первой в мире плавучей АЭС «Академик Ломоносов». В стадии достройки находится еще один энергоблок - четвёртый - на Белоярской АЭС. За рубежом ведется строительство атомных станций «Куданкулам» (Индия), «Бушер» (Иран), «Аккую» (Турция), Островецкой АЭС (Беларусь), второй очереди АЭС «Тяньвань» (Китай).

## Тема 1. Основные задачи, понятия и терминология курса

На сегодняшний день в России эксплуатируются 10 атомных электростанций (33 энергоблока установленной мощностью 24,2 ГВт), которые вырабатывают около 16% всего производимого в стране электричества.



# Реакторы на судах и плавучих АЭС



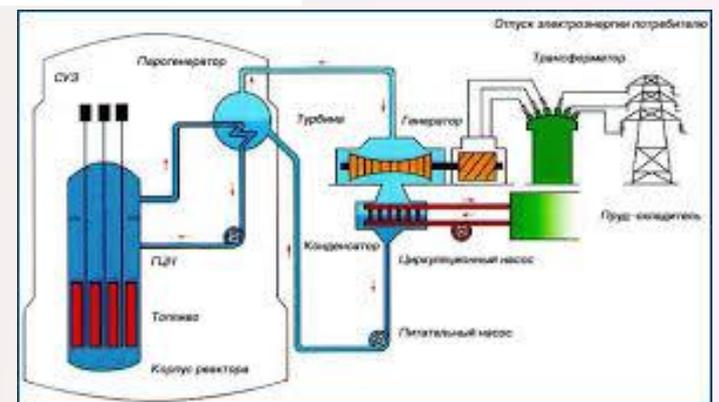
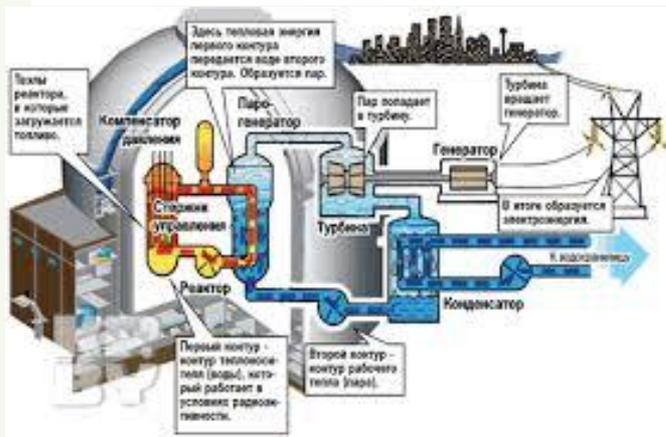
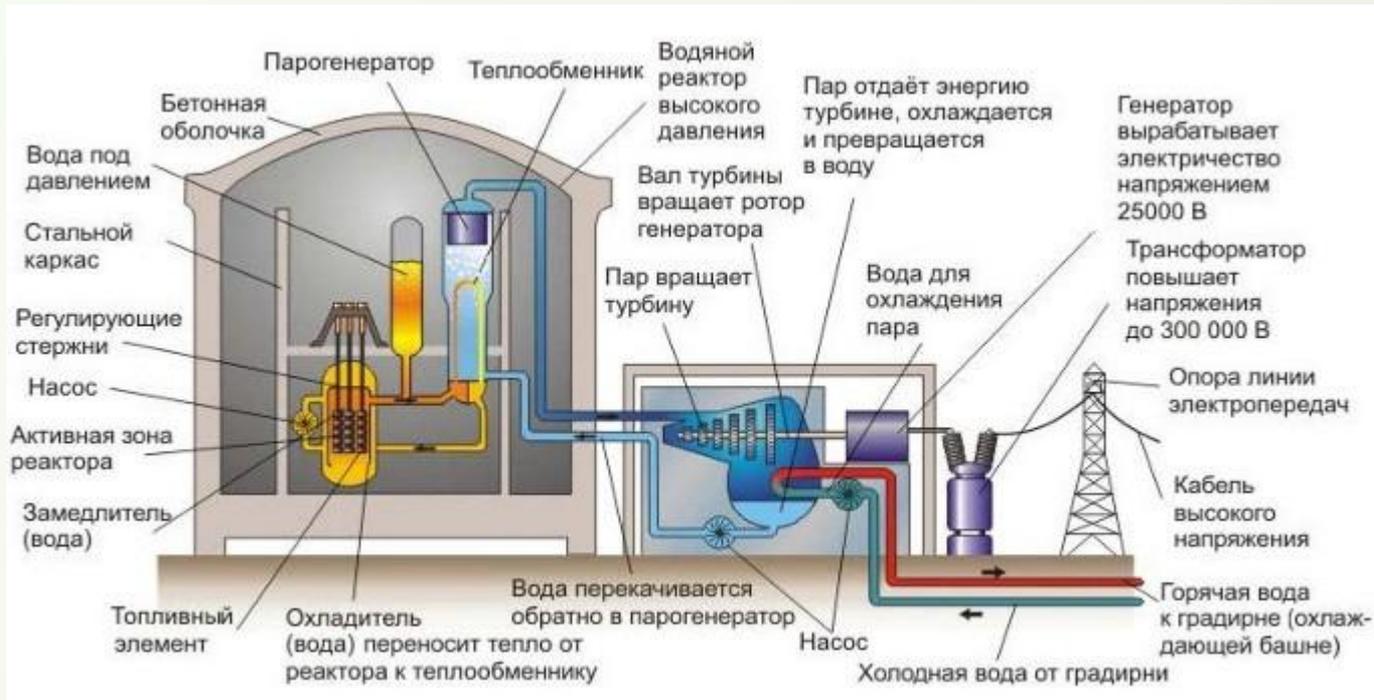
## Тема 2. Ядерные энергетические установки и их материалы (лекция+семинар, 4/6)

### Фотография АЭС

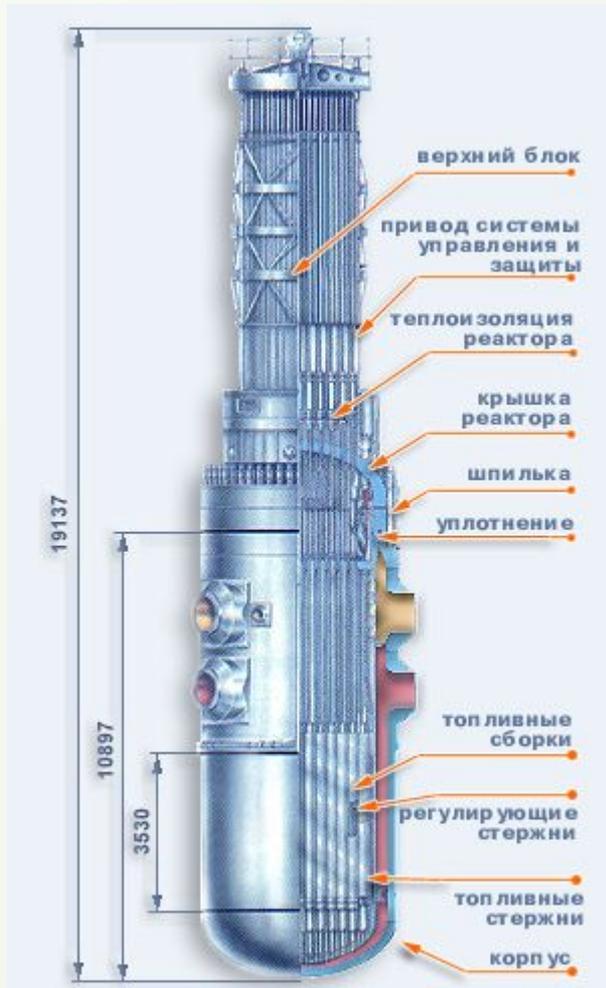


# Тема 2. Ядерные энергетические установки и их материалы

## 2.1. Схемы ядерно-энергетической установки

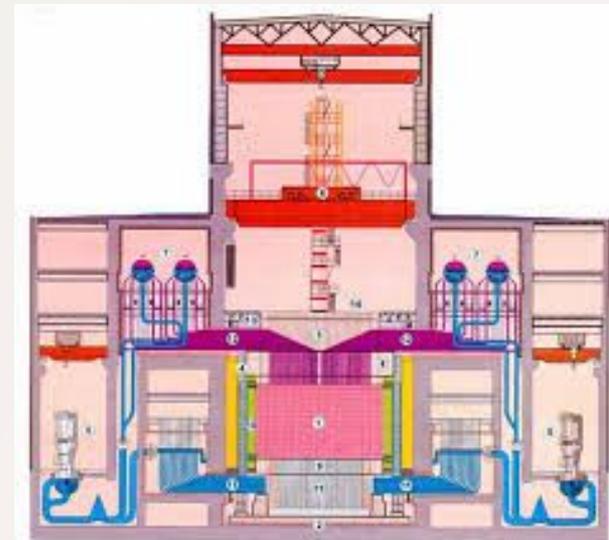
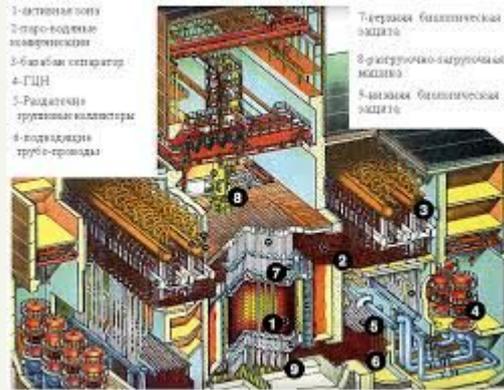
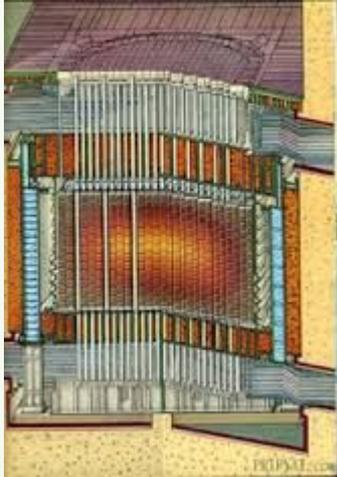


# Реактор ВВЭР



Характеристика	ВВЭР-210	ВВЭР-365	ВВЭР-440	ВВЭР-1000	ВВЭР-1200
Тепловая мощность реактора, МВт	760	1325	1375	3000	3200
К. п. д., %	27,6	27,6	32,0	33,0	>35,0
Давление пара перед турбиной, кг/см <sup>2</sup>	29,0	29,0	44,0	60,0	-
Давление в первом контуре, кг/см <sup>2</sup>	100	105	125	160,0	-
Температура воды, °С:					
на входе в реактор	250	250	269	289	298,6
на выходе из реактора	269	275	300	319	329,7
Диаметр активной зоны, м	2,88	2,88	2,88	3,12	-
Высота активной зоны, м	2,50	2,50	2,50	3,50	-
Диаметр ТВЭЛа, мм	10,2	9,1	9,1	9,1	-
Число ТВЭЛов в кассете	90	126	126	312	-
Загрузка урана, т	38	40	42	66	-
Среднее обогащение урана, %	2,0	3,0	3,5	3,3—4,4	4,71—4,85
Среднее выгорание топлива, МВт-сут/кг	13,0	27,0	28,6	40	>50

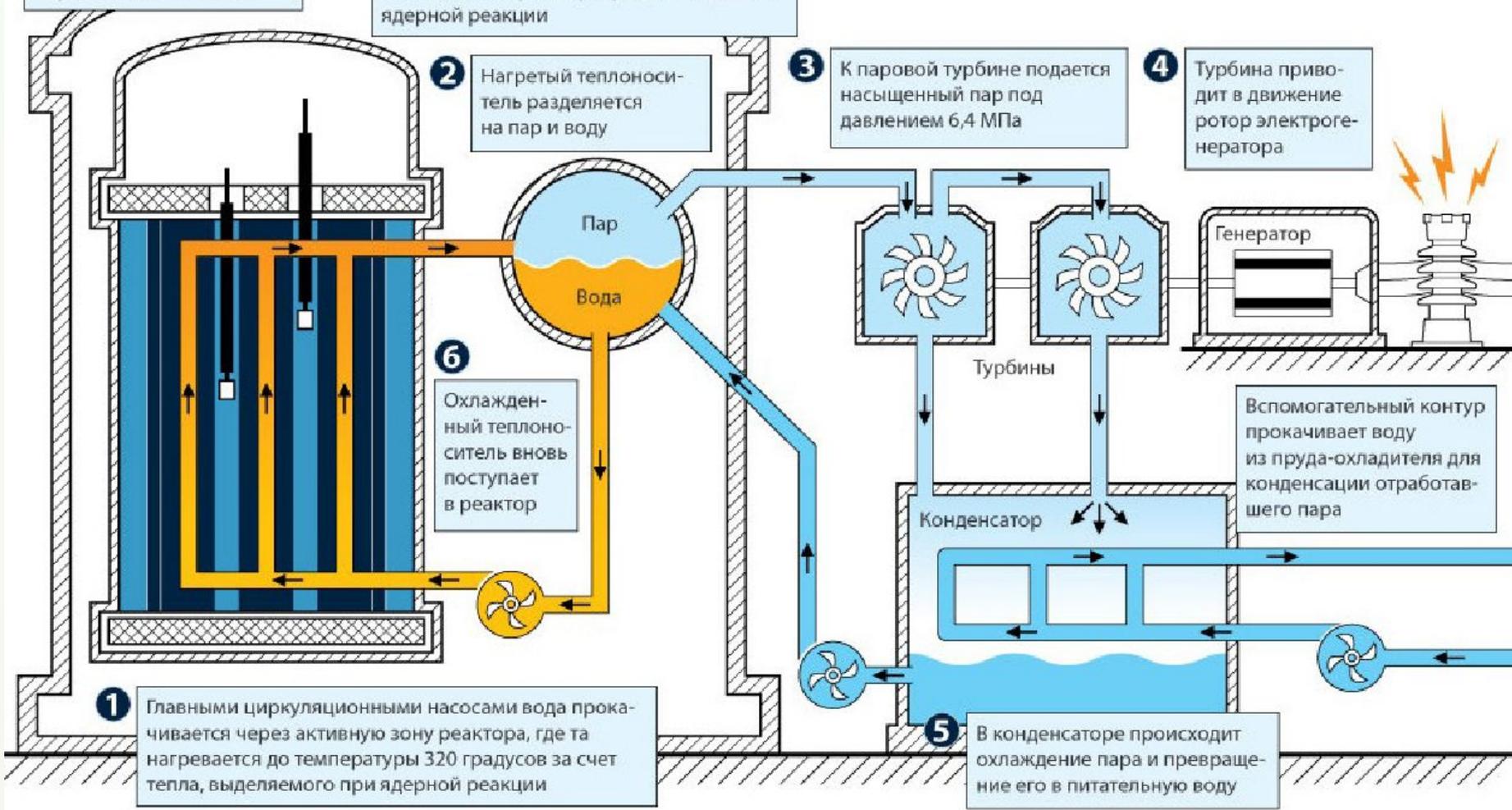
# Реактор РБМК



Контуры реактора герметичны для безопасности работы реактора для персонала и населения

Система управления и защиты реактора (СУЗ) – стержни, содержащие поглощающий нейтроны элемент (бор) предназначены для быстрого прекращения цепной ядерной реакции

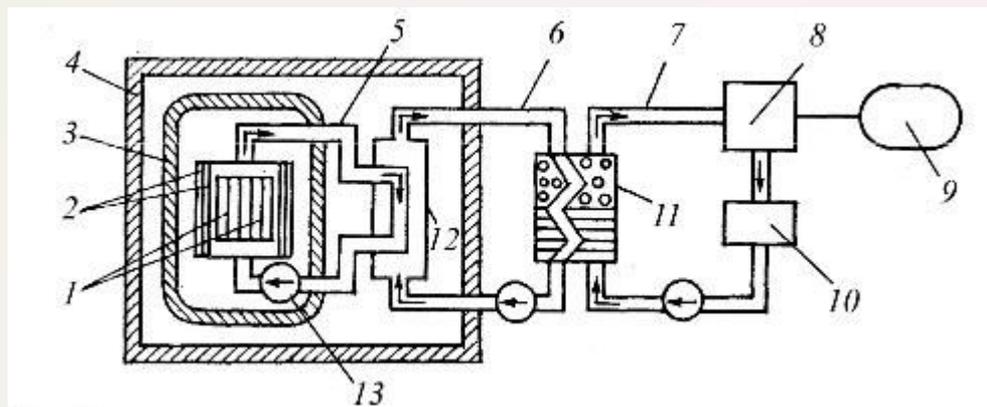
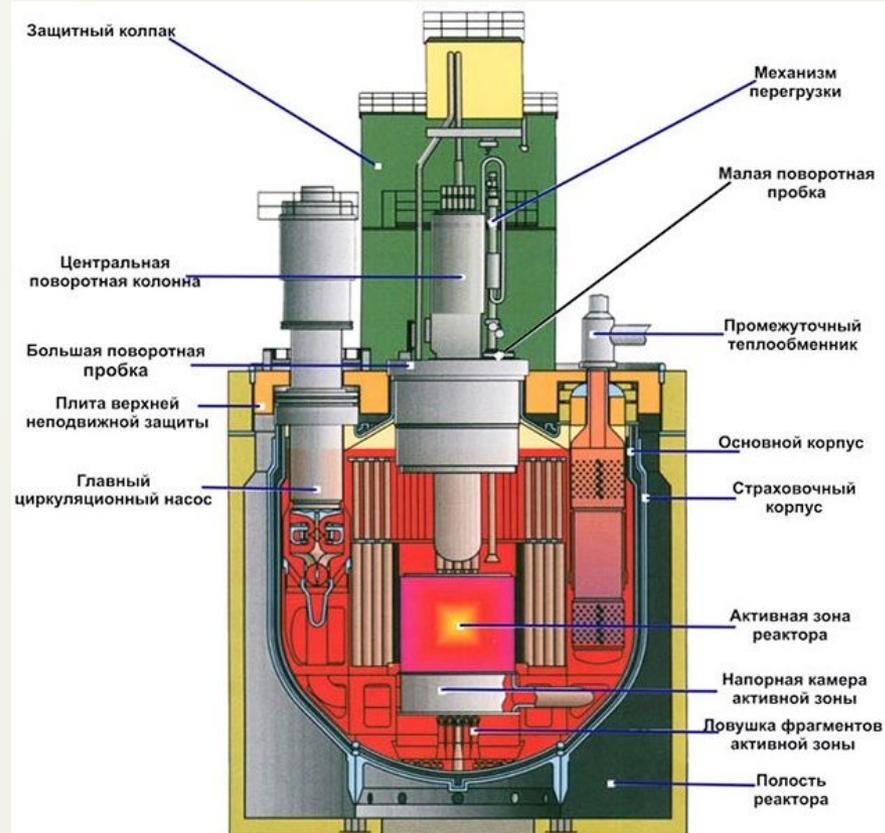
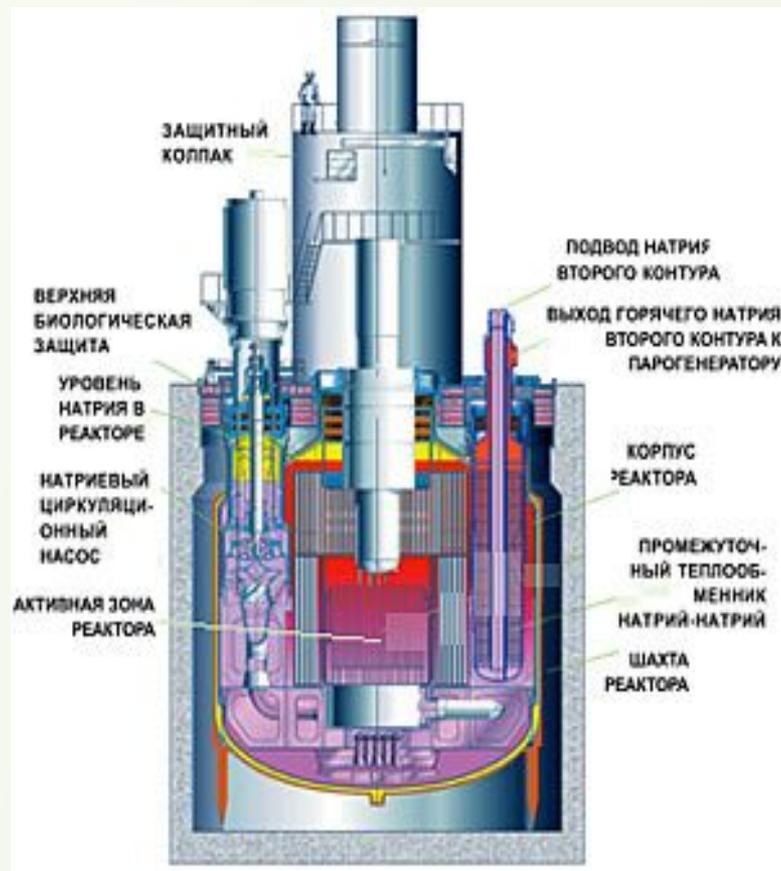
### АЭС с каналным реактором большой мощности (РБМК)

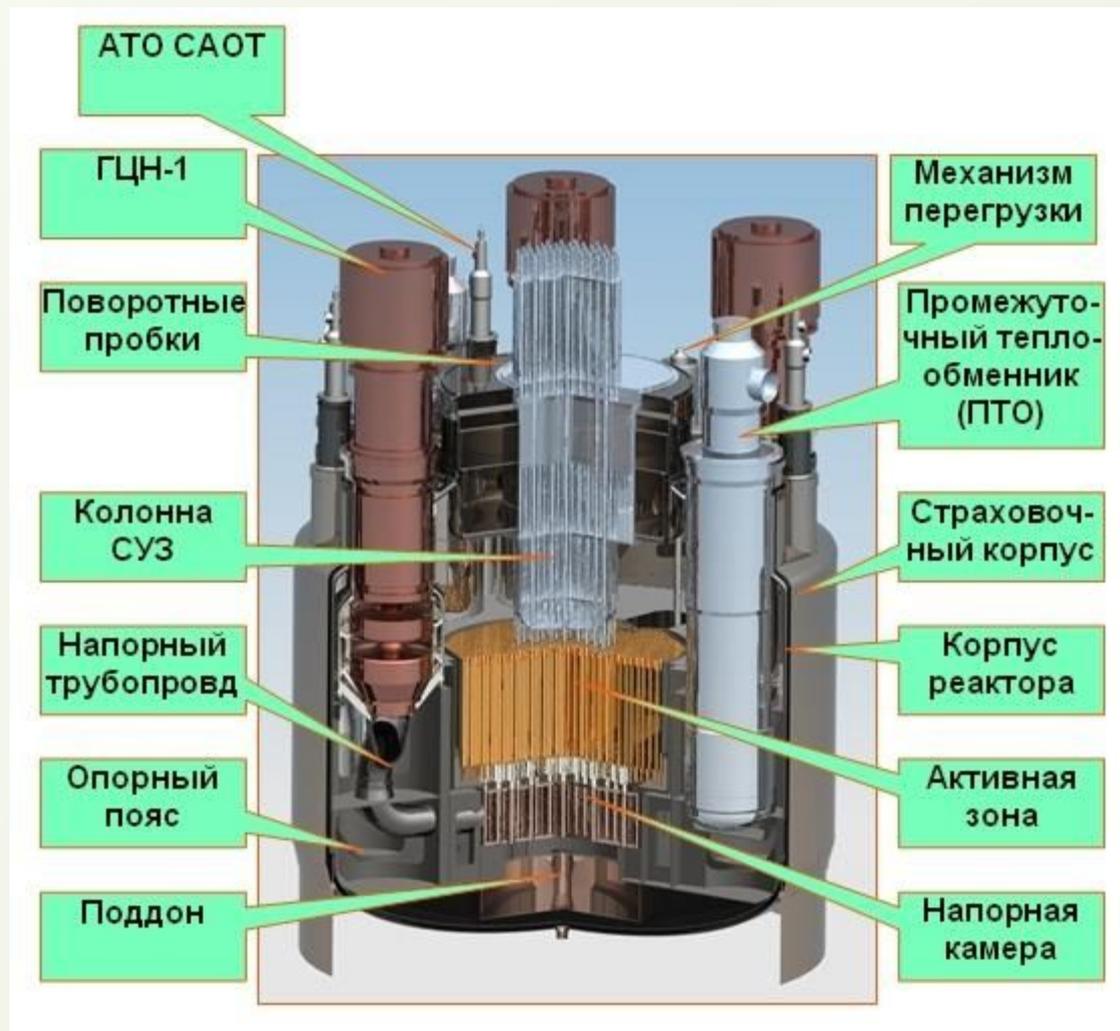


# Характеристики реактора РБМК

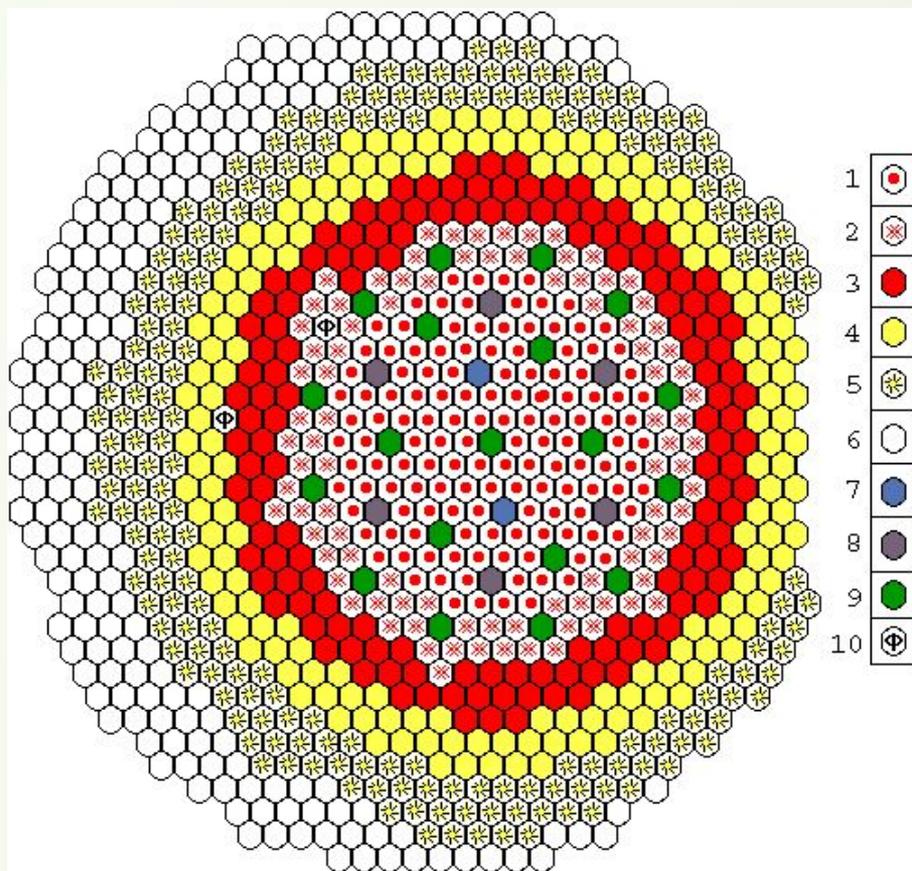
Характеристика	РБМК-1000	РБМК-1500	РБМКП-2400 (проект)	МКЭР- 1500 (проект)
Тепловая мощность реактора, МВт	3200	4800	5400	4250
Электрическая мощность блока, МВт	1000	1500	2000	1500
КПД блока, %	31,3	31,3	37,0	35,2
Давление пара перед турбиной, атм	65	65	65	65?
Температура пара перед турбиной, °С	280	280	450	
Размеры активной зоны, м:				
высота	7	7	7,05	7
диаметр (ширина×длина)	11,8	11,8	7,05×25,38	14
Загрузка урана, т	192	189	220	
Обогащение, % 235U				
испарительный канал	2,6-3,0	2,6-2,8	1,8	2-3,2
перегревательный канал	—	—	2,2	—
Число каналов:				
испарительных	1693-1661 <sup>[3]</sup>	1661	1920	1824
перегревательных	—	—	960	—
Среднее выгорание, МВт·сут/кг:				
в испарительном канале	22,5	25,4	20,2	30-45
в перегревателе канале	—	—	18,9	—
Размеры оболочки твэла (диаметр×толщина), мм:				
испарительный канал	13,5×0,9	13,5×0,9	13,5×0,9	-
перегревательный канал	—	—	10×0,3	—
Материал оболочек твэлов:				
испарительный канал	Zr + 2,5 % Nb	Zr + 2,5 % Nb	Zr + 2,5 % Nb	-
перегревательный канал	—	—	Нерж. сталь	—

# БН-800



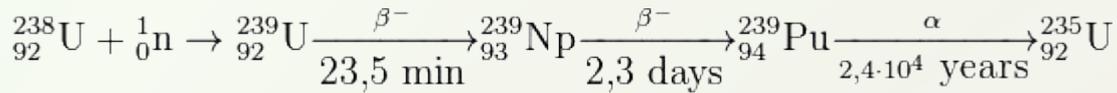


## Тема 2. Ядерные энергетические установки и их материалы. Зона воспроизводства реактора БН-600



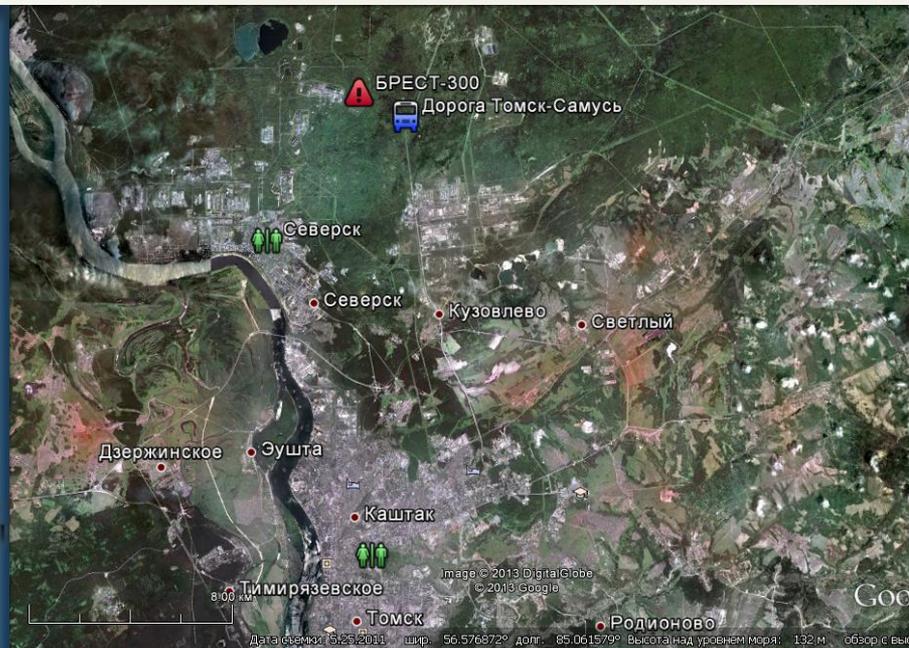
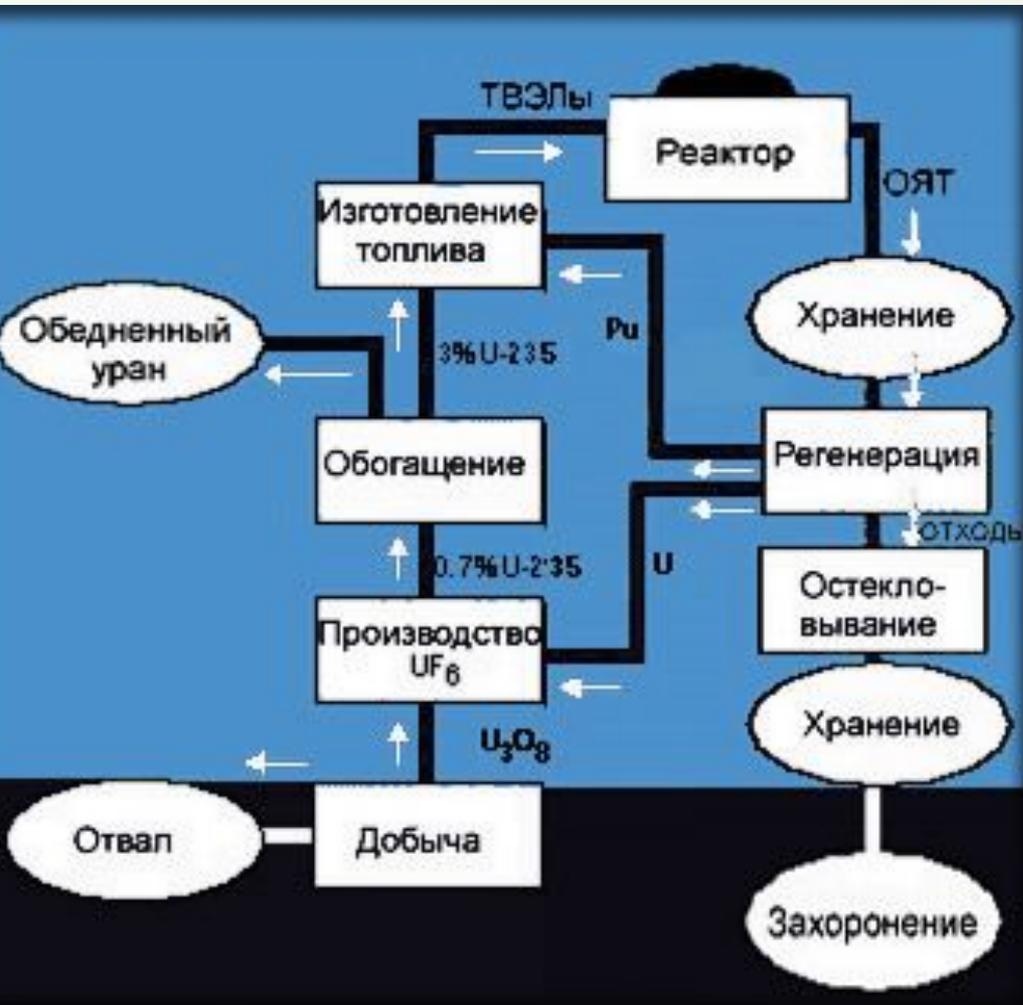
- 1 - ТВС активной зоны с малым обогащением;
  - 2 - ТВС активной зоны со средним обогащением;
  - 3 - ТВС активной зоны с большим обогащением;
  - 4 - ТВС внутренней зоны воспроизводства;
  - 5 - ТВС внешней зоны воспроизводства;
  - 6 - Хранилище отработавших сборок;
  - 7 - Стержни автоматического регулирования;
  - 8 - Стержни аварийной защиты;
  - 9 - Компенсирующие стержни;
  - 10 - Фотонейтронный источник.
- [\(обратно к содержанию\)](#)

# Особенности реактора БРЕСТ

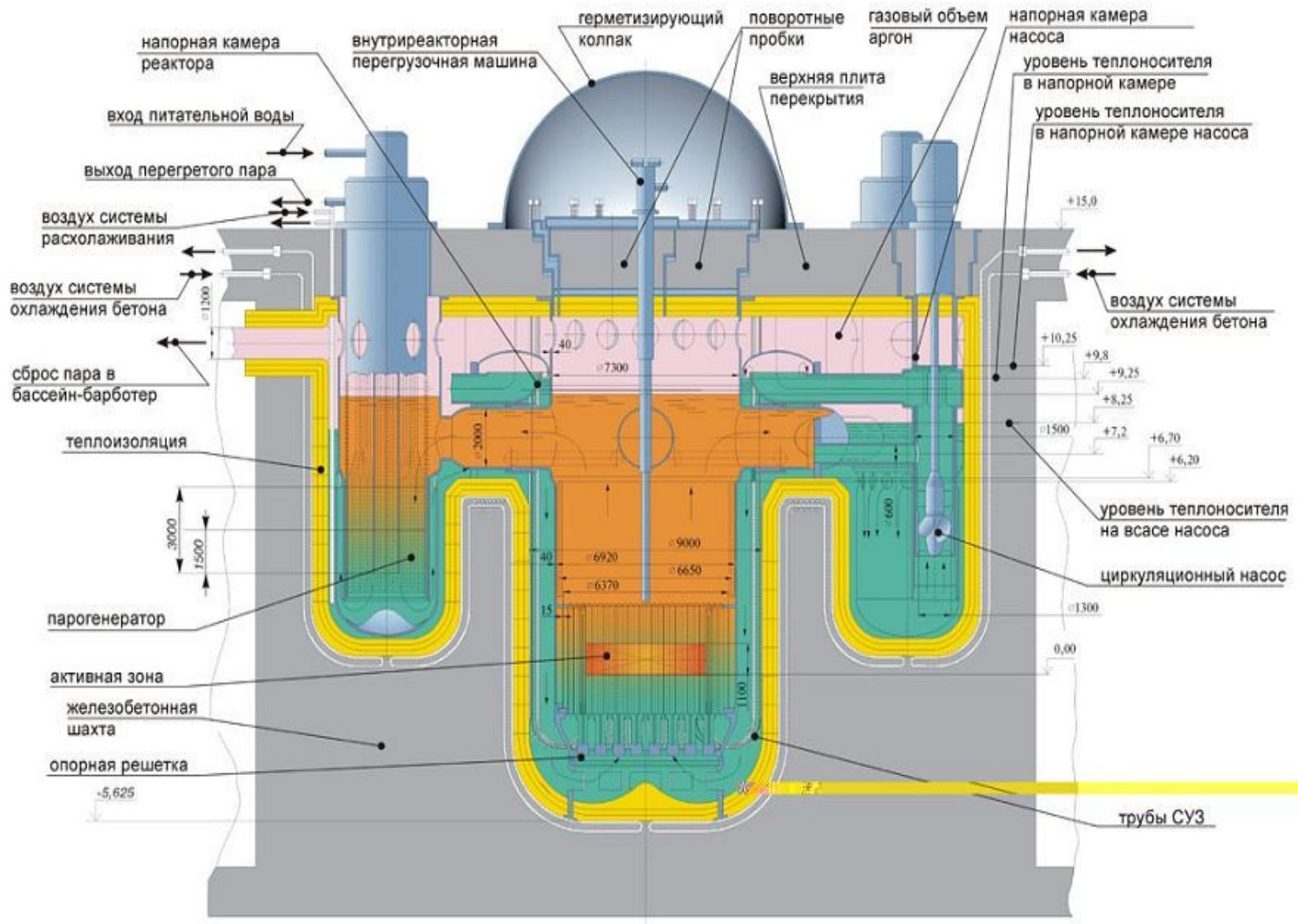


1. Реактор бассейнового типа.
2. Теплоноситель – свинец.
3. Топливо – мононитриды U-Pu-МА (минорные актиноиды, актиниды). К минорным актиноидам относятся долгоживущие и относительно долгоживущие изотопы нептуния (Np-237), америция (Am-241, Am-243) и кюрия (Cm-242, Cm-244, Cm-245), нарабатываемые в ядерных реакторах.
4. Замкнутый топливный цикл.
5. Позволяет «сжигать» примерно 80 кг МА за кампанию.
6. Старт с топливом из обеднённого урана, плутония и МА.

# Особенности реактора БРЕСТ. Замкнутый топливный цикл



# Реактор БРЕСТ (строится в Томске)



## Тема 2. Ядерные энергетические установки и их материалы.

### Классификация реакторов

- **1.1. Энергетические реакторы**, предназначенные для получения электрической и тепловой энергии, используемой в энергетике, а также для опреснения морской воды (реакторы для опреснения также относят к промышленным). Основное применение такие реакторы получили на атомных электростанциях. Тепловая мощность современных энергетических реакторов достигает 5 ГВт.
- **1.2. Транспортные реакторы**, предназначенные для снабжения энергией двигателей транспортных средств. Наиболее широкие группы применения — морские транспортные реакторы, применяющиеся на подводных лодках и различных надводных судах, а также в космической технике.
- **1.3. Экспериментальные реакторы**, предназначенные для изучения различных физических величин, значение которых необходимо для проектирования и эксплуатации ядерных реакторов; мощность таких реакторов не превышает нескольких кВт.
- **1.4. Исследовательские реакторы**, в которых потоки нейтронов и гамма-квантов, создаваемые в активной зоне, используются для исследований в области ядерной физики, физики твёрдого тела, радиационной химии, биологии, для испытания материалов, предназначенных для работы в интенсивных нейтронных потоках (в т. ч. деталей ядерных реакторов), для производства изотопов. Мощность исследовательских реакторов не превосходит 100 МВт. Выделяющаяся энергия, как правило, не используется.

## Тема 2. Ядерные энергетические установки и их материалы.

### Классификация реакторов

- 1.5. Промышленные (оружейные, изотопные) реакторы, используемые для наработки изотопов, применяющихся в различных областях. Наиболее широко используются для производства ядерных оружейных материалов, например  $^{239}\text{Pu}$ . Также к промышленным относят реакторы, использующиеся для опреснения морской воды.
- Часто реакторы применяются для решения двух и более различных задач, в таком случае они называются **многоцелевыми**. Например, некоторые энергетические реакторы, особенно на заре атомной энергетики, предназначались, в основном, для экспериментов. Реакторы на быстрых нейтронах могут быть одновременно и энергетическими, и нарабатывать изотопы. Промышленные реакторы кроме своей основной задачи часто вырабатывают электрическую и тепловую энергию.
- **2. По спектру нейтронов**
- 2.1. Реактор на тепловых (медленных) нейтронах («тепловой реактор»)
- 2.2. Реактор на быстрых нейтронах («быстрый реактор»)
- 2.3. Реактор на промежуточных нейтронах
- 2.4. Реактор со смешанным спектром

## Тема 2. Ядерные энергетические установки и их материалы.

### Классификация реакторов

- **3. По размещению топлива**
- [3.1 Гетерогенные реакторы](#), где топливо размещается в активной зоне дискретно в виде блоков, между которыми находится замедлитель;
- [3.2. Гомогенные реакторы](#), где топливо и замедлитель представляют однородную смесь ([гомогенную систему](#)).
  
- **4. По виду топлива**
- изотопы урана 235, 238, 233 ( [\$^{235}\text{U}\$](#) ,  [\$^{238}\text{U}\$](#) ,  [\$^{233}\text{U}\$](#) )
- изотоп плутония 239 ( [\$^{239}\text{Pu}\$](#) ), также изотопы  $^{239-242}\text{Pu}$  в виде смеси с  $^{238}\text{U}$  ([МОХ-топливо](#))
- изотоп тория 232 ( $^{232}\text{Th}$ ) (посредством преобразования в  $^{233}\text{U}$ )
  
- **5. По степени обогащения:**
- природный уран
- слабо обогащённый уран
- высоко обогащённый уран
  
- **6. По химическому составу:**
- металлический U
- $\text{UO}_2$  ([диоксид урана](#))
- UC ([карбид урана](#)) и т. д.

## Тема 2. Ядерные энергетические установки и их материалы.

### Классификация реакторов

- **5. По виду теплоносителя**

- $H_2O$  ([вода](#), см. [Водо-водяной реактор](#))
- Газ, (см. [Графито-газовый реактор](#))
- $D_2O$  ([тяжёлая вода](#), см. [Тяжеловодный ядерный реактор](#), [CANDU](#))
- [Реактор с органическим теплоносителем](#)
- [Реактор с жидкометаллическим теплоносителем](#)
- [Реактор на расплавах солей](#)
- [Реактор с твёрдым теплоносителем](#)

- **6. По роду замедлителя**

- С ([графит](#), см. [Графито-газовый реактор](#), [Графито-водный реактор](#))
- $H_2O$  (вода, см. [Легководный реактор](#), [Водо-водяной реактор](#), [ВВЭР](#))
- $D_2O$  (тяжёлая вода, см. [Тяжеловодный ядерный реактор](#), [CANDU](#))
- [Be](#), [BeO](#)
- [Гидриды](#) металлов
- Без замедлителя (см. [Реактор на быстрых нейтронах](#))

## Тема 2. Ядерные энергетические установки и их материалы.

### Классификация реакторов

- **7. По конструкции**
- [Корпусные реакторы](#)
- [Канальные реакторы](#)
  
- **8. По способу генерации пара**
- Реактор с внешним [парогенератором](#) (См. [Водо-водяной реактор](#), [ВВЭР](#))
- [Кипящий реактор](#)

### Классификация МАГАТЭ

- PWR (pressurized water reactors) — [водо-водяной реактор](#) (реактор с водой под давлением);
- BWR (boiling water reactor) — [кипящий реактор](#);
- FBR (fast breeder reactor) — [реактор-размножитель на быстрых нейтронах](#);
- GCR (gas-cooled reactor) — [газоохлаждаемый реактор](#);
- LWGR (light water graphite reactor) — [графито-водный реактор](#)
- PHWR (pressurised heavy water reactor) — [тяжеловодный реактор](#)
- Наиболее распространёнными [в мире](#) являются водо-водяные (около 62 %) и кипящие (20 %) реакторы.

## Тема 2. Ядерные энергетические установки и их материалы

### **2.2. Реакторные материалы:**

- **ТВЭЛЫ;**
- **оболочки ТВЭЛОВ;**
- **замедлители нейтронов;**
- **отражатели нейтронов;**
- **поглощающие стержни системы управления и защиты;**
- **корпусные изделия;**
- **теплоносители;**
- **материалы теплообменников и т.д.**

## Тема 2. Ядерные энергетические установки и их материалы

### **Общие требования к реакторным материалам**

1. Высокая прочность.
2. Оптимальная пластичность.
3. Иногда способность работать в условиях высоких динамических нагрузок.
4. Иметь высокую технологичность (легко обрабатываться).
5. Жаростойкость.
6. Высокая радиационная стойкость.
7. Совместимость (напр., оболочка твэла + теплоноситель).
8. Горючее: высокое тепловыделение, высокое выгорание, высокая радиационная стойкость.
9. Малое сечение поглощения тепловых нейтронов (для материалов АЗ). Следовательно, высокая чистота материалов.
10. Замедлитель: высокая эффективность замедления + малое сечение поглощения нейтронов.
11. Высокий коэффициент теплопроводности (особенно для материалов твэла).

## Тема 2. Ядерные энергетические установки и их материалы

13. Минимальный коэффициент термического расширения.

14. Минимальная стоимость.

### 2.3. Специфические требования к материалам АЗ

#### **Оболочки твэлов**

1. Минимальное сечение поглощения тепловых нейтронов.
2. Хорошие механические свойства.
3. Хорошие теплофизические свойства.
4. Высокая эрозионная стойкость в потоке теплоносителя.
5. Совместимость с топливом.

#### **Замедлитель и отражатель нейтронов**

1. Минимальное количество элементов с большим сечением поглощения нейтронов.
2. Высокая радиационная стойкость.
3. Отсутствие деформаций в результате радиационно-стимулированных процессов.
4. Отсутствие химической активности.
5. Высокая термостойкость.

## Тема 2. Ядерные энергетические установки и их материалы

### **Поглощающие материалы стержней управления и защиты**

1. Высокое сечение поглощения тепловых нейтронов (бор, кадмий, редкие земли и др.).
2. Некоторая термостойкость (с учётом тепловыделения при поглощении нейтронов).
3. Особенность: большое сечение поглощения нейтронов больших энергий (более 10 эВ) в быстрых реакторах.
4. Отсутствие деформаций в результате дефектообразования.
5. Высокая коррозионная стойкость.

### **Металлоконструкции канальных аппаратов**

1. Высокая термо- и радиационная стойкость.
2. Высокая коррозионная и эрозионная стойкость.
3. Малое сечение поглощения тепловых нейтронов.

## Тема 2. Ядерные энергетические установки и их материалы

### **Корпус корпусного реактора**

1. Высокая радиационная стойкость (продолжительность эксплуатации не менее 40 лет). Отсутствие охрупчивания. Минимальное наводораживание.
2. Высокая коррозионная стойкость.
3. Малый коэффициент теплового расширения.
4. Высокая технологичность при обработке.

### **Материалы активной зоны быстрых реакторов**

1. Большое массовое число.
2. Большой коэффициент теплопроводности.
3. Высокая эрозионная стойкость в жидкометаллическом теплоносителе.

## Тема 2. Ядерные энергетические установки и их материалы

### **2.4. Требования к материалам и узлам, находящимся за пределами активной зоны**

1. Главные циркуляционные трубопроводы (высокая прочность, стойкость к эрозии).
2. Поверхность нагрева парогенератора (стойкость к эрозии) .
3. Арматура (стойкость к коррозии, эрозии, кавитации).
4. Главные циркуляционные насосы (стойкость к коррозии, эрозии, кавитации)..

## Тема 2. Ядерные энергетические установки и их материалы

### **2.5. Материалы, применяемые в реакторостроении (обобщение)**

1. Широко используются металлы и их сплавы: высокая прочность, пластичность, способность упрочняться при пластической деформации. Производство и обработка хорошо освоены.
2. Чистые металлы применяются ограниченно (там, где принципиально важно отсутствие примесей): Al как оболочка твэла, Be в качестве замедлителя и т.д.
3. Недостаток чистых металлов – их низкая термостойкость.
4. Проблема коррозии металлов в среде газовых теплоносителей типа CO<sub>2</sub> при высокой температуре. Отсюда следует необходимость применения нержавеющей сталей и сплавов.
5. В изделиях за пределами активной зоны (корпуса, трубопроводы и т.д.) в основном используются материалы на основе железа.
6. Сплавы на основе Ni и Ti используются в парогенераторах и теплообменниках, где требуется высокая коррозионная стойкость под напряжением. Например, в жидком Na (быстрый реактор).