

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

Определение

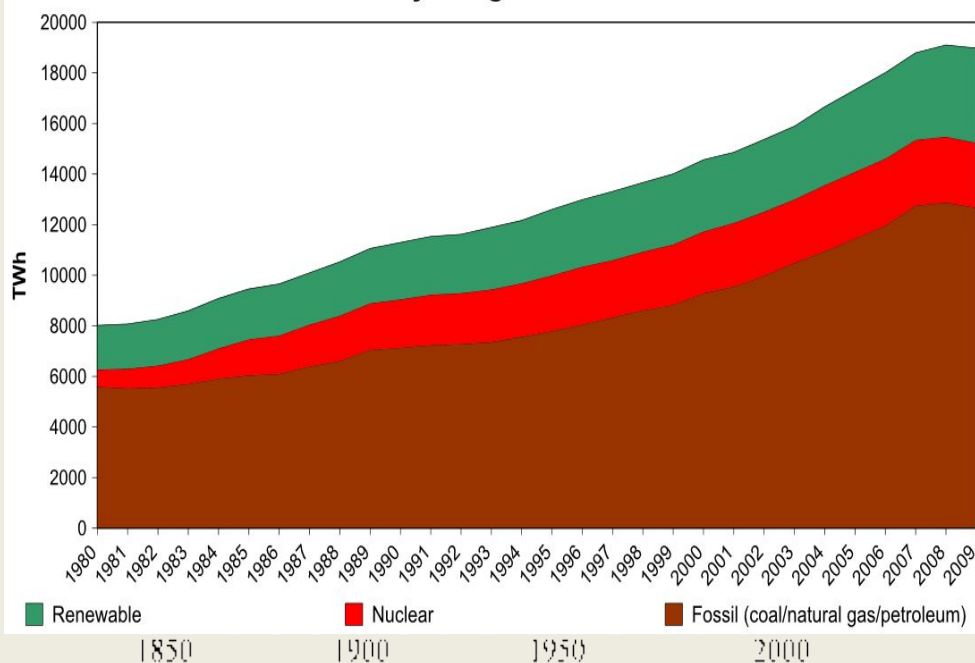
Ядерная (атомная) энергетика — это отрасль энергетики, предполагающая производство электрической, тепловой и других видов энергии путём преобразования энергии деления или синтеза ядер.

- Обычно для получения ядерной энергии используют цепную ядерную реакцию деления ядер урана-235 или плутония. Ядра делятся при попадании в них нейтрона, при этом получаются 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.

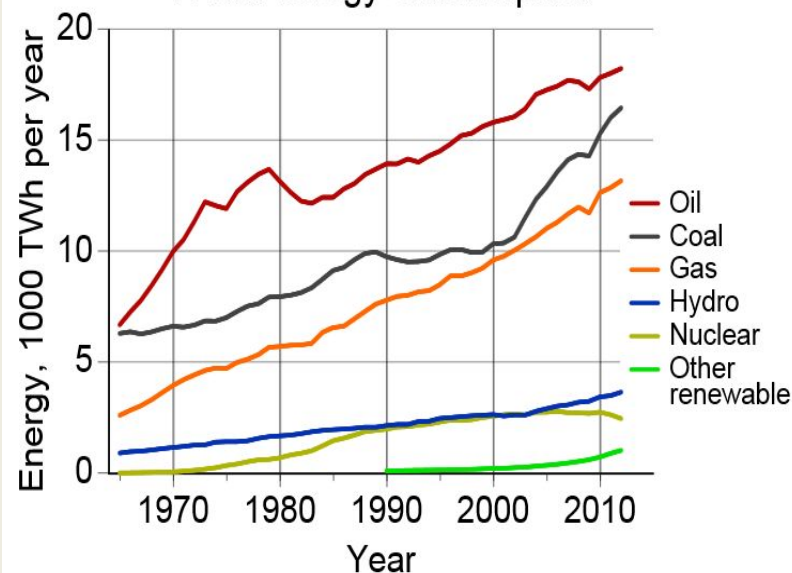
1.2. Роль ядерной энергетики в энергетическом балансе страны и мира

Преамбула. Мировое производство топлива сегодня составляет примерно 5×10^{20} Дж в год. Это соответствует 12×10^9 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

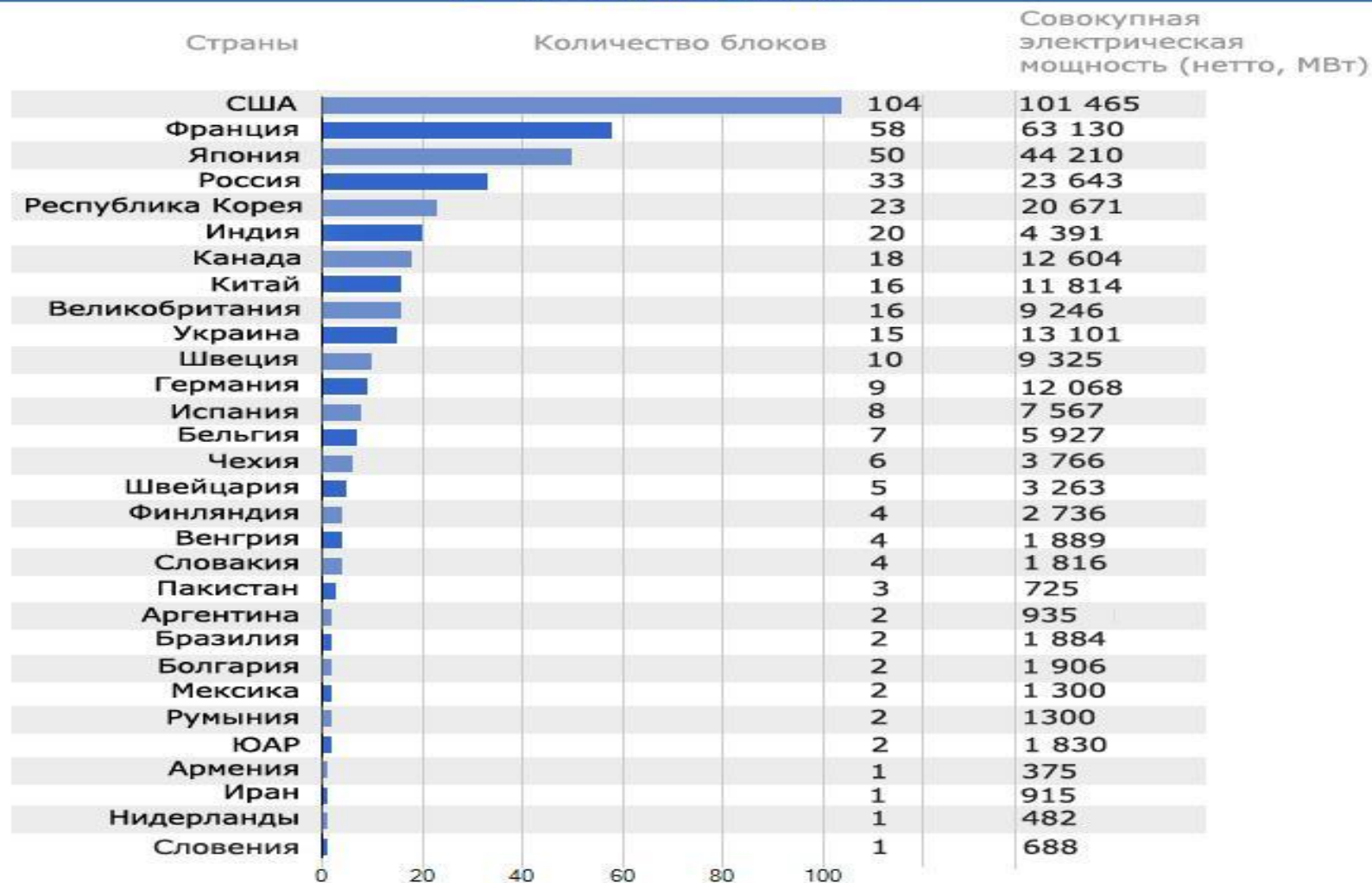


1.2. Роль ядерной энергетики в энергетическом балансе страны и мира

- 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



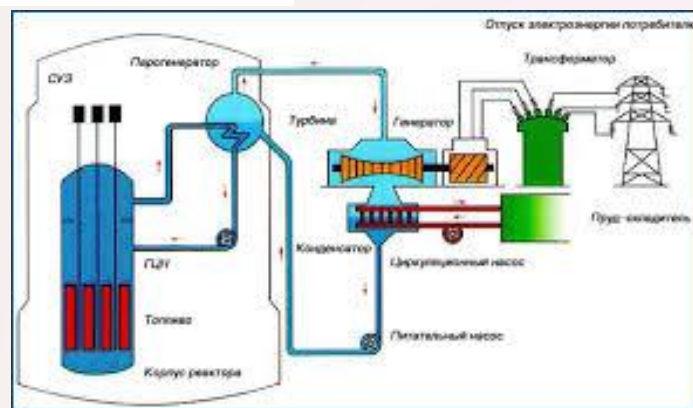
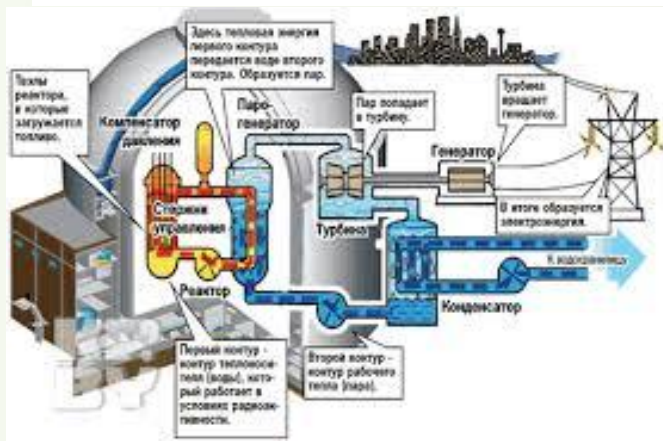
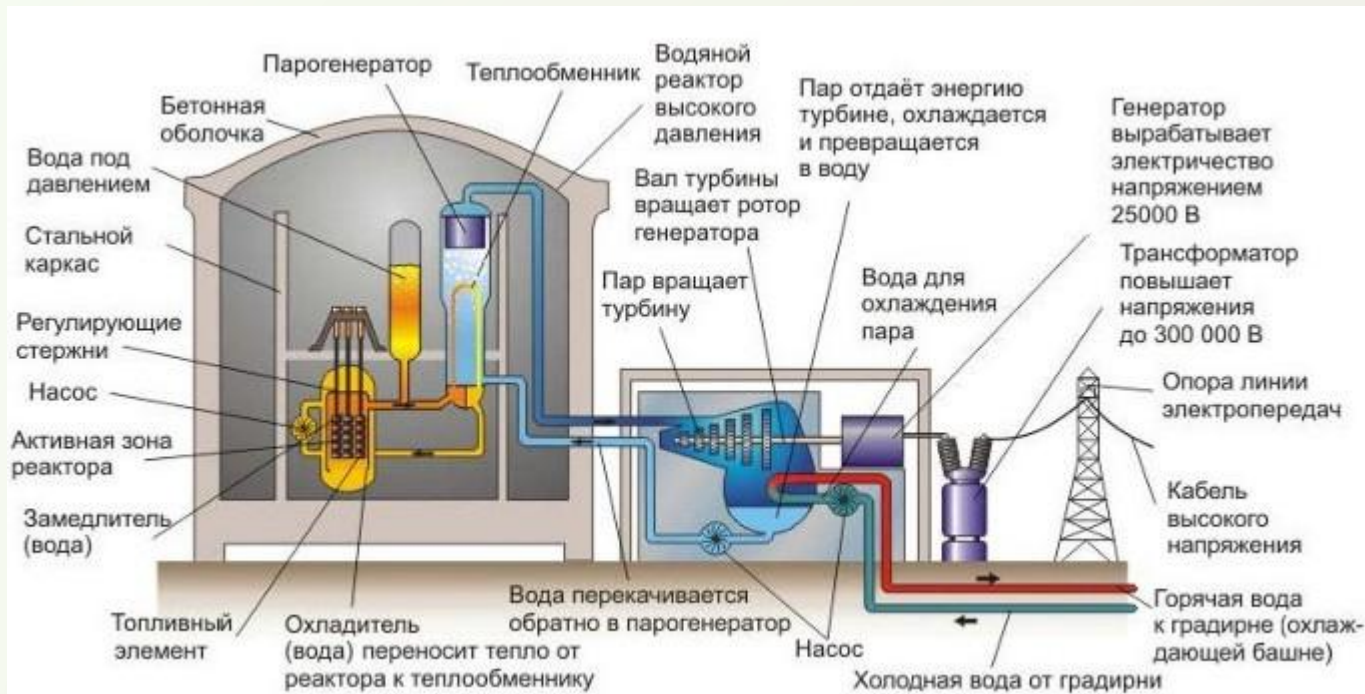
Тема 2. Ядерные энергетические установки и их материалы (лекция+семинар, 4/6)

Фотография АЭС

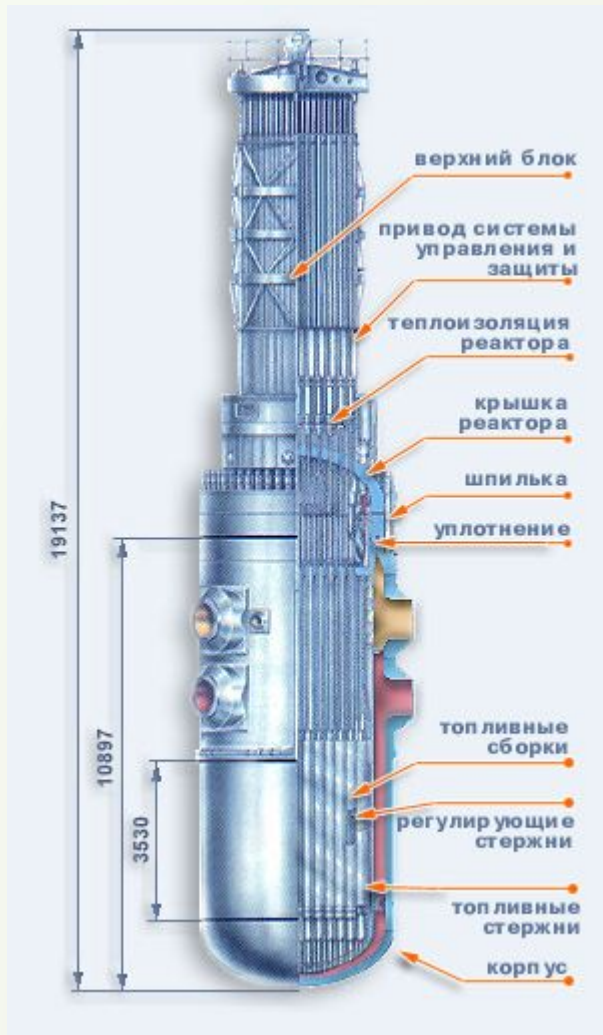


Тема 2. Ядерные энергетические установки и их материалы

2.1. Схемы ядерно-энергетической установки

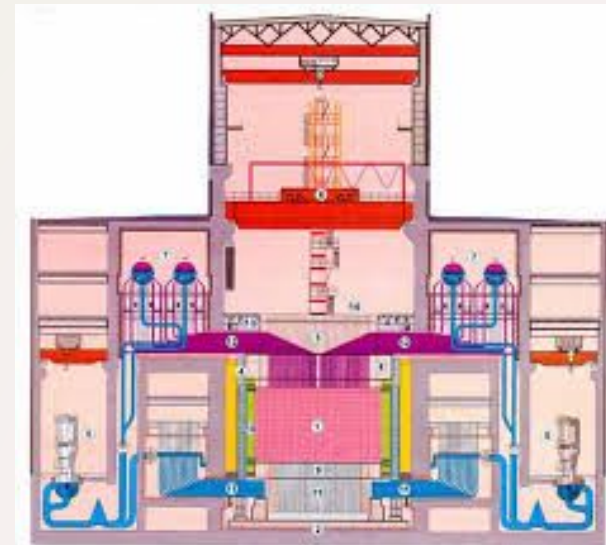
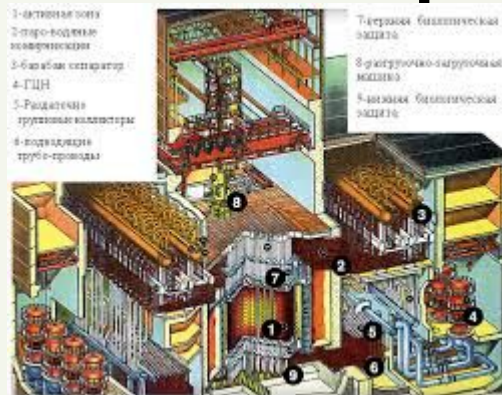
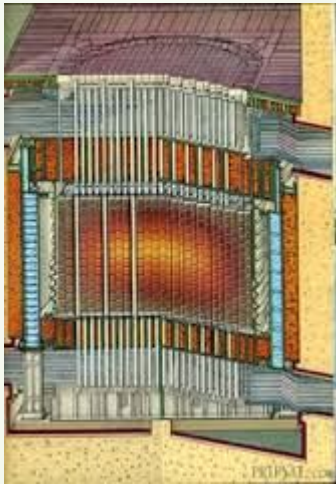


Реактор ВВЭР



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 ²	29,0	29,0	44,0	60,0	-
Давление в первом контуре, кг/см ²	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 ТВЭЛ, 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

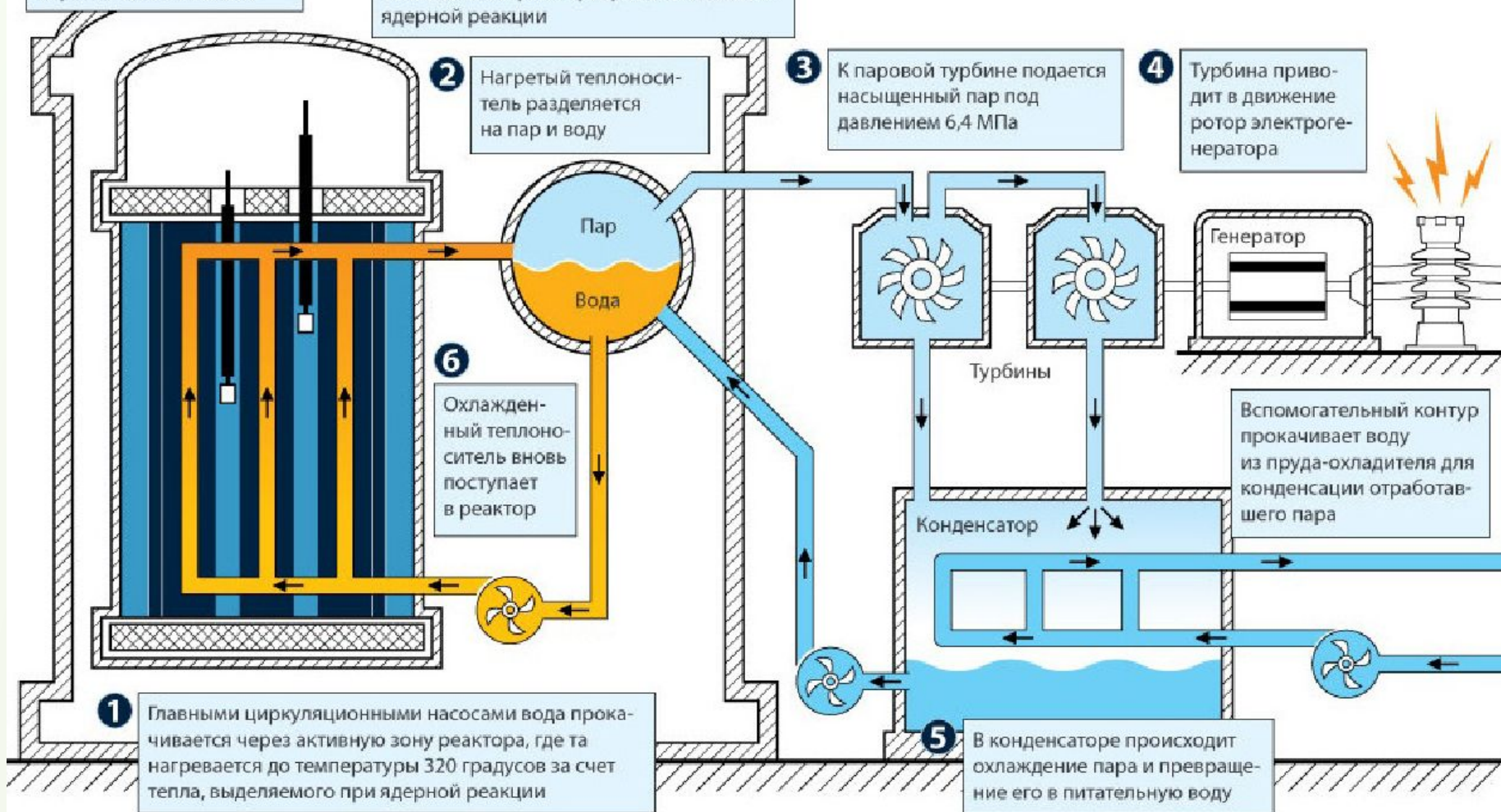
Реактор РБМК



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

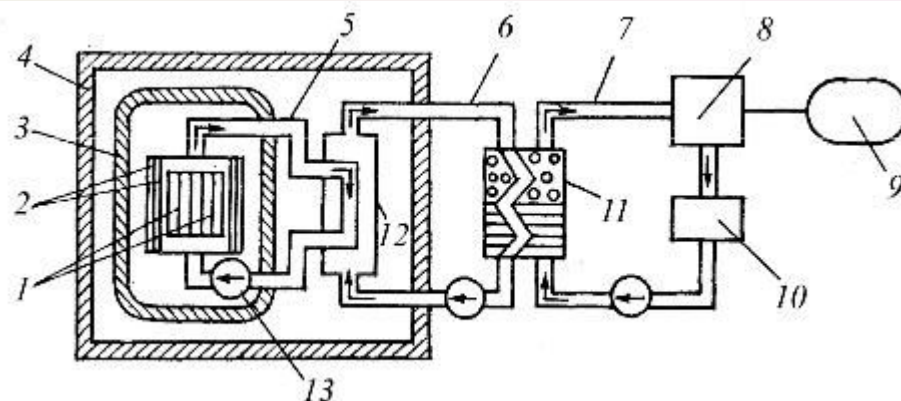
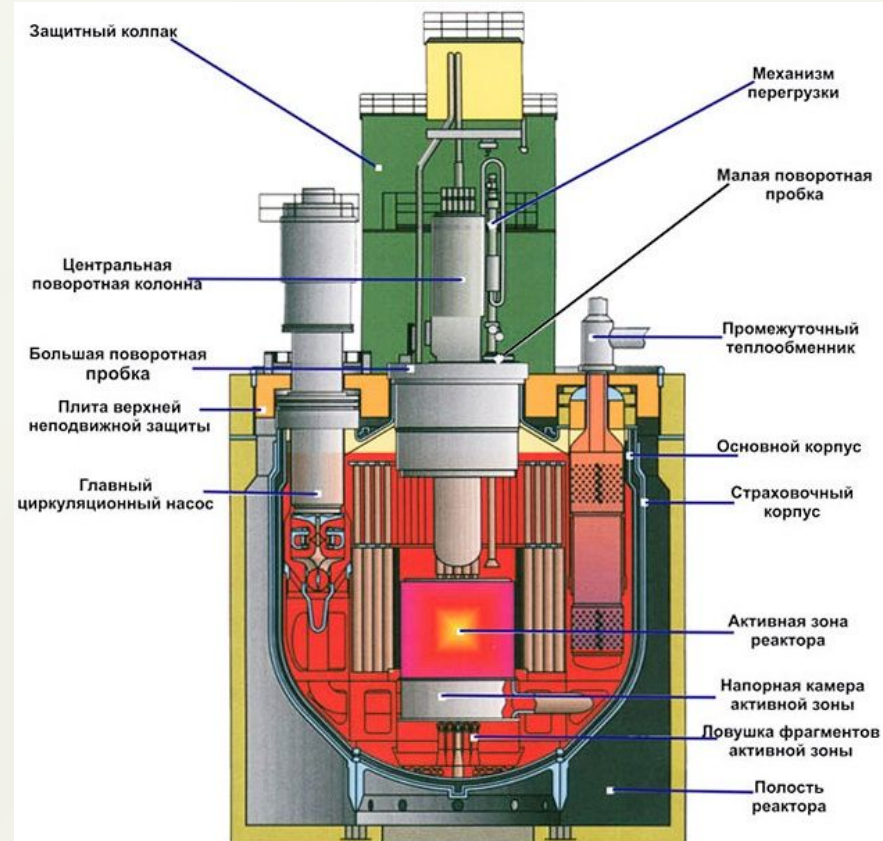
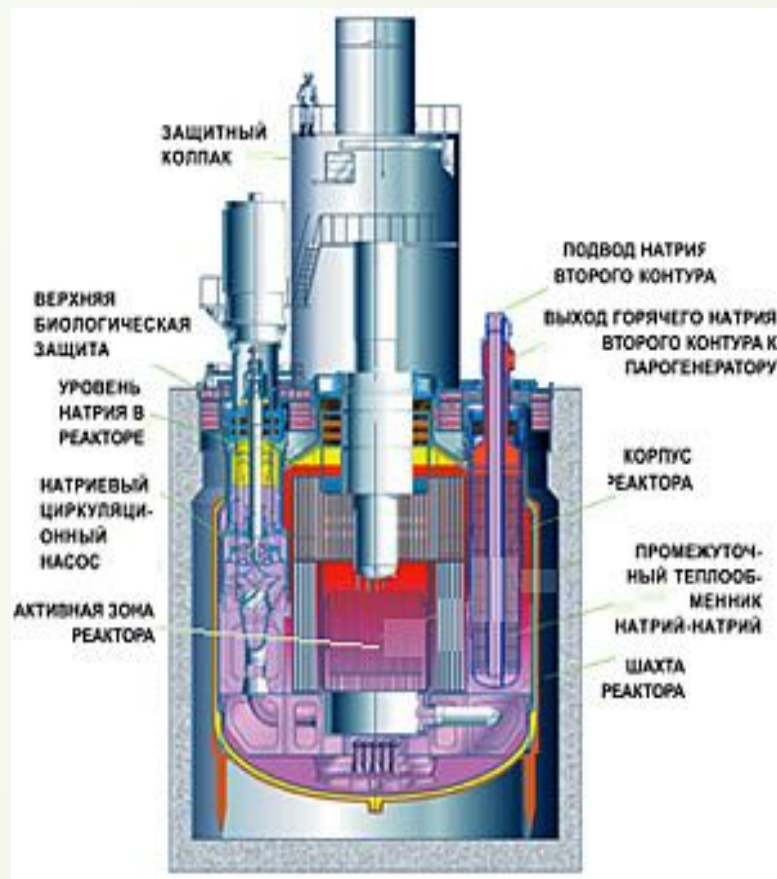
АЭС с каналным реактором большой мощности (РБМК)

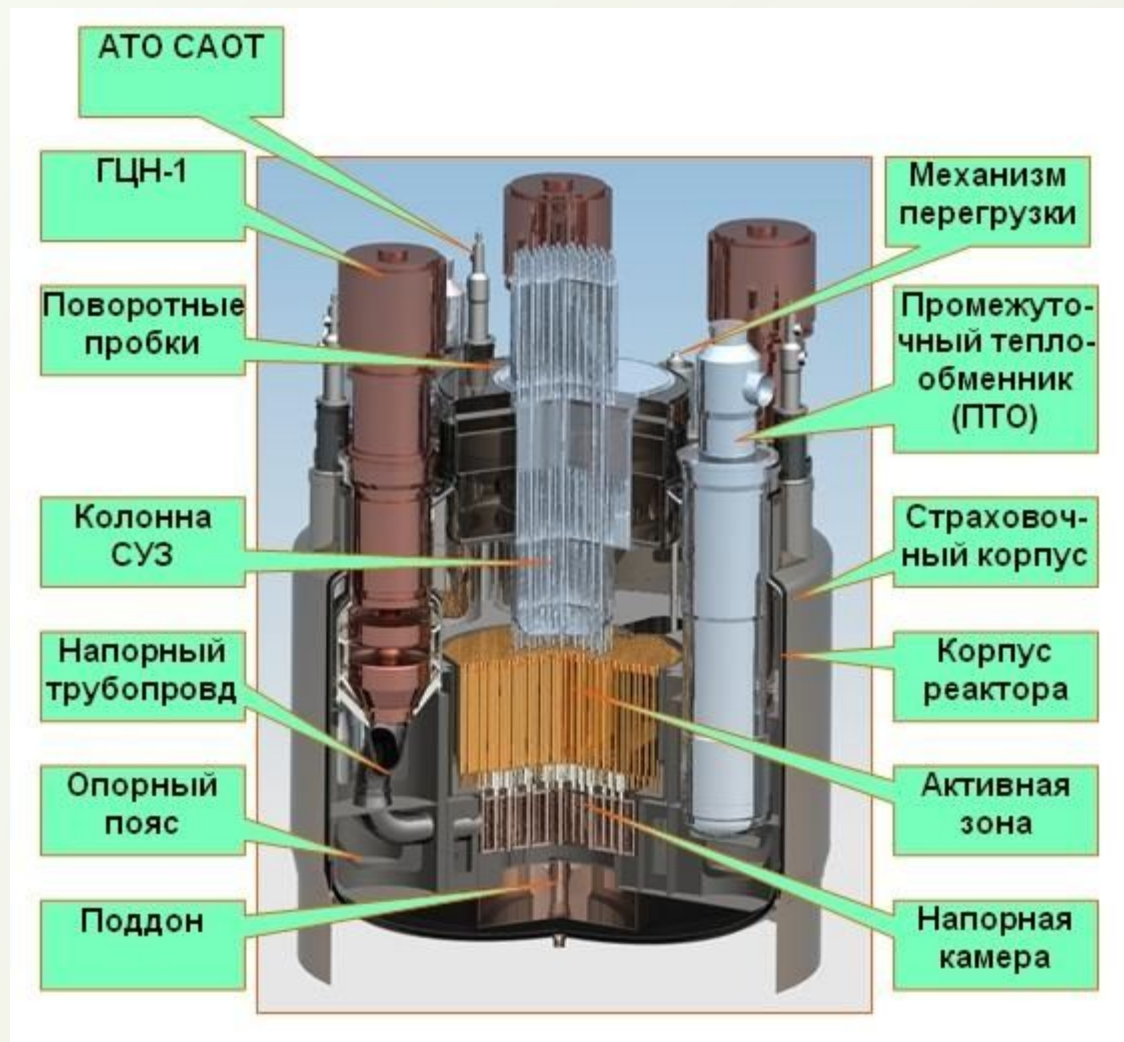


Характеристики реактора РБМК

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, % ²³⁵ U				
испарительный канал	2,6-3,0	2,6-2,8	1,8	2-3,2
перегревательный канал	—	—	2,2	—
Число каналов:				
испарительных	1693-1661 ^[3]	1661	1920	1824
перегревательных	—	—	960	—
Среднее выгорание, МВт·сут/кг:				
в испарительном канале	22,5	25,4	20,2	30-45
в перегревательном 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	—

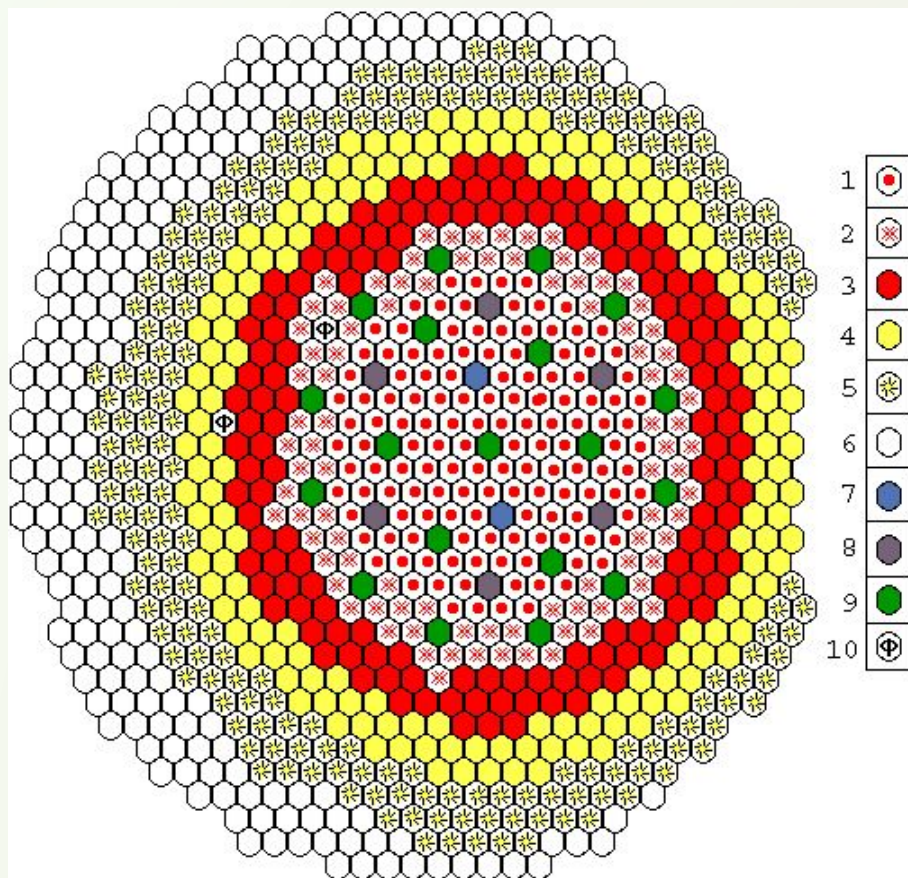
БН-800





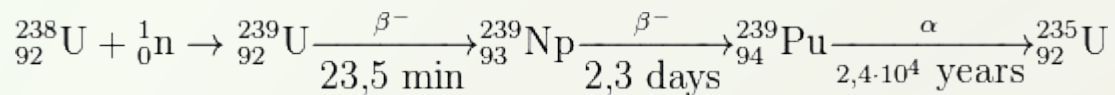
Тема 2. Ядерные энергетические установки и их материалы.

Зона воспроизводства реактора БН-600



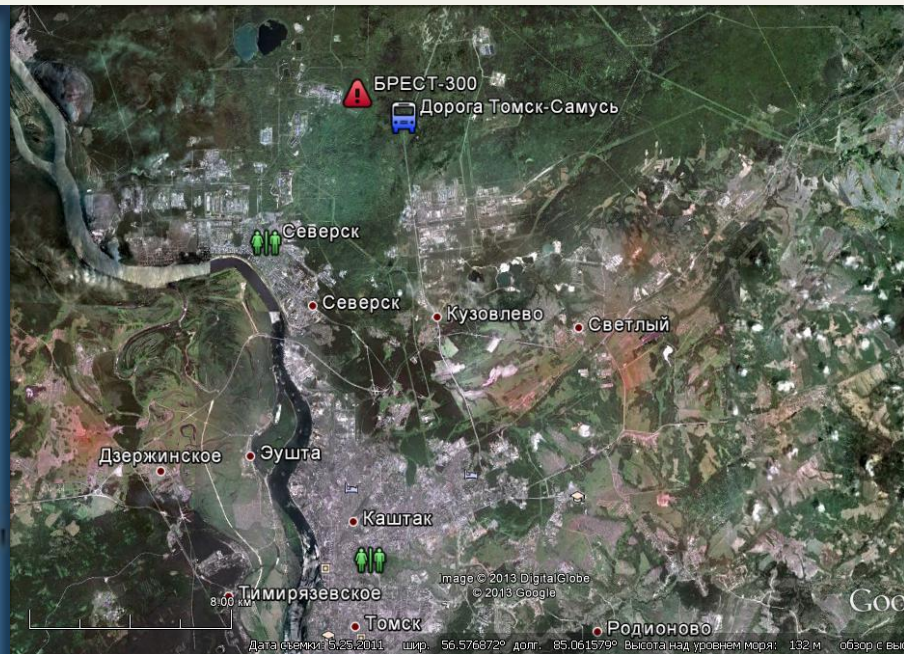
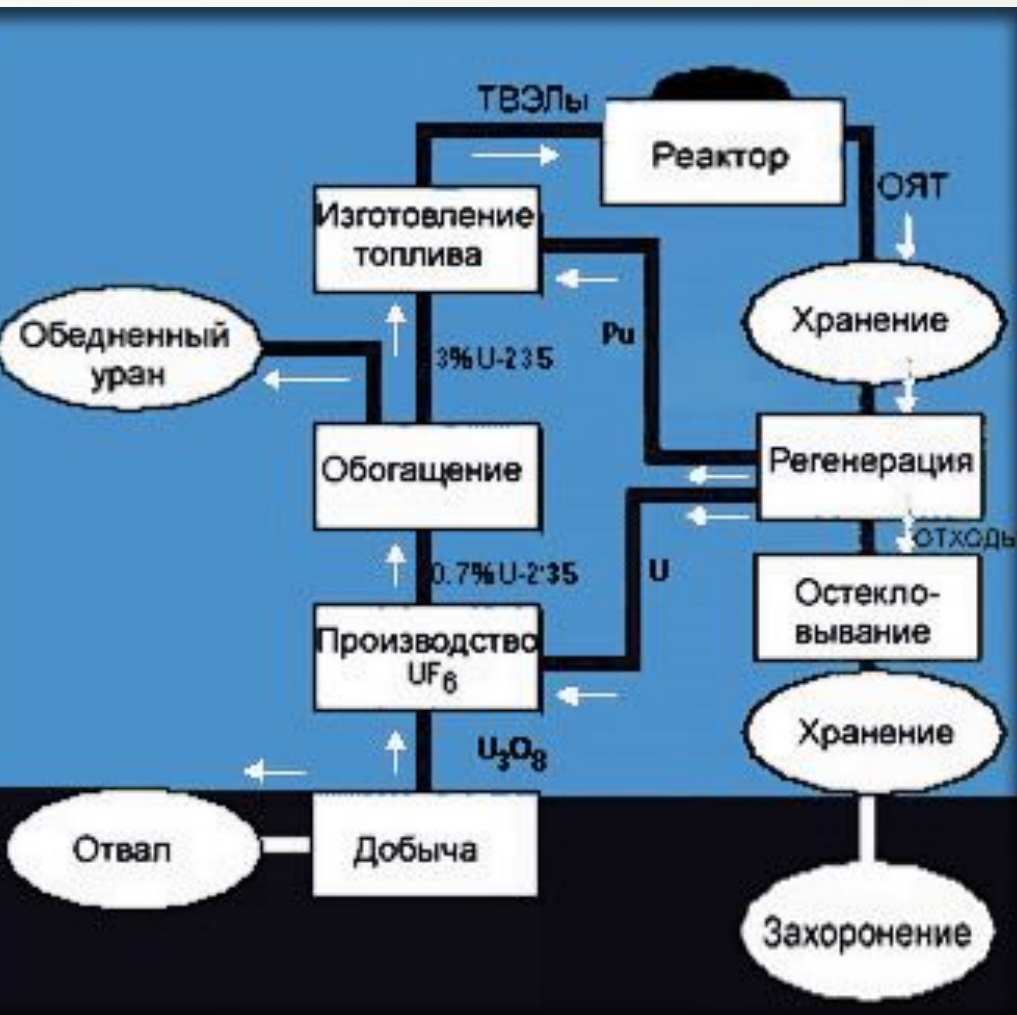
- 1 - ТВС активной зоны с малым обогащением;
 - 2 - ТВС активной зоны со средним обогащением;
 - 3 - ТВС активной зоны с большим обогащением;
 - 4 - ТВС внутренней зоны воспроизводства;
 - 5 - ТВС внешней зоны воспроизводства;
 - 6 - Хранилище отработавших сборок;
 - 7 - Стержни автоматического регулирования;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

Особенности реактора БРЕСТ

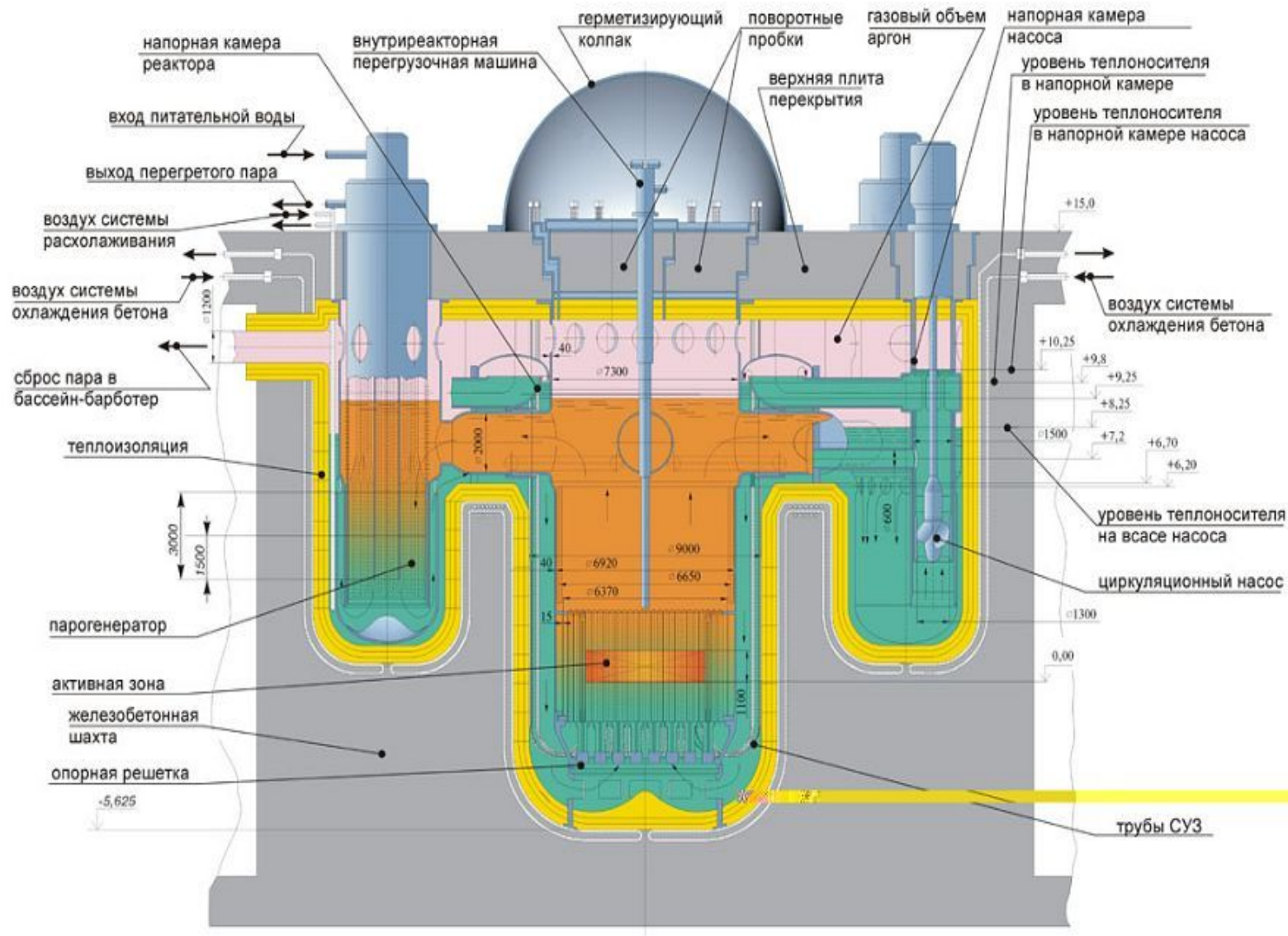


1. Реактор бассейнового типа.
2. Теплоноситель – свинец.
3. Топливо – мононитриды U-Pu-МА (минорные актиноиды, актиниды). К минорным актиноидам относятся долгоживущие и относительно долгоживущие изотопы нептуния (Np-237), америция (Am-241, Am-243) и кюрия (Cm-242, Cm-244, Cm-245), нарабатываемые в ядерных 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}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}U , ^{238}U , ^{233}U)
- изотоп плутония 239 (^{239}Pu), также изотопы $^{239-242}\text{Pu}$ в виде смеси с ^{238}U (МОХ-топливо)
- изотоп тория 232 (^{232}Th) (посредством преобразования в ^{233}U)
- **5. По степени обогащения:**
- природный уран
- слабо обогащённый уран
- высоко обогащённый уран
- **6. По химическому составу:**
- металлический U
- 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 CO₂ при высокой температуре. Отсюда следует необходимость применения нержавеющих 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).