

Дисциплина «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии»
для специальности «Теплоэнергетика»

Дисциплина «Проектирование и эксплуатация установок возобновляемой
энергетики»

для специальности «Электроэнергетика»

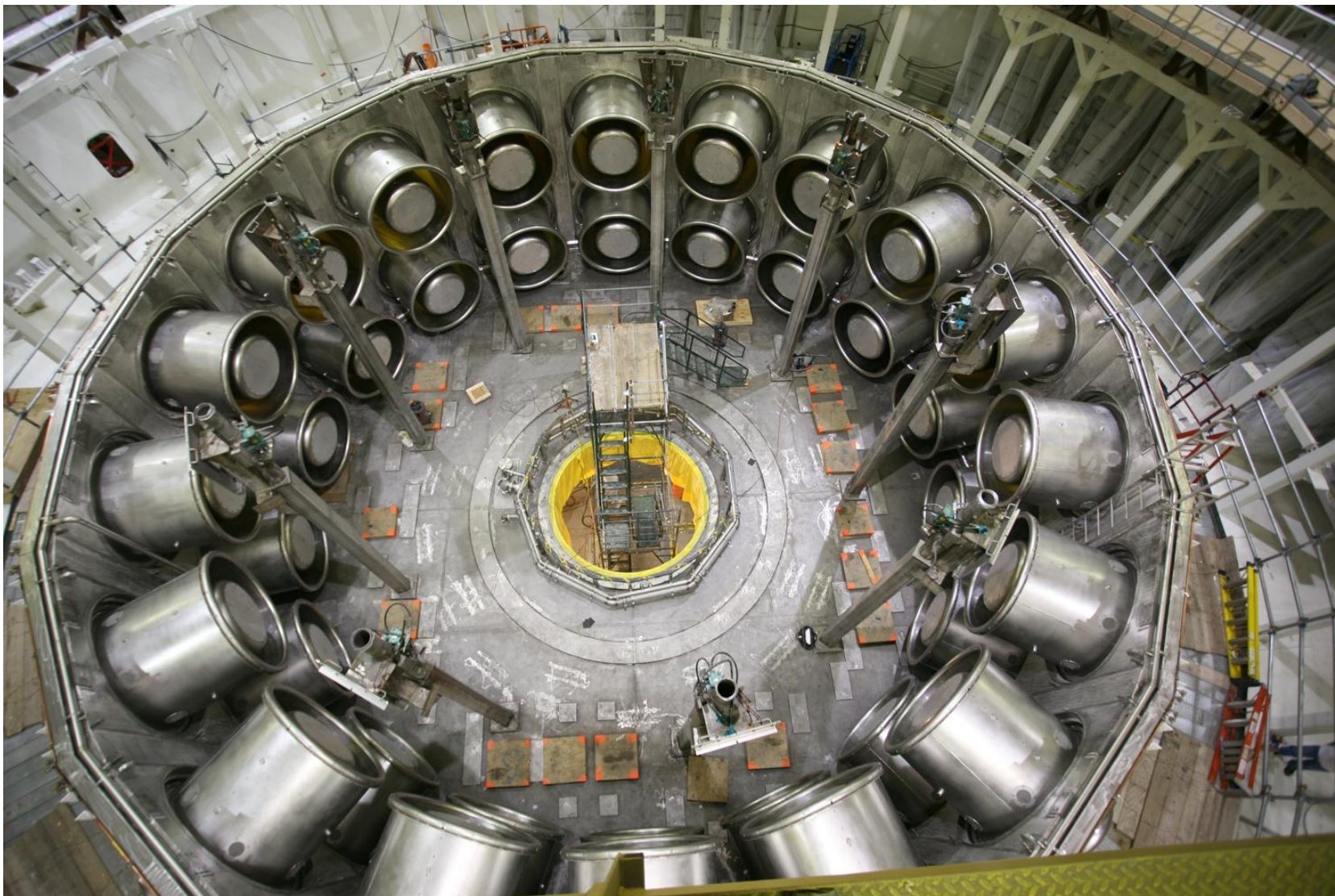
Факультет энергетики, автоматики и телекоммуникации
Кафедра «Энергетические системы»

Калытка Валерий Александрович

Доктор PhD; ассоциированный профессор (доцент); доцент кафедры
«Энергетические системы»

Лекция №9. Технология ядерных реакторов (ЯР).

Модели ЯР для АЭС. ВЭЭР-1000, ВЭЭР-1200



Лекция №9. Технология ядерных реакторов (ЯР). Модели ЯР для АЭС. ВЭЭР-1000, ВЭЭР-1200

Видеоролики:

1. Как делают ядерные реакторы? Завод 'АтомМаш' с МШ.

(24 минут 16 секунд)

<https://www.youtube.com/watch?v=bAcbWc1aA10>

2. Корпус ядерного реактора | Как это устроено? | Discovery

(5 минут 15 секунд)

<https://www.youtube.com/watch?v=eILI0PWj4tg>

3. ВВЭР-1200

(11 минут 29 секунд)

<https://www.youtube.com/watch?v=AVncAw2QQhM>

4. ВВЭР 1200 - самый мощный реактор | Техногеника | Discovery Channel

(44 минуты)

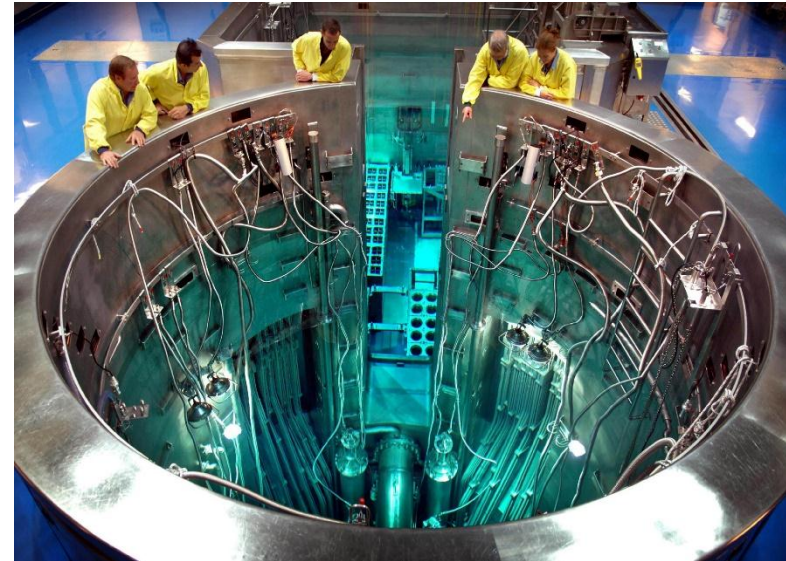
https://www.youtube.com/watch?v=JF_7RT-9Jh4

5. Конструкция реактора ВВЭР 1000

(57 минут 47 секунд)

<https://www.youtube.com/watch?v=lXTW1cfa5dE>

- Ядерным реактором (ЯР) называется устройство, предназначенное для организации и поддержания управляемой цепной реакции деления ядер, тепловыделения и теплосъема.
- Под ядерной энергией понимается разновидность внутренней энергии, обусловленной ядерными силами, связывающими в ядре все образующие его частицы — нуклоны.



Классификация ЯР.

1. По назначению.

- В данную группу входят энергетические, промышленные, реакторы-размножители (бридеры), экспериментальные, исследовательские и учебные реакторы. Энергетические реакторы (см. рис. 2.1) предназначены для преобразования ядерной энергии в теплоту и занимают наибольшую часть среди всех ЯР.
- Промышленными называются ЯР, предназначенные для производства новых материалов, изотопов и т. д. В них используются мощные потоки нейтронов и гамма-квантов, образующихся при работе ЯР. Достаточно близкое место по назначению к промышленным ЯР занимают реакторы-размножители, предназначенные для получения искусственных делящихся изотопов ^{235}Pu и ^{239}Pu .
- Экспериментальными называются ЯР, предназначенные для отработки нейтронно-физических и тепловых характеристик, элементов конструкции и технологии изготовления ЯР перед запуском их в серийное промышленное производство.
- Исследовательские ЯР (см. рис. 2.2) предназначены для проведения исследований по физике ЯР, определения нейтронно-физических характеристик реакторных материалов и других исследований.
- Учебные реакторы предназначены для проведения учебных занятий при подготовке обслуживающего персонала, выработки у него твердых практических навыков и психологической устойчивости при эксплуатации ЯР в нормальных и аварийных режимах.



Рис. 2.1
ЯР ВВЭР-1000

2. По размещению.

- *Стационарные.* Атомные электростанции (АЭС), атомные станции теплоснабжения (АСТ), атомные тепловые электроцентралы (АТЭЦ), атомные станции промышленного теплоснабжения (АСПТ) и т. д. (рис. 2.3).



Рис. 2.3

Атомная электрическая станция

2. По размещению.

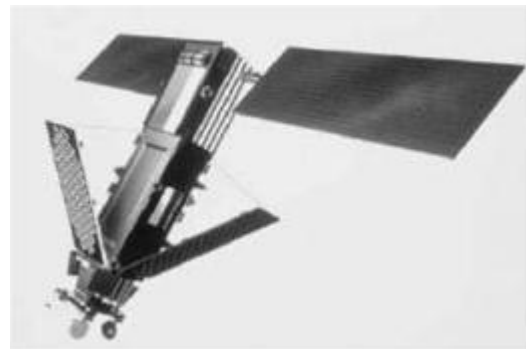
Транспортные:

- судовые (корабельные);
- плавучие АЭС;
- космические;
- авиационные;
- автомобильные и др.

На рисунках 2.4-2.8 показаны объекты размещения транспортных ЯЭУ.



Автомобильная ЯЭУ



Космическая ЯЭУ



ЯЭУ подводной лодки

3. По типу активной зоны.

- В зависимости от способа размещения в активной зоне ядерного топлива, замедлителя, конструкционных материалов, выгорающих поглотителей и т. д. ЯР подразделяются на: гомогенные и гетерогенные.
- *Гомогенной* называется активная зона, в которой ядерное топливо и замедлитель равномерно перемешаны, а размеры частиц малы по сравнению с длиной свободного пробега нейтронов в аз. В качестве топлива в таких ЯР используют растворы солей урана, а также твердые или газообразные смеси топлива и замедлителя.
- *Гетерогенной называется* активная зона, в которой топливо размещается в виде отдельных блоков. Возможна различная форма топливных блоков (они называются ТВЭЛ — тепловыделяющими элементами) — в виде стержней, пластин, шаров и т. д.

4. По энергетическому спектру нейтронов:

- на тепловых нейтронах (тепловые ЯР);
- на промежуточных нейтронах (промежуточные ЯР);
- на быстрых нейтронах (быстрые ЯР).

5. По конструктивным особенностям.

- По конструктивным особенностям реакторы подразделяются на: корпусные, бассейновые, каналные и интегральные.
- *Корпусные* — реакторы, основные элементы которых (активная зона, замедлитель, экраны, органы регулирования и т. д.) размещены в прочном корпусе, способном выдерживать значительное давление.
- *Бассейновые* — реакторы, основные элементы которых размещены в бассейне, заполненном водой. Давление воды при этом отсутствует.
- *Канальные* — реакторы гетерогенного типа, в которых ядерное топливо и теплоноситель размещены в отдельных технологических каналах, способных выдерживать довольно большое давление теплоносителя.
- *Интегральные* — реакторы, у которых в прочном корпусе наряду с активной зоной размещены отдельные элементы паропроизводящей установки (это могут быть парогенераторы, циркуляционные насосы I контура, система компенсации давления, очистки теплоносителя и т. д.).

По виду замедлителя.

- В зависимости от материала замедлителя реакторы могут быть с жидким или твердым замедлителем. В свою очередь, в качестве жидкого замедлителя может использоваться природная (легкая) вода, тяжелая (D_2O) вода, органические жидкости ит.д. В качестве твердых замедлителей могут использоваться бериллий, графит и т. д.

По виду теплоносителя:

- с водяным теплоносителем;
- с жидкометаллическим теплоносителем;
- с органическим теплоносителем;
- с газовым теплоносителем.

Принципиальная схема ЯР показана на рисунке 2.9. Основными элементами ЯР являются активная зона (аз), корпус, замедлитель, органы регулирования и управления, биологическая защита и отражатель нейтронов. Для обеспечения теплосъема организована циркуляция теплоносителя через активную зону.

Энергетические ЯР могут иметь различную конструкцию, размеры, состав активной зоны, но при этом их принцип действия остается одинаковым. На рисунках 2.10 и 2.11 показаны конструктивные особенности двух основных типов реакторов, используемых в российской атомной энергетике.

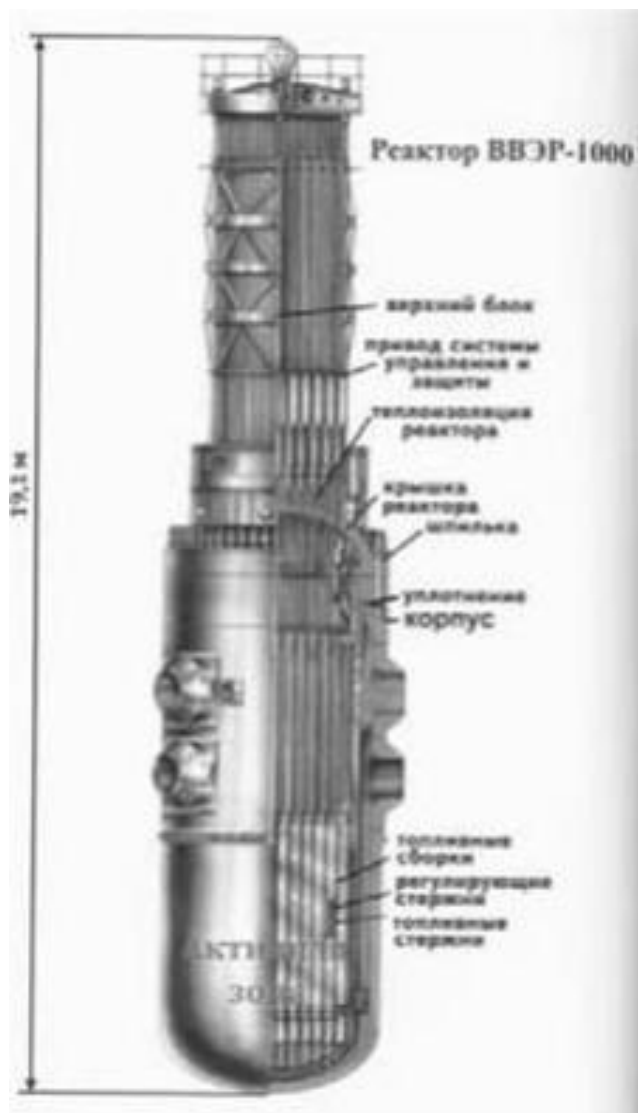


Рис. 2.10
Корпусной ЯР ВВЭР-1000

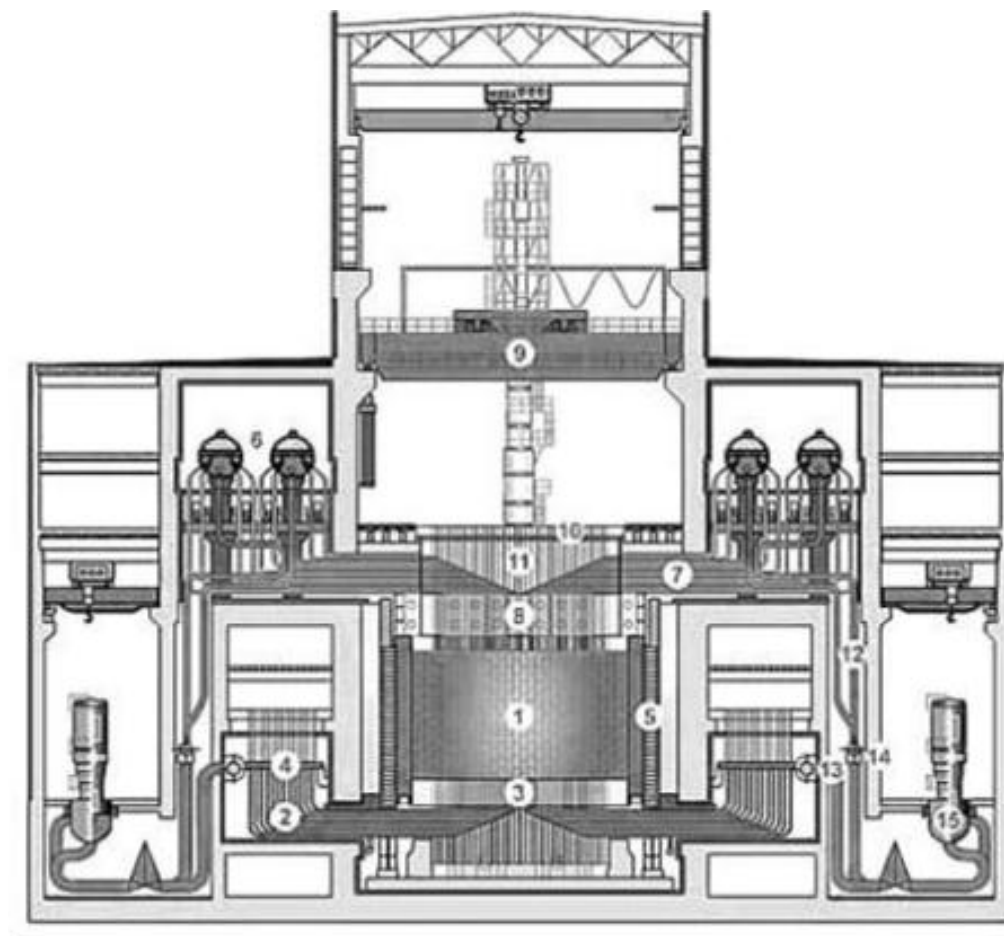
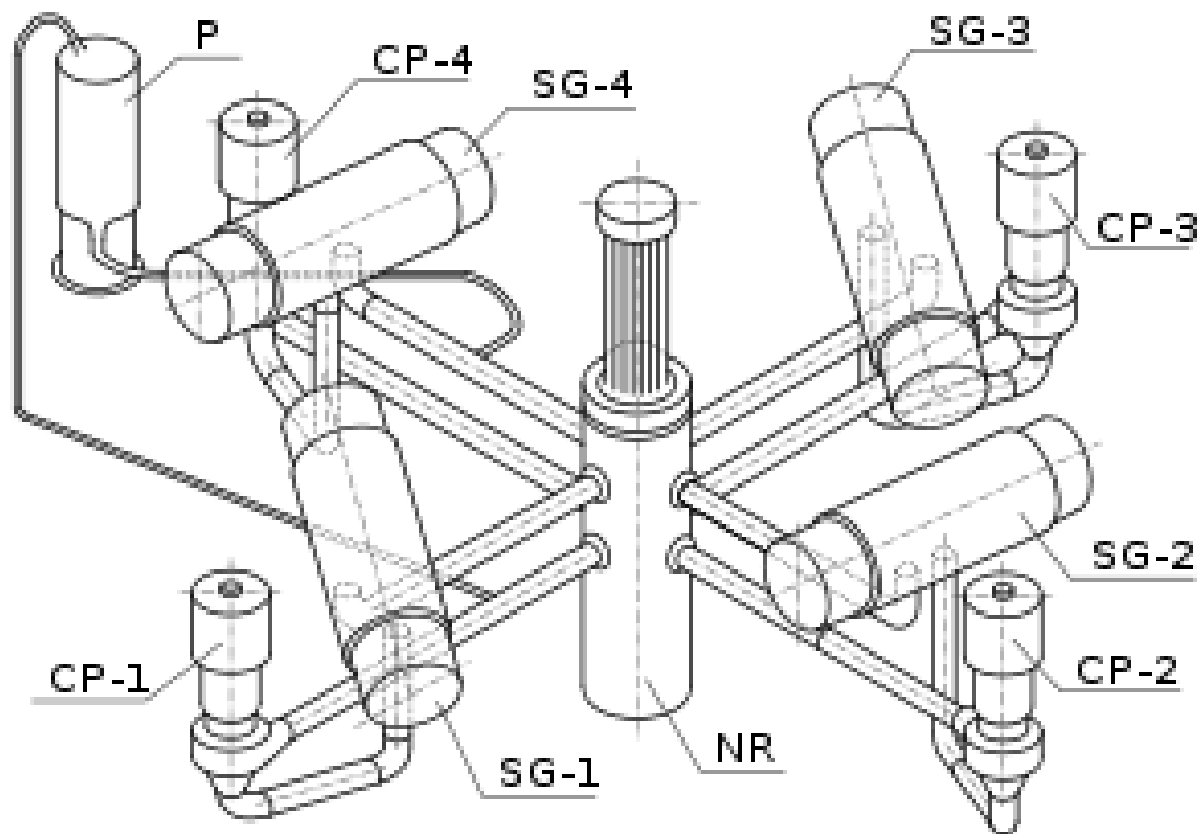


Рис. 2.11
Канальный ЯР РБМК-1000

ВВЭР-1000

- Активная зона ВВЭР-1000 набирается из 163 топливных кассет, в каждой из которых по 312 ТВЭЛов. Равномерно по кассете распределены 18 направляющих трубок. В направляющих трубках приводом может, в зависимости от положения кассеты в активной зоне, перемещаться пучок из 18 поглощающих стержней (ПС) органа регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ), сердечник ПС изготовлен из дисперсионного материала (карбид бора в матрице из алюминиевого сплава, могут применяться и другие поглощающие материалы: титанат диспрозия, гафний). В направляющих трубках (при нахождении не под ОР СУЗ) также могут быть размещены стержни выгорающего поглотителя (СВП), материал сердечника СВП — бор в циркониевой матрице, в настоящее время произведён полный переход с извлекаемых СВП на интегрированный в топливо поглотитель (оксид гадолиния). Сердечники ПС и СВП (Стержень выгорающего поглотителя) диаметром 7 мм заключены в оболочки из нержавеющей стали размером 8,2×0,6 мм. Кроме систем ПС и СВП в ВВЭР-1000 применяют и систему борного регулирования.
- Мощность блока с ВВЭР-1000 повышена по сравнению с мощностью блока с ВВЭР-440 благодаря изменению ряда характеристик. Увеличены объём активной зоны в 1,65 раза, удельная мощность активной зоны в 1,3 раза и КПД блока.
- Среднее выгорание топлива при трёх частичных перегрузках за кампанию составляло первоначально 40 МВт·сут/кг, в настоящий момент доходит до примерно 50 МВт·сут/кг.
- Масса корпуса реактора составляет порядка 330 т.
- ВВЭР-1000 и оборудование первого контура с радиоактивным теплоносителем размещены в защитной оболочке из предварительно напряжённого железобетона, называемой гермооболочкой или контейнментом. Она обеспечивает безопасность блока при авариях с разрывом трубопроводов первого контура.

Пространственная схема первого контура серийной РУ с ВВЭР-1000.



CP-1,2,3,4 —
циркуляционные
насосы;
SG-1,2,3,4 —
парогенераторы;
NR — ядерный
реактор;
P — компенсатор
давления

ВВЭР-1200

ВВЭР-1200 вода-водяной реактор, это одно из самых удачных ветвей развития ядерных энергетических установок. Реакторы класса ВВЭР работают по всей России и за её пределами. А вот новый реактор ВВЭР-1200 является представителем нового поколения вода-водяных ядерных энергетических установок.

От прошлых поколений он отличается мощностью 1200 мВат, и сроком эксплуатации до 50 лет. Работает эта машина на быстрых нейтронах. Принцип работу заключается в том, что вода с помощью ядерной энергии нагревается в реакторе до температуры 300 градусов, затем попадает в парогенератор, в котором превращается в пар. Далее направляется он на лопасти турбины генератора, заставляя его двигаться и вырабатывать электроэнергию.

- **Особенности ВВЭР-1200**

АЭС на основе ВВЭР-1200 характеризуются повышенным уровнем безопасности, позволяющим отнести их к поколению «3+». Это достигнуто внедрением новых «пассивных систем безопасности», которые способны функционировать без вмешательства операторов даже при полном обесточивании станции. На энергоблоке № 1 НВАЭС-2 в качестве таких систем применены система пассивного отвода тепла от реактора, пассивная система каталитического удаления водорода и ловушка расплава активной зоны. Другой особенностью проекта стала двойная защитная оболочка, в которой внутренняя оболочка предотвращает утечку радиоактивных веществ при авариях, а внешняя оболочка противостоит природным и техногенным воздействиям, таким как, например, смерчи или падение самолёта.

ВЭЭР-1200



Конструкция ядерного реактора

- Реактор типа ВВЭР представляет собой вертикальный цилиндрический корпус с эллиптическим днищем, внутри которого размещается активная зона и внутрикорпусные устройства. Сверху реактор герметично закрыт крышкой с установленными на ней приводами механизмов и органов регулирования и защиты реактора и патрубками для вывода кабелей датчиков внутриреакторного контроля. Крепление крышки к корпусу осуществляется шпильками.

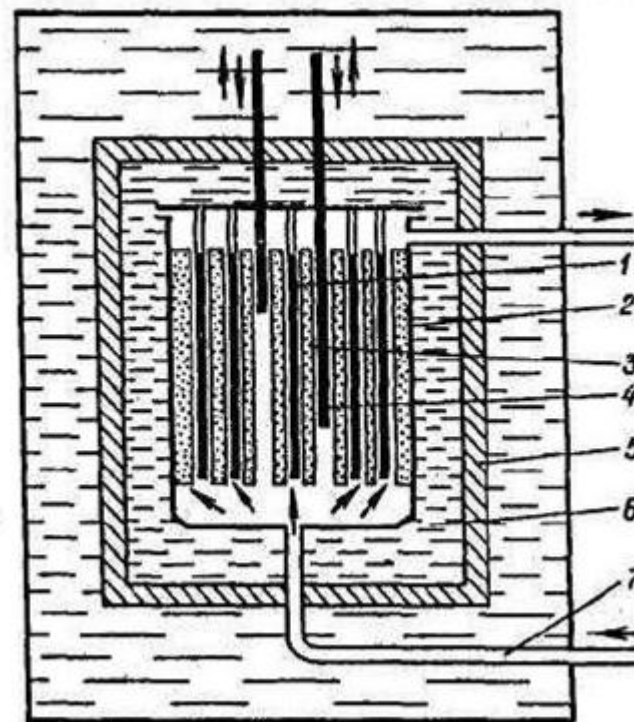


Рис. 2.9

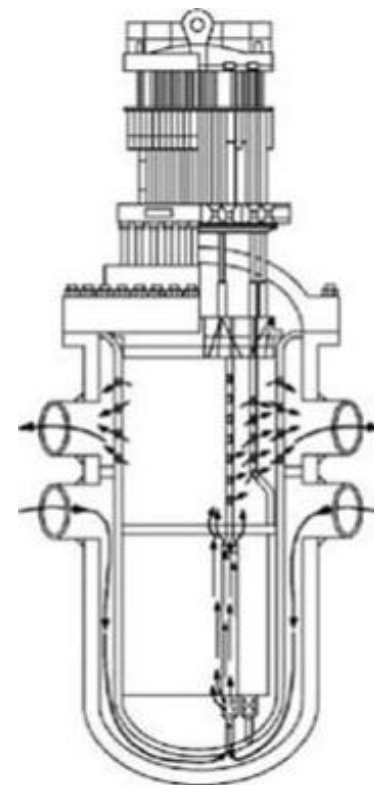
Принципиальное устройство ЯР:

1 — активная зона; 2 — корпус; 3 — замедлитель; 4 — органы регулирования; 5 — биологическая защита; 6 — отражатель нейтронов; 7 — циркуляция теплоносителя.

Принудительная циркуляция

Принудительная циркуляция (см. рис. 2.12) теплоносителя осуществляется по четырем замкнутым петлям 1 контура за счет работы главных циркуляционных насосов (ГЦН). Вода 1 контура, охлажденная в парогенераторах, поступает в реактор через нижний ряд напорных патрубков, проходит вниз по кольцевому зазору между корпусом и шахтой внутрикорпусной, затем через перфорированное эллиптическое днище и опорные трубы шахты входит в ТВС. Из ТВС через перфорированную нижнюю плиту теплоноситель выходит в межтрубное пространство, проходит через перфорацию шахты внутрикорпусной, попадает в кольцевой зазор между шахтой и корпусом и через четыре верхних выходных патрубка корпуса выходит из реактора.

•



Корпус ЯР и схема движения теплоносителя

Реактор

Реактор состоит из следующих основных узлов:

- корпус;
- внутрикорпусные устройства (шахта, выгородка);
- активная зона;
- верхний блок;
- каналы внутриреакторных измерений;
- блок электроразводок.

- Корпус реактора предназначен для размещения внутри- корпусных устройств (ВКУ) и активной зоны реактора. Теплоносителем и замедлителем в корпусе реактора является химочищенная вода с концентрацией борной кислоты 0- 16 гр/кг.
- При конструировании и изготовлении корпусов ВВЭР ставится задача обеспечения многолетней (до 40 лет) надежной эксплуатации реактора в различных режимах. Корпус реактора работает в очень жестких условиях: высокие давление и температура теплоносителя, мощные потоки радиоактивного излучения (максимальный расчетный флюенс быстрых нейтронов с энергией более 0,5 МэВ — $5,7 \cdot 10^{19}$ нейтр/см²), значительные скорости теплоносителя, который даже при высокой степени чистоты является коррозионноактивной средой.
- Шахта реактора (с днищем) предназначена для организации входного и выходного потоков теплоносителя и для защиты корпуса реактора от воздействия нейтронного излучения активной зоны, а также размещения в ней элементов активной зоны реактора.
- Шахта и выгородка являются составной частью защиты металла корпуса реактора от воздействия нейтронного и гамма-излучений, исходящих из активной зоны реактора. Одновременно шахта и выгородка входят в состав железобетонного отражателя, где основным отражателем является теплоноситель первого контура.