

- **Лекция 15. АЭС с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем.**



Основные реакторы на быстрых нейтронах



В разное время в разных странах существовали многочисленные проекты и программы создания энергетических быстрых реакторов.

Красным цветом на рисунке выделены реакторы, реально предназначенные для выработки энергии.

Германский реактор не был построен, хотя и был лицензирован, японский реактор, после аварии на начальном этапе работы был остановлен в 1995 г., и только в настоящее время его вновь пытаются запустить.

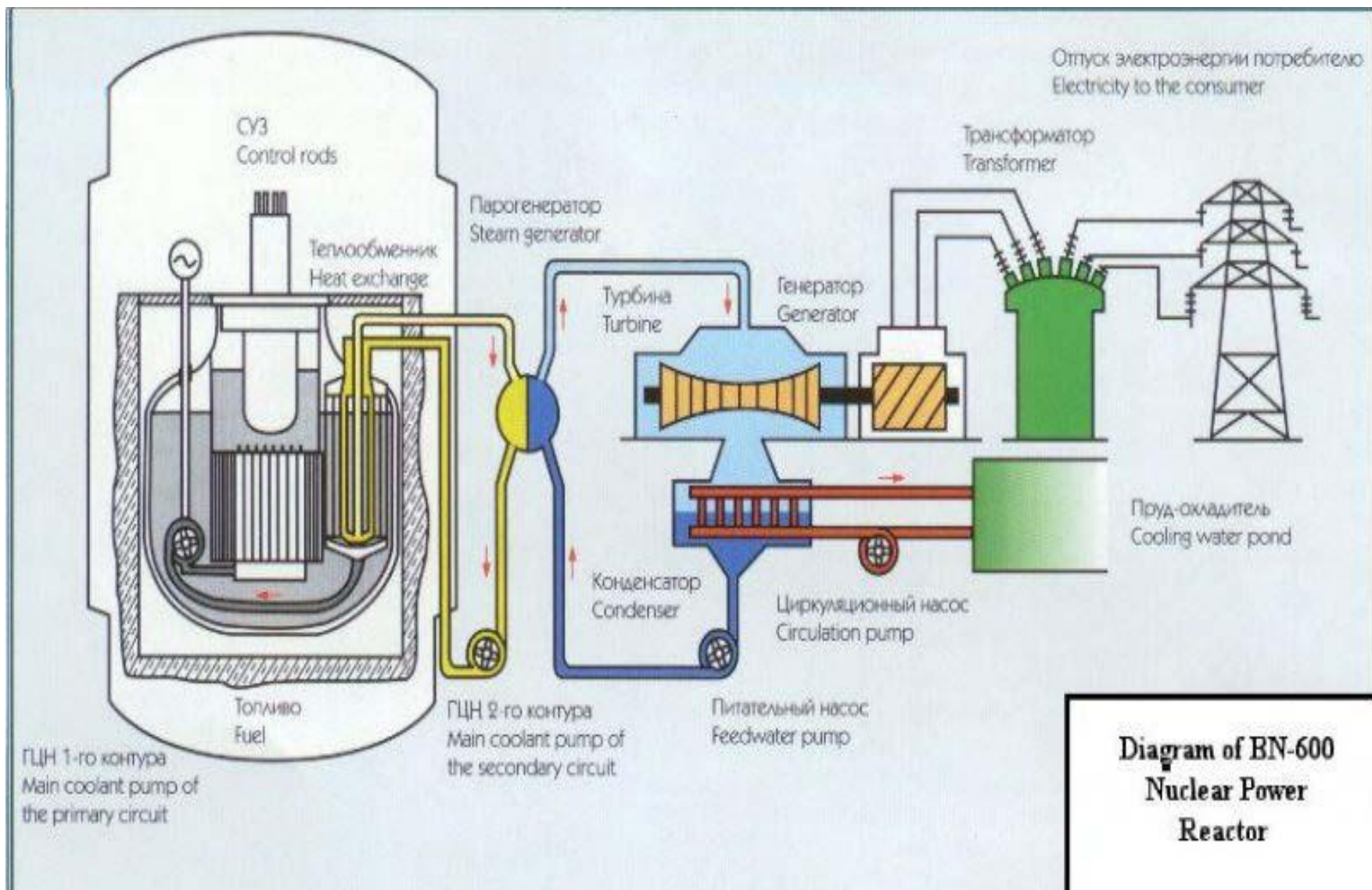
В России были реализованы два полномасштабных промышленных реактора (БР-350 и БН-600). В настоящее время функционирует один – БН-600.

Во Франции было также запущено два реактора – Phenix и SuperPhenix. В настоящее время функционирует один Phenix.

Таким образом, в мировом опыте создания и эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах Россия занимает заметное место.

Блочный щит управления реактора БН-600





- Схема АЭС с реактором БН

Быстрый реактор БН-600

- III-й блок Белоярской АЭС – быстрый реактор БН-600, работает в энергосистеме Среднего Урала с 1980 года.
- Ядерный реактор БН-600 выполнен с “интегральной” компоновкой оборудования, при которой активная зона и оборудование первого контура (насосы, теплообменники) размещены в корпусе реактора. Такая компоновка при сооружении крупной АЭС применена в СССР впервые.

- Корпус реактора представляет собой бак цилиндрической формы с эллиптическим днищем и конической верхней крышкой, выполненной с одиннадцатью горловинами – для поворотной пробки, насосов первого контура, промежуточных теплообменников, элеваторов системы перегрузки тепловыделяющих сборок (ТВС). Цилиндрическая часть корпуса соединена с днищем путем сварки через переходное опорное кольцо, на котором установлен опорный пояс, являющийся основой несущей конструкции внутри корпуса реактора; он образует системой радиальных ребер три сливные камеры для натрия, выходящего из теплообменников.
- На опорном поясе смонтировано все внутрикорпусное оборудование: напорная камера с ТВС активной зоны, зоны воспроизводства и внутреннего хранилища ТВС, первичная радиационная защита, промежуточные теплообменники, главные циркуляционные насосы первого контура. Нагрузка от массы реактора через опорное кольцо передается на катковые опоры, которые опираются на фундаментную плиту

Общие сведения и тепловая схема энергоблока

Тепловая схема блока трехконтурная: в первом и втором контурах теплоносителем является натрий, в третьем - вода и пар.

Отвод тепла от активной зоны осуществляется тремя независимыми петлями циркуляции, каждая из которых состоит из главного циркуляционного насоса 1 контура, двух промежуточных теплообменников, главного циркуляционного насоса 2 контура с буферной емкостью на всасе и с баком аварийного сброса давления, парогенератора ПГН-200М, конденсационной турбины К-210-130 со стандартной тепловой схемой и генератора ТГВ-200-2 МУЗ.

Использование натриевого теплоносителя обусловило применение ряда специальных систем:

- электрообогрев оборудования и трубопроводов, электромагнитных насосов,**
- фильтр-ловушек очистки натрия,**
- диагностики протечек воды в натрий,**
- локализации продуктов взаимодействия натрия с водой при межконтурных неплотностях парогенератора, пожаротушения натрия,**
- отмывки оборудования и ТВС от натрия,**
- инертного защитного газа аргона**

ОСНОВНЫЕ ПРОЕКТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕАКТОРА БН-600

Тепловая мощность, МВт	1470
Размеры корпуса реактора, м:: диаметр высота	12,8 12,6
Общая масса реактора в сборе, без натрия, т	3900
Объем натрия, м ³ : в первом контуре во втором контуре	820 960
Размеры активной зоны (диаметр x высота), м	2,06 x 0,75
Количество ТВС активной зоны	369
Количество твэлов в ТВС активной зоны	127
Наружный диаметр твэла активной зоны, мм	6,9
Количество ТВС зоны воспроизводства	379
Количество твэлов в ТВС зоны воспроизводства	37
Наружный диаметр твэла зоны воспроизводства, мм	14,2
Температура натрия первого контура, °С: на входе в активную зону на выходе из активной зоны	380 550
Температура натрия второго контура, °С: на входе в теплообменник на выходе из теплообменника	320 520
Максимальный нейтронный поток в активной зоне, 10 ¹⁶ н/см ² x с	0,77 x 10
Коэффициент воспроизводства топлива	1,3
Время между перегрузками, сут.	150

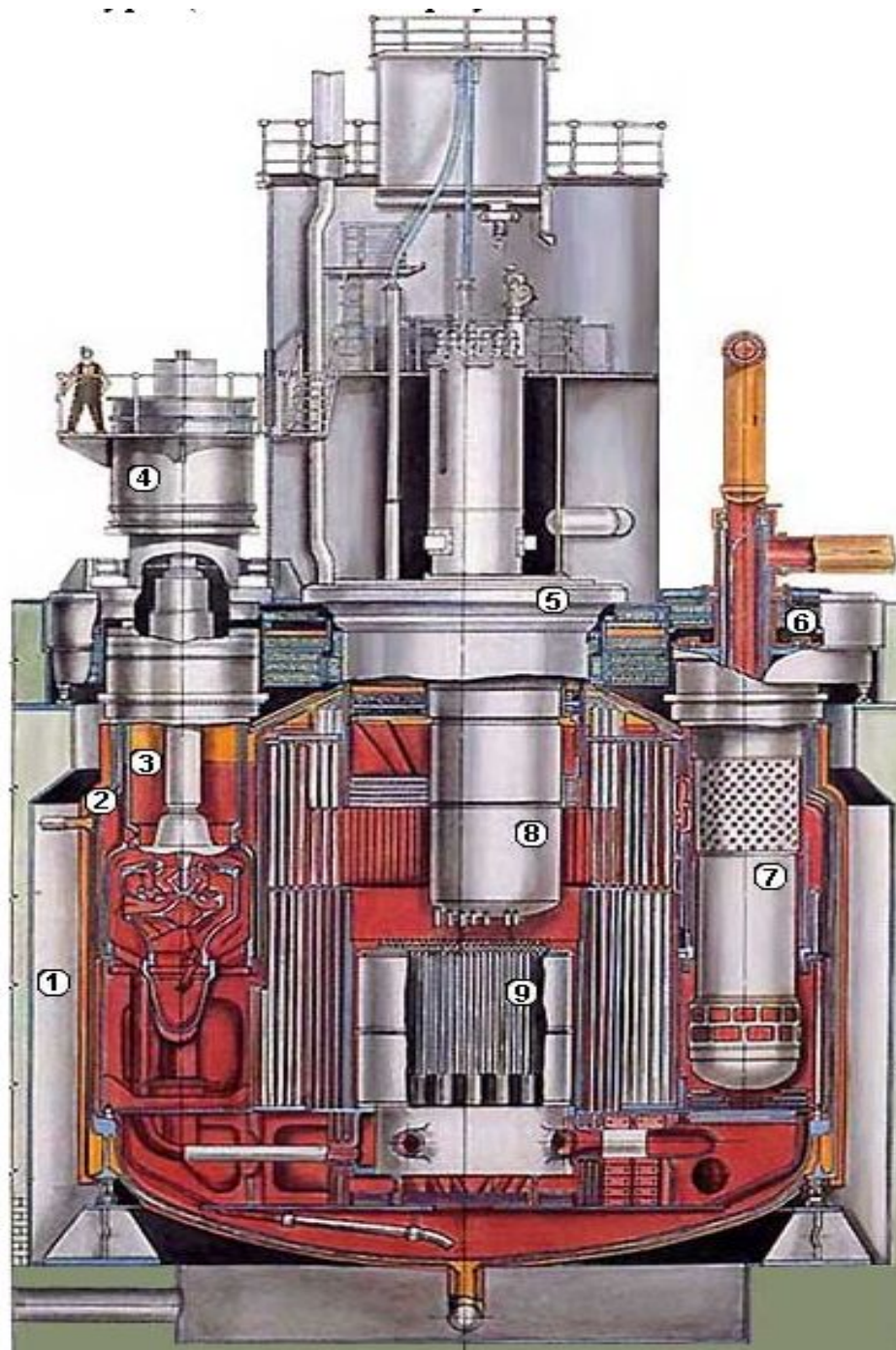
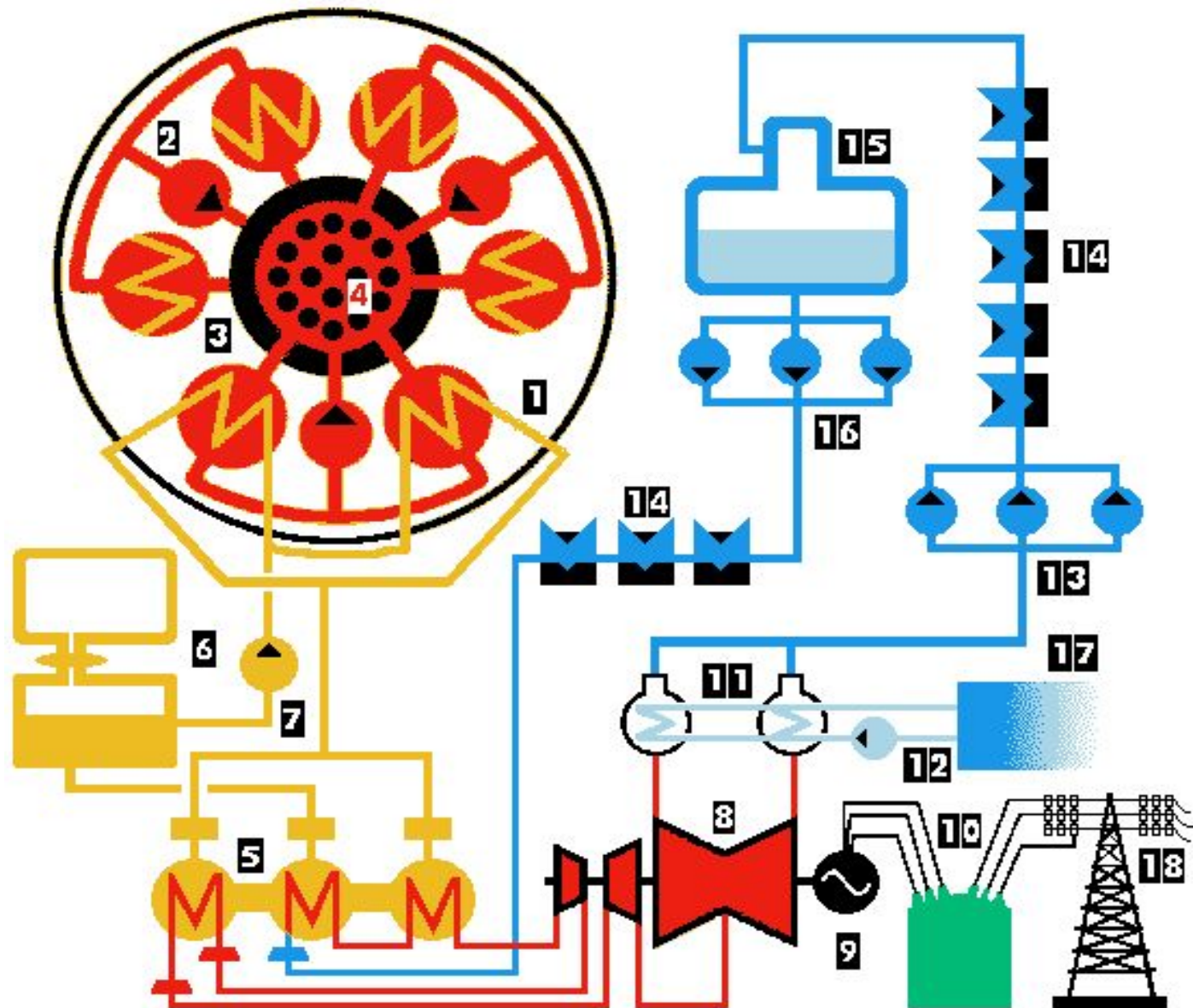


Рисунок. Конструкция Реактора БН-600

**1- Шахта; 2- Корпус; 3-
Главный
циркуляционный
насос 1 контура; 4-
Электродвигатель
насоса; 5- Большая
поворотная пробка; 6-
Радиационная
защита; 7-
Теплообменник
"натрий-натрий"; 8-
Центральная
поворотная колонна с
механизмами СУЗ; 9-
Активная зона.**

- 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



Тепловая схема энергоблока.

- ***Первый контур*** включает в себя три параллельные петли, каждая из которых состоит из главного циркуляционного насоса **2** и двух промежуточных теплообменников **3**.
- Циркуляция натрия в реакторе организуется следующим образом. Натрий от каждого из трёх главных циркуляционных насосов **2** по двум напорным трубопроводам (диаметр 630 мм, толщина стенок 13 мм) поступает в напорную камеру реактора, откуда через систему напорных коллекторов распределяется по составным частям активной зоны и боковой зоны воспроизводства, а также подается на охлаждение корпуса реактора, внутриреакторного хранилища отработавших ТВС **4** и первичной радиационной защиты.

- Нагретый до 550°C в активной зоне реактора натрий поступает в промежуточные теплообменники каждой петли, где, опускаясь по межтрубному пространству, подогревает натрий второго контура, протекающий по трубам вверх, до 520°C и, охладившись, возвращается на всас главных циркуляционных насосов.

Главный циркуляционный насос первого контура - центробежный погружного типа, с нижним гидростатическим подшипником работающим на натрии и с плавным регулированием числа оборотов вала электроприводом (по схеме асинхронно-вентильного каскада). Рабочее колесо насоса - двухстороннего всасывания. Для произведения ремонта насоса конструкция предусматривает возможность извлечения его выемной части из бака и замены без разгерметизации газовой полости реактора.

- Промежуточный теплообменник "натрий-натрий" - вертикальный кожухотрубный с коаксиальным подводом и отводом теплоносителя второго контура, противоточный. Высокорадиоактивный натрий первого контура проходит в межтрубном пространстве теплообменника сверху вниз; нерадиоактивный натрий второго контура поступает в теплообменник по центральной трубе в нижнюю камеру и затем движется внутри трубок противоточно натрию первого контура. Для исключения возможности протечек радиоактивного натрия первого контура, в случае течи внутри теплообменника, натрий второго контура находится под большим давлением, чем натрий первого контура.

- **Второй контур** включает в себя также три параллельные петли. Главным циркуляционным насосом второго контура **7** каждой петли натрий подается в промежуточный теплообменник **3**, где нагревается за счет тепла первого контура до 520 °С и направляется в парогенератор, в котором генерирует и перегревает пар третьего контура.

Для поддержания натрия в расплавленном состоянии при остановке блока предусмотрена разветвленная система электрообогрева всех трубопроводов и образования второго контура с устройствами контроля и автоматического регулирования температуры.

Главный циркуляционный насос второго контура - центробежный, вертикальный с нижним гидростатическим подшипником. Рабочее колесо - одностороннего всасывания.

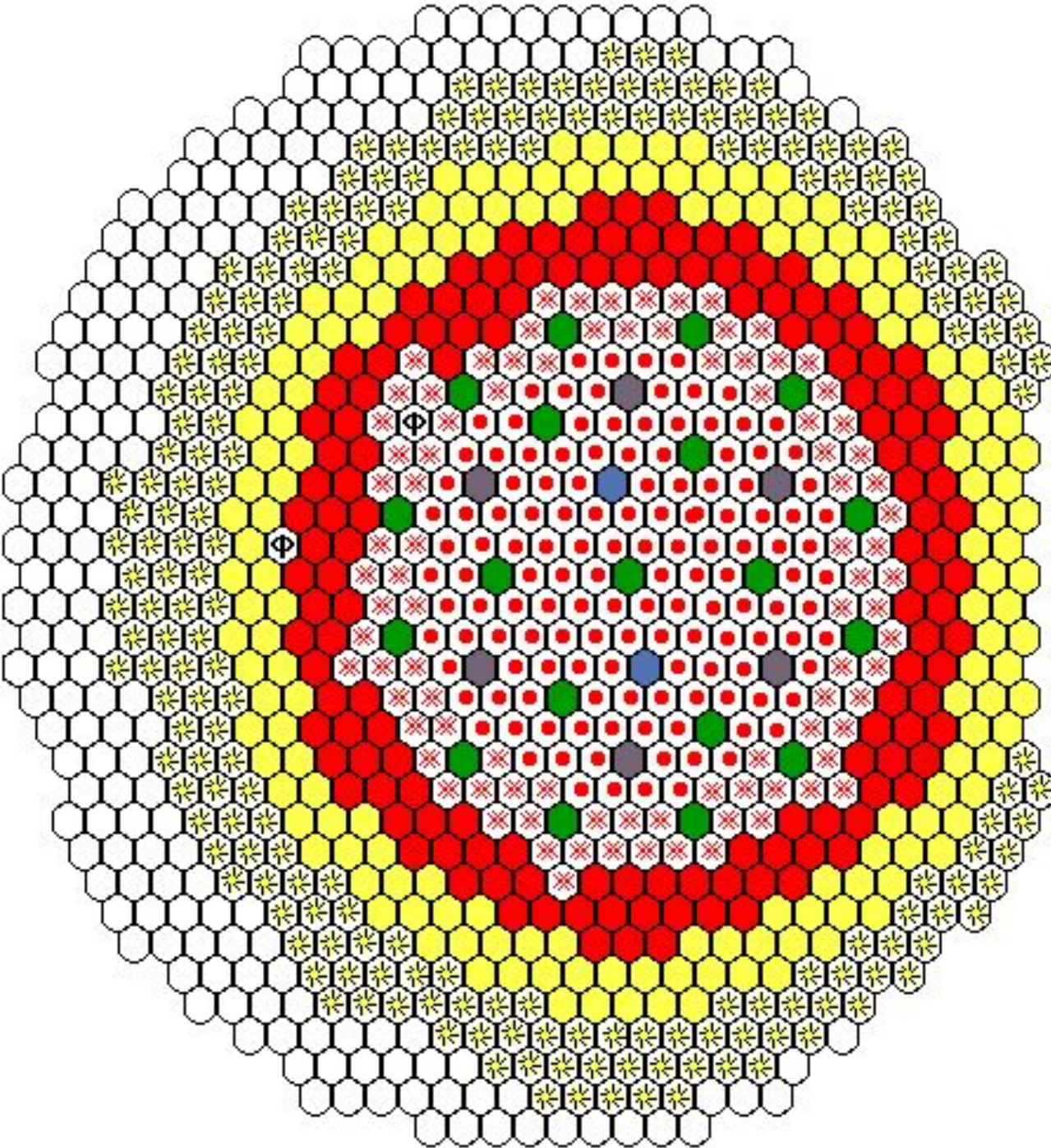
- ***Третий контур*** включает в себя три петли. В состав каждой петли входит конденсационная паровая турбина К-210-130 **8** номинальной мощностью 210 МВт со стандартной тепловой схемой. Теплоноситель - вода и пар.

- Для компенсации температурных удлинений насосов первого контура и промежуточных теплообменников относительно корпуса реактора использованы компенсаторы приваренные к горловине корпуса реактора. Корпус реактора заключен в страховочный кожух, исключающий возможность вытекания натрия из реактора даже при разрывах его корпуса. Пространство, заключённое между ними, используется при разогреве корпуса газом перед заполнением его натрием. Внутрикорпусная нейтронная защита, размещённая на опорном поясе, состоит из цилиндрических стальных экранов, стальных болванок и труб с графитовым наполнителем.

Активная зона реактора

- Активная зона (диаметр 2.05 м, высота 0.75 м) и зона воспроизводства (толщина 0.4 м) установлены на напорной камере и набраны из шестигранных ТВС кассетного типа с размерами "под ключ" 96 мм и с шагом 98 мм.
- Активная зона состоит из 370 кассет с ядерным топливом и воспроизводящим материалом, образующим торцевые зоны воспроизводства, 27 стержней системы СУЗ и одной кассеты с фотонейтронным источником.
- Выравнивание тепловыделения по радиусу активной зоны осуществляется загрузкой кассет с различным обогащением горючего (21 и 29.4 %): 162 периферийные кассеты активной зоны образуют зону большого обогащения, остальные входят в центральную зону малого обогащения.
- Активная зона по периметру окружена боковой зоной воспроизводства, состоящей из сборок, заполненных двуокисью обеднённого урана. За этой зоной воспроизводства расположено внутреннее хранилище кассет на 126 ячеек, которое предназначено для расхолаживания кассет, извлечённых из активной зоны, перед их выгрузкой из реактора.

Рисунок .Картограмма загрузки активной зоны.



- | | | |
|----|--|---|
| 1 | | 1 - ТВС активной зоны с малым обогащением; |
| 2 | | 2 - ТВС активной зоны со средним обогащением; |
| 3 | | 3 - ТВС активной зоны с большим обогащением; |
| 4 | | 4 - ТВС внутренней зоны воспроизводства; |
| 5 | | 5 - ТВС внешней зоны воспроизводства; |
| 6 | | 6 - Хранилище отработавших сборок; |
| 7 | | 7 - Стержни автоматического регулирования; |
| 8 | | 8 - Стержни аварийной защиты; |
| 9 | | 9 - Компенсирующие стержни; |
| 10 | | 10 - Фотонейтронный источник. |

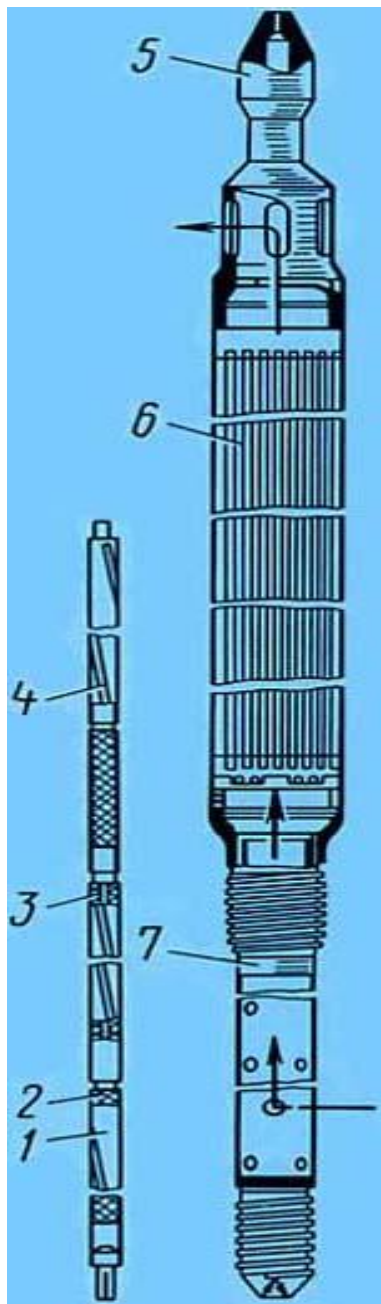
ТВС и твэлы реактора БН-600

- Кассеты активной зоны содержат 127 твэлов, расположенных по треугольной решётке с шагом 7.95 мм. Дистанционирование твэлов осуществляется с помощью проволоки, навиваемой на оболочку. Пристеночные твэлы дистанционируются лентой эллипсного сечения.

Кассета боковой зоны содержит 37 твэлов. Наружный диаметр оболочки этих твэлов равен 14.2 мм, толщина - 0.4 мм. Оболочка выполнена в виде трёхрёберной трубки с диаметром по рёбрам 15.25 мм.

Твэлы заполнены по длине активной зоны втулками из обогащенной окиси урана (или смеси окиси урана) и окиси плутония, а выше и ниже активной зоны расположены торцевые экраны из брикетов окиси "отвального" урана. Твэлы зоны воспроизводства заполнены брикетами из "отвального" урана. Газовые полости над уровнем натрия в реакторе заполнены аргоном.

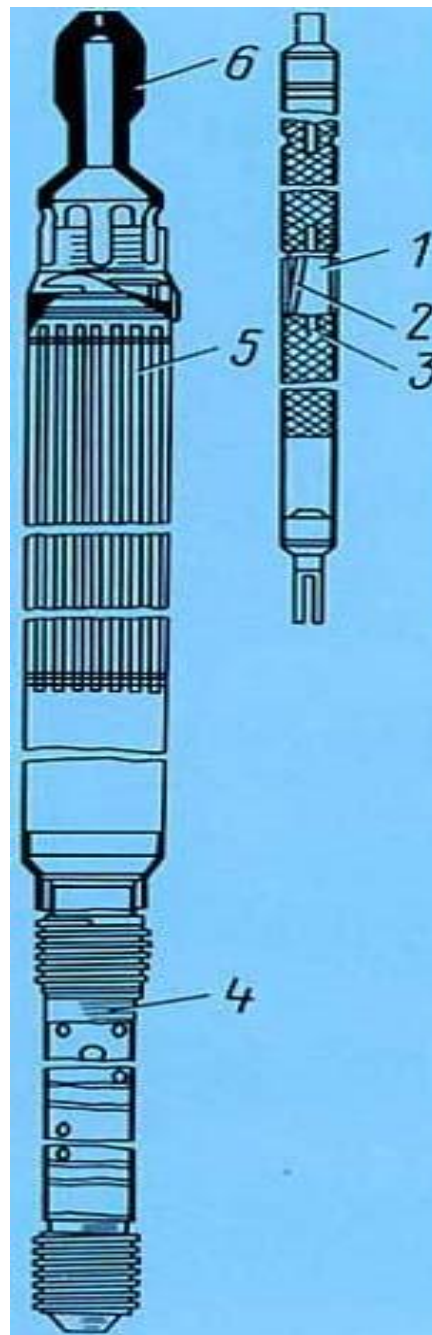
- Тепловыделяющая сборка состоит из твэлов, кожуха, головки для захвата ТВС при перегрузках и хвостовика, с помощью которого ТВС устанавливается в гнездо напорного коллектора и поддерживается вертикально. В хвостовике ТВС и в напорном коллекторе выполнены дроссельные устройства, обеспечивающие требуемое распределение расхода теплоносителя через ТВС, в соответствии с тепловыделением в них. Твэлы соединены между собой элементами крепления и ограждены чехлом, связывающим в единое целое все части ТВС.



Рисунок

ТВС и твэлы активной зоны:

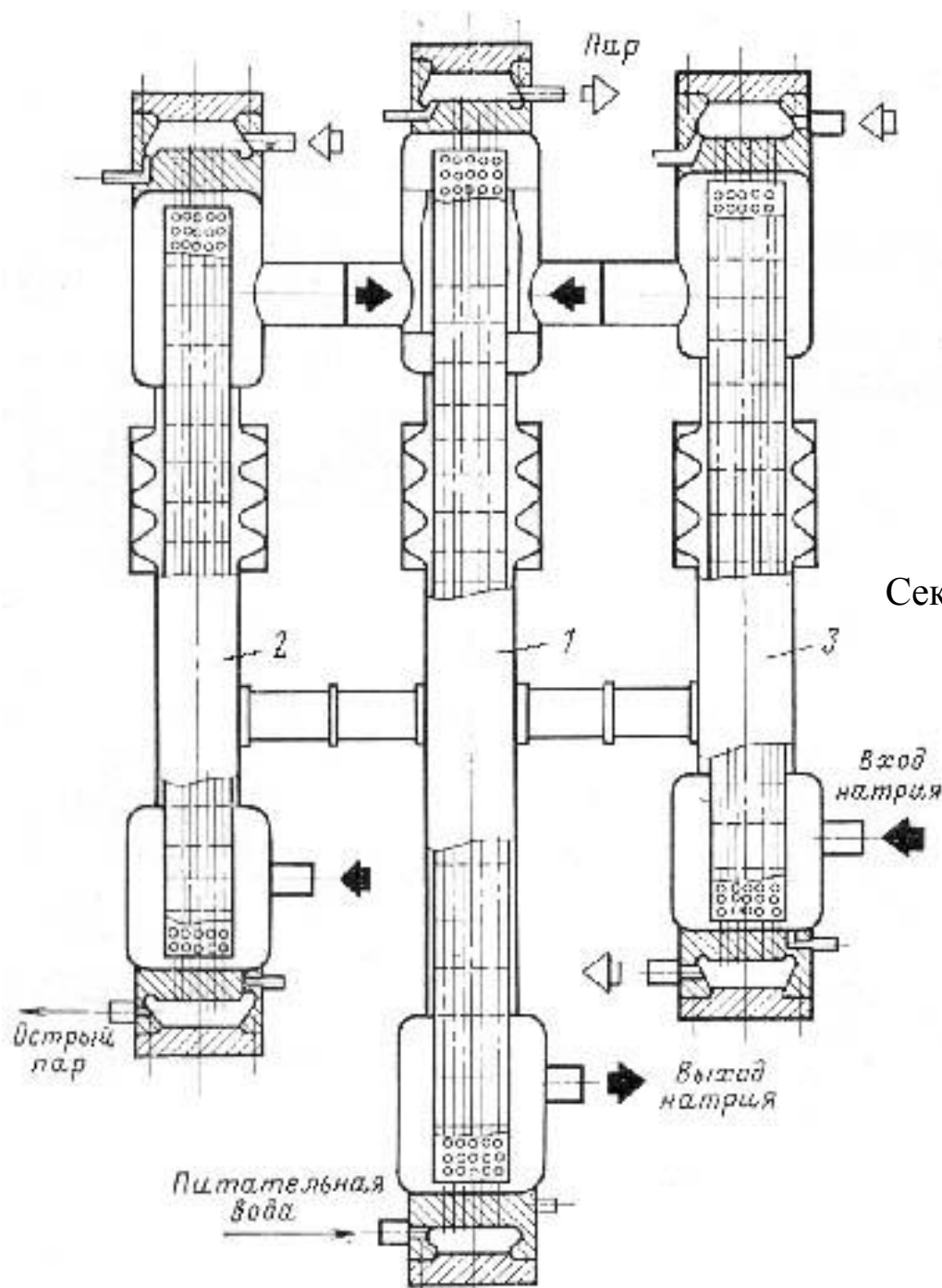
- 1-Оболочка твэла;
- 2 - Блочки "отвального" урана;
- 3 - Втулки обогащённого урана;
- 4-Дистанционирующая проволока;
- 5 - Головка ТВС;
- 6-Сборка твэлов;
- 7- Хвостовик ТВС



Рисунок

ТВС и твэл зоны воспроизводства:

- 1 - Оболочка твэла;
- 2 - Ребро;
- 3 - Блочки "отвального" урана;
- 4 - Хвостовик ТВС;
- 5 - Сборка твэлов;
- 6 - Головка ТВС



Секция парогенератора АЭС БН-600.

- 1 — испаритель;
- 2 — пароперегреватель;
- 3 — промежуточный пароперегреватель

Основные системы установки

Система управления и защиты (СУЗ)

СУЗ реактора обеспечивает измерение уровня и скорости изменения нейтронной мощности во всех диапазонах работы реактора, дистанционный контролируемый вывод реактора на заданный уровень мощности и устойчивое автоматическое поддержание мощности на заданном уровне, автоматическое надежное прекращение цепной реакции деления при возникновении аварийного состояния в реакторе или других системах, компенсацию изменения реактивности реактора.

СУЗ реактора БН-600 включает в себя 27 органов управления реактивностью, в том числе 19 стержней компенсации изменения реактивности (компенсация выгорания, температурных и мощностных эффектов), расположенных двумя кольцами, 2 стержня автоматического регулирования, расположенные в двух ячейках центральной части зоны малого обогащения, 6 стержней аварийной защиты, расположенные между первым и вторым кольцами компенсирующих стержней.

Система перегрузки топлива

- ***Система перегрузки топлива*** обеспечивает загрузку свежих ТВС и элементов СУЗ в реактор, выгрузку ТВС и элементов СУЗ из реактора, перестановку и разворот ТВС в реакторе.
- Комплекс механизмов и устройств системы перегрузки топлива включает в себя следующие устройства: две поворотные пробки (большая и эксцентрически на ней установленная малая), два механизма перегрузки (эксцентрически расположенные на малой поворотной пробке на разных расстояниях от центра), систему наведения, два элеватора транспортировки ТВС и элементов СУЗ (загрузки и выгрузки), механизм передачи сборок, барабан свежих и барабан отработавших сборок, устройства управления комплексом механизмов перегрузки.
- С помощью механизма перегрузки кассета устанавливается в гнездо каретки элеватора и перемещением каретки по наклонной направляющей поднимается из внутреннего хранилища к механизму передачи кассет и обратно.
- Механизм передачи кассет расположен в герметичном перегрузочном боксе. Он осуществляет транспортировку кассет из гнёзд каретки элеваторов в передаточные барабаны и обратно.

Система очистки натрия

- ***Система очистки натрия*** предназначена для очистки натрия от растворимых и нерастворимых примесей и индикации содержания этих примесей. Очистка осуществляется с применением холодных фильтров-ловушек.

Помещения, где возможно истечение и возгорание натрия, оборудованы ***системами пожаротушения натрия***, предусматривающими следующие способы тушения натрия: порошковым составом; в специальных поддонах с гидрорастворами; сливом натрия в аварийные емкости с самотушением натрия в них; самотушителями в относительно герметичных помещениях без подачи азота; подачей азота в помещения с натриевым оборудованием.

Система электроснабжения. Выдача электрической мощности в энергосистему осуществляется через три блочных повышающих трансформатора 1575/242 кВ мощностью 250 МВА каждый и далее через типовое открытое распределительное устройство 220 кВ, выполненное с двумя основными и одной обходной системой шин.

Важнейшие потребители электроэнергии систем безопасности имеют резервное питание от систем с автономными надежными источниками - автоматически запускаемыми дизель-генераторами и аккумуляторными батареями.

Безопасность реакторной установки

- Применение принципа глубоко эшелонированной защиты в виде системы барьеров на пути распространения ионизирующих излучений и радиоактивных веществ в окружающую среду и реализации системы технических и организационных мер по защите и сохранению эффективности этих барьеров.
- Как и во всех типах реакторов на энергоблоке с реактором БН-600 в качестве первого, второго и третьего барьеров рассматриваются матрица топлива, герметичная и прочная оболочка твэла и корпус реактора.
- Отличительной особенностью в условиях работы корпуса реактора является отсутствие каких-либо значительных повреждающих факторов: он не подвергается действию высокого давления, коррозионного воздействия и большого облучения нейтронами.
- Четвертым барьером является страховочный корпус реактора, страховочные кожухи вспомогательных трубопроводов 1 контура и герметичные помещения 1 контура.

Меры обеспечения защиты и сохранения эффективности барьеров

- выбор благоприятной площадки с невысокой сейсмичностью в соответствии с требованиями нормативных документов;
- использование и развитие внутренне присущих реактору на быстрых нейтронах свойств безопасности и его самозащиты за счет пассивных средств, отрицательных во всех режимах эффектов реактивности, низкой избыточной реактивности, отсутствия локальных критичностей,
- способности СУЗ обеспечивать приведение реактора в подкритическое состояние и поддержание его в этом состоянии во всех режимах,
- интегральной компоновки реактора, высокой тепловой инерции 1 и 2 контуров и осуществимости режимов естественной циркуляции теплоносителя в них;
- обеспечение требуемого качества систем, важных для безопасности, на всех этапах жизненного цикла энергоблока;
- применение систем безопасности, построенных на основе принципов резервирования, независимости, единичного отказа;
- применение средств диагностирования дефектов оборудования и отклонений режима их работы от нормального.

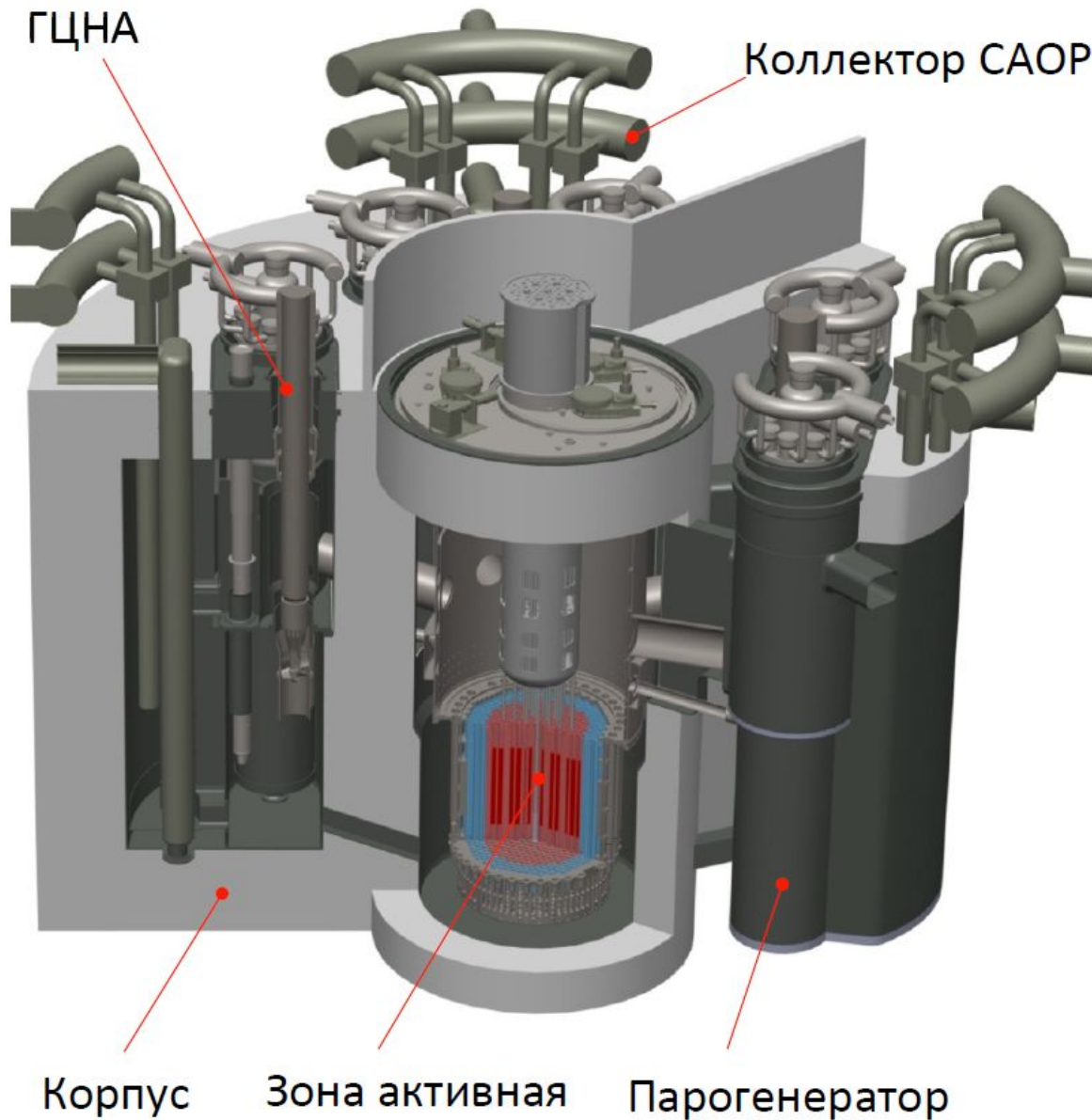
БРЕСТ

БРЕСТ — проект реакторов на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем, двухконтурной схемой отвода тепла к турбине и закритическими параметрами пара. Этот проект разрабатывается с конца 80-х годов, однако до сих пор находится в стадии поиска оптимальных решений в области систематизации, организации проектных работ и в части конструкции отдельных элементов реакторной установки и её оборудования. Главный конструктор реакторной установки — НИКИЭТ имени Н. А. Доллежала.

Первоначально проектировалась установка БРЕСТ, обеспечивавшая в составе энергоблока электрическую мощность 300 МВт, позже возник и проект с мощностью энергоблока 1200 МВт, однако на данный момент разработчики сосредоточили свои усилия на менее мощном БРЕСТ-ОД-300 («опытный демонстрационный»), в связи с отработкой большого количества новых в этой области конструктивных решений. Кроме того, выбранная мощность 300 МВт (эл.) и 700 МВт (тепл.) является минимально необходимой для получения коэффициента воспроизводства топлива в активной зоне, равного единице.

В настоящее время представители Росатома рассматривают БРЕСТ как составную часть проекта Прорыв, "консолидирующего проекты по разработке реакторов большой мощности на быстрых нейтронах, технологий замкнутого ядерного топливного цикла, а также новых видов топлива и материалов и ориентированный на достижение нового качества ядерной энергетики".

Реактор БРЕСТ

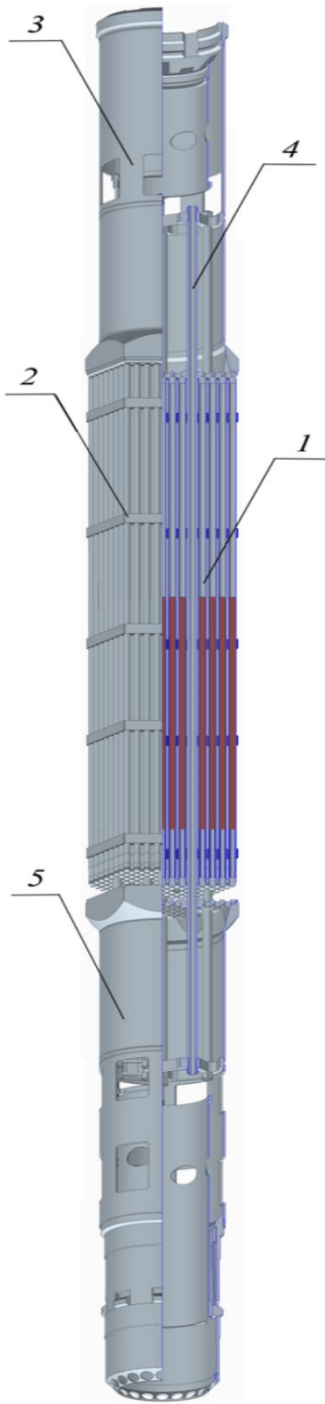


Характеристики

- Интегральная компоновка в сочетании с многослойным металлобетонным корпусом (нет выхода теплоносителя за пределы корпуса) для исключения потери теплоносителя.
- Отсутствие запорной арматуры в первом контуре - невозможно прекращение циркуляции. Схема циркуляции теплоносителя с перепадом свободных уровней - гарантированное продление циркуляции при обесточивании.
- Использование плотного высокотеплопроводного смешанного уран-плутониевого нитридного топлива и малозамедляющего нейтроны тяжелого свинцового теплоносителя позволяют обеспечить воспроизводство делящихся материалов в активной зоне. Полное воспроизводство делящихся материалов в активной зоне (КВА ~1,05) ограничивает запас реактивности, исключает возможность реализации тяжёлой реактивностной аварии.
- Применение малоактивируемого свинцового теплоносителя с высокой температурой кипения, не вступающего в бурное взаимодействие с водой и воздухом в случае разгерметизации контура.
- Применение системы аварийного расхолаживания с естественной циркуляцией и отводом тепла к атмосферному воздуху.

ТВС БРЕСТ

- 1 – ТВЭЛ;
- 2 – дистанционирующая решетка;
- 3 – головка;
- 4 – несущая труба;
- 5 – хвостовик.



ТВС бесчехловая шестигранная с гладкостержневыми ТВЭлами.

При перекрытии расхода теплоносителя на входе теплоотвод обеспечивается за счет перетока теплоносителя из «соседних» ТВС.

Обоснование принимаемых решений для технического проекта строилось на результатах экспериментов на мало- и среднемасштабных стендах , а также по итогам расчётных работ с использованием верифицированных программных средств.

Выполнен анализ наиболее консервативных исходных событий:

исходных событий, приводящих к несанкционированному введению положительной реактивности

исходных событий, приводящих к нарушению теплоотвода от активной зоны.

Для наиболее консервативных сценариев развития исходных событий при наложении множественных отказов систем и оборудования или ошибок персонала возможно превышение максимального проектного предела части твэл активной зоны. Плавление оболочек твэл и топлива при этом не происходит. Целостность контура циркуляции обеспечена.

Анализ переходных процессов на РУ БРЕСТ-ОД-300 показывает возможность исключения тяжёлых аварий, требующих эвакуации и