

ПАССИВНЫЕ СИСТЕМЫ ОТВОДА ТЕПЛА В ПРОЕКТАХ РЕАКТОРОВ ВВЭР НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Слободчук В.И., доцент кафедры
«Оборудование и эксплуатация ЯЭУ»
ИАТЭ НИЯУ МИФИ

Системы безопасности

- Безопасность атомных станций при возникновении аварийных ситуаций обеспечивается введением в состав АЭС специальных систем, предназначенных для предупреждения аварий и ограничения их последствий.
- Одной из таких систем является система аварийного охлаждения активной зоны.
- Системы безопасности строятся с использованием как **активных**, так и **пассивных** элементов.

СИСТЕМЫ ПАССИВНОГО ОТВОДА ТЕПЛА

- Системы пассивного залива активной зоны
- Системы пассивного отвода тепла через парогенератор (СПОТ ПГ)

КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ПАССИВНОГО ЗАЛИВА АКТИВНОЙ ЗОНЫ

- По назначению:
 - **одноцелевые** (аварийное охлаждение АЗ);
 - **многоцелевые** (совмещающие функции охлаждения и остановки реактора, а также удержания реактора в подкритическом состоянии)

КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ПАССИВНОГО ЗАЛИВА АКТИВНОЙ ЗОНЫ

- По способу подачи охлаждающей среды в реактор:
 - давлением газа;
 - давлением среды первого контура (пар или пароводяная смесь);
 - под действием гидростатического напора, т. е. самотеком.

КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ПАССИВНОГО ЗАЛИВА АКТИВНОЙ ЗОНЫ

- По длительности работы системы:
 - кратковременно (как правило, в течение нескольких минут для быстрого охлаждения активной зоны реактора);
 - долговременно (до нескольких суток, в целях отвода остаточного тепла).

КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ПАССИВНОГО ЗАЛИВА АКТИВНОЙ ЗОНЫ

- По расходной характеристике:
 - не профилируемые (расход зависит от перепада давления между емкостью с охладителем и охлаждаемым контуром);
 - профилируемые (с использованием специальных устройств для изменения расхода)

КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ПАССИВНОГО ЗАЛИВА АКТИВНОЙ ЗОНЫ

- По способу удержания охлаждающей среды вне зоны:
 - с помощью обратных клапанов;
 - с помощью пружинных клапанов;
 - пневматическими вентилями на линии слива;
 - односторонними разрывными мембранами.

КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ПАССИВНОГО ЗАЛИВА АКТИВНОЙ ЗОНЫ

- По месту ввода охлаждающей среды:
 - в холодные и/или горячие нитки ГЦК;
 - в опускной участок реактора;
 - в смесительную камеру реактора;
 - в напорные коллекторы;
 - в ТОПЛИВНЫЕ каналы.

КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ПАССИВНОГО ЗАЛИВА АКТИВНОЙ ЗОНЫ

- По условиям срабатывания:
 - при падении давления в первом контуре;
 - при снижении перепада давления между первым контуром и защитной оболочкой;
 - при снижении давления воздуха в системе пневматических клапанов на линии слива.

КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ПАССИВНОГО ЗАЛИВА АКТИВНОЙ ЗОНЫ

- По месту размещения объема с охлаждающей средой:
 - внутри защитной оболочки;
 - за пределами контейнмента.

КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ПАССИВНОГО ЗАЛИВА АКТИВНОЙ ЗОНЫ

- По типу используемого источника рабочего газа:
 - газовая подушка в самой гидроемкости;
 - отдельный сосуд со сжатым газом;
 - среда первого контура (пар или пароводяная смесь)

КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ПАССИВНОГО ЗАЛИВА АКТИВНОЙ ЗОНЫ

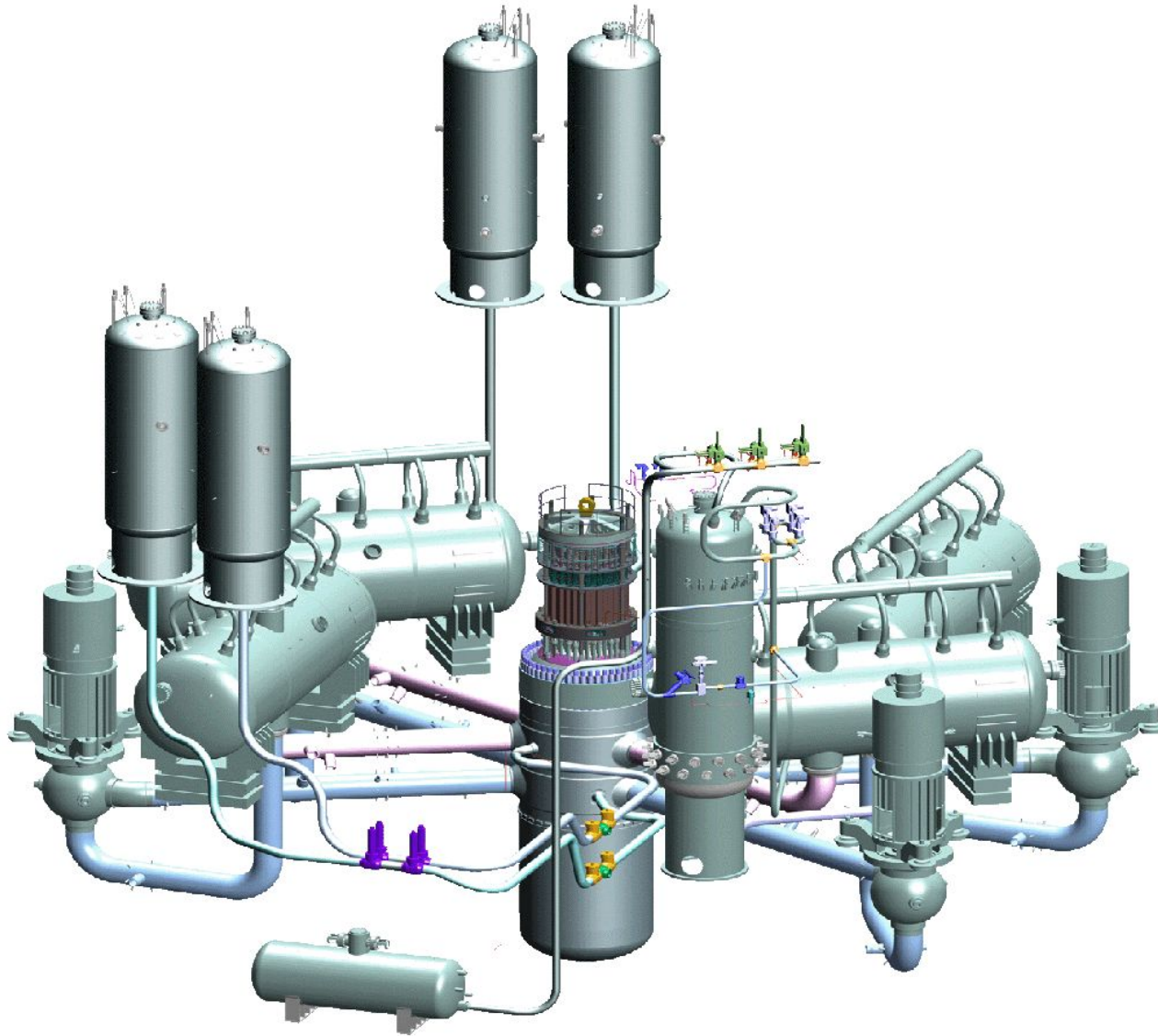
- По способу предотвращения попадания рабочего газа в реактор:
 - использование быстрозапорных задвижек на линии слива;
 - применение устройств для сброса давления газа;
 - плавающий поплавковый клапан внутри гидроемкости;
 - отказ от использования в системе неконденсирующихся газов.

КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ПАССИВНОГО ЗАЛИВА АКТИВНОЙ ЗОНЫ

- По химическому составу охладителя:
 - обычная вода;
 - водные растворы.

- Система пассивного залива активной зоны в зарубежной практике начала применяться с середины 60-х годов прошлого столетия.
- В Советском Союзе такие системы начали применяться с середины 70-х годов при разработке реакторных установок ВВЭР-440 второго поколения (проект В-213)

Пассивная часть САОЗ



АТЭЦ-200 (ОКБМ)

- АТЭЦ-200 – интегральная установка, тепловая мощность 700 МВт (электрическая мощность – 240 МВт).
- Предусмотрено две системы аварийного расхолаживания (САРХ):
 - первая система обеспечивает теплоотвод через парогенератор (2 петли)
 - вторая система обеспечивает теплоотвод от первого контура непосредственно и расположена на верхней крышке реактора

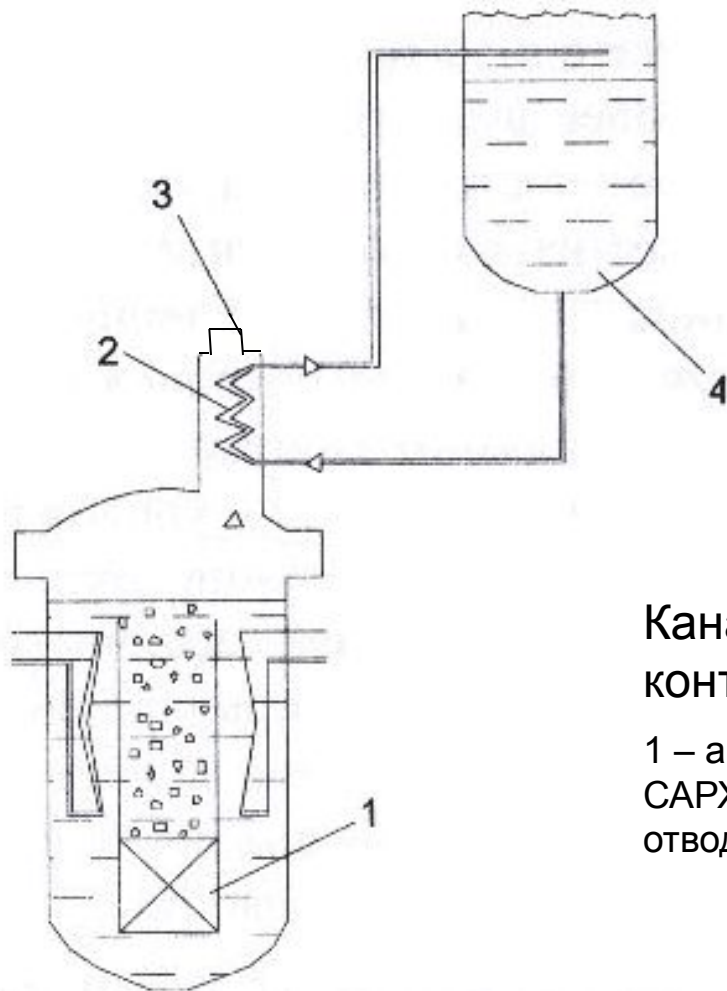
АТЭЦ-200 (ОКБМ)



Канал САРХ через второй контур АТЭЦ-200

1-теплообменник канала расхолаживания, 2 – бак запаса воды, 3 – емкость запаса воды второго контура, 4 – воздушный теплообменник

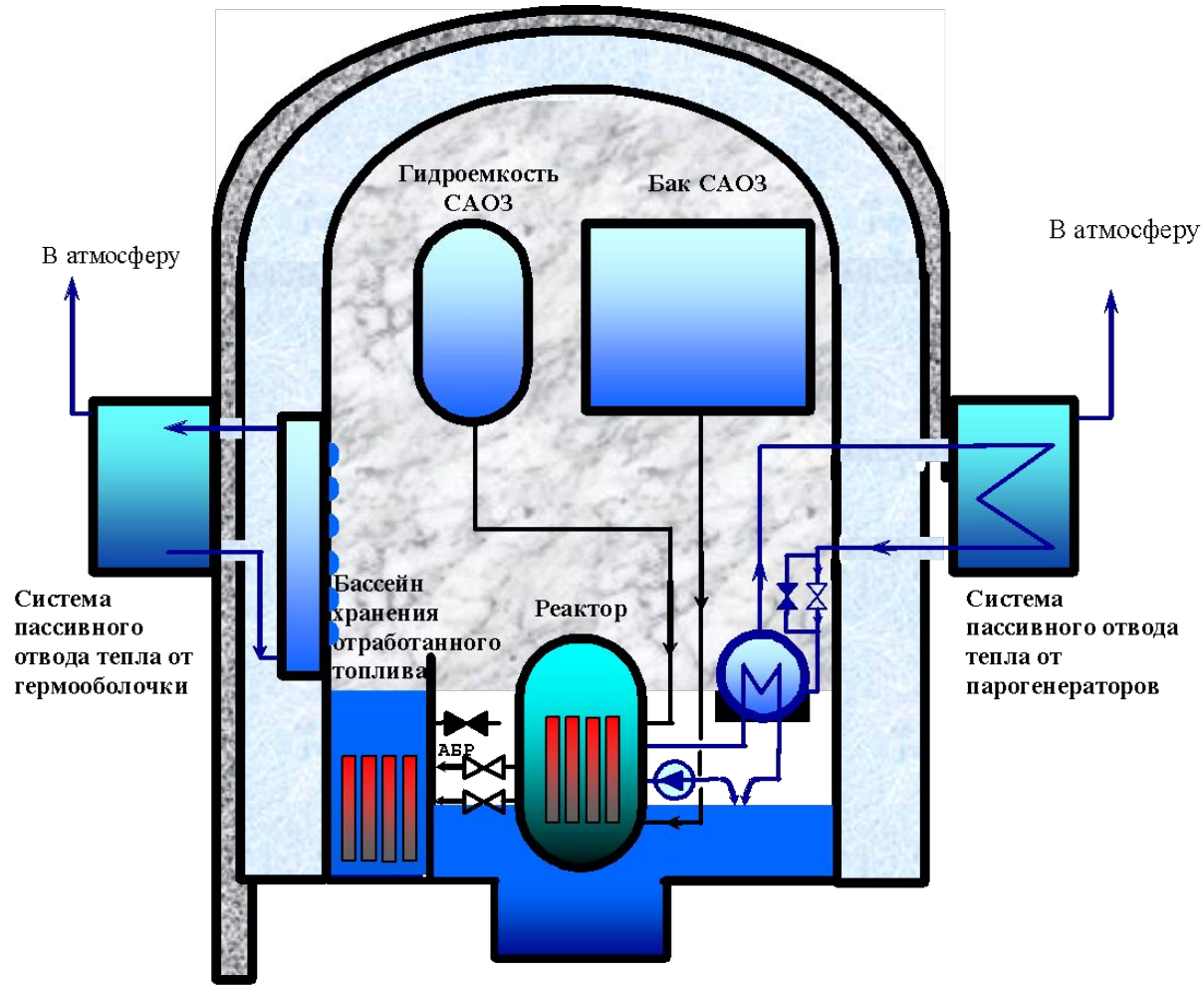
АТЭЦ-200 (ОКБМ)

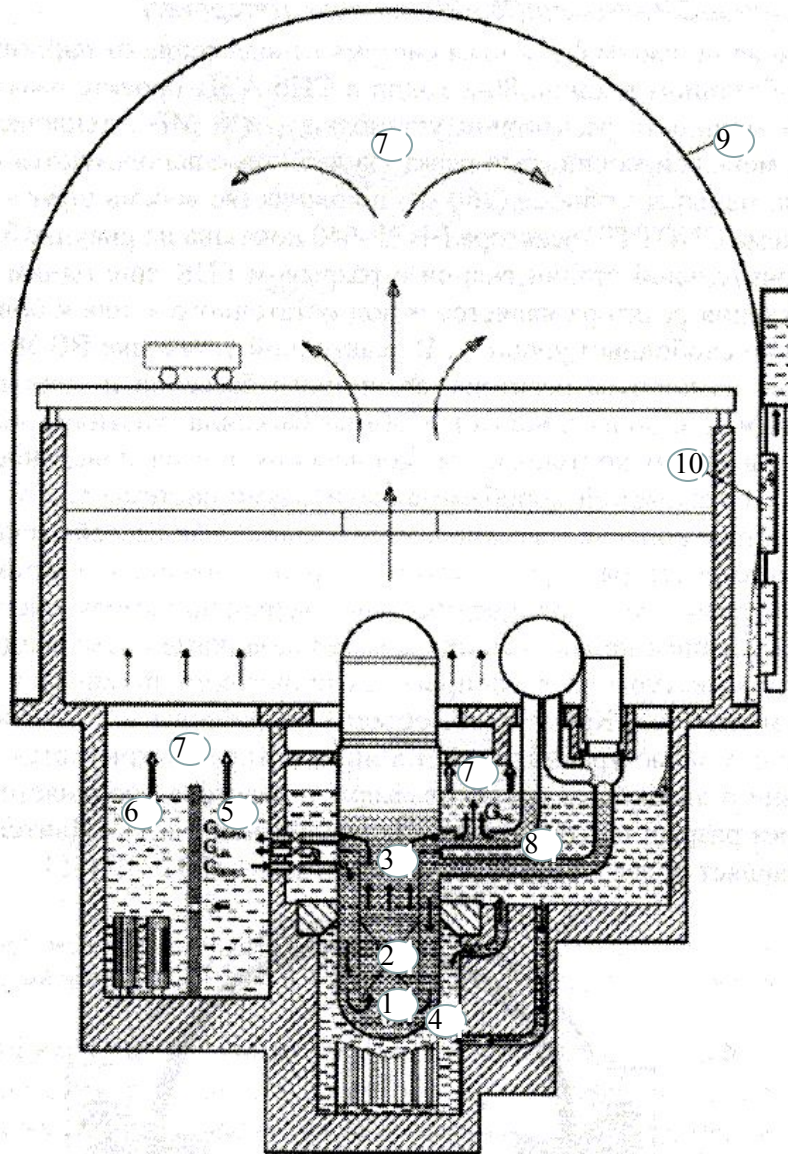


Канал САРХ через первый контур АТЭЦ-200.

1 – активная зона, 2 – теплообменник САРХ, 3 – мембрана, 4 – бассейн отвода тепла

Пассивная часть САОЗ на примере проекта ВВЭР-640





Система отвода тепла через аварийный бассейн реактора ВВЭР-640:
 1 – нижняя камера смешения, 2 – АЗ, 3 – верхняя камера смешения,
 4 – подреакторное пространство, 5, 6 – топливные бассейны, 7 – пар и ПГС,
 8 – аварийный бассейн, 9 – ЗО, 10 – СПОТ ЗО

ВВЭР-640

- Разработка проекта: Атомэнергопроект, ОКБ «Гидропресс», РНЦ «Курчатовский институт»...
- АЭС оснащена пассивными системами безопасности, обеспечивающими останов реактора, расхолаживание и длительный отвод остаточного тепла, не требующие вмешательства персонала и подачи энергии извне в течение не менее 24 часов.

ВВЭР-640

- Система аварийного охлаждения активной зоны состоит из четырех гидроемкостей и четырех баков низкого давления.
- При снижении давления в первом контуре ниже 4 МПа открываются обратные клапаны на ГЕ САОЗ высокого давления, и борный раствор поступает в корпус реактора.

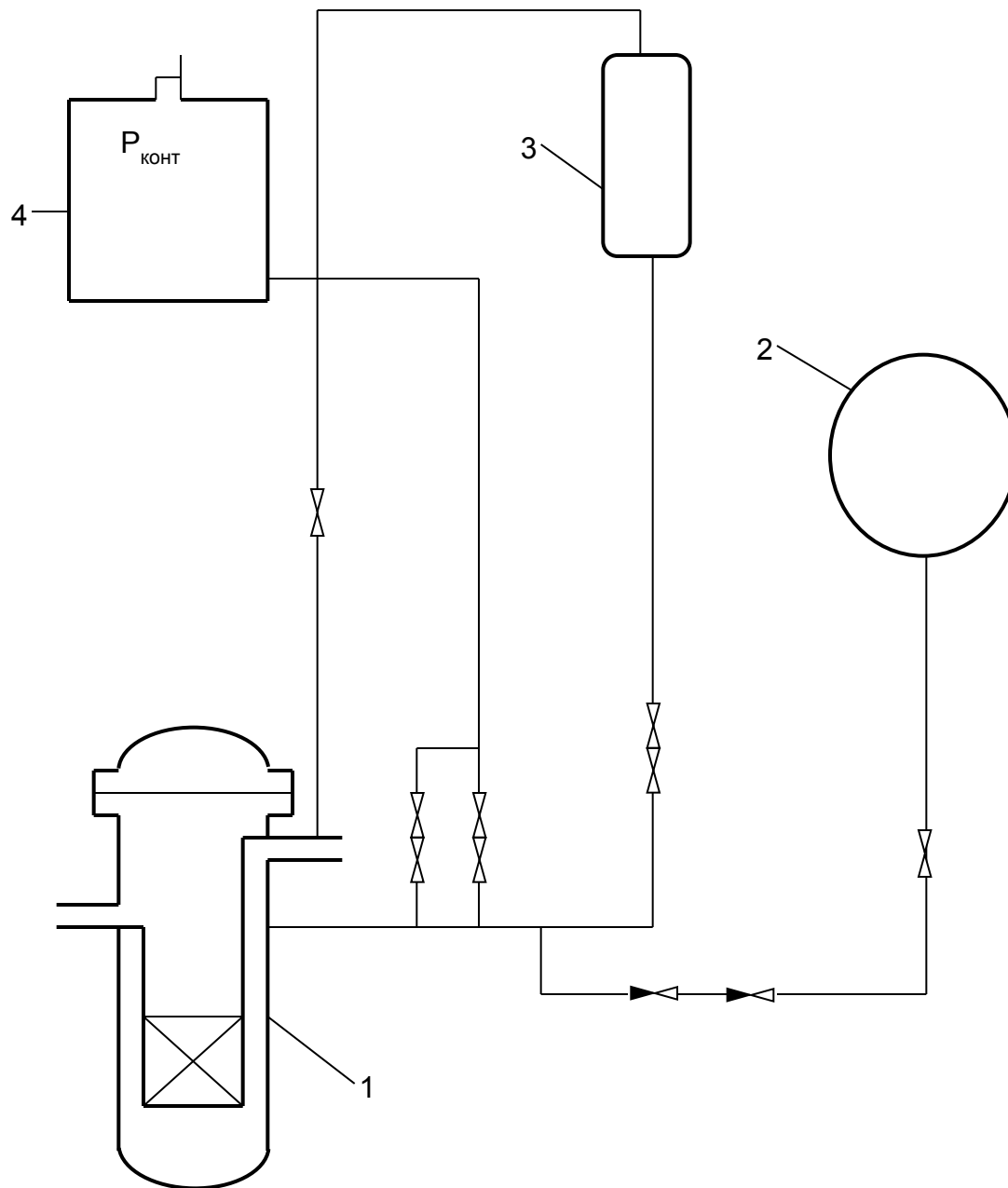
ВВЭР-640

- После уменьшения разницы давления между первым контуром и ГО до 0,6 МПа открываются специальные клапаны – аварийные блоки разгерметизации (АБР), соединяющие горячие и холодные нитки петель с объемом топливного бассейна.
- После снижения перепада давления между первым контуром и баками САОЗ ниже 0,3 МПа начинается залив активной зоны из этих баков (четыре бака по 460 м³)

ВВЭР-640

- Теплоноситель и борный раствор из ГЕ и баков САОЗ собираются в специальном герметичном ограждении вокруг реактора и петель первого контура.
- После опорожнения двух ГЕ и двух баков САОЗ уровень в аварийном бассейне устанавливается выше уровня выходных патрубков реактора, а при опорожнения всех ГЕ и баков – на уровне разъема ГЦН.

AP600



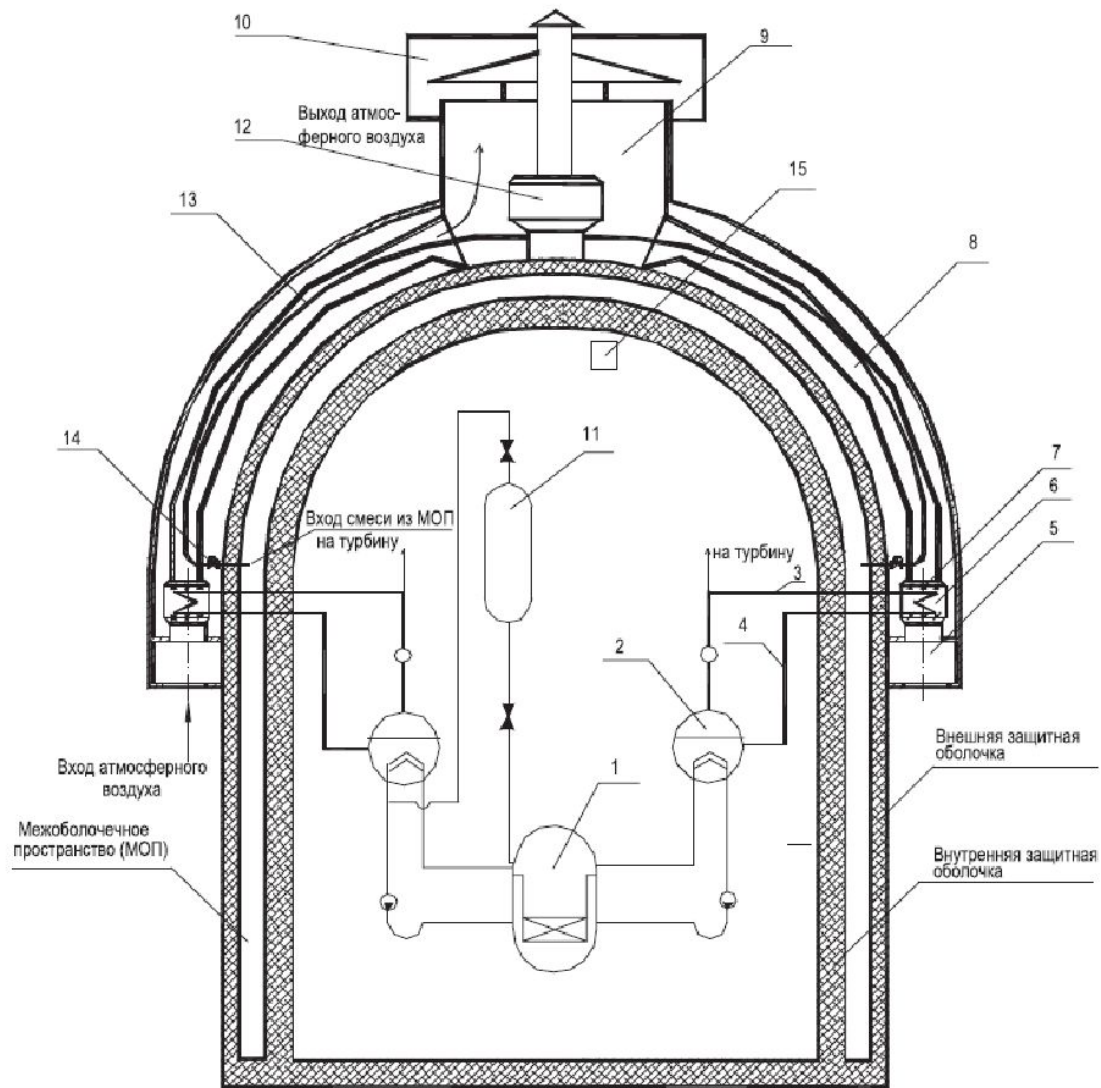
Система пассивного залива активной зоны реактора AP600.

- 1 – реактор,
- 2 – гидроаккумулятор,
- 3 – бак подпитки активной зоны,
- 4 – бак запаса воды

AP600

- - Гидроаккумуляторы, 2 шт, объем 48 м^3 каждый с раствором борной кислоты, рабочее давление 4,83 МПа;
- - Баки подпитки активной зоны, 2 шт, объем 57 м^3 каждый, на полное давление первого контура;
- - Бак запаса воды, объем 2108 м^3 .

АЭС-2006



Технологическая схема пассивных систем РУ В-392М. 1 – реактор, 2 – парогенератор, 3 – паровой тракт СПОТ, 4 – конденсационный тракт СПОТ, 5 – входной кольцевой коллектор, 6 – теплообменник СПОТ, 7 – шибер СПОТ, 8 – тяговая шахта СПОТ, 9 – выходной коллектор СПОТ, 10 – дефлектор, 11 – ГЕ-2, 12 – фильтровальная установка, 13 – труба-теплообменник пассивной системы фильтрации (ПСФ), 14 – вентиль ПСФ, 15- пассивный каталитический рекомбинатор водорода.

АЭС-2006

- Отличия
 - - система гидроемкостей второй ступени -ГЕ-2;
 - - система пассивного отвода остаточного тепла – СПОТ;
 - - пассивная система фильтрации протечек из защитной оболочки –ПСФ;
 - - система контроля концентрации и аварийного удаления водорода.

АЭС 2006

- В состав системы пассивного залива активной зоны входят системы гидроемкостей первой и второй ступеней: ГЕ-1 и ГЕ-2.
- ГЕ-1 - это система аналогичная таковой для проекта В-320 и состоит из 4-х ГЕ, заполненных раствором борной кислоты и находящихся под давлением азота 5,9 МПа.
- Общий запас охладителя в емкостях 200 м³, что обеспечивает подачу требуемого объема охлаждающей среды в АЗ (150 м³), если произойдет отказ одной ГЕ.

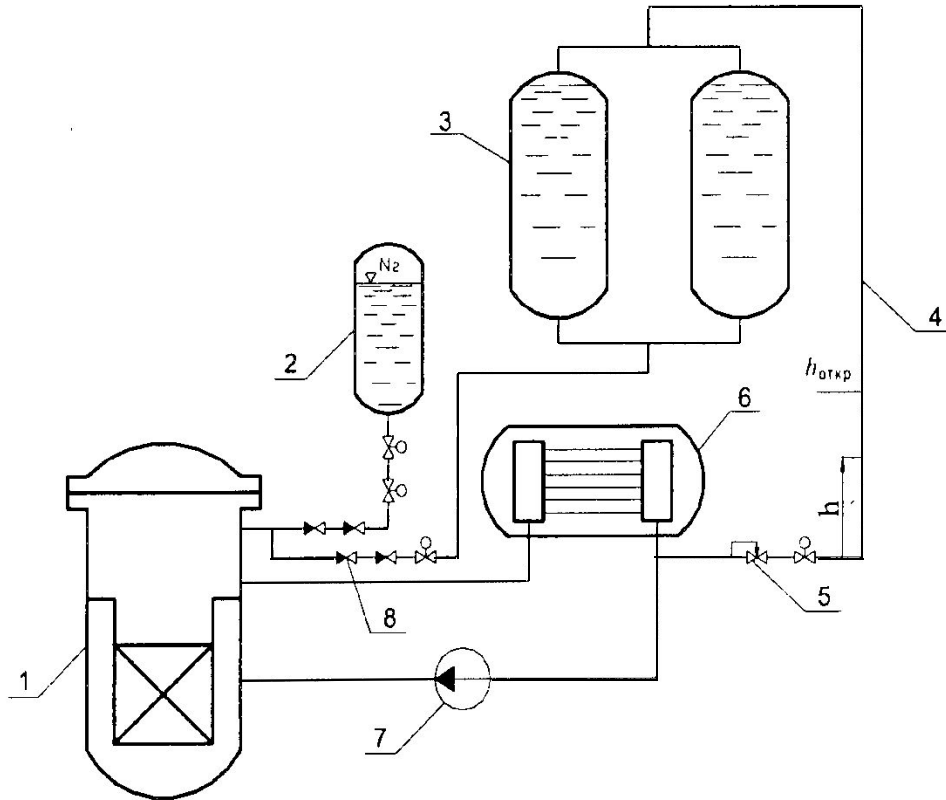
АЭС 2006. GE-2.

- GE-2 предназначены для пассивной подачи раствора борной кислоты в активную зону реактора с целью отвода остаточного тепла в условиях полной потери собственных нужд.
- Система состоит из 4-х групп гидроаккумуляторов (по две емкости объемом 120 м^3 каждая) с раствором борной кислоты, находящихся под атмосферным давлением.

АЭС 2006. ГЕ-2.

- В соответствии с расчетами запаса воды в ГЕ-2 достаточно для съема остаточного тепла в течение 24 часов при учете работы СПОТ ПГ.
- Без учета работы СПОТ ПГ запаса воды хватит на 7-8 часов работы (испарительное охлаждение активной зоны).

АЭС 2006.



Система пассивного залива активной зоны. Один канал.

1- реактор, 2 – гидроемкость первой ступени (ГЕ-1), 3 - гидроемкость второй ступени (ГЕ-2), 4 – паровая линия, 5 – специальный обратный клапан, 6 – парогенератор, 7 – ГЦН, 8 – обратный клапан.

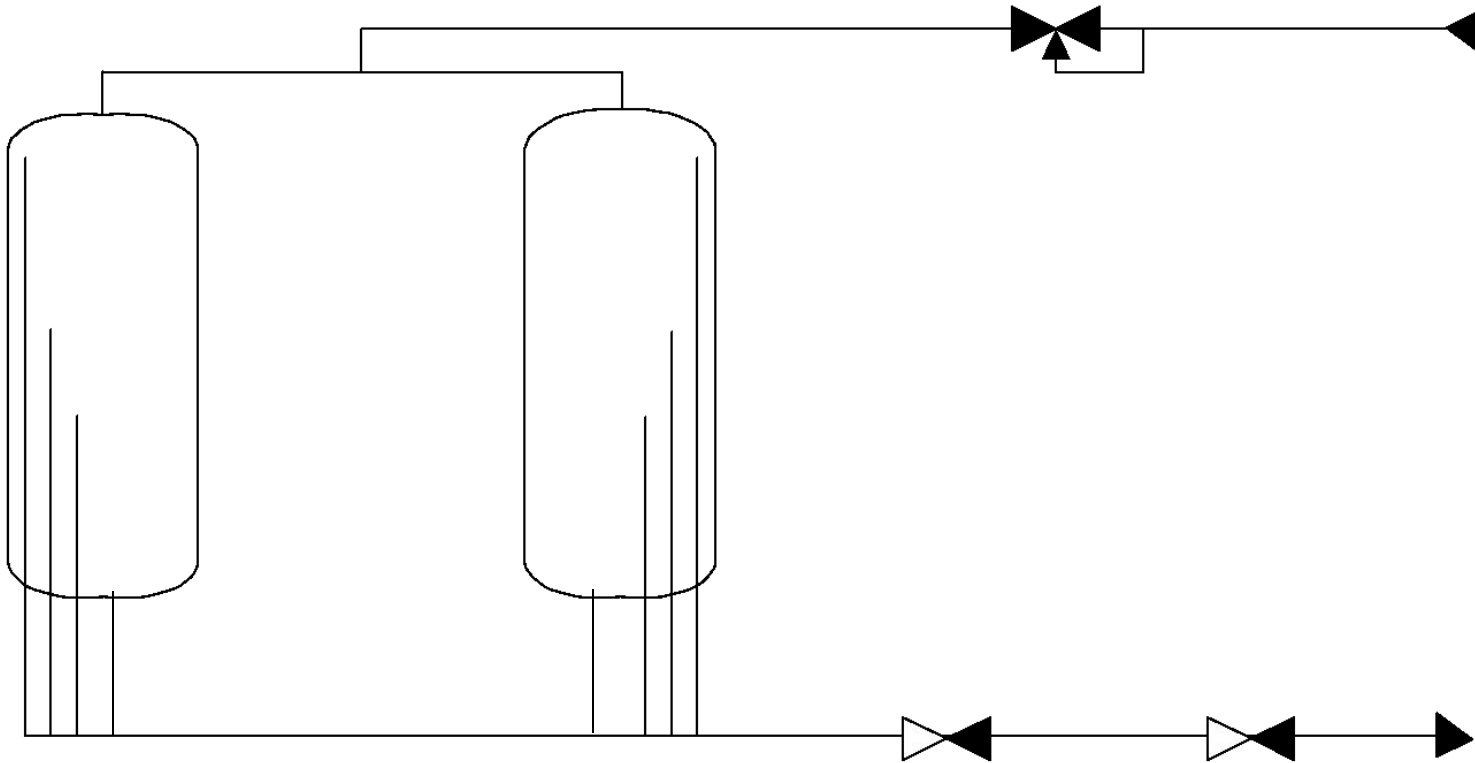
АЭС 2006. ГЕ-2.

- ГЕ-2 представляют собой вертикальные цилиндрические сосуды, размещенные на площадке обслуживания центрального зала, что обеспечивает необходимый гидростатический напор по отношению к реактору.
- Верх гидроемкостей подсоединен к выходным коллекторам парогенераторов с помощью паровой линии, оснащенной специальными обратными клапанами. Клапаны настроены на открытие при снижении давления в первом контуре ниже 1,5 МПа.
- По линии слива ГЕ-2 подключены к трубопроводам Ду300 подсоединения к реактору ГЕ-1 в неотключаемой части.

АЭС 2006. ГЕ-2.

- На трубопроводах слива установлены запорные задвижки, необходимые для отключения ГЕ-2 от первого контура при ремонте и обратные клапаны для исключения роста давления в ГЕ-2 в состоянии ожидания и автоматического открытия линии слива при снижении давления в первом контуре ниже 1,5 МПа.

АЭС 2006. ГЕ-2.



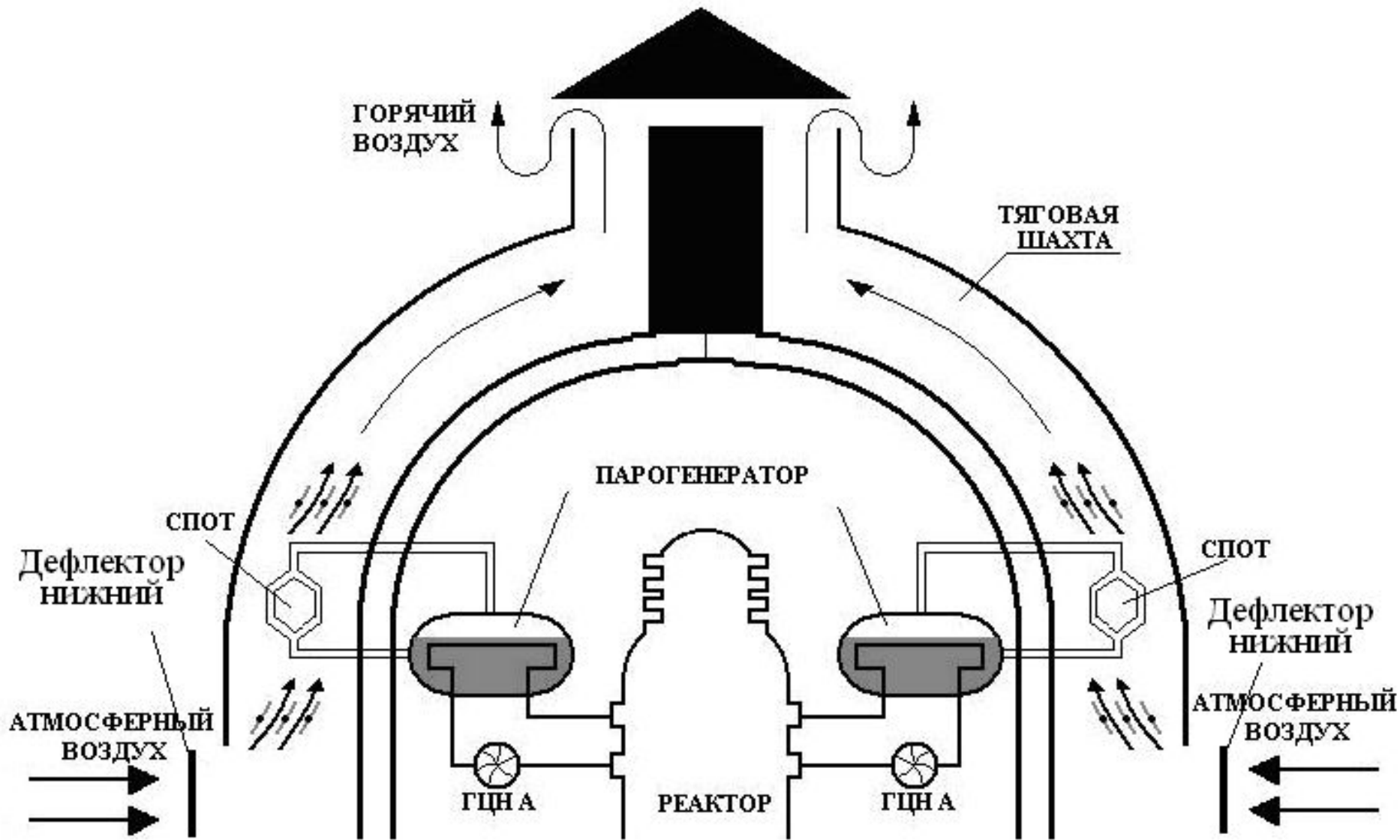
АЭС 2006. ГЕ-2.

- В системе реализовано четырехступенчатое профилирование во времени расхода, подаваемого в активную зону охладителя.
- Профилирование выполнено на основе последовательного прекращения истечения по сливной линии, оказавшейся выше уровня воды в баке.
- Величина расхода с запасом отслеживает закон снижения мощности остаточного энерговыделения в активной зоне (10 – 5 -3,33 - 1,6 кг/с)

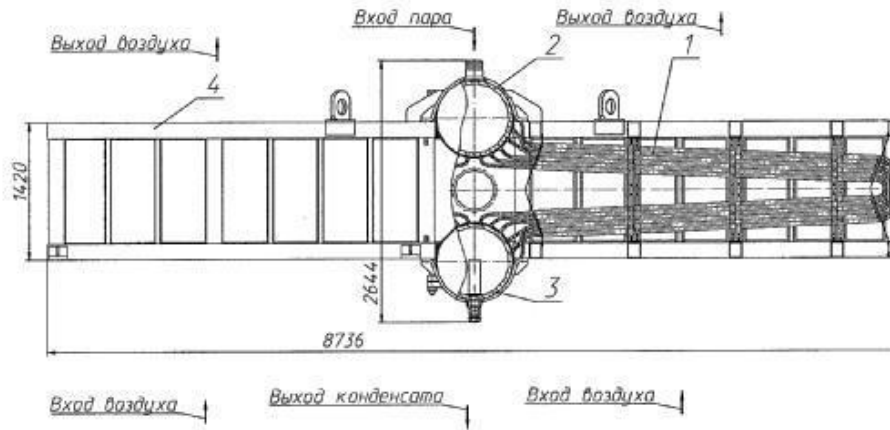
Работа ГЕ-2.

- При возникновении аварийной ситуации с потерей теплоносителя первого контура и падении давления в ГЦК до 1,5 МПа открываются специальные обратные клапаны и в верхнюю часть гидроемкостей начинает поступать пар под давлением, соответствующим давлению в реакторе.
- Трубопровод, связывающий ГЕ-2 с первым контуром, подключен к холодной нитке ГЦК в точке, расположенной выше высотной отметки подсоединения горячей нитки к реактору.
- Истечение охладителя из ГЕ начинается не позже момента, когда уровень в реакторе снизится до отметки подсоединения горячей нитки ГЦК.
- Это гарантирует надежное охлаждение активной зоны.

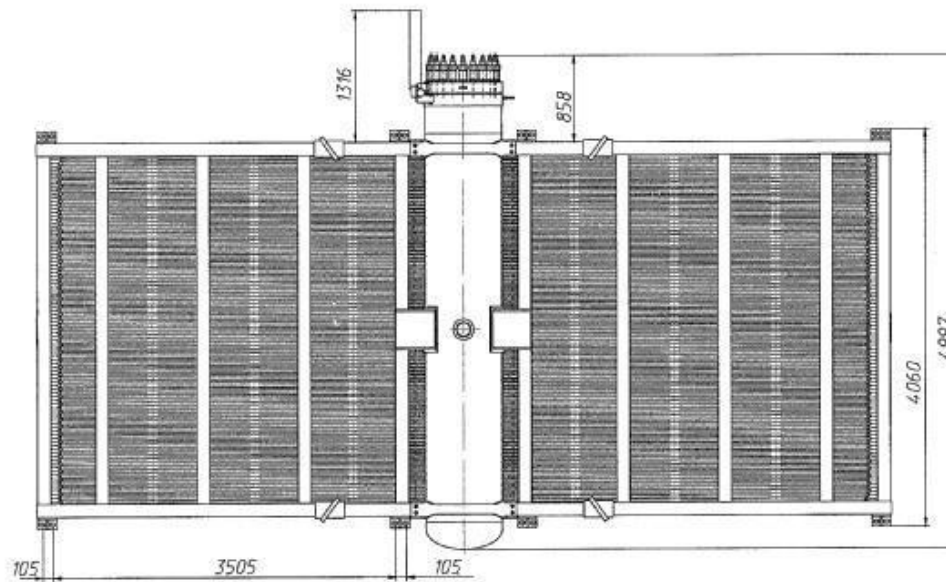
Принцип работы системы СПОТ и ее конструкция



Теплообменник СПОТ ПГ



- 1 – пучок трубный;
- 2 – раздающий коллектор;
- 3 – собирающий коллектор;
- 4 – рама.

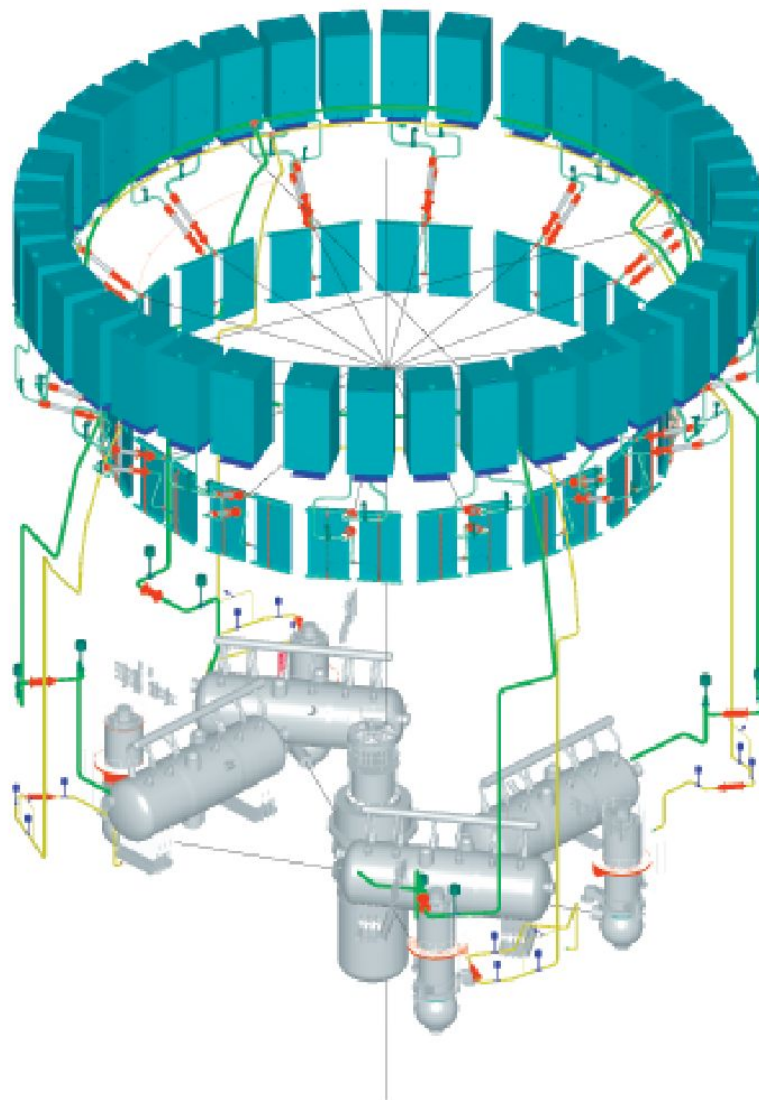


СПОТ ПГ

- Система пассивного отвода тепла энергоблоков АЭС 2006 имеет восемь воздушных теплообменников-конденсаторов, по два теплообменника на каждый парогенератор реакторной установки.
- При работе СПОТ в режиме отвода остаточных тепловыделений в РУ пар из парогенератора поступает в раздающий коллектор теплообменника, затем движется сверху вниз внутри теплообменных труб. При этом пар конденсируется, отдавая тепло воздуху.
- Воздух забирается из атмосферы вне здания оболочки, затем за счет естественной тяги поступает в кольцевой коллектор, расположенный вокруг здания оболочки и имеющий воздухоприемные отверстия.

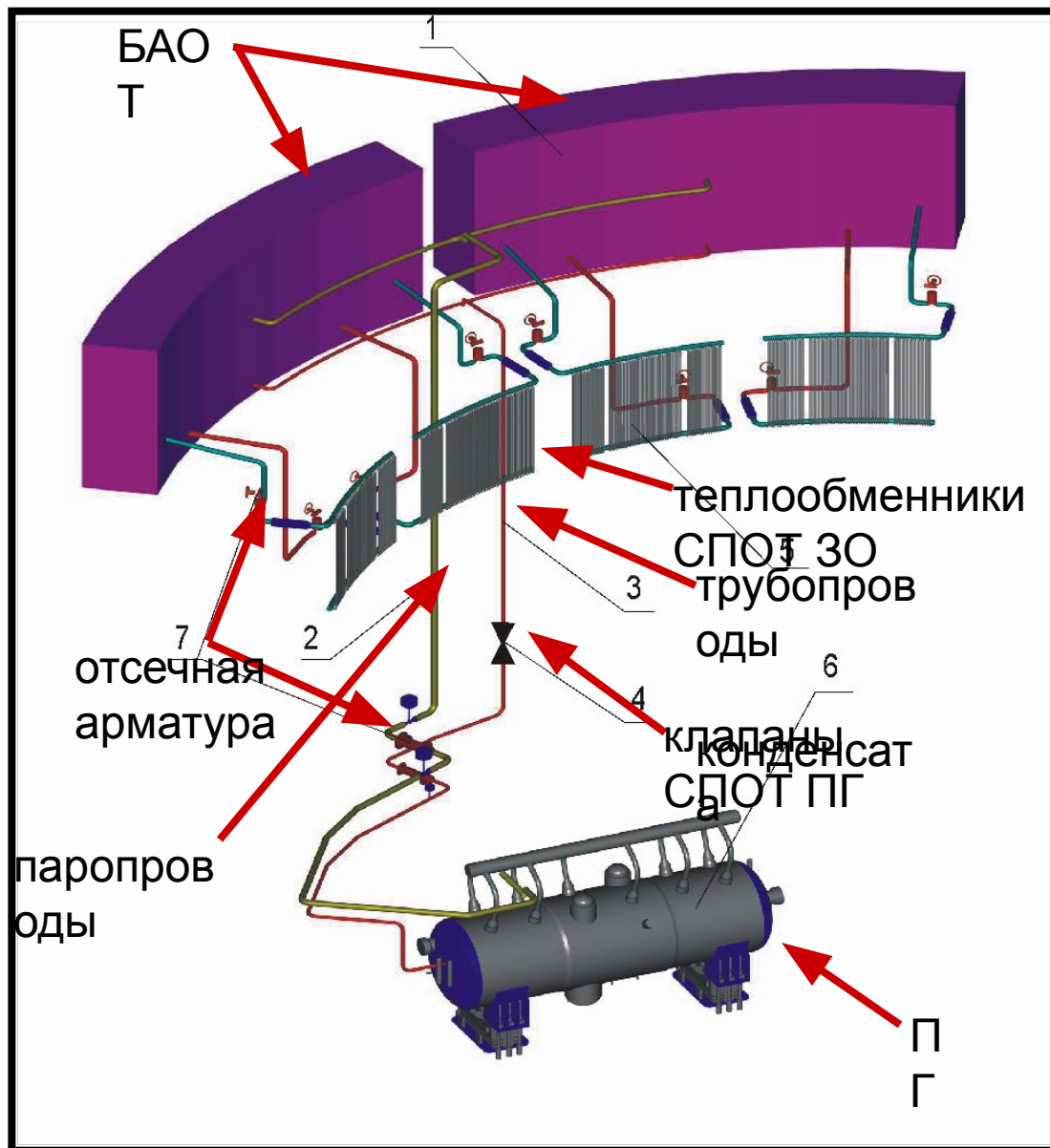
Работа СПОТ ПГ

- По индивидуальным воздуховодам воздух поступает на воздушные теплообменники-конденсаторы.
- Нагретый в теплообменниках воздух поступает в тяговые воздуховоды, которые заканчиваются общим выходным коллектором с дефлектором.
- Конденсат поступает в собирающий коллектор и отводится из теплообменника

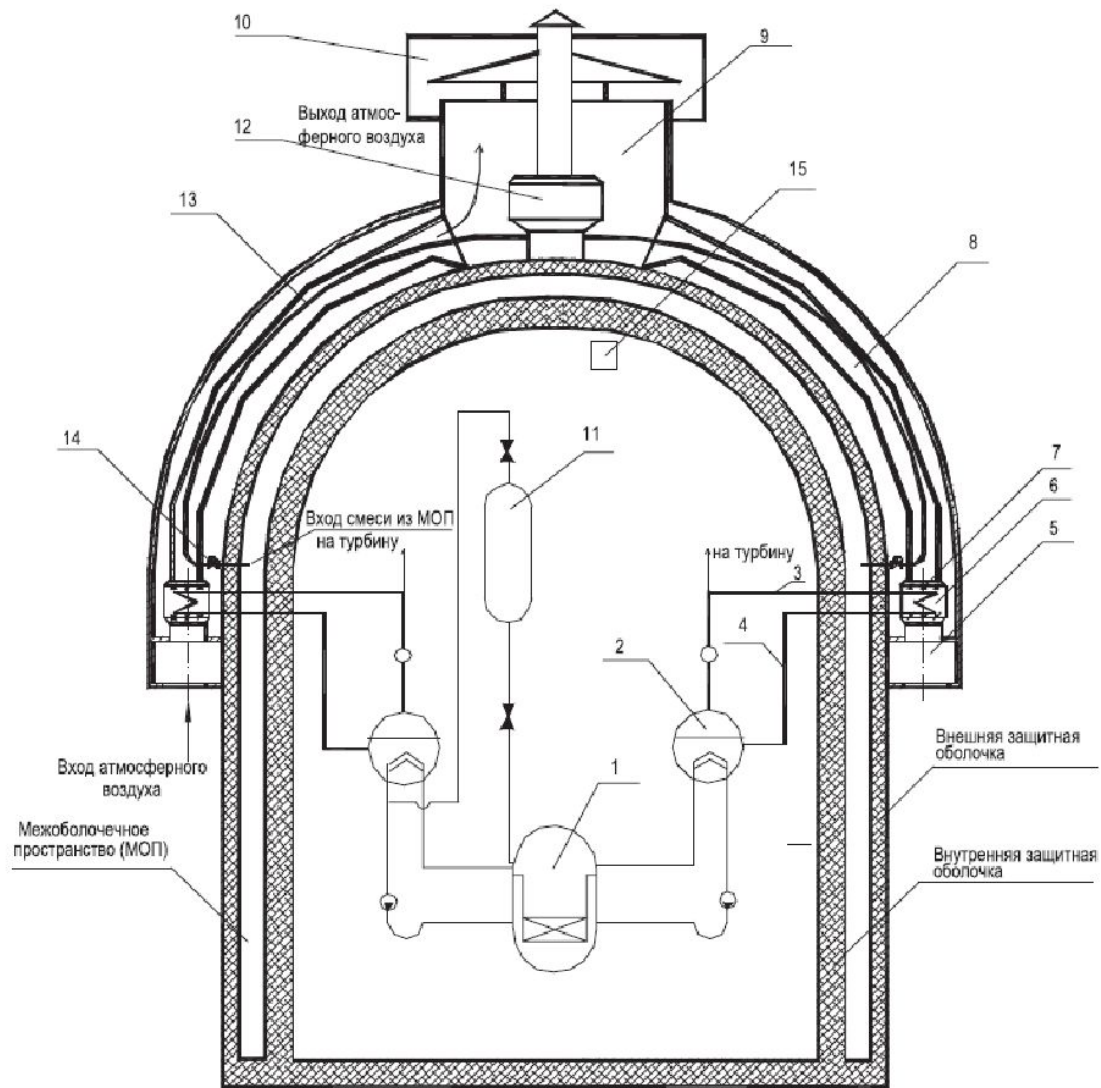


СПОТ ПГ и СПОТ 30

СПОТ ПГ и СПОТ ЗО (принципиальная схема)



АЭС-2006

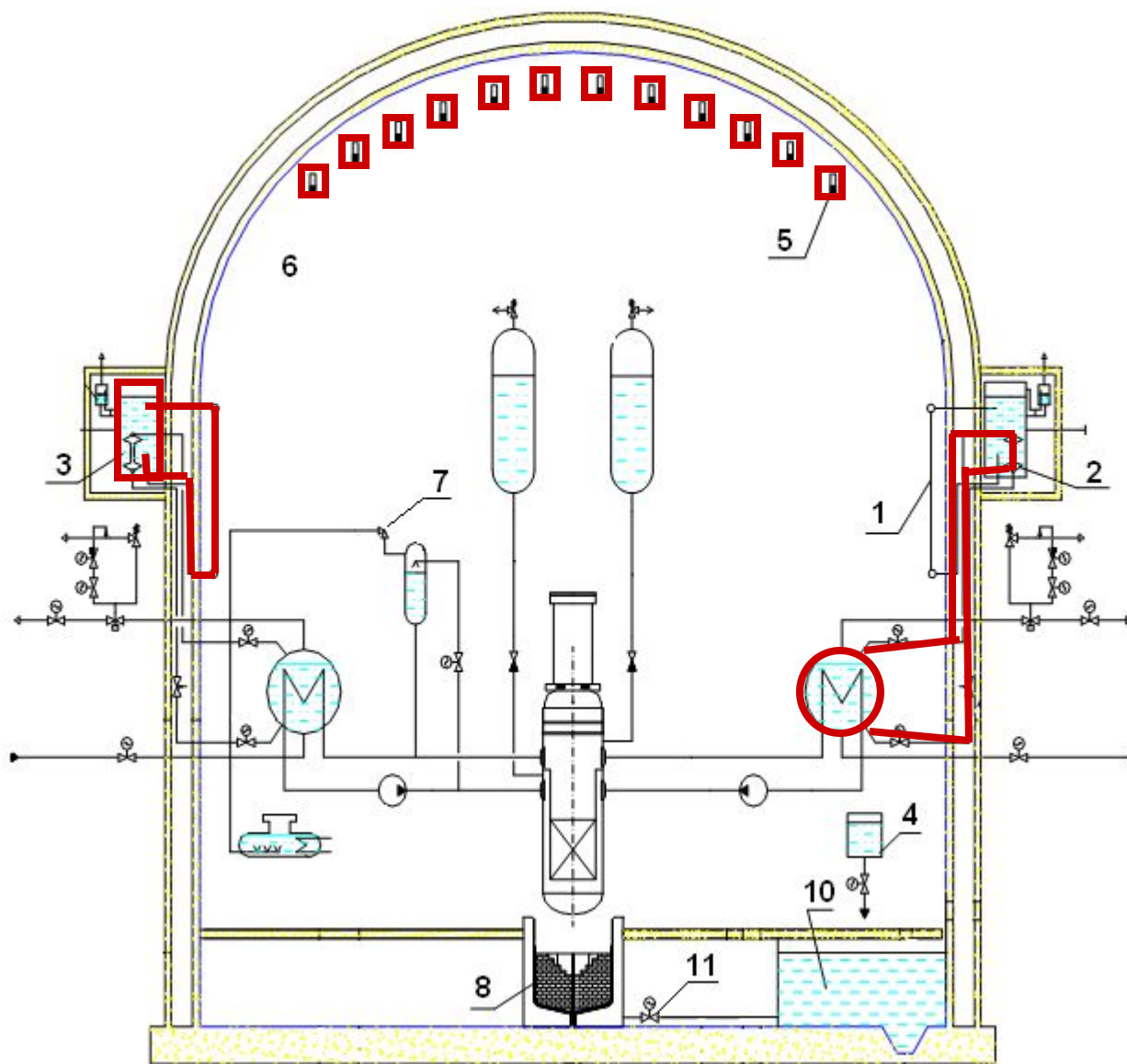


Технологическая схема пассивных систем РУ В-392М. 1 – реактор, 2 – парогенератор, 3 – паровой тракт СПОТ, 4 – конденсационный тракт СПОТ, 5 – входной кольцевой коллектор, 6 – теплообменник СПОТ, 7 – шибер СПОТ, 8 – тяговая шахта СПОТ, 9 – выходной коллектор СПОТ, 10 – дефлектор, 11 – ГЕ-2, 12 – фильтровальная установка, 13 – труба-теплообменник пассивной системы фильтрации (ПСФ), 14 – вентиль ПСФ, 15- пассивный каталитический рекомбинатор водорода.

Пассивная система фильтрации протечек из защитной оболочки

- При потере источников электропитания удаление и очистка парогазовой среды из межоболочечного пространства осуществляется пассивной системой фильтрации (ПСФ).
- Открывается арматура ПСФ, и парогазовая среда поступает в теплообменники.
- Капельная влага испаряется за счет нагрева горячим воздухом.
- Очистка происходит на фильтрах с последующей подачей газовой среды в выходной коллектор, а затем в атмосферу.

Система контроля концентрации и аварийного удаления водорода.



Система удаления водорода (с пассивными рекомбинаторами)

Система контроля концентрации и аварийного удаления водорода.

- Система предназначена для исключения горения и взрыва водорода.
- Состоит из пассивных каталитических рекомбинаторов водорода.
- Предусматривается 50 дожигателей водорода размером 1,5x0,3x1,4 м каждый.
- Исключает взрывоопасные концентрации водорода при запроектных авариях.

Пассивная система охлаждения активной зоны АР1000

- Для залива активной зоны
- Гидроаккумуляторы: 2 штуки, объем каждого $58,6\text{м}^3$; рабочее давление $4,83\text{ МПа}$.
- Баки подпитки активной зоны: 2 шт., объем каждого $70,8\text{м}^3$; на полное давление реактора.

Пассивная система охлаждения активной зоны AP1000

Для охлаждения активной зоны

- Бассейн перегрузки топлива (внутри контайнмента), объем 2092,6 м³.
- Теплообменник пассивного отвода остаточного тепла- расположен в бассейне перегрузки).
- Система автоматического сброса давления в реакторе для залива активной зоны водой из бассейна перегрузки.
- Рециркуляционный приямок

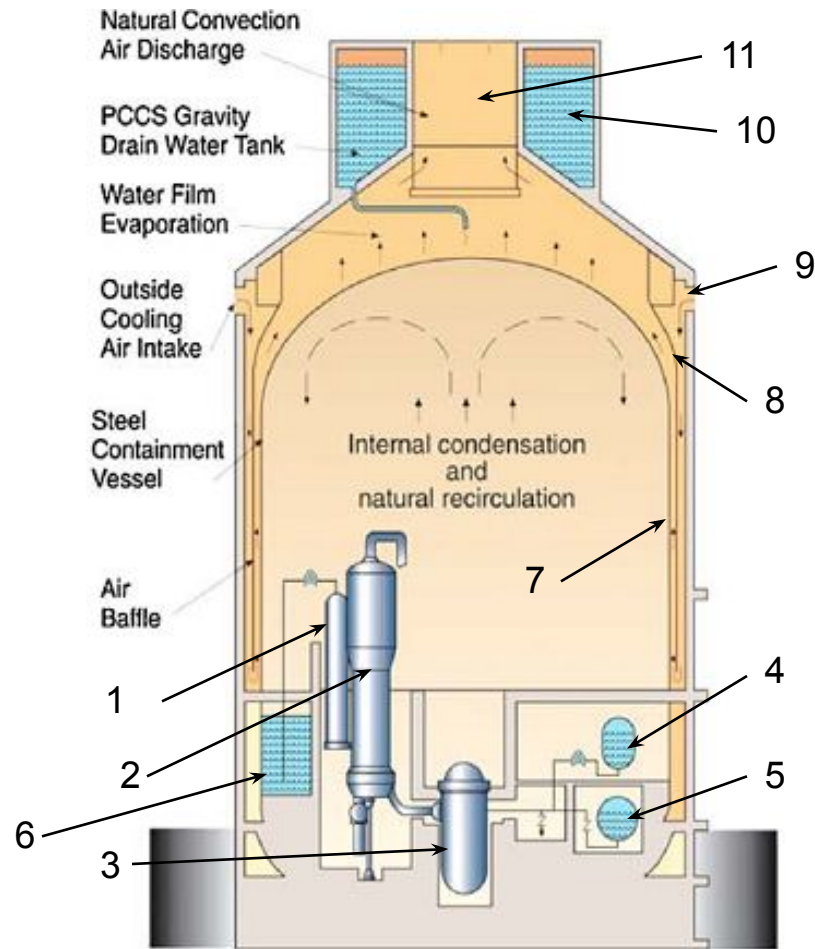


Схема пассивной системы охлаждения защитной оболочки реактора AP1000. 1- компенсатор давления, 2 – парогенератор, 3 – корпус реактора, 4 – бак подпитки АЗ, 5 – гидроаккумулятор, 6 –внутриконтейментный бассейн перегрузки топлива, 7 –стальная защитная оболочка, 8 - дефлектор, 9 –вход охлаждающего воздуха, 10 –бак запаса воды, 11 – выход нагретого воздуха

Пассивная система охлаждения защитной оболочки AP1000

- Бак запаса воды объемом 2784 м³.
- Воздушные заслонки.
- Дефлектор и каналы охлаждения оболочки

Проект EP-1000 (ЕС-США)

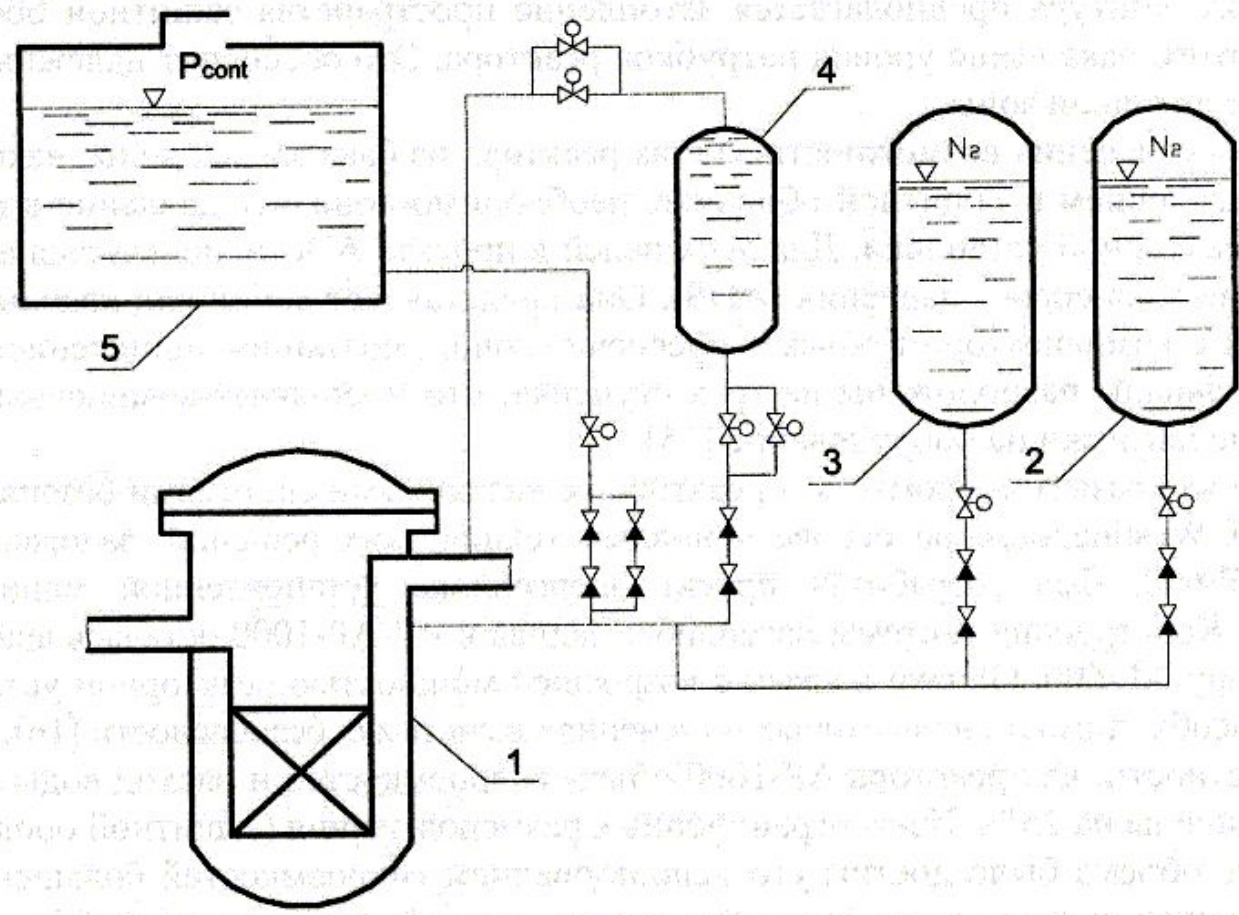


Схема пассивного залива активной зоны реактора EP-1000.
1 – реактор, 2 – гидроаккумулятор (2шт.), 3 – бак повторного залива активной зоны (2 шт.), 4 – бак подпитки активной зоны (2 шт.), 5 бак запаса воды

Проект APR-1400 (Корея)

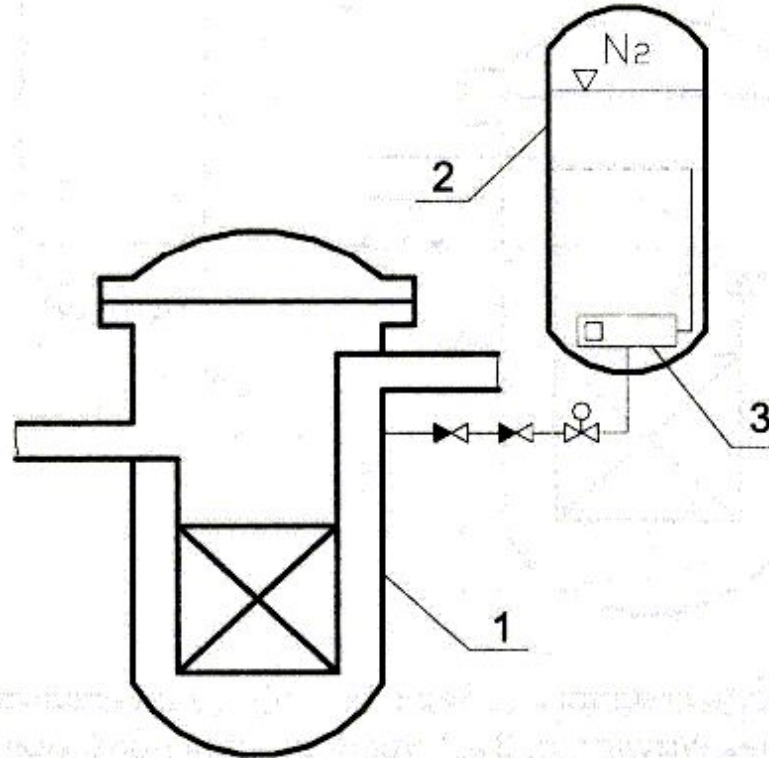


Схема пассивного залива активной зоны реактора APR-1400.
1 – реактор, 2 – гидроаккумулятор (4шт., $V=68 \text{ м}^3$), 3 –
устройство профилирования расхода (30с – не менее 950 кг/с;
далее - не менее 214 кг/с)

Проект APWR (Япония)

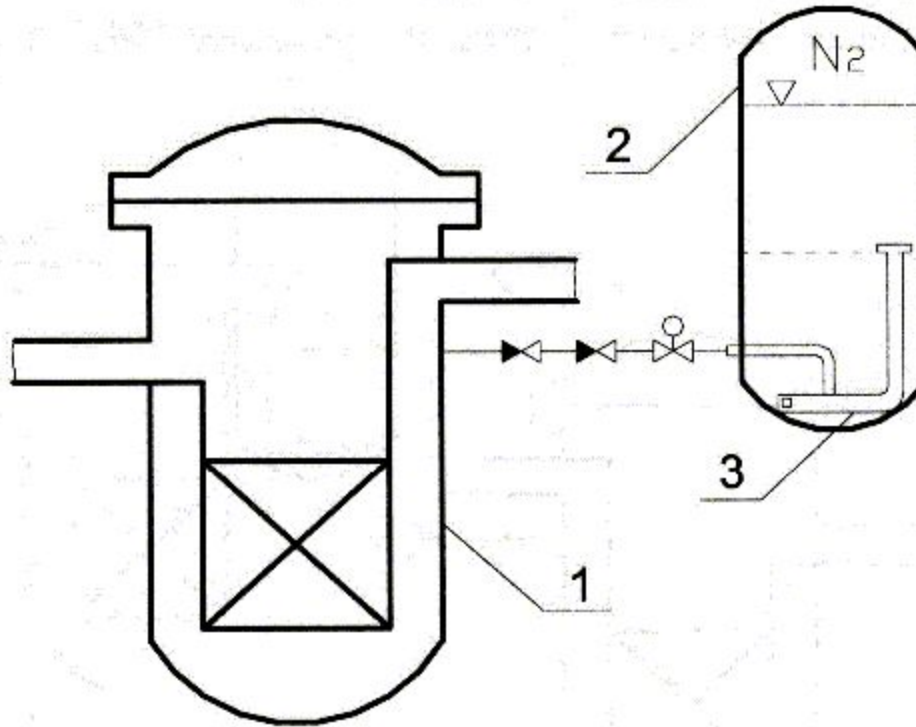


Схема пассивного залива активной зоны реактора APWR.
1 – реактор, 2 – гидроаккумулятор (4шт., $V=114 \text{ м}^3$), 3 –
устройство профилирования расхода (соотношение расходов
5:1)

Проект MS-600 (Япония)

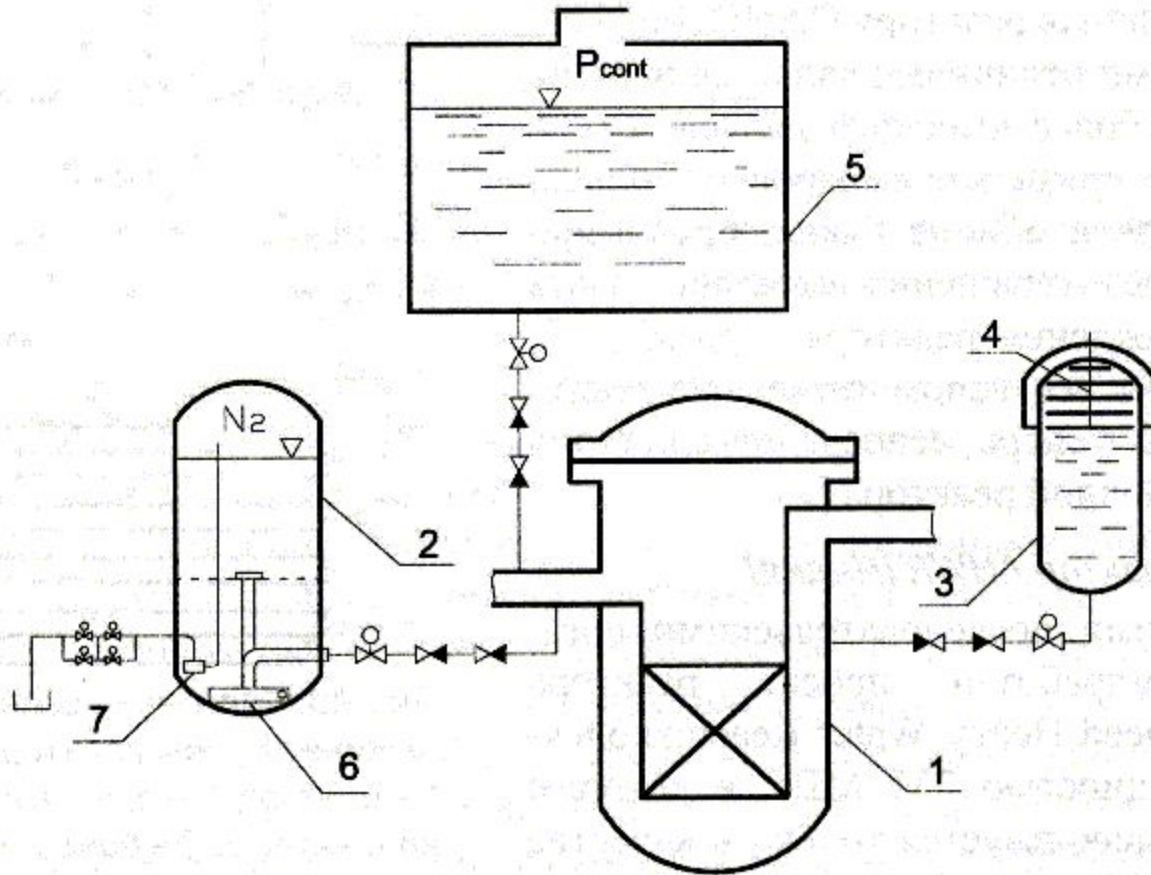


Схема пассивного залива активной зоны реактора MS-600.

1 – реактор, 2 – гидроаккумулятор, 3 – дополнительная гидроемкость ($V = 15 \text{ м}^3$), 4 – нагреватель ($T = 180^\circ\text{C}$), 5 – бак запаса воды, 6 – устройство профилирования расхода, 7 – газосбросное устройство.