

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - СОФИЯ



**Енергомашиностроителен факултет
Катедра „Топлоенергетика и ядрена енергетика“**

Доклад

**Тема: „Системи за безопасност –
сравнение между ВВЕР 1000 и АР 1000“**

Изготвил: инж. Даниел Огнянов Коларов

София, 2015 г.



Съдържание

Съдържание.....	2
Увод	3
1. Системи за безопасност при ВВЕР 1000	5
1.1. Система за аварийно впръскване на борен разтвор	5
1.2. Система за аварийно и планово разхлаждане на първи контур и охлаждане на басейна за отлежаване	6
1.3. Система за аварийно охлаждане на активната зона.....	10
1.4. Система за пасивно отвеждане на топлината	12
1.5. Система за бързо въвеждане на бор.....	15
2. Системи за безопасност при АР 1000	17
2.1. Система за пасивно охлаждане на активната зона.....	17
2.2. Система за пасивно отвеждане на остатъчното топлоотделяне	18
2.3. Система за аварийно охлаждане и борирание на реактора	20
2.4. Системи за аварийно подхранване при авария със загуба на топлоносител	22
2.5. Система за пасивно охлаждане на контейнмента	24
Изводи.....	26
Използвана литература:	27



Увод

Ядрената енергетика е клон на енергетиката, обхващащ генерирането на електрическа и топлинна енергия от ядрени реактори. Първите ядрени реактори са построени през 40-те години на 20-ти век. В началото на 50-те този вид енергетика навлиза в разцвет заради икономическия и военнотехнологичен подем след края на Втората световна война. До средата на 80-те са построени стотици ядрени реактори в десетки държави по света, а към 2012 година десетки са в процес на изграждане. Най-големите производители на енергия от ЯЕЦ в световен мащаб са САЩ, Франция, Южна Корея, Великобритания, Русия, Канада и Китай. Някои държави планират изграждането на нови мощности, докато други големи производители планират закриване на мощности, а някои смятат да закрият всичките си ЯЕЦ като Германия, Белгия и Швейцария.

Ядрената енергетика подпомага устойчивото развитие, защото суровините са достатъчни за векове напред, особено като се вземе предвид разработката на “III +” поколение реактори, някои от които ще използват и Плутоний, който към момента се счита за ядрен отпадък.

Споровете около развитието на ядрената енергетика са свързани главно с повишаващата се цена на ЯЕЦ, безопасността им и радиоактивните отпадъци. Дебатите за безопасността възникват след три значими аварии в ядрени електрически централи — в Трий Майл Айленд (САЩ) през 1979, в Чернобил (СССР) през 1986 и във Фукушима I (Япония) през 2011. Нивото на безопасност на ядрените електроцентрали е тясно свързано с времето, по което те са били проектирани. Вече съществуват няколко поколения, като всяко поколение се отличава със съществено повишаване на изискванията за надеждност и безопасност.

Реакторите първо поколение се разработват до 60-те год. на миналия век. Техните проекти са разработват основно на базата на общо промишлени стандарти за безопасността.

Днес най-често срещаните реактори в експлоатация са тези от второ поколение. Проектите им се базират на специфични стандарти за безопасност и включват развита активна система за безопасност.

Реакторите трето поколение са така наречените усъвършенствани реактори, които в момента се изграждат или експлоатират. Те представляват подобрене на второто поколение, като повишеното им



ниво на безопасност се постига основно чрез широко прилагане на пасивни системи за безопасност.

Реакторите от четвърто поколение все още са в теоретичен стадий на разработка и тяхното изграждане и тестване не се очаква преди 2035 година.



1. Системи за безопасност при ВВЕР 1000

При реакторът с вода под налягане ВВЕР 1000 системите за безопасност са два вида – активни и пасивни. Активните системи изпълняват функции при наличие на външен източник на енергия и най-често се задействат при включване на помпи. Пасивните системи не се нуждаят от външно електрозахранване за да функционират.

1.1. Система за аварийно впръскване на борен разтвор

Предназначението на системата за аварийно въвеждане на бор е да изпълнява следните функции:

-осигуряване на подкритичност на активната зона в условията на отказ на системата за управление и защита (СУЗ) на реактора;

-впръскване на борен разтвор в компенсатора на налягане в режим на теч от първи контур във втори, за понижаване на налягането.

При нарушения на условията за нормална експлоатация, например при обезточване, системата е работоспособна, тъй като има надеждно енергоснабдяване от дизел-генераторите. При проектни аварии (при аварии с теч на топлоносителя от първи контур) системата за аварийно въвеждане на бор впръсква разтвор на борна киселина (с концентрация 16g/kg, температура 50°С, разход 29m³/h (от два канала)) в компенсатора на налягане. При аварии с несработване на аварийната защита на реактора в аварийни режими система за аварийно въвеждане на бор подава в първи контур разтвор на бор с концентрация 16 g/kg, температура 50°С, разход 29 m³/h за бързо привеждане на реакторната инсталация в подкритично състояние. Системата подава борирана вода в компенсатора на налягане или в първи контур при противоналягане в контура в диапазона 0 – 19.6MPa.

Каналите на системата за аварийно въвеждане на бор се включват непосредствено в първи контур чрез тръбопроводите на системата за аварийен впръск високо налягане и чрез системата за компенсиране на налягането. Системата е защитена от въздействията на външни стихийни явления: земетресения, урагани, екстремални температури. Оборудването на системата е разположено под железобетонната обвивка, а част от тръбопроводите и арматурата под двойната херметична железобетонна обвивка. Това предпазва системата от външни въздействия.



Системата е защитена от екстремални температури, тъй като оборудването е разположено в помещения, които имат система за вентилация и охлаждане.

С цел поддържане на работоспособността на системата и откриване на възможни скрити откази на компонентите ѝ се провеждат комплексни периодични изпитания на каналите при работа на реактора на мощност, и при спрян реактор.

Ако при работа на мощност един от каналите на системата за аварийно въвеждане на бор стане неработоспособен, неговата работоспособност трябва да бъде възстановена за 168 часа. През този период останалите канали трябва да се проверят най-малко един път, за да се потвърди тяхната работоспособност. Ако през това време друг канал загуби работоспособността си, реакторът се извежда в режим на студено спиране.

1.2. Система за аварийно и планово разхлаждане на първи контур и охлаждане на басейна за отлежаване

Системата за аварийно и планово разхлаждане на първи контур и охлаждане на басейна за отлежаване е предназначена да изпълнява следните функции:

- разхлаждане на реакторната инсталация до 60°C след спиране на реактора, когато отвеждането на топлината през парогенераторите стане слабо ефективно ($P_1= 1.96\text{MPa}$, $T= 130^{\circ}\text{C}$) във всички режими на работа на блока (планово, ремонтно, аварийно разхлаждане);

- отвеждане на остатъчната топлина от горивото в реактора към системата на междинния контур на потребителите на реакторното отделение във всички проектни работни режими на блока;

- отвеждане на остатъчната топлина от горивото в басейна за отлежаване във всички работни режими на блока;

- въвеждане на реагенти за свързване на радиоактивния йод в топлоносителя на първи контур при аварии с теч;

- съхраняване на запаса от топлоносител в реактора по време на голям теч.

В режими на нормалната експлоатация, при работа на блока на мощност, системата за аварийно и планово разхлаждане на първи контур и



охлаждане на басейна за отлежаване осигурява отвеждането на топлината от горивото, разположено в басейна за отлежаване. Охлаждането на горивото в басейна за отлежаване в режим на нормална експлоатация се осигурява от един от каналите на системата: разход до 750 m³/h, поддържана температура на водата в басейна за отлежаване не повече от 50 °C, налягане 0.1 МРа.

При нарушения на условията за нормална експлоатация, изискващи разхлаждане на реакторната инсталация до студено състояние, например, при обезточване, системата изпълнява функция по отвеждане на топлоотделянето и разхлаждане на реакторната инсталация, при това се запазва плановият разход от помпите на система за аварийно и планово разхлаждане на първи контур и охлаждане на басейна за отлежаване, тъй като елементите на системата имат надеждно електроснабдяване от аварийните дизел-генератори.

В аварийни режими, свързани със загуба на топлоносител от първи контур, основна функция на системата за аварийно и планово разхлаждане на първи контур и охлаждане на басейна за отлежаване е отвеждане на остатъчното топлоотделяне от активната зона на реактора и басейна за отлежаване с цел да се ограничи повреждането на ядреното гориво над определените от проекта стойности, както и да се осигури подхранване на първи контур с цел съхраняване на запаса от топлоносител в реактора. При аварии с теч на топлоносител от първи контур системата осигурява подаване в реактора на разтвор на борна киселина с концентрация в началния момент на аварията не по-малка от 16 g/kg с температура не по-ниска от 20 °C от басейна за отлежаване. В режим на аварийно разхлаждане се осигурява подаване на вода в първи контур с разход 300 m³/h при налягане в контура 2.45 МРа с увеличение до 900 m³/h при понижаване на налягането в контура до 0.1 МРа. В аварийна ситуация е достатъчно да работи поне един канал с посочения разход. Закъснението на подаването на вода след появата на аварийен сигнал за загуба на нормално електроснабдяване е не повече от 40 s от началото на аварията и без загуба на нормално електроснабдяване - не повече от 30 s.

При проектни аварии, които не са свързани с разгерметизиране на първи контур, системата за аварийно и планово разхлаждане на първи контур и охлаждане на басейна за отлежаване изпълнява функция по отвеждане на остатъчното топлоотделяне от активната зона, от басейна за отлежаване и по разхлаждане на блока. Във всички аварийни режими се



запазва функцията по отвеждане на топлината от горивото в басейна за отлежаване. В проекта е предвидена линия за подаване на вода в басейна за отлежаване от помпите на спринклерната система с разход 20 t/h при аварии с теч от първи контур. Системата работи както по време на аварийни ситуации, така и в следаварийния период (в течение на целия период, през който има гориво в активната зона).

Помпата на всеки канал има линия за рециркулация, осигуряваща възможност за извършване на проби на помпата. При обезточване и в аварийни режими помпата работи на линията за рециркулация, докато не бъдат достигнати необходимите параметри за подаване на вода в първи контур.

За защита на първи контур от свръх налягане в режим на разхлаждане, както и за защита на смукателните тръбопроводи и на оборудването на система за аварийно и планово разхлаждане на първи контур и охлаждане на басейна за отлежаване от повишаване на налягането над допустимото на колектора за планово разхлаждане са монтирани два предпазни клапана.

В аварийни режими, свързани със загуба на топлоносител от първи контур, основна функция на системата за аварийно и планово разхлаждане на първи контур и охлаждане на басейна за отлежаване е отвеждането на остатъчното топлоотделяне от активната зона на реактора с цел ограничаване на повреждането на ядреното гориво над определените в проекта стойности, както и съхраняване на необходимия запас от топлоносител с необходимата концентрация на борна киселина в корпуса на реактора.

При аварии с голям теч (скъсване на тръбопровод с диаметър над 100 mm, включително скъсване на главен циркуляционен тръбопровод Ду 850) в началния стадий охлаждането на активната зона и съхраняването на необходимия запас от топлоносител в реактора се осигурява за сметка на подаването на борен разтвор от помпите на системата за аварийно впръскване високо налягане (след понижаване на налягането в първи контур до 7.9 МРа) и от пасивното сработване на хидроакумулаторите на първото стъпало (при налягане в първи контур 5.9 МРа). Помпите на система за аварийно и планово разхлаждане на първи контур и охлаждане на басейна за отлежаване започват да подават вода в реактора при налягане в първи контур под 2.5 МРа. Също така, при понижаване на налягането в



първи контур под 1.5 МРа започва подаване на вода в реактора от система на хидроакумулатори - второ стъпало на системата.

В началния момент на аварията подаването на борирана вода от помпите в реактора става от басейна за отлежаване (обемът на използваната вода е 750 m³). Известно време след началото на аварията нивото на водата в басейна за отлежаване се понижава до такава минимална стойност, при която става автоматично превключване на смукателните тръбопроводи на помпите на САОЗ (системи за аварийно и планово разхлаждане на първи контур и охлаждане на басейна за отлежаване, аварийен впръск високо налягане) и на спринклерната помпа. Към този момент в обема на херметичната обвивка се образува, за сметка на изтичане от първи контур (включително на запаса от вода на хидроакумулаторите на системата за пасивно заливане на активната зона), достатъчен запас от борирана вода, необходима за осигуряване на безкавитационна работа на помпите.

На следващия стадий отвеждането на топлината от активната зона и поддържането на необходимия запас на топлоносител в реактора се осигурява за сметка на непрекъснатата циркулация на борирана вода с помощта на помпите на системи за аварийно и планово разхлаждане на първи контур и охлаждане на басейна за отлежаване и аварийен впръск високо налягане по затворен контур (обем на херметичната обвивка – топлообменник за аварийно и планово разхлаждане на първи контур и охлаждане на басейна за отлежаване – помпи на САОЗ).

В съответствие със структурата на изграждане на защитни системи за безопасност системата има четири независими, физически разделени канала, производителността на всеки канал е 100 %. Всеки канал осигурява изпълнение на функциите за безопасност в пълен обем в режимите на проектни аварии. Наличието на три канала прави възможно изпълнението на функциите на системата при отказ на един канал (зависим от изходното аварийно събитие отказ на един канал в резултат на скъсване на тръбопровод в мястото на присъединяване на тръбопровода на система за аварийно и планово разхлаждане на първи контур и охлаждане на басейна за отлежаване към ГЦТ или отказ в резултат на независим от изходното събитие отказ на активен или пасивен елемент, който има движещи се части или на една независима от изходното събитие грешка на персонала). Вторият канал може да бъде в неработоспособно състояние вследствие на ремонт или обслужване.



Каналите на системата са физически разделени и напълно независими един от друг. Независими са технологичните части, системите за управление, осигуряващите системи, местата за разполагане на оборудването, тръбопроводите, кабелите, елементите на управлението и т. н., благодарение на което отказ в един канал не може да доведе до отказ в друг канал.

1.3. Система за аварийно охлаждане на активната зона

Пасивната част на системата за аварийно охлаждане на зоната (CAOЗ) е предназначена за подаване на разтвор от борна киселина с концентрация не по-малко от 16 g/kg в реактора, при налягане в първи контур под 5.9 МРа в количество, достатъчно за охлаждане на активната зона на реактора до включване на частта с ниско налягане на системата за аварийно и планово разхлаждане при проектни аварии със загуба на топлоносител.

При пускане на реакторната инсталация системата се включва към реактора при налягане в първи контур над 6.37 МРа. При планово разхлаждане за предотвратяване на сработването на системата в резултат на понижаване на налягането, системата се изключва от реактора при налягане в реактора от 8.8 до 9.8 МРа. В случай на скъсване на главния циркуляционен тръбопровод (ГЦТ) в този режим и достигане зададената стойност за включване на системата, тя преминава автоматично в работоспособно състояние.

Предвидени са технологични защити, предотвратяващи попадането на азот в реактора при изпразване на хидроакумулаторите на системата за аварийно охлаждане на зоната.

Системата се състои от три идентични по състав на оборудването и напълно независими един от друг канали.

В състава на всеки канал влизат:

- хидроакумулатор на системата за аварийно охлаждане на зоната;
- запорна арматура, предпазни и обратни клапани;
- тръбопроводи.

Всеки канал в пасивната част на системата за аварийно охлаждане на зоната има връзка със следните технологични системи:



- система за аварийно и планово разхлаждане на първи контур и охлаждане на басейна за отлежаване;
- система за продувка-подпитка на първи контур (1 КВА);
- система на дренажите и организираните протечки на радиоактивни среди (1 КТА);
- система газови сдвукки от оборудването за реакторно отделение (РО) (1 КТВ);
- система на организираните протечки на топлоносител от първи контур (1 ЈЕТ);
- система за вземане на проби от оборудването за РО (1 КТВ).

Хидроакумулаторът на системата за аварийно охлаждане на зоната представлява вертикален цилиндричен съд с елипсовидно дъно, поставен върху цилиндрична опора и напълнен с борна вода под налягане, създавано от азотна възглавница. На всеки хидроакумулатор са монтирани по две импулсно-предпазни устройства. Пропускателната способност на импулсно-предпазните устройства е избрана по условието да не се превишава разчетното налягане с повече от 15 %.

В резервоарите се контролират и се поддържат номиналните стойности на налягането на азота, нивото на водата, концентрацията на борна киселина H_3BO_3 и температурата на разтвора от борна киселина.

При изработването на хидроакумулаторите на системата за аварийно охлаждане на зоната се използва въглеродна стомана (корпус, дъна, тръбни наставки, капак, люк, опора).

На всеки хидроакумулатор са монтирани по две импулсно-предпазни устройства. Пропускателната способност на ИПУ е избрана по условието да не се превишава разчетното налягане с повече от 15 %.

При нормална експлоатация при работа на мощност не се изисква сработване на системата. Системата се намира в режим на очакване, бързодействащите запорни задвижки са отворени, всеки хидроакумулатор е изолиран от реактора с два последователно разположени обратни клапана. Извършва се контрол и поддържане на параметрите на системата.

При нарушаване на нормалната експлоатация не се изисква работа на системата. Системата се намира в режим на очакване.

При аварии, свързани със скъсване на главен циркуляционен тръбопровод, когато налягането в реактора падне под 5. 89 МРа, обратните клапани се отварят по пасивен начин (за сметка на разликата в наляганията) и разтворът от борна киселина от хидроакумулаторите



постъпва в реактора. При намаляване на нивото в хидроакумулатора до 1700 mm автоматично се затварят бързодействащите запорни задвижки за предотвратяване на попадането на азот в реактора. В течение на 30 мин след началото на аварията не се изисква намеса на оператора в управлението на системата. След изтичане на това време операторът има възможност, в случай на необходимост, да затвори бързодействащите запорни задвижки.

Надеждността на системата се определя от надеждността на сработване на обратните клапани в момента на впръскване на разтвора с борна киселина, а също така и от надеждността на изключването на хидроакумулаторите от реактора след сработването за сметка на затварянето на бързодействащите запорни задвижки за предотвратяване навлизането на азота от резервоарите в реактора.

Обратните клапани представляват пасивни елементи, за сработването на които не се изискват действия на оператора или системата. В режим на впръскване има резервиране, т. е. за изпълнението на своята функция е достатъчно да се осигури подаването на борна вода от три от четирите хидроакумулатора.

Надеждността на изключване на хидроакумулаторите след сработването се увеличава от дублирането на бързодействащите задвижки на всяка линия от хидроакумулаторите до реактора.

1.4. Система за пасивно отвеждане на топлината

Системата за пасивно отвеждане на топлината (СПОТ) представлява пасивна част от системата за аварийно отвеждане на топлината чрез парогенераторите както при херметични първи и втори контур, така и при възникване на течове в първи или във втори контур. Активна част на системата е системата за аварийно разхлаждане на парогенераторите (САР-ПГ).

В режим на нормална експлоатация функционирането на системата не е необходимо, СПОТ се намира в режим на очакване. За поддържането на системата в работоспособно състояние се провеждат периодични изпитания и проверки. Тя може да бъде въведена в работа при нарушаване на нормалната експлоатация. Системата за пасивно отвеждане на



топлината осигурява непрекъснато отвеждане на остатъчното топлоотделяне (до 2 % от номиналната мощност на реакторната инсталация) при аварии, протичащи с отказ на активните системи за безопасност (САР ПГ). При това системата за пасивно отвеждане на топлината започва работа вследствие на обезточването на електромагнитите, удържащи въздушните затвори в затворено положение 30s след загубата на всички източници за електроснабдяване с променлив ток.

Загриването на системата при пускане на блока се извършва заедно със загряването на парогенераторите. При това арматурата на парокондензатния тракт е напълно отворена, а въздушните затвори са затворени. При работа на блока на мощност системата се поддържа в "горещо" състояние за сметка на наличието на естествена циркулация на средата по парокондензатния тракт. Естествената циркулация на средата на парогенератора в системата се осигурява за сметка на кондензацията на парата в топлообменниците на системата за пасивно отвеждане на топлината и следващото завръщане на кондензата в парогенератора.

В режим на очакване загубите на топлина във втори контур възникват за сметка на кондензацията на парата в топлообменниците на система за пасивно отвеждане на топлината в резултат на проектна нехерметичност на въздушните затвори и в резултат на загубите на топлина през топлоизолацията на парокондензатния тракт. При планово разхлаждане на реакторната инсталация системата се разхлажда по естествен път (при затворени затвори)

При нарушаване на нормалната експлоатация не се изисква работа на системата за пасивно отвеждане на топлината. Системата може да се включи в работа по команда на оператора.

Системата може автоматично да се включи в работа в случай на отказ на съответния канал на системата за аварийно разхлаждане на парогенераторите, за да поддържа налягането на парата във втори контур.

При всички аварии, изискващи работа на системата за пасивно отвеждане на топлината и протичащи без разхерметизиране на първи контур, операторът може да превключи въздушните регулатори на СПОТ от режим на поддържане на налягането на втори контур в режим на разхлаждане, ако няма необходимост да се държи блока в горещ резерв.

Увеличаването на налягането във втори контур води до сработване на бързодействащото редуциращо устройство към атмосферата (или до



еднократно сработване на импулсно-предпазните устройства на парогенератора при отказ на БРУ-А) и до включване в действие на системата за пасивно отвеждане на топлина. Бързодействащото редукиционно устройство към атмосферата се затваря, след като нивото на остатъчното топлоотделяне стане равно на мощността, отвеждана от системата за пасивно отвеждане на топлина.

Отварянето на въздушните затвори се извършва поради обезточването на секцията за надеждно хранване на съответния канал със времезакъснението от ~ 30s.

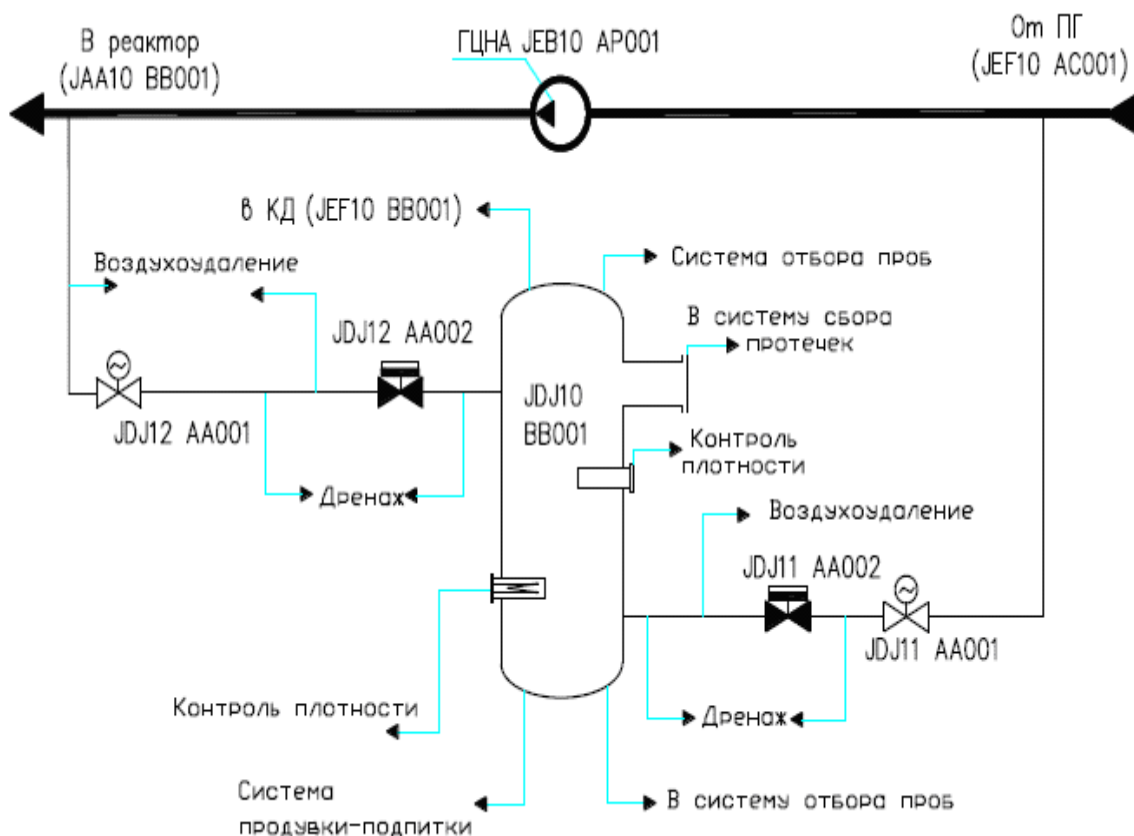
При възникване на изходно събитие с голям теч автоматично сработва аварийната защита на реактора. След изтичане на контролното време от 30 секунди, свидетелстващо за незапускане на дизеловите генератори, затворите (горния и долните) се отварят. При първия етап на работа на система за пасивно отвеждане на топлината се извършва разхлаждане на парогенератора по втори контур, при това въздушният регулатор е напълно отворен. Продължителността на разхлаждането зависи от температурата на външния въздух. На този етап система за пасивно отвеждане на топлината не участва в отвеждането на остатъчното топлоотделяне. Тази задача се изпълнява от хидроакумулаторите, подхранващи активната зона. Бързодействащите спирателно-отсичащи клапани се затварят само в случай на намаляване на нивото в парогенератора (например, вследствие утечка на пара в колектора за собствени нужди и др.). При втория етап на работа на системата (след като температурата на втори контур стане по-ниска от температурата на първи контур) СПОТ на неповредените кръгове преминава в режим на кондензация на парата от първи контур и връщане на кондензата в активната зона.

Системата за пасивно отвеждане на топлината представлява пасивна система за безопасност, състояща се от четири кръга. В проекта е осигурено резервиране на елементите на системата. По мощност на топлоотвеждането е предвиден 33 % резерв.

Елементите на системата имат възможност за периодично изпробване при режими на нормална експлоатация, при което се осигурява функционална готовност на системата за изпълнение на нейните функции по безопасността.

1.5. Система за бързо въвеждане на бор

Системата за бързо въвеждане на бор (СБВБ) представлява специална система за управление на надпроектни аварии без сработване на аварийната защита и е предназначена за привеждане на активната зона на реактора в подкритично състояние чрез въвеждане на концентриран разтвор от борна киселина в първи контур заедно със системата за аварийно въвеждане на бор в условия на отказ на системата за управление и защита на реактора. Системата за бързо въвеждане на бор се състои от четири независими един от друг канали, всеки от които включва резервоар с разтвор от борна киселина, тръбопроводи за включване, съединяващи резервоара с главния циркуляционен тръбопровод, тръбопроводи и арматура. Подгръването на разтвора от борна киселина в резервоара се извършва от блок електрически нагреватели.



По време на нормална експлоатация при работа на мощност не се изисква сработване на системата. Системата е загрята и се намира в режим на очакване, бързодействащата арматура е затворена, изолиращата



арматура е отворена. Извършва се контрол и поддържане на параметрите на системата. При нарушаване на нормалните условия на експлоатация не се изисква работа на системата.

Системата се намира в режим на очакване. При възникване на проектни аварии не се изисква работа на системата.

Системата се намира в режим на очакване. При надпроектна авария без сработване на аварийната защита преминаването на системата от режим на очакване в режим на работа става при наличието на сигнал на АЗ и при плътност на неутронния поток надвишаващ 15 % от текущата мощност 4 сек след формирането на сигнала на аварийната защита. При това се отваря бързодействащата арматура на тръбопровода Ду 200. За сметка на разликата в наляганията в главния циркуляционен помпен агрегат борният разтвор от резервоарите постъпва в първи контур. При това се извършва смесване на топлоносителя на първи контур с постъпващия разтвор от борна киселина, в резултат на което концентрацията на бор в контура се увеличава.

При режими без загуби на електрозахранване за собствени нужди на АЕЦ ефективната работа на системата завършва с изравняване на концентрацията на бор в резервоарите и в първи контур. При режими със загуба на електрозахранване за собствени нужди на АЕЦ подаването на борен разтвор в първи контур се осигурява с работа на главния циркуляционен помпен агрегат по инерция. Въвеждането на бор завършва с изравняването на разликата в наляганията на главния циркуляционен помпен агрегат и съпротивлението на канала на системата за бързо въвеждане на бор.



2. Системи за безопасност при AP 1000

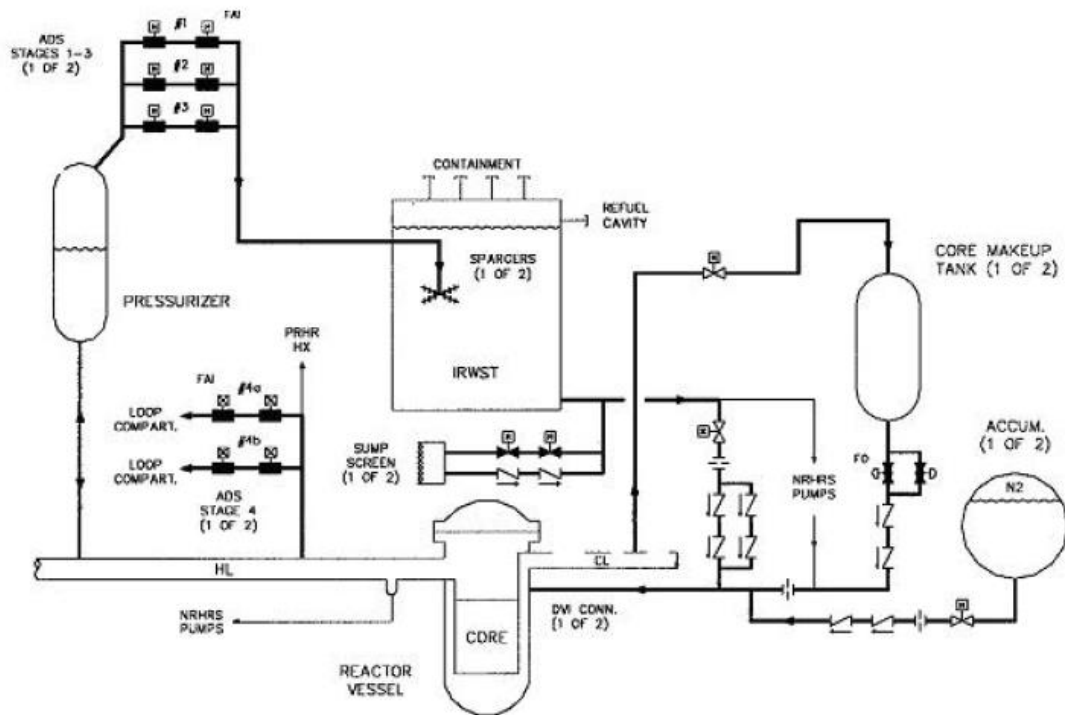
Реакторът с вода под налягане AP1000 работи на концепцията, че в случай на проектна авария (каквато е скъсването на главен циркуляционен тръбопровод), инсталацията е създадена, за да се постигне и поддържа безопасно състояние и спиране на реактора без намесата на оператор и без да е необходимо използването на електрически ток или помпи. Вместо да разчита на активни компоненти като дизелови генератори и помпи, AP 1000 е проектиран на базата на силите на гравитацията, естествената циркулация и компресираните газове, за да се запазят активната зона и херметичната обвивка от прегряване. Въпреки това, има много активни компоненти, които са включени в AP 1000, но са определени като несвързани с безопасността. Такива са:

- Система за химичен контрол;
- Система за нормално отвеждане на остатъчното топлоотделяне;
- Спомагателна подхранваща система.

2.1. Система за пасивно охлаждане на активната зона

Системата е категоризирана като Сеизмична категория I. Състои се от 2 резервоара -високо налягане, 2 резервоара – средно налягане (акумулатори), резервоар за събиране на вода (ниско налягане), система за пасивно отвеждане на остатъчното топлоотделяне, тръбопроводи, клапани и др. Системата е проектирана да осигурява нормалното топлоотвеждане в случай на проектни аварии.

2.2. Система за пасивно отвеждане на остатъчното топлоотделяне



AP1000 Passive Core Cooling System

За аварии при които няма загуба на топлоносител, системата за пасивно отвеждане на остатъчното топлоотделяне осигурява охлаждането на активната зона. Теплообменника се свързва към системата за охлаждане на реактора. Линията за отвеждане към теплообменника се свързва към един от горещите тръбопроводи на реактора чрез тройник, а към линията от теплообменника - към един от студените тръбопроводи на парогенератора. Входящата линия е свързана и към горната част на теплообменника като по този начин се осигурява естествената циркулация – топлата вода се издига над студената. Теплоносителя влиза в горната част на теплообменника, в долната му част е изхода където водата е по студена и тече в посока към реактора. Теплообменника се поддържа под същото налягане, каквото е в реактора ~15MPa.

Теплообменникът е потопен във вътрешният резервоар за вода на контейнента като топлината на водата в него е малко по-висока от тази в резервоара, за да се осигури охлаждането на топлоносителя. Теплообменника е разположен над системата от тръбопроводи на Първи

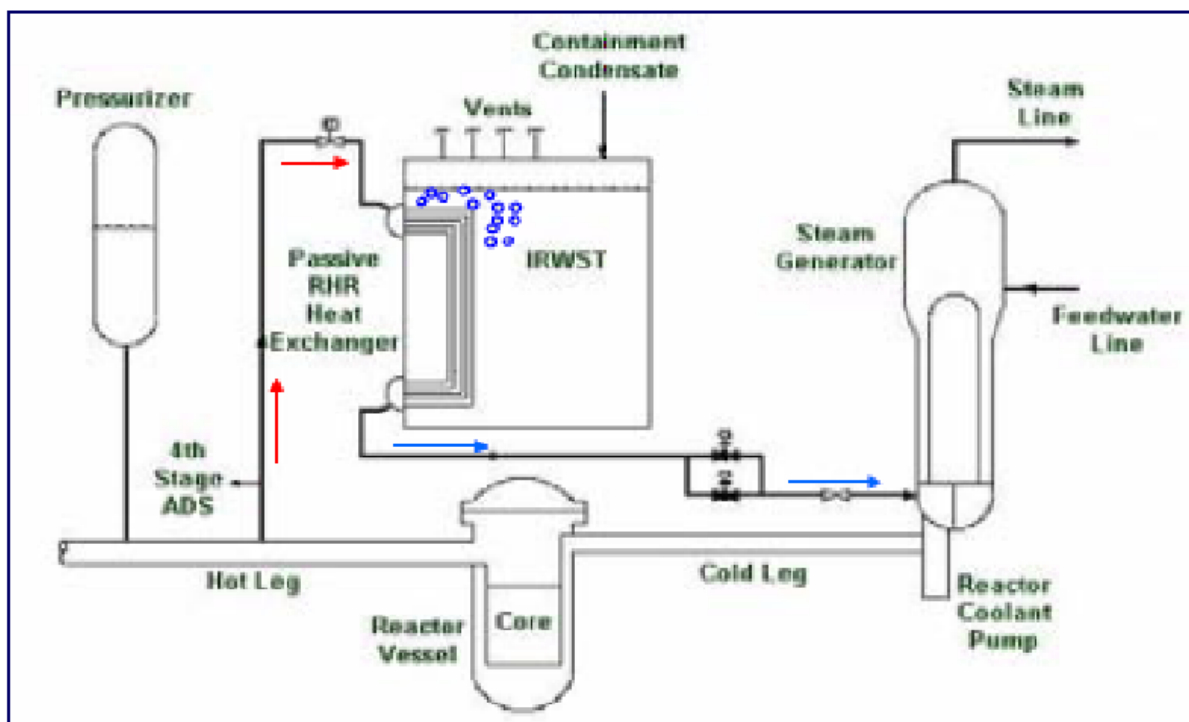


контур, за да се осигури естествената циркулация. Разположението на тръбопровода на системата позволява задействането ѝ също и от помпите на реактора. Когато Главните циркулационни помпи работят те осигуряват принуден поток в същата посока като естествената циркулация през топлообменника. Въпреки, че не се очаква натрупване на газове в системата, към входящата линия е свързана вертикална тръба в която има детектори, които да сигнализират на операторите в случай, че се натрупват газове в системата. Това позволява на операторите ръчно да отворят предпазните клапани и да изпуснат тези газове във резервоара на контейнмента, където да барбутират.

Тази система, ако работи заедно със пасивната система за охлаждане на контейнмента, може да осигури охлаждане на активната зона за продължителен период от време. Около 2 часа са нужни на температурата на водата в резервоара на контейнмента да достигне температура на кипене при аварийни ситуации. Започва да се образува пара, която кондензира във херметичната вътрешна част на контейнмента, изработена от стомана с дебелина между 4 и 5 сантиметра. Тази стоманена обвивка се охлажда от системата за пасивно охлаждане на контейнмента. Кондензатът се събира в улей разположен в най-ниската част на контейнмента и от там се отвежда до вътрешният резервоар на контейнмента. Възстановяването на водата в този резервоар осигурява неограниченото охлаждане през топлообменника за пасивно охлаждане на зоната.

Тази пасивна система се използва за да се осигури безопасното изключване на реактора. Отвежда топлината от реактора към топлообменника, от там към вътрешния резервоар на контейнмента, към обема на контейнмента, към обвивката на контейнмента и накрая към атмосферата. Освобождаването на топлина към контейнмента се постига след започването на кипене на водата в резервоара, който е отворен към контейнмента.

2.3. Система за аварийно охлаждане и бориране на реактора



Резервоарите с борен разтвор осигуряват подаването на топлоносител и борен разтвор към реактора в случаи, в които нормалното подаване е невъзможно или недостатъчно и няма загуба на топлоносител. Има два такива резервоара, разположени в контейнмента, малко над нивото на охлаждащият кръг на реактора. По време на нормална работа резервоарите са напълно запълнени със студена борирана вода. Количеството на борен разтвор в тези резервоари е проектирано да бъде достатъчно за безопасното изключване на реактора в случай на авария. Всеки от тези резервоари е свързан към кръга на две места – директно в корпуса на реактора, и към един от студените тръбопроводи. Директните линии са затворени при нормална работа на реактора, чрез два паралелно свързани клапана, които се отварят при загуба на налягане и загуба на електричество.

Линията от резервоарите към студения тръбопровод обикновено е отворена за да се поддържа налягане равно на това в реактора и да не се допусне ефекта на воден удар при изливане на резервоарите в реактора. Линията от студения тръбопровод към резервоара (високо налягане) се нарича линия за баланс на налягането. Тя е свързана към горната част на резервоара. Температурата на водата в тези тръбопроводи е по-висока от тази на борираната вода в тръбопроводите за директно впръскване в реактора. И двата резервоара са свързани към реактора на една и съща



височина, и при получаване на сигнал за отваряне на клапаните, те се отварят с такава последователност, че да се осигури необходимият топлоносител.

Има два процеса за които са предвидени тези резервоари – вкарване на пара в резервоара и рециркулация на водата. Парата се вкарва, за да заеме мястото на борираната вода. Тя се вкарва през студения тръбопровод, в който се образува пара при неговото опразване. При рециркулация на водата, топла вода от студения тръбопровод се вкарва в резервоарите, а студената се излива в системата за охлаждане на реактора. Резултатът е повишаване на борния разтвор в системата за охлаждане на реактора.

Работата на тези резервоари зависи от състоянието на системата за охлаждане на реактора, и най-вече от изтичане от студените тръбопроводи. Когато тези тръбопроводи са запълнени и налягането е постоянно, впръскването в реактора става чрез рециркулацията. Ако масата на топлоносителя в реактора намалее достатъчно за да се получи изпразване на студените тръбопроводи, парата изтласква борираната вода от резервоарите в реактора. В случай на скъсване на тръбопровод, температурата и налягането в охладителната система намаляват. Поради охлаждането коефициентът на реактивност се покачва поради обратния температурен коефициент. Ако се приеме, че всички клъстери от поглъщащи пръти са блокирани и напълно изведени от активната зона, мощността на реактора започва да нараства. Активирането на системата за аварийно бориране, позволява вкарването на достатъчно количество борен разтвор в реактора за да се понижи реактивността и да се изключи безопасно реактора.

В случай на скъсване на тръба в парогенератора, системата за аварийно бориране заедно със системата за предпазване от препълване на парогенератора спират изтичането на топлоносител от реактора в парогенератора. Това се случва без да се активира системата за понижаване на налягането, и без намеса на оператора. В случай на такова скъсване резервоарите на системата за аварийно охлаждане и бориране на реактора работят в режим на рециркулация за да осигурят необходимото количество борен разтвор за компенсиране на загубите от изтичането и борирането на топлоносителя в реактора. В случай на изтичане от 10 галона на минута, системата може да забави активирането на системата за аварийно понижаване на налягането за 10 часа, като осигурява топлоносител за реактора. След активирането на тази система, системата за пасивно охлаждане на зоната, осигурява достатъчно количество борирана вода за да се компенсира намаляването на масата на топлоносителя.



2.4. Системи за аварийно подхранване при авария със загуба на топлоносител

Системата за пасивно охлаждане на активната зона се състои от четири различни системи за впръскване по време на аварии със загуба на топлоносител:

- Акумулаторите, които осигуряват голям поток от топлоносител за кратък период от време;
- Резервоарите (високо налягане) осигуряват сравнително голям поток за по-продължителен период от време;
- Вътрешният за контейнмента резервоар осигурява слаб поток, но за значително по-дълъг период от време;
- Контейнмента е последния източник на вода.

При авария със загуба на топлоносител (LOCA) резервоарите под високо налягане, осигуряват впръскване съпоставимо с изтичането на топлоносител. Очаква се, че при по-голямо разкъсване и активирането на системата за намаляване на налягането, студените тръбопроводи ще се изпразнят. В този случай резервоарите под високо налягане ще се изпразнят с голяма скорост. Предпазните клапани на линията за директно впръскване в реактора пречат на обратния поток към резервоарите от акумулаторите, при което би било възможно байпасирането на реактора. При малки LOCA резервоарите работят при режим на рециркулация, тъй като студените тръбопроводи са пълни с топлоносител. С напредването на аварията и изпразването на студените тръбопроводи, режимът на работа на резервоарите се сменя и се осигурява по-силен поток от борирана вода.

Двата акумулатора съдържат борирана вода и възглавница от азот под налягане, което осигурява бързо впръскване в реактора. Разположени са в контейнмента и също като резервоарите са свързани към линиите за директно впръскване в реактора. На входа на реактора са разположени дефлектори, насочващи потока към долната част на реактора за да се предотврати байпасирането на активната зона. Акумулаторите осигуряват няколко минути впръскване при аварии с големи разкъсвания.

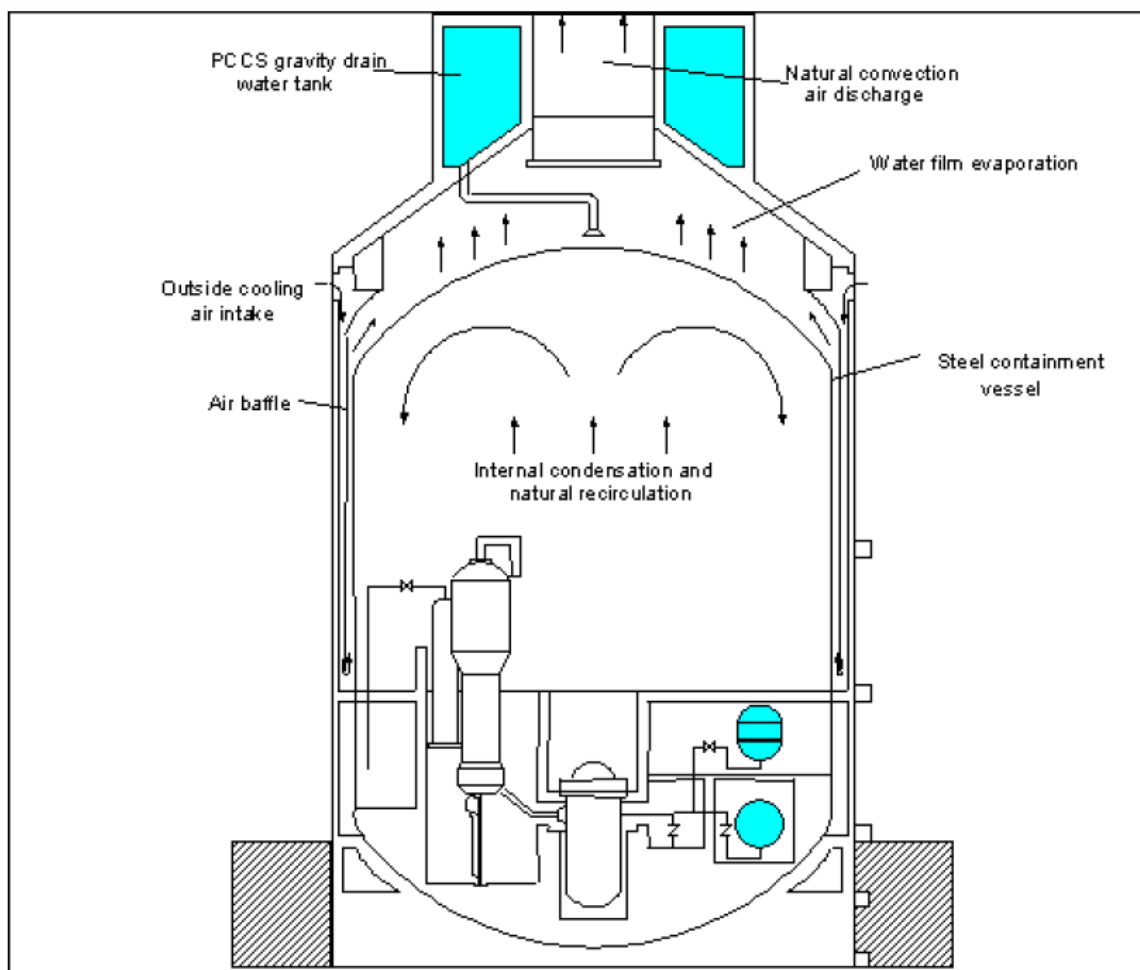
Вътрешният за контейнмента резервоар за вода е разположен в контейнмента малко над нивото на реактора. Вкарването на вода в системата за охлаждане на реактора е възможно само след понижаване на налягането в кръга. В този резервоар се използват клапани, които се отварят автоматично при подаване на сигнал за четвърта фаза на системата за автоматично понижаване на налягането. Това се случва, когато налягането в реактора стане по-ниско от това в резервоара.



След активирането на всички тези системи контейнмента е наводнен до степен позволяваща рециркулацията на вода обратно в реактора под действието на гравитацията. Времето, необходимо за да се достигне тази рециркулация е различно според това каква точно е аварията. При скъсване на някоя от линиите за директно впръскване в реактора съдържанието на вътрешният за контейнмента резервоар за вода се излива в контейнмента и го наводнява. В случай на автоматично понижаване на налягането без да има изтичане на топлоносител, нивото в този резервоар намалява много бавно и рециркулацията може да не започне в продължение на няколко дена. Рециркулацията в контейнмента е възможна, когато са отворени клапаните за рециркулация и запълването на контейнмента с вода е достигнало необходимото ниво. Когато нивото в резервоара намалее се отварят допълнителни клапани, осигуряващи редундантни линии за вкарване на вода в реактора. Възможно е да се отворят клапаните ръчно за да се наводни контейнмента при тежки аварии, при които има разтапяне на активната зона. Това се постига чрез Системата за вътрекорпусно задържане на кориума (разтопената активна зона).

Основната идея на тази система е да се наводни реакторното помещение. Водата циркулира около реакторната обвивка и отнема топлината, която се отдава от кориума. След това се изпарява в обема на контейнмента, където кондензира и отново служи за охлаждане. Целта е да се задържи кориума вътре в корпуса в реактора, вместо да бъде разрушен корпуса и кориума да се събира в уловител на стопилката извън него. Този метод се използва в Ядрената енергийна централа Ловийса, с реактори ВВЕР-440/В230.

2.5. Система за пасивно охлаждане на контейнмента



AP1000 Passive containment cooling system

Системата за пасивно охлаждане на контейнмента предава топлина от стоманената обвивка на контейнмента директно към околната среда за да не се превишават налягането и температурата за които е проектиран контейнмента в случай на авария. Системата трябва да извършва това охлаждане само когато нормалните средства за охлаждане не работят – когато вентилацията в контейнмента не работи продължителен период от време. Също така системата е проектирана да работи при аварии при които се изпуска големи количества енергия в контейнмента.

Пасивната система включва стоманената обвивка на контейнмента, която обгражда реактора и парогенераторите. Тази обвивка има горна, вътрешна, и външна обвивка. Стоманената обвивка е проектирана за 45 кРа налягане. Направена е от стомана, дебела от около 4-5 см. Диаметърът на контейнмента е около 36.5м. Бетонната обвивка обгражда стоманената



част с около 1.5 м напрегнат железобетон. В горната част на външната обвивка е изграден радиален въздухозаборник. В горната част на контейнента са поставени резервоар за вода и комин, който освобождава натрупаната топлина и повишава естествената циркулация. Височината му е около 15 метра над резервоара. Между бетонната обвивка и стоманената обвивка има множество отвори водещи към комина, разположен над контейнента.

В случай на авария, при която в контейнента се изхвърля голямо количество енергия, системата за пасивно охлаждане на контейнента може да осигури над 72 часа охлаждане на контейнента и време за реакция. В случай на авария със загуба на топлоносител във обема на контейнента се изхвърля топлоносител със висока температура. Теплоносителя се изпарява с голяма скорост, поради голямата разлика в налягането – в реактора е около 15MPa, а в контейнента налягането е атмосферно. Парата се издига до горната част на стоманената херметична обвивка на контейнента, където отдава топлината си на метала, охлажда се и кондензира. Пада на дъното на контейнента, събира се в улея за събиране на кондензата и се връща във вътрешния за контейнента резервоар за вода, откъдето постъпва в реактора.

През отворите между вътрешната и външната част на контейнента преминава въздух под действието на естествената циркулация, който охлажда стоманената повърхност и напуска отворите поради по-високата си температура, а на негово място постъпва по-студен въздух. В случай, че това охлаждане е недостатъчно и налягането в контейнента започне да се повишава, от външния резервоар започва да се излива вода през отворите, облива стоманената обвивка и я охлажда по-ефективно. Това може да продължи до 72 часа след което резервоарът трябва да се запълни повторно. Ако това е невъзможно налягането в контейнента ще започне да се покачва, но няма да превиши 90% от проектното за контейнента.



Изводи

Без значение от вида на реактора, системите му за безопасност се проектират така, че реакторът да е защитен от повреди и аварии от причини, вътрешни или външни за реакторната инсталация. Защиатавайки реактора, тези системи защитават и хората работещи с него, тези в околността, както и околната среда. Затова те са толкова важни за бъдещото развитие на ядрената енергетика.



Използвана литература:

1. Владимир Велев, Топлофизика на ядрените реактори, ИФО Дизайн, 2003
2. Владимир Велев, Калин Филипов, Ядрена Техника, ИФО Дизайн, 2011
3. Обобщен доклад за проведените в АЕЦ “Козлодуй” стрес тестове, “АЕЦ Козлодуй” ЕАД, Октомври 2011
4. Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety - Primary piping in PWRs, International Atomic Energy Agency IAEAq June 2003
5. Стоян Калчев, Пламен Василев, Аварийни инструкции на 3 и 4 блок на АЕЦ “КОЗЛОДУЙ” – Състояние и развитие, АЕЦ “Козлодуй” ЕАД, 2006
6. Официален сайт на AP 1000 - <http://www.ap1000.westinghousenuclear.com/>
7. “ Westinghouse AP1000 Advanced Passive Plant“ - W.E. Cummins, M.M. Corletti, T.L. Schulz, *Westinghouse Electric Company, LLC*
8. Westinghouse AP1000®Nuclear Power PlantSeminar in Cooperation with Technical University of Sofia, Bulgaria, March 2014, Lecturer - Howard Bruschi
9. Westinghouse Technology Systems Manual - USNRC HRTD, Rev 0111