

Технически Университет – София
Катедра Топло- и ядрена енергетика

Доклад:

Максимално-проектни аварии със загуба на топлоносител в реактори от типа ВВЕР

Изготвил:
Даниел Коларов

София 2013

Тежките аварии са аварийни събития, които не са включени в проекта на централата. При тяхното възникване е възможно да се наруши целостта на активната зона на реактора и на границите на първи контур. Въпреки, че вероятността за възникване на подобни аварии е много малка, в проектите на съвременните енергийни реактори се включват средства за тяхното управление. Това са например водородните рекомбинатори и игнители, които не позволяват натрупването на опасно високи концентрации на водород, за да не се допусне неговото възпламеняване или взривяване. Друго средство за управление на тежките аварии е уловителят на стопилката. Неговото предназначение е при възникване на авария с разрушаване на активната зона, да задържи и охлади разтопента маса от горивните касети, вътрешнокорпусните устройства и дъното на корпуса, като не и позволи да взаимодейства с бетонната конструкция. В противен случай е възможно да се генерира значително количество свободен водород, както и да се стигне до разрушаването на дъното на защитната обвивка и преминаването на стопилката в околната среда.

Система аварийно и планово разхлаждане – ниско налягане

Системата за аварийно и планово разхлаждане на активната зона - ниско налягане, съчетава функциите на защитна система за безопасност и система за нормална експлоатация. Системата е предназначена за аварийно разхлаждане на активната зона на реактора и следващо продължително отвеждане на остатъчната топлина от активната зона при аварийни условия, свързани с изтичане от първи контур, включително разкъсване на главен циркуляционен тръбопровод, като осигурява подаване в първи контур на разтвор от борна киселина с концентрация повече от 16 g/kg, с разход 250-300 m³/h, при налягане в първи контур ≤ 2.16 MPa и 700-750 m³/h при атмосферно налягане в първи контур; планово разхлаждане на първи контур по време на спиране на реактора и отвеждане на остатъчната топлина от активната зона при ремонт и презареждане на горивото. Системата е част от системите за безопасност и се състои от три независими канала като всеки един от каналите осигурява 100% функциите на системата.

Система за аварийно подаване на бор – средно налягане

Това е защитна система, която е част от системите за безопасност, предназначена за аварийно подаване в първи контур на разтвор на борна киселина с начална концентрация 40 g/kg и разход повече от 130 m³/h, при аварийни условия със съхранено високо налягане в първи контур (≤ 11 MPa), а

също така за компенсирание на течове в режими с разхерметизиране на първи контур.

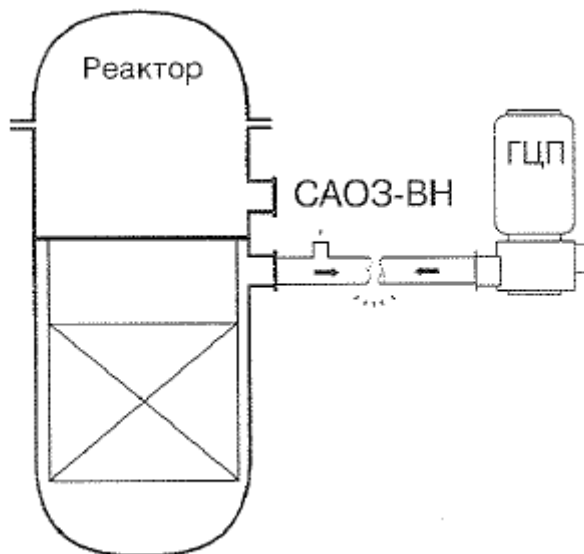
С помощта на системата, както и с помощта на всички останали системи, подаващи борен разтвор към Първи контур, може да бъде реализирано отвеждане на топлина от първи контур съгласно процедурата "Bleed and feet". Процедурата представлява изхвърляне на топлоносител от първи контур през теча или отваряне на клапан от първи контур към хермозоната и компенсирание на получения теч посредством тези системи. Изхвърлената паро-водна смес се втечнява от спринклерна система, пада на дъното на хермозоната и попада в резервоара за аварийно подхранване с борен разтвор. От там топлоносителя се охлажда чрез топлообменници от система за техническа вода за отговорни потребители, т.е. отвежда се топлината към алтернативния краен поглътител – атмосферата, и посредством изброените по-горе системи, отново се подава към Първи контур.

Система за аварийно охлаждане на активната зона – пасивна част

Системата САОЗ - пасивна част е защитна система и е част от системите за безопасност, предназначена е за заливане на активната зона при авария с голяма загуба на топлоносител, когато налягането в първи контур стане по-ниско от 5.9 МРа. Концентрацията на бор в хидроакумулаторите е 16 g/kg и осигурява подкритичност в активната зона на реактора. Системата е проектирана така, че обемът на разтвора с борна киселина в три хидроакумулатора (от четири инсталирани) да е достатъчен при възникване на двустранно разкъсване на главен циркуляционен тръбопровод, за разхлаждане на активната зона до включване на помпите за планово и аварийно разхлаждане на първи контур. Оборудването и тръбопроводите на всички канали от системите за безопасност са

физически разделени и защитени от външни въздействия, което осигурява невъзможност за отказ на два и повече канала едновременно поради обща причина. Каналите на системата за техническо водоснабдяване на отговорни потребители са пространствено разделени. По този начин системите са способни да изпълнят функциите си с отчитане на единичен отказ. Източниците на електрозахранване и запасите от работна среда и охлаждаща вода обезпечават автономност на системите за безопасност не по-малко от 72 часа.

Авария на ВВЕР с голямо изтичане на топлоносител



Това е така нареченото Гилотинно разкъсване на 200 % - и от двата края изтича топлоносител. При такава авария се приема, че един от главните циркуляционни тръбопроводи от нагнетателната страна е напълно разкъсан и от двата му края изтича топлоносител. Това е най-тежката проектна авария за реакторите ВВЕР-1000. При такава авария помпите се изключват поради големия пад на налягане и реактора се заглушава с помощта на аварийната защита.

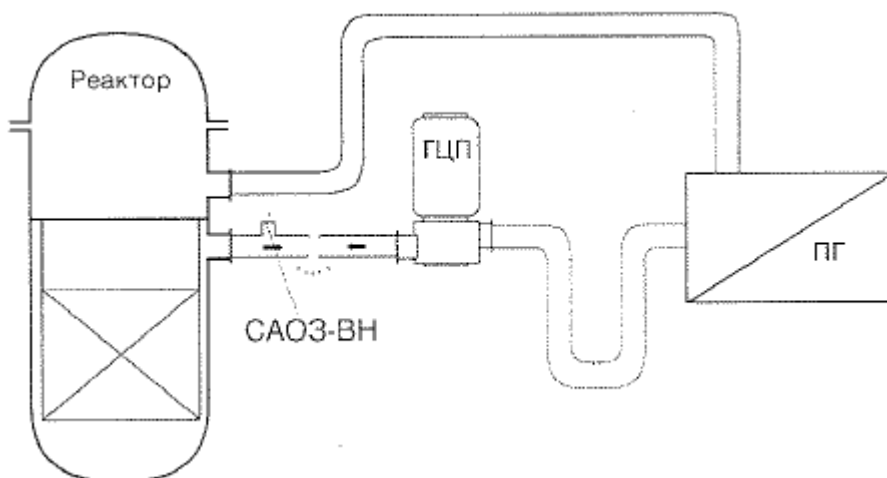
При гилотинно разкъсване на главен циркуляционен тръбопровод топлоносителът изтича и от двата му края. В началото, веднага след аварията, налягането рязко спада, след което скоростта му намалява, поради образуването на пароводна смес в корпуса на реактора. В даден момент след началото на аварията (5-10 секунди) налягането е достатъчно ниско и се подава борирана вода от Системата за Аварийно охлаждане на Зоната – Високо Налягане (CAOЗ-ВН), както и от хидроакумулаторите. След активирането на CAOЗ все още има изтичане на пароводна смес в шахтата на реактора, което пречи на водата от хидроакумулаторите да достигне шахтата и тя изтича през разкъсването. Налягането продължава да намалява до момента в който се включва CAOЗ-НН (ниско налягане). В началото на аварията теча е достатъчно силен и активната зона на реактора се оголва, температурата на топлоотделящите елементи бързо се покачва и стига до 1000 градуса Целзий, при което те се разрушават и в контура и контейнмента изтичат газообразни продукти на делене. Постепенно долната камера се запълва и зоната започва да се пълни с вода – ТОЕ се охлаждат и се отделя голямо количество пара, отнасящо водни капки в

парогенератора, където те кондензират заради все още високата температура на Втори контур. В горната камера на реактора се създава противоналягане, така наречената парна възглавница.

Последаната фаза е дълговременното разхлаждане на реактора. Помпите на САОЗ-НН подават вода в неповредените студени тръбопроводи и топлоносителят се движи през зоната, охлаждайки топлоотделящите елементи. Възможно е да продължи генерирането на пара, която излиза през пробива и кондензира в контейнента благодарение на спринклерната му система.

При такава авария е възможно получаването на процеса газосуелинг. В газовата хлабина на ТОЕ се натрупват газообразни продукти на делене и се получава значително вътрешно налягане на ТОЕ. При ниско налягане на топлоносителя може да се получи раздуване на ТОЕ, което блокира проходното сечение на топлоносителя и се получава лошо охлаждане на топлоотделящите елементи.

Авария на ВВЕР с малко изтичане на топлоносител



Според оценката на основния контур на ВВЕР е по-вероятно да се получи малко разкъсване в основния контур, отколкото гилотинно разкъсване. Такова изтичане може да се появи и при отказ на предпазен клапан да затвори. Най-голямата и важна разлика между аварията с голямо и малко разкъсване е скоростта на намаляване на налягането – при малък теч то е значително по-бавно. При такава авария за голям период от време след началото на аварията не може да се използват хидроакумулаторите на САОЗ – ниско налягане.

Като се имат предвид последствията най-сериозния случай при този тип авария е малък теч при малко разкъсване на студения тръбопровод между помпата и реактора. Веднага след началото на аварията налягането на контура

започва рязко да спада и реакторът се спира след активирането на защитите му. При налягане под 10 МРа се активира САОЗ - Високо налягане. Налягането продължава да намалява и при 6,5 – 7 МРа водата в контура започва да се изпарява. В първоначалния момент започва да кипи водата в компенсатора на обема, а в последствие се образуват парни мехурчета и в корпуса на самия реактор (образува се парна възглавница под капака на самия реактор). Ако помпите останат включени, ще се увеличи циркулацията на топлоносител през активната зона, което способства за нейното по-добро охлаждане. От друга страна това би довело до увеличена загуба на топлоносител през разкъсването. Възможна е и появата на кавитация в помпите вследствие появата на двуфазна смес. Правилата за експлоатация на ВВЕР гласят, че е по-добре да се изключат Главните циркуляционни помпи (ГЦП) при такава авария. При такова разкъсване в студения тръбопровод парата, която се събира в горната камера на реактора, не може да излезе през разкъсването. Водата в корпуса спада до нивото на горещия тръбопровод. Въпреки това налягането остава достатъчно високо за да не могат да се приведат в действие хидроакумулаторите на САОЗ - Ниско налягане. Получава се изпразване на секциите на Първи контур на парогенераторите. Теплоносителят, който се намира в тях изтича през разкъсването, а тръбният сноп се запълва с пара идваща през топлите тръбопроводи от реактора.

Парогенераторите могат да се използват и като средство за охлаждане, макар и да не са предвидени за тази цел. В секциите им кондензира постъпилата пара и се стича обратно в активната зона. За да е възможно това обаче е необходимо топлоносителя по Втори контур да се охлажда и налягането му да се понижава, тъй като е възможно да се появи ефекта на обратния топлинен поток.

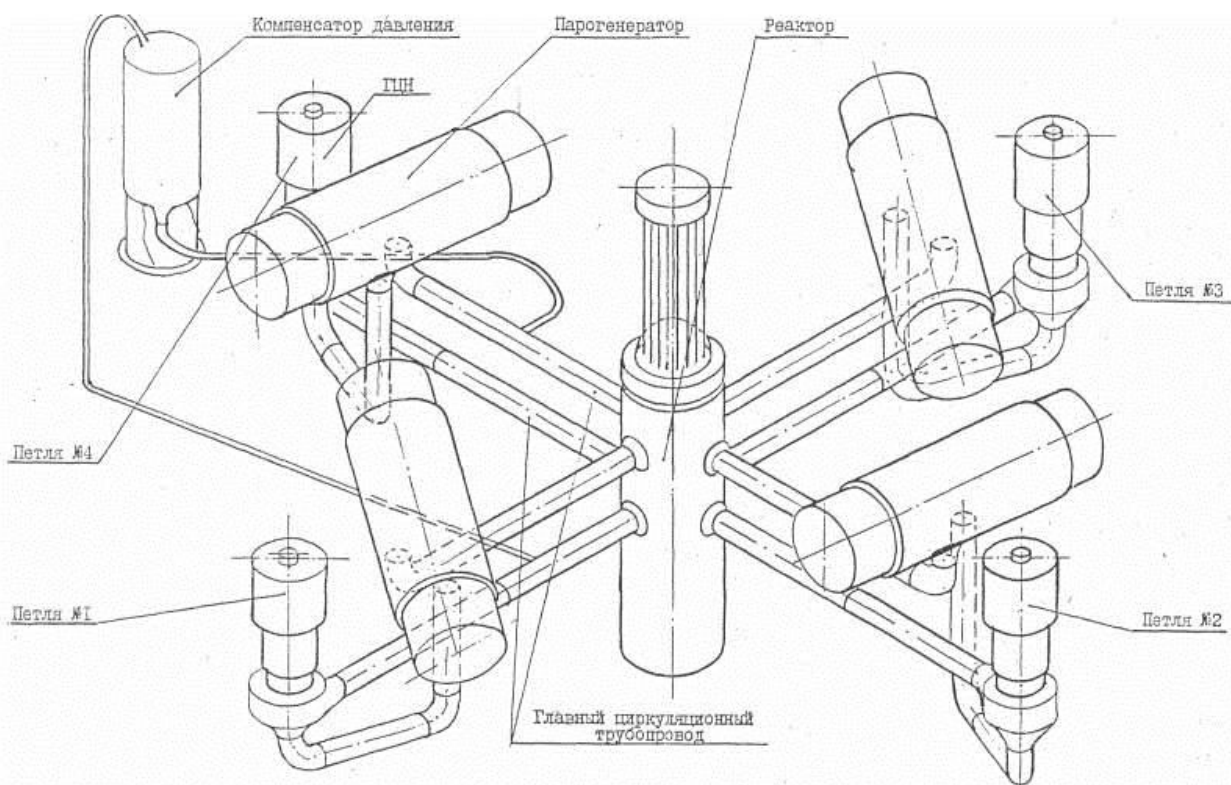
Тъй като топлоносителя изтича през разкъсването активната зона на реактора се оголва от горе на долу. Парната възглавница поддържа високото налягане в реактора, тъй като не може да излезе през пробива на студения тръбопровод, и пречи на сработването на аварийните системи.

Под помпата откъм смукателната и страна е разположена U-образна извивка (хидрозатвор), предназначен за избягване на кавитацията на помпата. Понеже реакторът и циркуляционният кръг са свързани като скачени съдове, то парата в парагенератора може да излезе през разкъсването, едва когато нивото в реактора достигне до това отговарящо на хидрозатвора. Тогава парата в парагенератора ще започне да преминава през помпата и да излиза през разкъсването. При попадането и в контейнента ще кондензира поради охлаждането и от спринклерната система.

Налягането в корпуса бързо ще се понижи, водата която е останала в долната част на реактора ще се изпари поради пониженото налягане и високата си температура. Пароводната смес, която ще се получи повторно ще намокри вече оголената горна част на активната зона. При продължаващо спадане на налягането е напълно възможно да се получи повторно оголване на активната зона, подобно на случая на авария със загуба на топлоносител при гилотинно разкъсване. Въпреки това падането на налягането е добро, тъй като ще позволи активирането на САОЗ-НН с хидроакумулаторите. В активната зона ще постъпи голямо количество силно борирана вода, която ще охлади активната зона и заглуши реактора. След този момент разхлаждането на активната зона е аналогично на това при авария с гилотинно разкъсване.

Поради генерацията на пара, нивото на водата в реактора е по-ниско от това на пароводната смес, понеже във водата няма парни джобове. Това ниво е ниво на колапс на течността, а явлението на повишаване на нивото поради намиращите се в него парни мехури е суелинг на нивото.

Авария на ВВЕР с пълна загуба на подхранваща вода за парогенераторите



Тази авария се води надпроектна авария според класификацията на МААЕ (Международна агенция за атомна енергия със седалище Виена, Австрия). При

тези аварии намаляването на последствията от тях става чрез активирането на аварийните процедури.

Когато е невъзможно да се осигури нормалното или аварийно подхранване на парогенераторите с топлоносител са възможни сериозни повреди на активната зона. В процеса на топлоотвеждането на остатъчното топлоотделяне след заглушаването на реактора чрез задействане на аварийната защита по сигнал – затваряне на клапаните на турбината поради ниско ниво в парогенераторите, които се изпразват по втори контур. Това води до загряване на топлоносителя до състояние на насищане. При това положение налягането в първи контур се покачва до момент в който се отварят предпазните клапани на компенсатора на обема. Тези клапани циклично се отварят и затварят като по този начин предизвикват загуба на маса на топлоносител от основния контур. В резултат е възможно оголването на активната зона и да се разхерметизират топлоотделящите елементи в случай, че е невъзможно да се подхранва първи контур.

При всички надпроектни аварии е необходима незабавната намеса на персонала, за разлика от проектните аварии. В този случай е най-подходяща процедурата Feed and Bleed. Първо се включват помпи от CAOЗ-ВН с цел възстановяване на масата на топлоносителя в основния контур. Второто действие е принудително да се отворят предпазните клапани на компенсатора на обема за да може да се отведе остатъчното топлоотделяне към барбутажния бак, а от там и в контейнента. Основната задача на тази процедура е да се разхлади най-ефективно първи контур, като се поддържа определено ниво на топлоносителя, конкретно налягане и температура.

Времето за стартиране на процедурата е най-важно за предпазването на реактора. То зависи от момента на достигане на максимална стойност в горните кръгове на активната зона. Тази температура е подбрана така, че да даде на персонала достатъчно време да стартира процедурата по продухване и подхранване.

Системата предпазни-изолиращи клапани се състои от последователно монтирани предпазен и изолиращ клапан. Тя е предназначена за сработване на Feed and Bleed, като през нея се изхвърля пара, двуфазна смес и недогрятата вода. Изолиращият клапан спира изтичането на флуид, когато е нужно да се прекрати процедурата или при отказ на предпазния клапан да затвори, вследствие на повреда при цикличното му отваряне и затваряне преди началото на процедурата.

Събитието “Пълна загуба на подхранваща вода с процедура Feed & Bleed” е с ясно обозначена индикация на блочния щит за управление (БЩУ). При активиране на индикациите персонала извършва конкретни действия в рамките на конкретни времеви интервали. Някои от тях са:

- При достигане на конкретни температури в главните циркуляционни тръбопроводи трябва да се пусне една помпа от САОЗ-ВН.
- Да отвори принудително предпазния клапан на предпазно-изолиращия комплект клапани и да го остави в отворено положение.

Максималното време от 15 минути се определя от запаса до насищане, който се изчислява като разлика между температурата на насищане, съответстваща на налягането на отваряне на ПИКК и температурата, при която се стартира Feed & Bleed. Това време се оценява като достатъчно, тъй като решението за стартиране на процедурата е взето значително по-рано.

- До 30-тата минута от стартирането на процедурата да осъществи запълването на резервоара за аварийно подхранване на активната зона от резервоара за аварийно подхранване на първи контур. При работа на една помпа от САОЗ-ВН, времето за изчерпване на резервоара за аварийно подхранване на активната зона се оценява на 1900 секунди.

- След достигане на налягането в първи контур 0,8 МПа да осъществи по-нататъшно разхлаждане на реакторната инсталация до необходимите параметри използвайки помпите от системата САОЗ-НН като отвори допълнително предпазните клапани на Компенсатора на обема. Времето за тези операторски действия може да не бъде регламентирано, тъй като в момента на достигане на посоченото налягане е налице контролирано състояние на реакторната инсталация с висока концентрация на бор и стабилен градиент на разхлаждане на първи контур, оценен на около 20 градуса Целзий за час при функциониране на една помпа и отворен предпазно-изолиращ комплект клапани.

При ВВЕР реакторите периода от началото на аварията до стартиране на процедурата е 3 часа. Това време дава голяма възможност на персонала да овладее аварията. Времето е толкова голямо поради големия воден обем на първи контур и хоризонталните парогенератори, които забавят обезточването по втори контур и продължават да отвеждат топлина от основния контур продължителен период от време. При блоковете с вертикални парогенератори

(реактори PWR) времето от началото на аварията до стартиране на процедурата Feed & Bleed е от порядъка на 15 минути.

В АЕЦ Козлодуй след провеждане на стрес тестове и модернизация е определено, че следните елементи от инсталацията са от Сеизмична категория 1:

- Реактор (активна зона, вътрешно-корпусни устройства), корпус и капак на реактора;
- Басейн за отлежаване на касетите;
- Главни циркуляционни тръбопроводи на първи контур и Главни циркуляционни помпи;
- Парогенератори;
- Система за компенсирание на обема и поддържане на налягането в Първи контур;
- Контрол на топлофизични и неутронно-физични параметри – апаратура за контрол на неутронния поток;
- Система за разхлаждане на БОК;
- Система за подхранваща вода;
- Система главни паропроводи (главен парен колектор);
- Система за аварийна подхранваща вода;
- Система за запълване на БОК;
- Система за заливане на активната зона;
- Система за понижаване на налягането в бокса на парогенераторите - Спринклерна система;
- Система за надеждно електрозахранване Първа и Втора категория;
- Система за автоматична сеизмична защита;
- Система автоматика на степенчат пуск (за натоварване на дизел-генераторите);
- Система херметични помещения;
- Система за понижаване на налягането в хермозоната;
- Система техническо водоснабдяване отговорни потребители ;
- Система за пожароизвестяване и пожарогасене;
- Допълнителна система за аварийно подхранване на ПГ 3-ти и 4-ти блок.
- Транспортно-технологично оборудване за презареждане – презареждаща машина и 250 t кран в централна зала на хермозоната.

Сеизмичната квалификация на тръбопроводите, оборудването и закрепващите елементи на първи контур е проверена в редица мерки от програмата за модернизация, като са обобщени и резултатите с отчитане на

новите сеизмични изисквания за площадката. Потвърдена е квалификацията на следното основно оборудване на първи контур:

- Главни циркуляционни тръбопроводи;
- Парогенератори;
- Главни циркуляционни помпи.

Инсталирани са допълнително филтриращи системи за понижаване на налягането, действащи на пасивен принцип. При повишаване на налягането в херметичната конструкция до проектната му стойност се разкъсва мембраната свързана към тръбопровода до съд, запълнен с филтриращ разтвор. Газовата среда от херметичната конструкция преминава през филтриращия разтвор и се изпуска посредством дроселна система към вентилационните комини на блокове 5 и 6.

Разкъсване на главен циркуляционен тръбопровод е много вероятно при силно земетресение, поради местенето на подвижните и неподвижните части на системата от тръбопроводи. Поради тази причина те са категоризирани като съоръжения от сеизмична категория 1. Други възможни причини са превишаване на максималното допустимо налягане в тръбопроводите, което се предотвратява от превантивните и аварийните защиты по налягане, както и разрушаване на тръбопровода вследствие на корозия. Корозията се предотвратява чрез водоочистка на топлоносителя – дейонизация, деаерация и други.

Използвана литература:

1. Владимир Велев, Теплофизика 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