
**ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЛИЯНИЕТО НА СИСТЕМИТЕ ЗА
ПАСИВНО ОХЛАЖДАНЕ НА АКТИВНАТА ЗОНА
ПРИ РЕАКТОРИТЕ ТИП ВВЕР-1000**

Й. Георгиев¹

Ключови думи: хидроакумулатори, ВВЕР-1000, надпроектна авария, ЯЕЦ

Научна област: математическо моделиране (моделиране на ядрени реактори)

РЕЗЮМЕ

В статията е изследвано влиянието на системите за пасивно охлаждане на активната зона при реакторите тип ВВЕР-1000 В-320 и В-392/В-466 – хидроакумулатори първа степен (УТ11-14) и хидроакумулатори втора степен (JNG50-80) [3] върху развитието на авария с теч по първи контур и пълна загуба на променливо електрозахранване на блока.

С помощта на термохидравличния компютърен код ATHLET-2.1A [6] е направен анализ на поведението на ядрената инсталация, като за целта е използван разработеният изчислителен модел за реактор тип ВВЕР-1000 В-320 [2]. В допълнение са моделирани хидроакумулаторите втора степен на модификациите В-392 и В-466 [5]. Целта на проведените термохидравлични анализи е да се определи времето, за което след началото на аварията температурата на топлоотделящите елементи достига 1200 °С, т.е. да се проследи влиянието на системите за пасивно охлаждане на активната зона при реактори тип ВВЕР-1000. Когато температурата на обвивките достигне 1200 °С, започва ускорено окисление на циркония при взаимодействие с парата, което води до бързо нарастване на температурата на циркониевата обвивка, а оттам и на целия топлоотделящ елемент. Реакцията става самоподдържаща се. Това води до разхерметизация на обвивката на горивото [1].

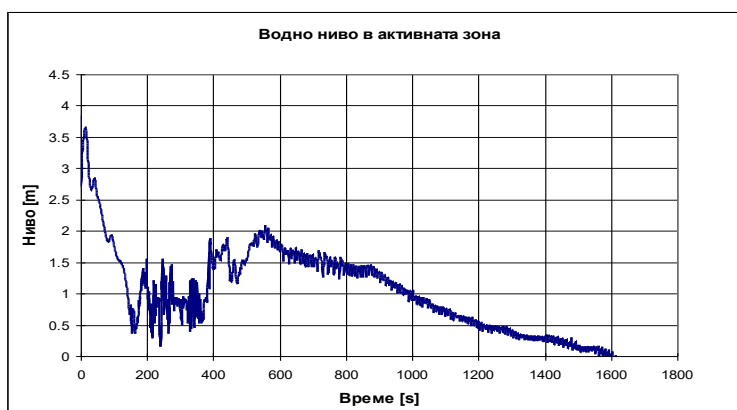
Сценарият на разглежданата авария е пълно обезточване на ядрения енергиен блок с едновременно скъсване на тръбопровод на системата за аварийно охлаждане на активната зона – ниско налягане (TQ2), първи канал с вътрешен диаметър – 279 mm. При симулирането на аварията е прието скъсване на тръбопровода, присъединен на

¹ Йото Г. Георгиев, доц., кат. „Топлоенергетика и ядрена енергетика”, Технически университет – София, 1000 София, e-mail: y_g_g@abv.bg

студената част на първи циркуляционен кръг между реакторния съд и главната циркуляционна помпа – 1. В резултат на инициращото събитие, цялото оборудване с променливотоково електрозахранване – втора категория, включително системите за безопасност, е неработоспособно. Предполага се, че пълната загуба на електрозахранване настъпва в момента на скъсването. Поради пълното обезточване на блока спират да функционират всички системи за нормална експлоатация. Единствената система за аварийно охлаждане на активната зона, която остава в работа, е системата на хидроакумулаторите. Наложен е отказ на четирите БРУ-А. Оборудването на системите за безопасност с електрозахранване първа категория (потребители, които не допускат загуба на електрозахранване) е работоспособно в периода до пълно разреждане на акумулаторните батерии. В анализа това време е прието за 2 часа. Началните условия на модела съответстват на номиналните параметри на блока. Неутронно – физичните характеристики на активната зона се отнасят за края на горивната кампания. При провеждане на термохидравличните пресмятания не са разглеждани операторски действия за управление на аварията.

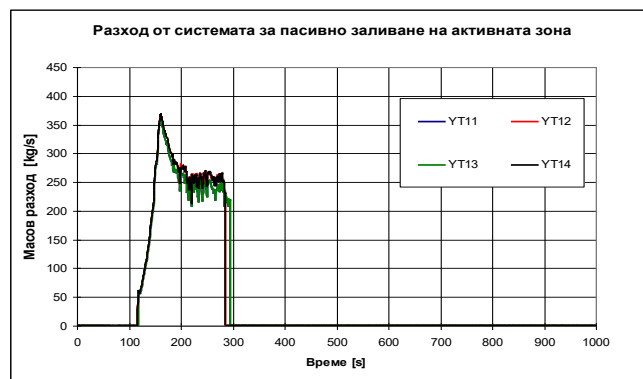
Развитие на аварията със задействане на хидроакумулаторите

При настъпване на аварията се получава сигнал „Обезточване на 3 от 4 главни циркуляционни помпи при мощност на реактора над 5% за повече от 1,2 s”, който задейства аварийната защита на реактора. Поглъщащите групи на системата за управление и защита на реактора се въвеждат в активната зона с аварийна скорост в крайно долно положение за време от 1,2 s след сигнала за аварийна защита и реакторът се заглушава. Непосредствено след началото на аварията се генерира сигнал за „Автоматичен стъпаловиден пуск на системите за безопасност” по първа програма по причина „Обезточване на секции надеждно захранване втора категория 6 kV и температура в първи контур над 70 °C” [4]. В резултат на загубата на топлоносител от първи контур, както и поради неработоспособността на системата за подхранване ТК и на активните системи за аварийно охлаждане на реактора, нивото на водата в активната зона започва да се понижава. Към 150-та секунда се постига кратко оголване на топлоотделящите елементи, без да се достига до повреждането им. Изливането на хидроакумулаторите първоначално компенсират изтеклия флуид. За период от време около половин час се поддържа максимална температура на повърхността на топлоотделящите елементи под 1200 °C.



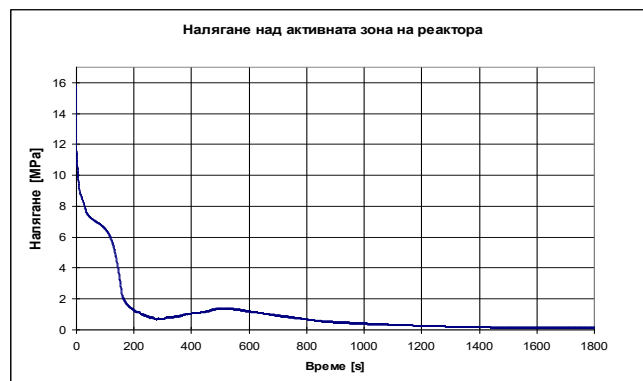
Фиг. 1. Ниво на водата в активната зона на реактора

Хидроаккумуляторите започват да подават воден разтвор на борна киселина в корпуса на реактора, след като налягането в основния контур стане по-ниско от 5,9 МРа. Инжектирането на борен разтвор от втори и четвърти хидроаккумулятор (УТ12В01 и УТ14В01) в долната смесителна камера на реактора започва в 116-та секунда. В 119-та секунда е началото на инжектирането на борен разтвор от първи и трети хидроаккумулятор (УТ11В01 и УТ13В01) в горната смесителна камера на реактора. Максималният масов разход на инжектиран флуид се достига за 51 секунди след сработването им и е равен на 357,8 kg/s. Втори и четвърти хидроаккумулятори се изолират от първи контур поради понижаване на водното ниво в тях до 1,2 m в 285 s, а първи и трети – съответно в 295 s. Изолирането на хидроаккумуляторите става чрез бързодействащите отсичащи клапани на тръбопроводите, които ги свързват с реакторния съд, за да се предотврати инжектирането на азот в реактора.



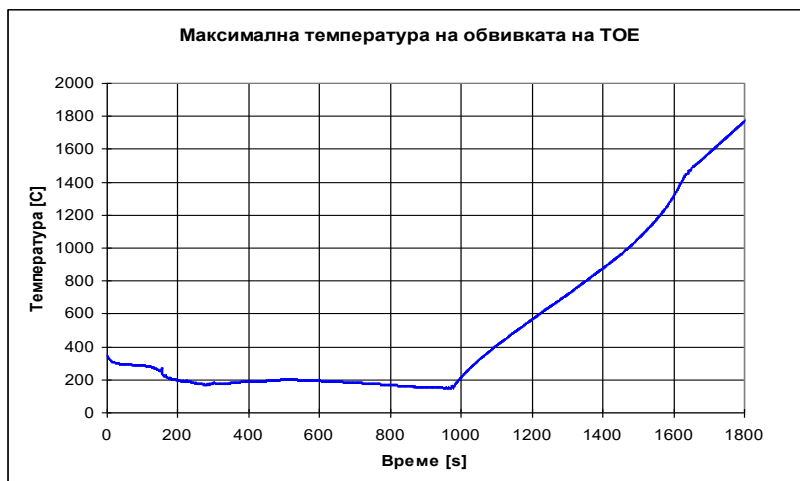
Фиг. 2. Разход от системата за пасивно охлаждане на активната зона – УТ

Течът от първи контур с условен диаметър 279 mm предизвиква бързо понижаване на налягането в реактора. Това е причина за изработване на сигнал за включване на електрическите нагреватели на компенсатора на налягане, но поради загубата на променливо електрозахранване те са неработоспособни. Над водното ниво се образува парна възглавница, която намалява градиента на пада на налягането в основния контур. При изливането на хидроаккумуляторите част от инжектираната вода се изпарява, което води до повишаване на налягането в реактора между 400-та и 600-та секунда, след което то се установява малко над атмосферното.



Фиг. 3. Налягане над активната зона на реактора

След заглушаването на реактора чрез аварийната защита температурата на топлоотделящите елементи се понижава. В резултат от подаването на борен разтвор от хидроакумулаторите максималната температура на обвивките на топлоотделящите елементи се задържа за продължителен период от време под 200 °С. Понижаването на водното ниво в активната зона на реактора след 981-та секунда води до оголване и разгриване на топлоотделящите елементи. В 1563-та секунда след началото на аварията максималната температура на обвивките на топлоотделящите елементи достига 1200 °С.



Фиг. 4. Максимална температура на обвивката на ТОЕ

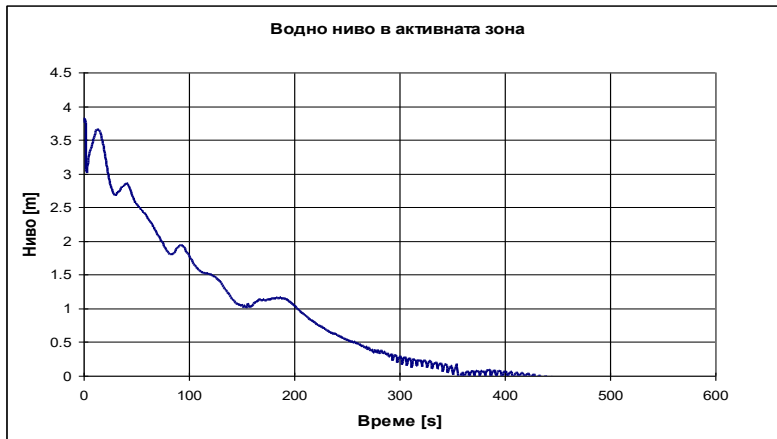
От анализа на получените резултати може да се каже, че времето от началото на аварията до преминаването ѝ в тежка е около половин час (26 min). Това е времето, с което разполага оперативният състав на централата да възстанови променливото електрозахранване на ядрения блок, преди да настъпи сериозно повреждане на активната зона с последващо изхвърляне на радиоактивни продукти на делене в херметичните помещения и в околната среда.

Развитие на аварията без задействане на хидроакумулаторите поради отсъствие на сигнал за "Автоматичен стъпаловиден пуск на системите за безопасност"

При това изследване е наложен отказ за формиране на сигнал за включване на „Автоматичен стъпаловиден пуск на системите за безопасност“. Бързодействащите отсичащи клапани на тръбопроводите, които свързват хидроакумулаторите с реакторния съд, се затварят при понижаване на налягането в първи контур под 6,9 МРа и липса на сигнал за включване на „Автоматичен стъпаловиден пуск на системите за безопасност“ [4].

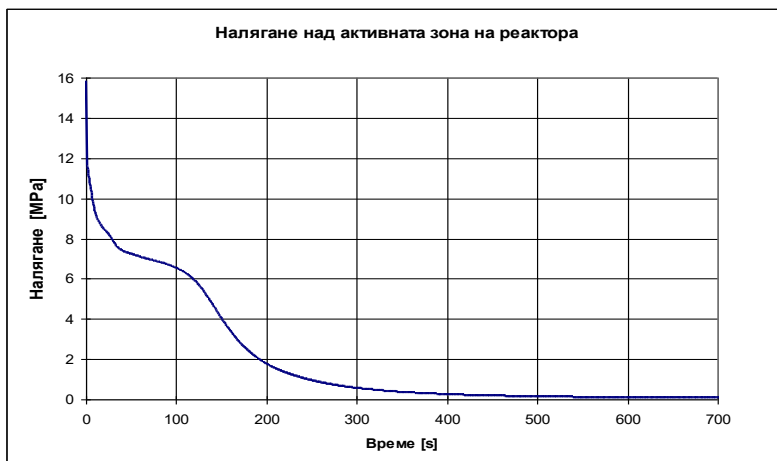
Поради намаляването на топлоносителя в първи контур започва понижаване на нивото на водата в активната зона. Тъй като активните системи за аварийно охлаждане на активната зона и хидроакумулаторите не са работоспособни, изтеклият флуид не се

компенсира. За пет минути се осушава активната зона поради липсата на системи, които да подават охлаждаща вода в първи контур за компенсиране на изтеклия топлоносител през мястото на скъсването.

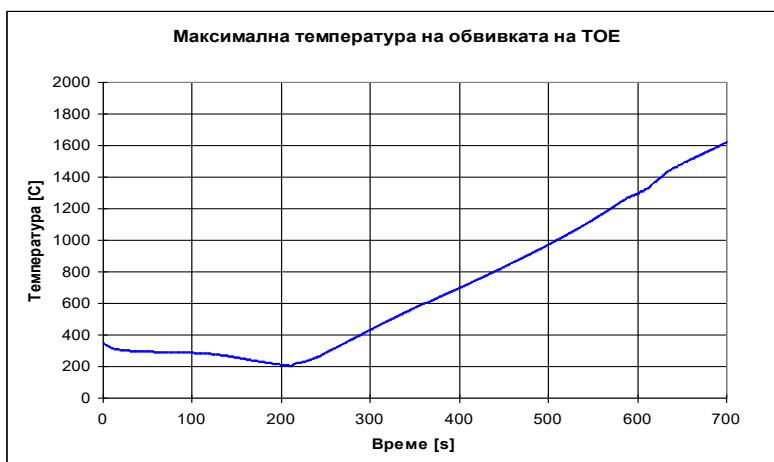


Фиг. 5. Ниво на водата в активната зона на реактора

Поради загубата на флуид от първи контур и прекратяване на верижната реакция на делене на ядреното гориво в активната зона налягането в реактора се понижава. В първите няколко минути понижаването на налягането е с по-малка скорост в сравнение със сценария с работоспособни хидроакумулатори, което води до по-голям масов разход през теча. Изолирането на хидроакумулаторите от реактора става в 76-та секунда, когато налягането в първи контур падне под 6,9 МПа. Това става чрез затварянето на бързодействащите вентили на тръбопроводите, които свързват хидроакумулаторите с реактора.



Фиг. 6. Налягане над активната зона на реактора



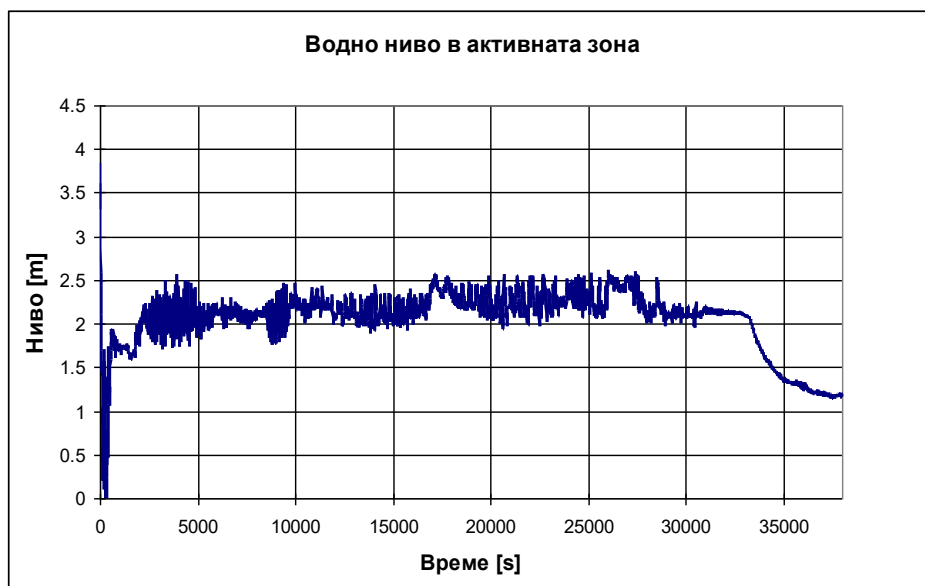
Фиг. 7. Максимална температура на обвивката на ТОЕ

В първите три минути от началото на аварията, след заглушаването на реактора, температурата на повърхността на топлоотделящите елементи се понижава от 350 °C до 200 °C (фигура 6). От друга страна, затварянето на стопорно-регулацияния клапан на турбината минимизира отдаването на топлина от първи към втори контур. След 209-та секунда започва трайно разгриване на топлоотделящите елементи поради оголването на активната зона на реактора. Тъй като отвеждането на генерираната топлина вследствие на остатъчното енергоотделяне в активната зона се осъществява само чрез флуида, изтекъл през мястото на скъсването, то много бързо се достига до разгриване на горивните пръти. В 571-та секунда след началото на аварията максималната температура на повърхността на топлоотделящите елементи достига 1200 °C, с което аварията преминава в тежка. Това е около три пъти по-бързо, отколкото при аварията с работа на хидроакумулаторите.

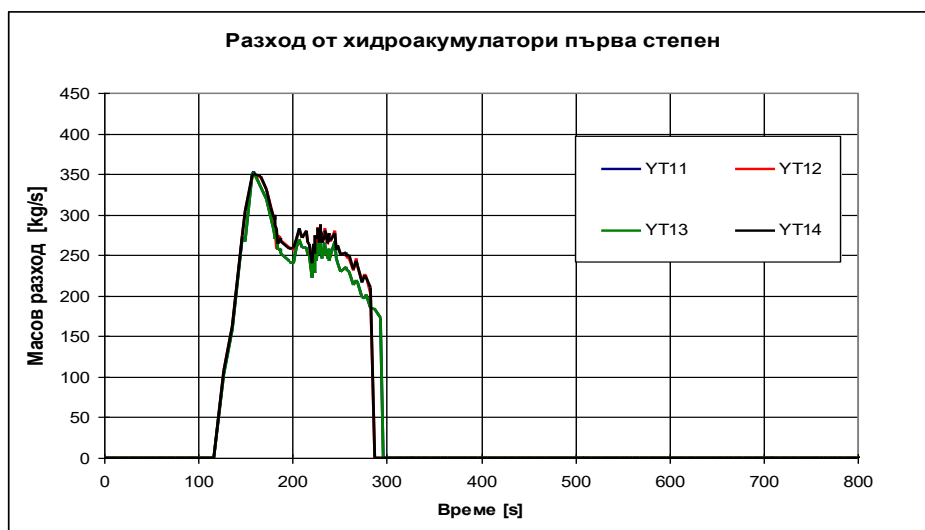
Влияние на втората степен на системата за аварийно охлаждане на активната зона – пасивна част (хидроакумулатори) върху развитието на аварията

С помощта на компютърния код ATHLET-2.1A е направен анализ на ефективността на допълнителните системи за пасивно заливане на активната зона в условията на надпроектна авария.

Поради загубата на топлоносител от първи контур през мястото на изтичане, както и поради неработоспособността на активните системи за аварийно охлаждане на реактора, нивото на водата в активната зона започва да се понижава. Към 160-тата секунда се постига кратко оголване на топлоотделящите елементи, без да се достига до тяхното повреждане. В първия момент изливането на хидроакумулатори първа степен компенсира изтеклия флуид. След 182-та секунда започва подаването на борен разтвор от хидроакумулаторите втора степен. В резултат на това водното ниво в активната зона се установява за 9,16 h на ниво от около 2,3 m. Трайното оголване на активната зона започва в 33293-та секунда след началото на аварията.

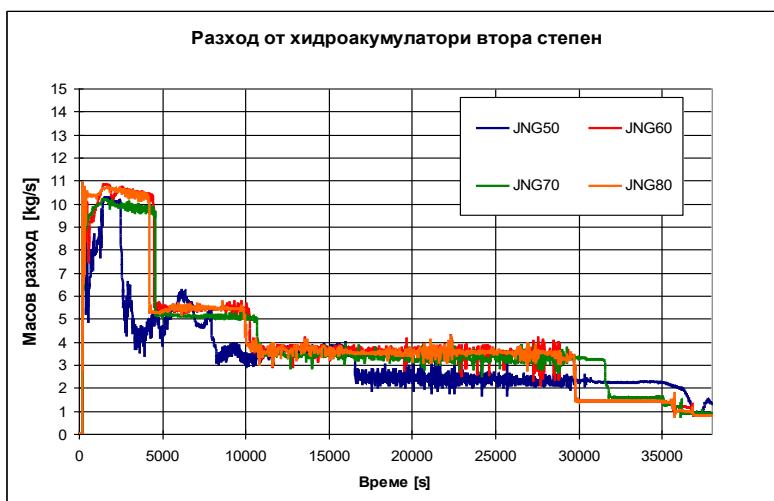


Фиг. 8. Ниво на водата в активната зона на реактора



Фиг. 9. Разход от системата за пасивно охлаждане на активната зона – УТ

Хидроакумулаторите първа степен започват да подават воден разтвор на борна киселина в корпуса на реактора, след като налягането в основния контур стане пониско от 5,9 МРа. Инжектирането на борен разтвор от хидроакумулаторите първа степен се извършва в същата последователност, както в първия сценарий. Същото се отнася и за тяхното изолиране.



Фиг. 10. Разход от системата за пасивно охлаждане на активната зона – първа степен

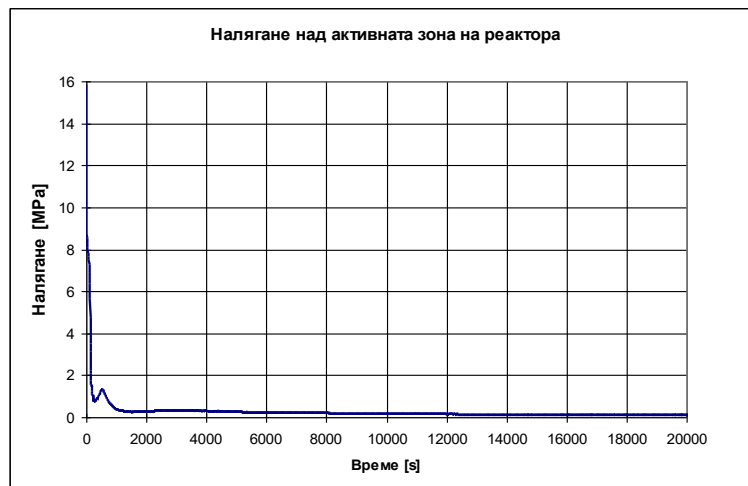
Хидроакумулаторите втора степен започват да подават борен разтвор в реактора в 182-та секунда след началото на аварията, когато налягането в основния контур се понижи до 1,5 МРа. Четвърти канал на хидроакумулатори втора степен достига проектния си разход 63 секунди след задействането си. Около 800 секунди след началото на аварията втори и трети канал достигат проектния си разход. Взаимодействието на парата с водата в хидроакумулаторите води до забавяне във времето на получаване на проектен разход от системата, тъй като постъпилата пара над водата в хидроакумулатора кондензира, понижавайки налягането в съда. Първи канал достига проектен разход от 10 kg/s след около 1500 секунди. Този разход се задържа само за около 16 минути, след което се понижава наполовина при голямо колебание в масовия разход. Първи канал не работи с проектния разход поради факта, че течът е между реактора и главна циркуляционна помпа – 1. Това довежда до пониско налягане в студената част на първи главен циркуляционен тръбопровод, което означава и по-ниско налягане в тръбопровода, който свързва хидроакумулатора в горната част с първи контур. От това може да се направи изводът, че при теч на някой от главните циркуляционни тръбопроводи, съответният канал на хидроакумулатори втора степен няма да е напълно работоспособен, тъй като подаваната в реактора вода ще е с по-малък масов разход от проектните стойности.

В началото четвърти канал достига най-бързо проектния си разход спрямо другите канали заради най-голямата си отдалеченост спрямо мястото на теча. Това довежда до по-бавно намаляване на стойността на налягането в първите минути от аварията на входа на четвърти канал в сравнение с другите три канала.

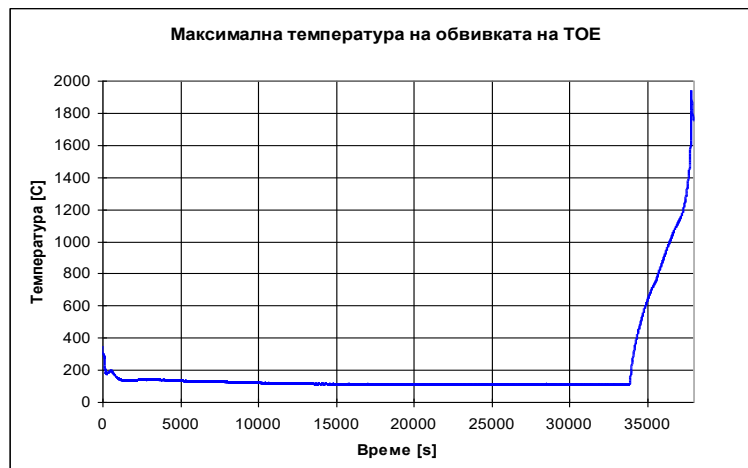
В съответствие с четиристъпалното профилиране на масовия разход от системата от хидроакумулатори втора степен, което профилиране се реализира чрез последователно прекратяване на изтичането по сливните линии, които се оказват по-високо от нивото в хидроакумулатора, разходът през всеки от каналите се променя стъпаловидно. Масовият разход през втори, трети и четвърти канали има сравнително стабилни стойности и се променя без големи колебания при прехода от една степен към друга. Втори и четвърти хидроакумулатор (JNG60B, JNG80B), които са свързани към долната смесителна камера на реактора, инжектират флуид малко по-бързо от третия (JNG70B), който е свързан към горната смесителна камера. Същото явление се наблюдава

дава и при хидроакумулаторите първа степен. Причината за това е образуването на парна възглавница над активната зона на реактора, която подпира подаването на вода от първи и трети канал на хидроакумулаторите и по този начин намалява техния разход.

Течът от първи контур с условен диаметър 279 mm води до бързо понижаване на налягането в реактора. При изливането на хидроакумулаторите първа степен, част от водата се изпарява, което води до временно повишаване на налягането в реактора около 500 секунди след началото на аварията, след което налягането се установява около атмосферното. То остава малко по-високо от атмосферното поради непрекъснатото изпарение на част от инжектираната вода от хидроакумулатори втора степен.



Фиг. 11. Налягане над активната зона на реактора



Фиг. 12. Максимална температура на обвивката на ТОЕ

След заглушаването на реактора чрез аварийната защита температурата на топлоотделящите елементи се понижава до около 180 °C. В резултат от продължителното подаване на борен разтвор от хидроакумулаторите втора степен максималната температура на обвивките на топлоотделящите елементи се задържа за сравнително

дълъг период от време на стойност около 110 °С. Понижаването на водното ниво в активната зона на реактора предизвиква оголване и разгриване на топлоотделящите елементи след 33915-та секунда. В 37356-та секунда след началото на аварията, максималната температура на обвивките на топлоотделящите елементи достига 1200 °С, което е индикация за преминаване към тежка авария.

Термохидравличният код ATHLET-2.1A изчислява, че при наличието на хидроакумулатори втора степен, разрушаването на активната зона ще настъпи 37356 секунди (10 часа и 22 минути) след началото на аварията. Проведеният анализ с помощта на компютърния код ATHLET-2.1A показва, че в работата на системата на хидроакумулаторите втора степен съществено влияние оказва мястото на скъсване (първи канал не е с проектен разход), докато при хидроакумулаторите първа степен не се наблюдава такова влияние, т.е. от тази гледна точка те са по-надеждни. Също така за разлика от хидроакумулаторите първа степен, при хидроакумулаторите втора степен е необходим значителен период от време, докато масовият разход достигне проектните стойности и се установи.

Изводи

От резултатите, представени по-горе, при изследването на авария с пълно обезточване на ядрения енергиен блок с едновременно скъсване на тръбопровод на системата за аварийно охлаждане на активната зона – ниско налягане (TQ2) първи канал с вътрешен диаметър – 279 mm, се вижда, че времето, за което аварията преминава в тежка, е 1563 секунди (26 минути). При отказ на съществуващите хидроакумулатори – първа степен това време е 571 секунди или три пъти по-малко. При наличието на хидроакумулатори втора степен разрушаването на активната зона настъпва 37356 секунди (10 часа и 22 минути) след началото на аварията. От извършените анализи може да се направи заключение, че използването на новата система хидроакумулатори втора степен води до отлагане на разрушаването на активната зона при реактори от тип ВВЕР-1000 с десет часа. При хидроакумулатори втора степен се вижда, че каналът, при който е течът, не е с проектен разход, което намалява ефекта от неговата работа.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Велев В., К. Филипов.* Ядрени горива, ИФО Дизайн, София, 2008.
2. *Георгиев Й., Вл. Велев.* Модел на ядрен енергиен блок с реактор тип ВВЕР-1000 В-320 с компютърния код ATHLET-2.1A, Научна конференция на ЕМФ, Созопол, 2011.
3. *Калякин, С. Г.* Теплогидравлика пассивных систем безопасности АЭС с ВВЭР, Обнинск, 2007.
4. Основные исходные данные для проведения расчетного обоснования СОАИ для РУ В-320, Балаково, 1996.
5. *Asmolov, V. G.* Passive safety in VVERs, JSC Rosenergoatom (Nuclear Engineering International), 26 August, 2011.
6. *Lerchl, G., Austregesilo, H.* ATHLET Code Documentation Part 1: ATHLET Description, 2006.

Постъпила: декември, 2012

INVESTIGATION THE IMPACT OF CORE COOLING SYSTEM PASSIVE PART FOR REACTOR TYPE VVER-1000

Y. Georgiev¹

Keywords: hydro-accumulators, VVER-1000, over-project accident, nuclear reactors

Research area: mathematical modeling (modeling of nuclear reactors)

ABSTRACT

The article presents investigation on impact of emergency core cooling systems passive part in reactor type VVER-1000 V-320 and V-392/V-466 – hydroaccumulators first stage (YT11-14) and hydroaccumulators second stage (JNG50-80) during accident with loss of coolant and complete loss of AC power.

¹ Yoto G. Georgiev, Assistant Professor, Department of Heat and Nuclear Energetic, Technical University of Sofia, 1756 Sofia, Bulgaria, e-mail: y_g_g@abv.bg

