



LT0500033

*Branduolinės energetikos sauga, radioaktyviosios atliekos*

## **BRANDUOLINĖS SAUGOS IR AVARIJŲ EIGOS IGNALINOS AE TYRIMŲ APIBENDRINIMAS**

**A. Kaliatka, E. Ušpuras**

*Branduolinių įrenginių saugos laboratorija*

*Atlikta avarijų analizė parodė, kad įdiegus giluminės Ignalinos AE saugos analizės rekomendacijas, Ignalinos jėgainė yra patikimai apsaugota nuo avarijų kurių metu būtinas greitas automatinis apsaugų suveikimas. Avarijų su ilgalaikiu reaktoriaus aušinimo praradimu atvejais yra reikalingas operatoriaus įsikišimas, siekiant išsivelninti avarijos pasekmes. Tokių avarijų valdymo galimybės yra išanalizuotos šiame straipsnyje.*

### **1. Įvadas**

Visas potencialiai įmanomas Ignalinos atominės elektrinės (AE) avarijas sąlyginai galima suskirstyti į dvi grupes. Pirmąją grupę sudarytų avarijos kai pavojingi branduolinės saugos požiūriu parametrai gali būti pasiekiami avarijos pradžioje (per pirmąsias dešimt minučių). Tokios avarijos reikalauja greito automatinis apsaugų suveikimo. Antrajai grupei priklausytų avarijos kai pavojingi branduolinės saugos požiūriu parametrai gali būti pasiekiami praėjus sąlyginai daug laiko nuo avarijos pradžios (daugiau kaip po dešimties minučių). Tokių avarijų pasekmės priklauso nuo operatoriaus veiksmų.

Šiame darbe aptarta šių dviejų grupių galimų avarijų pasekmės. Naudojantis Ignalinos AE pagrindinio cirkuliacinio kontūro (PCK) modeliu, išnagrinėta ilgalaikio reaktoriaus aušinimo praradimo avarijos eigos valdymo galimybės.

### **2. Avarijos, reikalaujančios greito automatinis apsaugų suveikimo**

Avarijų, reikalaujančios greito automatinis apsaugų suveikimo, grupę sudaro avarijos sukeltos įrangos gedimų, avarijos su šilumnešio praradimu, avarijos iššauktos reaktyvumo pokyčių bei pereinamieji procesai be avarinio reaktoriaus stabdymo. 1996 m. atlikta giluminė Ignalinos AE saugos analizė [1] parodė, kad Ignalinos AE yra patikimai apsaugota nuo avarijų sukeltų įrangos gedimų, avarijų iššauktų

reaktyvumo pokyčių ir avarių su šilumnešio praradimu, jeigu inicijuojantis įvykis neiššaukia šilumnešio lokalinio srauto stagnacijos ir vamzdynų trūkiai įvyksta hermetinėse avarių lokalizacijos sistemos (ALS) patalpose. Remiantis tokiomis saugos analizės [1] rekomendacijomis ir papildomos analizės rezultatais buvo įdiegta reaktoriaus stabdymas ir reaktoriaus avarinio aušinimo sistemos (RAAS) suveikimas pagal šilumnešio debito per grupinius paskirstymo kolektorius (GPK) sumažėjimą ir pagal slėgio būgnuose separatoriuose mažėjimo greitį (signalas “dp/dt”). Apsaugos sistema pagal šilumnešio debito per GPK sumažėjimą [2] apsaugo reaktorių avarių, iššaukiančių lokalinę srauto stagnaciją, o signalas “dp/dt” padeda saugiai ataušinti reaktorių esant garotiekių trūkiams už hermetinių ALS patalpų ribų [3]. Taip pat, buvo įdiegta papildoma avarinės apsaugos sistema reaktoriaus stabdymui kai nesuveikia projekcinė apsaugos sistema [4]. Visoms įdiegtoms modifikacijoms buvo atliktos saugos analizės. Jos įrodo automatinių apsaugų sugebėjimą užtikrinti saugų ir patikimą reaktoriaus ataušinimą, įvykus bet kokiai pirmosios grupės avarijai.

### 3. Avarijos su ilgalaikiu reaktoriaus aušinimo praradimu

Įgjalinos AE pirmojo lygio tikimybinis saugos įvertinimas parodė, kad rizikos topografijoje dominuoja ne avarijos su šilumnešio praradimu, o pereinamieji procesai. Pagrindinis veiksnys, įtakojantis aktyviosios zonos suirimo dažnį yra ilgalaikis reaktoriaus aušinimo praradimas. Esant tokioms avarijoms aktyviosios zonos parametrai pasiekia pavojingas ribas praėjus pakankamai ilgam laiko tarpui nuo avarijos pradžios. Tai reiškia, kad yra laiko imtis priemonių, valdyti avarijos eigą ir sušvelninti avarijos pasekmes.

Labiausiai tikėtinas inicijuojantis įvykis, galintis iššaukti ilgalaikį reaktoriaus aušinimo sutrikimą yra visiškas elektros energijos tiekimo praradimas. Visiškas elektros energijos tiekimo praradimas – tai elektros energijos tiekimo saviems poreikiams praradimas kai papildomai priimamas visų dyzelių generatorių gedimas. Elektros energijos saviems poreikiams praradimas iššaukia visų pagrindinių cirkuliacinių siurblių (PCS), maitinimo vandens padavimo siurblių, techninio vandens cirkuliacinių siurblių ir kt. sustojimą. Dyzelių generatorių gedimas neleidžia veikti RAAS ilgalaikio aušinimo posistemei, o tai reiškia, kad nėra galimybės papildyti reaktoriaus priverstinės cirkuliacijos

kontūrą vandeniui.

Naudojantis Ignalinos AE PCK modeliu, išnagrinėtos ilgalaikio reaktoriaus aušinimo praradimo avarijos eigos valdymo galimybės:

- slėgio priverstinės cirkuliacijos kontūre sumažinimas ir vandens padavimas iš RAAS hidroakumuliatorių ir deaeratorių;
- BS patalpų ventiliacija;
- tiesioginis vandens padavimas į reaktoriaus erdvę.

Pereinamųjų procesų metu vykstančių termohidraulinių procesų analizei buvo naudojamas Ignalinos AE PCK modelis sukurtas RELAP5/MOD3.2 pagalba. RELAP5 kompiuterinis kodas buvo sukurtas Idaho Nacionalinėje laboratorijoje ir skirtas PWR ir BWR tipo reaktorių analizei. Tai viendimensinis nepusiausvyrinis dvifazis termohidraulinis sisteminis kodas. Pastaruoju metu RELAP5 kodas yra sėkmingai taikomas ir termohidrauliniams procesams RBMK tipo jėgainėse modeliuoti. Kodo pagalba sukurto modelio tinkamumas RBMK-1500 jėgainei yra pagrįstas [5]. PCK modelis, skirtas ilgalaikio reaktoriaus aušinimo praradimo avarijos analizei, turi keletą skirtumų nuo modelio aprašyto [5]:

- sumodeliuota tik viena PCK kilpa. Tai pateisinama tuo, kad abiejose kilpose vykstantys procesai, nagrinėjamos avarijos atveju, yra identiški;
- šilumos perdavimas tarp ekvivalentinių kuro kanalų yra išspręstas šilumos mainų per tarpelius tarp grafito blokų į reaktoriaus dujinį kontūrą pagalba;
- detaliai sumodeliuoti reaktoriaus valdymo ir apsaugos sistemos (RVAS) strypų aušinimo ir radialinio reflektoriaus aušinimo kontūrai. Tai leidžia įvertinti liekamosios šilumos nuvedimą nuo grafito klojinio šio kontūro pagalba;
- sumodeliuota reaktoriaus erdvė, kurią formuoja reaktoriaus gaubto metalo konstrukcijos kartu su viršutinėmis ir apatinėmis metalo plokštėmis;

- numatyta galimybė ne tik modeliuoti papildomą vandens padavimą į GDH, bet ir į reaktoriaus erdvę. Tam kad sumodeliuoti šilumos nuvedimą nuo būgnų separatorių patalpose esančių įrenginių ir vamzdžių paviršių, būgnų separatorių, garo vandens komunikacijų bei garotiekių modeliai papildyti šiluminėmis struktūromis.

#### **4. Visiško elektros energijos praradimo analizė, kai papildomas vanduo paduodamas iš RAAS hidroakumuliatorių ir deaeratorių**

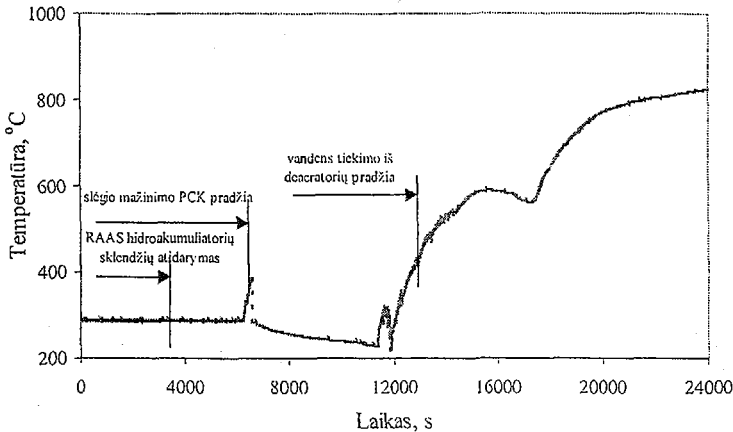
Liekamojo šilumos išsiskyrimo iš aktyviosios zonos visiško stoties elektros energijos praradimo be operatoriaus įsikišimo atveju analizė parodė, kad maždaug 2000 sek. (apytiksliai 0,5 val.) po avarijos pradžios būgnai separatoriai ištuštėja. Kuro elementų apvalkalo ir kuro kanalų sienelių perkaitimas, kurį iššaukia visiškas vandens išgaravimas iš aktyviosios zonos, prasideda maždaug po 6000 sek. (apytiksliai 1,6 val.) nuo avarijos pradžios. Maksimalaus galingumo kuro kanaluose, praėjus apytiksliai 7200 sek. (2 val.) nuo avarijos pradžios, viršijamas priimtino kriterijus kuro elementų apvalkalams (700 °C). Praėjus apytiksliai 12000 sek. (daugiau kaip 3 valandos) nuo avarijos pradžios, viršijamas priimtino kriterijus kuro kanalo sienelėms (650 °C). Kadangi slėgis PCK yra artimas nominaliai reikšmei, kelių kuro kanalų trūkių tikimybė yra neatmetama.

Papildomo vandens padavimas į PCK leistų atitolinti visiško vandens išgaravimo iš aktyviosios zonos momentą. Tokiais papildomo vandens tiekimo šaltiniais visiško elektros energijos praradimo atveju gali būti RAAS hidroakumuliatoriai ir deaeratoriai. 16-oje hidroakumuliatorių yra apie 212 m<sup>3</sup> vandens, suslėgto iki 9 MPa, o keturiuose deaeratoriuose – 480 m<sup>3</sup> vandens. Slėgis deaeratoriuose apie 1,2 MPa.

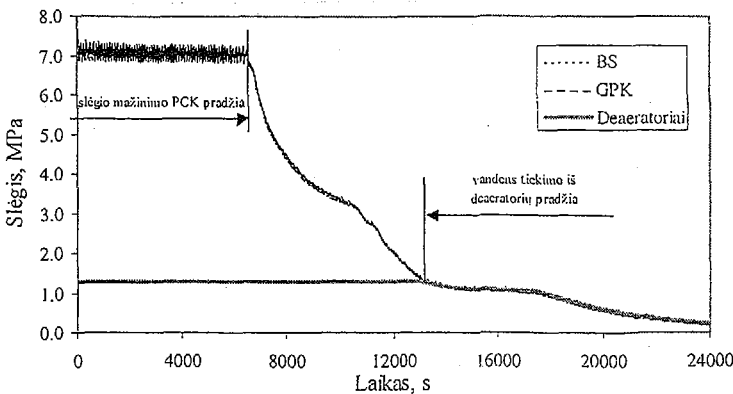
Pagrindinių termohidraulinių parametrų kitimas, esant visiškam elektros energijos praradimui, įvertinant operatoriaus veiksmus, paivaizduotas 1 pav. ir 2 pav. Modeliuojant buvo priimta, kad praėjus vienai valandai nuo avarijos pradžios operatorius atidaro greitaieges sklendes, esančias vamzdyne iš hidroakumuliatorių į GPK.

Tačiau, slėgis hidroakumuliatoriuose ir GPK greitai susilygina ir šalto vandens padavimas iš hidroakumuliatorių nutrūksta. Apytiksliai 6100 sek. nuo avarijos pradžios kuro elementų apvalkalų temperatūra vidutinio galingumo kanaluose pradeda kilti (1 pav.). Modeliuojant

buvo priimta, kad temperatūros kilimas yra signalas operatoriui pradėti mažinti slėgį kontūre. Slėgio sumažinimas PCK yra vykdomas atidarant vieną GRĮ-B. Pradėjus mažėti slėgiui (2 pav.), atsinaujina vandens padavimas į GPK iš hidroakumuliatorių. Greitaeigių sklendžių užsidarymas hidroakumuliatorių pajungimo kontūre apsaugo juos nuo visiško ištuštėjimo ir dujų patekimo į aktyviają zoną.



1 pav. Maksimali kuro elementų apvalkalų temperatūra vidutinio galingumo kanale



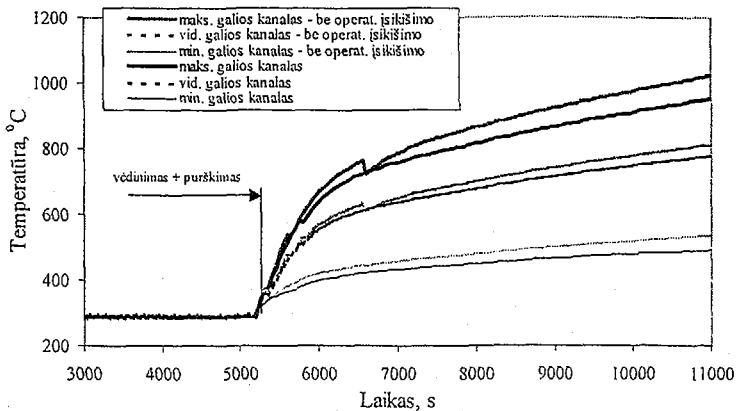
2 pav. Slėgis PCK ir deaeratoriuose

Vandens padavimas iš deaeratorių tampa įmanomas tik po slėgio sumažėjimo GPK apytiksliai iki 1,2 MPa (t. y. iki slėgio deaeratoriuose). Vanduo iš deaeratorių pasiekia aktyviąją zoną, čia užverda, išgaruoja ir tuo būdu palaiko slėgį PCK. Toks slėgio palaikymo procesas trunka maždaug vieną valandą (2 pav.). Toliau dėl vandens kiekio sumažėjimo deaeratoriuose, vandens padavimas į GPK sumažėja ir slėgis PCK pradeda mažėti. Vandens padavimas iš deaeratorių nuslopina kuro elementų apvalkų (1 pav.) ir kanalo sienelių temperatūrų kilimo procesą. Vis dėl to, apytiksliai po penkių valandų nuo avarijos pradžios temperatūros dar kartą pradeda kilti. Tai reiškia, kad yra būtina atnaujinti vandens padavimą į GPK panaudojant išorines priemones. Kadangi slėgis PCK jau mažesnis nei 1 MPa, išorinių žemo slėgio vandens šaltinių (pvz., gaisrinės mašinos) panaudojimas yra galimas.

#### **5. Visiško elektros energijos praradimo analizė, kai yra ventiliuojamos būgnų separatorių patalpos**

Kitas galimas kelias sušvelninti visiško stoties elektros energijos praradimo avarijos pasekmes galėtų būti būgnų separatorių patalpų ventiliavimas. Ignalinos AE yra dvi BS patalpos (po kiekvienoje reaktoriaus pusėje). Įrengimai ir vamzdynai BS patalpose sudaro didelį aušinimo plotą: BS, garo kolektoriai, dalis garotiekių, dalis nuleidžiamųjų vamzdynų, garo-vandens komunikacijos ir dalis kanalų, kurie yra virš aktyviosios zonos. Reaktoriui dirbant normaliomis sąlygomis maksimali oro temperatūra BS patalpose gali siekti 270 °C. Jeigu patalpoje esančios durys ir numušamieji paneliai būtų atidaryti, BS patalpose susidarytų natūrali oro cirkuliacija. Natūralios cirkuliacijos pagalba galėtų būti pašalinta dalis liekamosios šilumos, sugeneruotos aktyviojoje zonoje. Efektas būtų dar didesnis jeigu būtų sumontuota oro drėkinimo purkštukų sistema. BS patalpų ventiliacijos analizė buvo atlikta panaudojant CONTAIN kodą. Deja, skaičiavimo rezultatai parodė, kad suminis pašalinamos tokiu būdu šilumos kiekis yra tik apie 10,5 MW. Tai yra apytiksliai septynis kartus mažesnis negu sugeneruota šilumos aktyviojoje zonoje. Kuro elementų apvalkų temperatūros visiško stoties elektros energijos praradimo be operatoriaus įsikišimo atveju ir BS patalpų ventiliavimo atveju yra palygintos

3 pav. Kaip matosi, temperatūrų sumažėjimas dėl ventilacijos yra labai nedidelis.



3 pav. Maksimali kuro apvalkalo temperatūra skirtingo galingumo kuro kanaluose

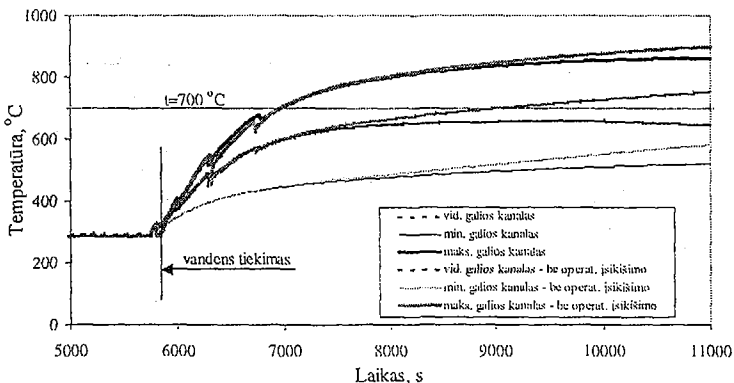
## 6. Visiško elektros energijos praradimo analizė su tiesioginiu vandens padavimu į reaktoriaus erdvę

Tiesioginio vandens padavimo į reaktoriaus erdvę, esant visiškam elektros energijos praradimui, analizė atlikta naudojant tą patį RELAP5 pagalba sukurtą PCK modelį kaip ir anksčiau aprašytais atvejais. Analizės metu buvo priimta, kad aktyviosios zonos perkaitimo pradžios momentu (5800 sek. nuo avarijos pradžios) pradedamas tiekti vanduo į viršutinę reaktoriaus erdvės dalį. Vandens padavimo debitas priimtas lygus 68,6 kg/s (vieno RAAS siurblio našumas) esant 30 °C temperatūrai. Sąveika tarp šalto vandens ir karšto grafito, kuri gali privesti prie grafito kolonų suirimo, nebuvo analizuojama. Atliktos analizės tikslas buvo įvertinti tokios rūšies aktyviosios zonos aušinimo tikslingumą, įvertinant galimybę išvengti kuro strypų perkaitimo ir suirimo, kai kitos priemonės neužtikrina reikiamo aušinimo. Šios rūšies aušinimas galėtų būti naudojamas tikrai kritiniais atvejais. Šio avarijų valdymo būdo pranašumas būtų toks, kad slėgis reaktoriaus

erdvėje yra artimas atmosferiniam. Tai reiškia, kad vandens padavimui galima panaudoti bet kokį išorinį žemo slėgio vandens šaltinį.

Patekęs į reaktoriaus erdvės viršutinę dalį vanduo tekėtų žemyn grafito klojinio išoriniu paviršiumi į tarpą tarp reaktoriaus korpuso ir grafito kolonų. Tarpai tarp grafito kolonų yra labai siauri (1,2 mm), grafito blokų temperatūra aktyviosios zonos centre yra didesnė negu 300 °C. Taigi, vandens tekėjimas žemyn šiais tarpeliais praktiškai neįmanomas. Nutekėjęs į reaktoriaus erdvės apatinę dalį, vanduo dujų – garo mišinio nuvedimo vamzdžiais pašalinamas į ALS atspariuosius boksus.

Paduodamas vanduo aušina reaktoriaus erdvės metalines konstrukcijas, apatinius ir viršutinius grafito lėtiklio blokus ir radialinio grafito reflektoriaus išorinį paviršių. Kadangi vanduo nepasiekia grafito blokų giliausių vietų, grafito temperatūra aktyviosios zonos centre auga. Buvo palygintos maksimalios kuro elementų apvalkų temperatūros atveju be operatoriaus įsikišimo kai reaktoriaus aktyvioji zona bandoma aušinti paduodant vandenį tiesiai į reaktoriaus erdvę. Kaip matyti iš 4 pav., kuro elementų apvalkų perkaitimo greitis mažėja, paduodant vandenį. Tačiau reaktoriaus nėra pakankamai ataušinamas.



4 pav. Maksimali kuro apvalkalo temperatūra skirtingo galingumo kuro kanaluose



## **Išvados ir pasiūlymai**

Atlikta avarijų analizė parodė, kad įdiegus [1] rekomenduotas modifikacijas, Ignalinos AE yra patikimai apsaugota nuo avarijų kai pavojingi branduolinės saugos požūriū parametrai gali būti pasiekiami avarijos pradžioje (kai būtinas greitas automatinių apsaugų suveikimas). Avarijų ilgalaikio reaktoriaus aušinimo praradimo atveju yra reikalingas operatoriaus įsikišimas, siekiant sušvelninti avarijos pasekmes. Darbe aptartos trys ilgalaikio reaktoriaus aušinimo praradimo avarijos eigos valdymo galimybės:

- slėgio priverstinės cirkuliacijos kontūre sumažinimas ir vandens padavimas iš RAAS hidroakumuliatorių ir deaeratorių bei išorinio šaltinio;
- liekamojo energijos išsiskyrimo iš reaktoriaus nuvedimas vėdinant BS patalpas;
- liekamojo energijos išsiskyrimo iš reaktoriaus nuvedimas tiesiogiai tiekiant vandenį į reaktoriaus erdvę.

Analizės rezultatai rodo, kad dvi paskutinės galimybės yra neveiksmingos. Būgnų-separatorių patalpų aušinimo ir tiesioginio vandens padavimo į reaktorių nepakanka liekamojo energijos išsiskyrimo iš reaktoriaus nuvedimui. Tačiau, slėgio priverstinės cirkuliacijos kontūre sumažinimas ir vandens padavimas iš RAAS hidroakumuliatorių ir deaeratorių bei išorinio šaltinio leidžia sušvelninti ilgalaikio reaktoriaus aušinimo praradimo avarijos pasekmes. Todėl ši avarijos pasekmių sušvelninimo priemonė rekomenduota įtraukti į RBMK-1500 avarijų eigos valdymo programą.

## **Literatūra**

1. Ignalina Safety Panel Recommendations on the Ignalina NPP Units 1&2 In-Depth Safety Assessment. 1997.
2. Uspuras E., Kaliatka A. Thermal-hydraulic analysis of accidents leading to the local flow stagnation in RBMK-1500, Fourth Information Exchange Forum on Safety Analysis for NPP of WWER

and RBMK types. Obninsk, October 11-15, 1999. Vol. 2, Arrgone USA. 2000.

3. Rimkevičius S., Kaliatka A., Urbonavičius E. Thermal-hydraulic evaluation of Ignalina NPP response to steam-line rupture, Nuclear Energy. 2000. 39. N 6.
4. Kaliatka A. Thermal-hydraulic evaluation of additional shutdown system at the Ignalina nuclear power plant, Proc. of the 9<sup>th</sup> International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics, NURETH-9.
5. Kaliatka A., Uspuras E. Benchmark analysis of main circulation trip events at the Ignalina NPP using RELAP5 code, Nuclear Engineering and Design. 2000. Vol. 202. N 1. P. 109-118.

## **Generalization of Nuclear Safety and Course of Accident Events Research in the Ignalina NPP**

### **Summary**

The safety analysis shown that after implementation of SAR recommendations Ignalina NPP is adequately protected against accidents which required fast initiation of automatic protections. In case of accidents with long-term loss of core cooling additional operator actions are required. Accident management in case long-term core cooling are analyzed in this paper.