

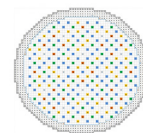


iae.lt

# Avarijų branduoliniuose energetiniuose įrenginiuose tyrimai ir jų valdymo metodų kūrimas Lietuvoje

Akad. Algirdas Kaliatka

**A**varija Fukušimos Daiiči atominėje elektrinėje, įvykusi 2011 metais, parodė, kad užtikrinant branduolinių įrenginių saugą ir šiais laikais atsiranda spragų. Pati avarijos eiga atskleidė, kad tokiai avarinių pasekmių grandinei Japonijoje nebuvo pasiruota – t. y. nebuvo iš anksto apgalvoti veiksmai, nebuvo paruoštos priemonės, nebuvo pasirengta tokiai avarijai suvaldyti. Po šios avarijos visame pasaulyje buvo atliekami taip vadinami „streso testai“, kurių metu buvo tikrinamos branduolinių įrenginių sunkių avarijų valdymo sistemos. Branduolinių įrenginių saugos įvertinimas ir avarijų valdymas neįmanomas be išsamaus tokių sistemų tyrimo – t. y. be termohidraulinių procesų, vykstančių branduoliniuose įrenginiuose skaitinio modeliavimo. Tik skaitinis modeliavimas leidžia patikrinti daugybę avarinių situacijų ir parinkti tinkamas avarijos valdymo priemones (operatoriaus veiksmus ir naudojamą įrangą). Kuriant skaitinius modelius būtina įvertinti, kad branduoliniuose energetiniuose įrenginiuose eksploatacijos ir avarinių įvykių metu sutinkami visi žinomi šilumos ir hidrodinamikos mechanizmai ir režimai (vien- ir dvifaziai srautai, laminariniai ir turbulenciniai režimai, kintamųjų fizikinių savybių įtaka, šilumos ir masės pernešimo procesai ir t. t.). Šie procesai realizuojami gan sudėtingomis sąlygomis – esant



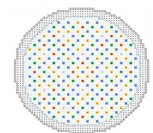
AVARIJŲ  
BRANDUOLINIUOSE  
ENERGETINIUOSE  
ĮRENGINIUOSE  
TYRIMAI IR JŲ  
VALDYMO METODŲ  
KŪRIMAS LIETUVOJE

stacionariems ir nestacionariems režimams su staigiais technologinių parametru pokyčiais, sudėtingai geometrijai, faziniams perėjimams bei tarpfazinėms sąveikoms ir t. t. Technologinių parametru branduoliniame reaktoriuje visuma avarinės situacijos metu yra besivystanti sistema, kurioje termohidraulinių procesų struktūra kuriuo nors laiko momentu gerokai priklauso nuo sistemos priešistorės. Sunkiųjų avarių atveju, kai pažeidžiami branduolinio kuro strypai, reikia mokėti sumodeliuoti šilumos nuvedimo procesus ne tik nuo kintančios geometrijos branduolinio kuro strypų, bet ir nuo lydalo, įvertinti egzotermes vandens garo ir metalo reakcijas, paskaičiuoti susidarančio vandenilio (kurio mišinys su oru yra sprogu) kiekį ir t. t. Per trūkį reaktoriaus aušinimo kontūre garo-vandens mišinys iš vamzdinių yra išmetamas į juos gaubiančias patalpas. Todėl taip pat labai svarbu tinkamai modeliuoti procesus, vykstančius šiose patalpose, siekiant įvertinti patalpų reakciją į slėgio ir temperatūros padidėjimą. Šiuo atveju svarbu nustatyti, ar patalpos sugebės lokalizuoti radioaktyviomis medžiagomis užterštą garo-vandens mišinį, ar atlaikys staigų slėgio padidėjimą.

Branduolinių įrenginių sauga pirmiausiai rūpinasi šių įrenginių projektuotojai, kurie numato galimas avarijas ir sukuria projektines jų valdymo priemones. Eksploatuojant branduolinius įrenginius už jų saugą atsako eksploatuojanti organizacija, ją stebi reguliuojančios institucijos su joms padedančiomis techninėmis saugos (mokslinėmis) organizacijomis. Subyrėjus Sovietų Sąjungai, Lietuva liko turinti du galingiausius pasaulyje atominės elektrinės energetinius reaktorus, veikiančius Ignalinos atominėje elektrinėje (AE), tačiau be reguliuojančios ir jai galinčių padėti techninių-mokslinių institucijų pagalbos. Šią padėtį buvo būtina nedelsiant ištaisyti ir tai buvo padaryta 1991 m. spalio mėn. įkuriant Valtynybines atominės energetikos saugos inspekciją (VATESI) ir Lietuvos energetikos institute 1992 m. kovo mėn. įsteigiant mokslinę Ignalinos saugos analizės grupę (ISAG). Vėliau ši grupė, kuri buvo pirmoji mokslinė-techninė saugos organizacija, padedanti Ignalinos AE ir VATESI, peraugo į Branduolinių įrenginių saugos laboratoriją. Kitos Lietuvos mokslinės institucijos ir aukštosios mokyklos taip pat prisidėjo teikdamos mokslinę-techninę pagalbą: Kauno technologijos universitetas, Vytauto didžiojo universitetas, Vilniaus universiteto Fizikos fakultetas, Fizinių ir technologijos mokslų centras ir kiti. Šiame straipsnyje kalbama apie branduolinių energetinių įrenginių saugos tyrimus Lietuvos energetikos institute (LEI).

Kaip jau buvo minėta anksčiau, termohidrauliniai procesai, vykstantys reaktoriaus aušinimo kontūre ir jį gaubiančiose patalpose, yra labai sudėtingi. Todėl pradžioje buvo bandoma šį uždavinį supaprastinti, išskaidant į komponentus: šilumos atidavimo nuo branduolinio kuro strypų rinklių procesai reaktoriaus aktyviojoje zonoje, šilumnešio tekėjimo reaktoriaus aušinimo kontūru hidraulika ir termohidrauliniai procesai vandeniugaru ir oru užpildytose patalpose. LEI mokslininkai šilumos pernešimo procesų tyrimus vykdė nuo pat instituto įkūrimo 1956 metais, tad ši patirtis jiems buvo geras pagrindas nagrinėjant procesus reaktoriuose. Pavyzdžiui, galima paminėti eksperimentinius ir skaitinius tyrimus strypų pluoštuose, kintamų šilumnešio srauto ir šilumos apkrovos galios sąlygomis. Palyginant eksperimentų metu nustatytus šilumnešio temperatūrų laukus strypų pluoštuose (branduolinio kuro strypų imitatoriuose) su apskaičiuotais naudojantis kvazistacionarinėmis šilumos mainų lygtimis, buvo nustatyti turbulencinės difuzijos koeficientai, leidžiantys uždaryti diferencialinę lygčių sistemą, aprašančią šilumnešio tekėjimą branduolinio kuro strypų rinklėse ir atlikti pereinamų procesų termohidraulinius skaičiavimus šiuose įrenginiuose.

Šilumos nuvedimo nuo branduolinio kuro strypų rinklių ir termohidraulinių procesų reaktoriaus aušinimo kontūre modelių kūrimas paprastai atliekamas etapais. Pirmajame etape sudėtinga pradinė termohidraulinių pernešimo procesų, vykstančių branduolinių

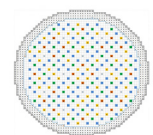


jėgainių elementuose, sistema yra supaprastinama norint eliminuoti neesminius efektus ir reiškinius. Kitame etape sudaroma modelio diferencialinių lygčių sistema, naudojant fundamentalius masės, impulso ir energijos tvarumo dėsnius priimtų fizikinių prielaidų ribose, idealizuojant pradinę sistemą. Paprastai šiame etape gaunama diferencialinių lygčių sistema būna ne tik sudėtinga, bet ir neuždara, daugiausia dėl statistinių vidurkinimo procedūrų naudojimo. Todėl neatskiriama matematinių modelių kūrimo dalis yra uždaros pernešimo lygčių sistemos sudarymas, naudojant uždarančiąsias priklausomybes, kurios įgalina tam tikra prasme atkurti informaciją, prarastą fizikinio modelio supaprastinimo bei diferencialinių lygčių vidurkinimo procesų metu. Šios uždarančiosios priklausomybės paprastai sudaromos remiantis eksperimentų rezultatais, todėl jos gali būti taikomos tik nurodytose ribose, tam tikriems tekėjimo režimams, temperatūros, slėgio intervalams. Yra nemažai šiuolaikinių sisteminių programų paketų, sprendžiančių uždarą diferencialinių pernešimo lygčių sistemą ir skirtų specialiai branduolinių reaktorių aušinimo kontūruose ar reaktorių gaubiančiuose patalpose vykstantiems termohidrauliniams procesams modeliuoti. Tačiau visi šie programų paketų yra sukurti korpusiniams suslėgto ar verdančio vandens branduoliniams reaktoriams. LEI mokslininkai pritaikė šiuos programų paketus ir patikrino jų veikimą Ignalinos AE veikusiems kanalinio tipo RBMK-1500 reaktoriams, kurių techniniai parametrai žymiai skiriasi nuo numatytų minėtuose programų paketuose. Sukurtų modelių tinkamumas buvo patikrintas naudojantis duomenimis ir apie integralinius, ir apie pavienius RBMK reaktorių efektus. Kaip integralinių efektų duomenys buvo panaudoti Ignalinos AE įvykusių pereinamųjų procesų matavimo duomenys. Ši atlikta patikra leido pasitikėti gautais deterministinės analizės rezultatais.

Siekiant tiksliau sumodeliuoti pereinamuosius procesus reaktoriaus aktyviojoje zonoje ir aušinimo kontūre, įvertinti „grįžtamuosius ryšius“, kai šilumnešio bei kuro tablečių temperatūra, garo kiekis dvifaziame sraute daro įtaką neutroniniams procesams, šiuo metu plačiai naudojami programų paketai, jungiantys šiuos skirtingus, bet vienas kitą įtakojančius reiškinius. LEI mokslininkai buvo sukūrę bendrą termohidraulinius ir neutroninius procesus RBMK-1500 reaktoriuje sujungiantį modelį, leidusį tiksliau modeliuoti pereinamuosius procesus Ignalinos AE reaktoriuose. Šie darbai leido sukurti ir įdiegti Ignalinos AE nepriklausomas reaktoriaus stabdymo sistemas.

Praeito amžiaus pabaigoje branduolinių jėgainių saugai įvertinti buvo pradėta taikyti „geriausio įverčio“ metodika, kurios sudedamąja dalimi yra neapibrėžtumo ir jautrumo analizė. Tokios analizės metu, siekiant įvertinti avarijos pasekmes, atliekami variantiniai skaičiavimai, kurie įgalina nustatyti atskirų parametru įtaką rezultatams, o rezultatų kreivių miškas nusako rezultatų neapibrėžtumo diapazoną. Pradžioje „geriausio įverčio“ metodas kartu su neapibrėžtumo ir jautrumo analize buvo taikomas tik termohidraulinių procesų avarijų su cirkuliacijos kontūro trūkiais analizės atvejams. LEI šio metodo taikymo sritis išplėsta – metodas pritaikytas termohidraulinei avarijų be šilumnešio praradimo ir avarijų lokalizacijos sistemos atsako analizei. Šio metodo taikymas pasiteisino, nes jis leidžia ne tik tiksliau nusakyti saugos lygį, bet ir nustatyti atskirų modeliavimo parametru įtaką galutiniams skaičiavimo rezultatams. Taip išrenkami labiausiai galutinį rezultatą lemiantys parametrai ir turimas modelis tobulinamas taip, kad ši įtaka sumažėtų. Dar veikiant Ignalinos AE, toks „geriausio įverčio“ metodas buvo taikomas pagrindžiant RBMK-1500 reaktorių saugą, licencijuojant atominę elektrinę. Šis metodas ir dabar taikomas daugelyje kitų, užsienyje veikiančių, branduolinių jėgainių saugos pagrindime.

Remiantis LEI mokslininkų 1996–2008 m. atliktais tyrimais, bendradarbiaujant su Ignalinos AE ir užsienio partneriais, buvo pasiūlyta, pagrįsta bei įdiegta daugelis Ignalinos AE



AVARIJŲ  
BRANDUOLINIUOSE  
ENERGETINIUOSE  
ĮRENGINIUOSE  
TYRIMAI IR JŲ  
VALDYMO METODŲ  
KŪRIMAS LIETUVOJE



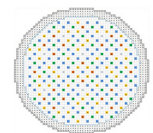
modernizacijų (pvz., papildoma reaktoriaus stabdymo sistema, kuri vėliau buvo išvystyta į antrą nepriklausomą stabdymo sistemą, reaktoriaus stabdymo ir avarinio aušinimo sistemų naujų algoritmų įdiegimas). Atliktos modernizacijos leido Ignalinos AE antrojo energetinio bloko reaktoriaus aktyviosios zonos pažeidimo tikimybę sumažinti nuo  $4 \cdot 10^{-4}$  iki  $5 \cdot 10^{-6}$ . Visi šie patobulinimai leido saugiai eksploatuoti Ignalinos AE reaktorius iki pat jų galutinio sustabdymo. LEI mokslininkų atliktas procesų reaktoriaus aušinimo kontūre ir jį gaubiančiose patalpose modeliavimas neprojektinių ir sunkių avarių atvejais leido sukurti avarių valdymo RBMK-1500 reaktoriams metodiką. Ignalinos AE antrajame energetiniame bloke sunkių avarių valdymo instrukcijos (parengtos minimos metodikos pagrindu) buvo įdiegtos, likus porai metų prieš jo galutinį sustabdymą. Reikia pažymėti, kad tokia metodika RBMK reaktoriams yra unikali. RBMK reaktorių kūrėjai Rusijoje tuo metu dar nebuvo sukūrę tokios sistemingos kanalinių reaktorių valdymo metodikos. Ši avarių valdymo metodika, kurioje įvertinti specifiniai šilumos pernešimo reaktoriaus aktyviojoje zonoje per grafito klojinį procesai, buvo pristatyta daugelyje tarptautinių mokslinių, reaktorių termohidraulikai skirtų konferencijų, kur buvo gerai įvertinta.

Galutiniai sustabdžius Ignalinos AE reaktorių (antrasis reaktorius sustabdytas 2009 m. pabaigoje), nebuvo pamiršta, kad potencialų pavojų kelia ir branduolinis kuras, esantis atidirbusio (panaudoto) kuro saugojimo baseinuose. Panaudotame branduoliniame kure, net jį išėmus iš reaktoriaus, vyksta branduolinio skilimo procesai, kurių metu išsiskiria šiluma. Avarija Fukušimos Daiiči AE parodė, kad praradus aušinimą, tokie atidirbusio branduolinio kuro baseinai gali kelti didelę grėsmę. Jei branduoliniame kure išsiskirianti šiluma nebus nuvedama, branduolinio kuro strypų rinklės perkais, branduolinio kuro tabletes gaubiantis apvalkalas praras hermetiškumą. Lietuvai tai buvo ypač aktualu, nes labai ilgą laiką atidirbusio kuro saugojimo baseinai buvo pilni prikrauti atidirbusių branduolinio kuro strypų rinklių (dabartiniu metu kuras jau baigiamas iškrauti iš panaudoto kuro baseinų ir toks didelis pavojus negresia). Ignalinos AE atidirbusio kuro baseinai nėra hermetiškose patalpose, todėl praradus vandenį ir kuro apvalkalų hermetiškumą, radioaktyvios medžiagos galėjo patekti į aplinką. LEI mokslininkai modeliavo šilumos nuvedimo praradimo avariją skirtingais programų paketais, kas leido ne tik įvertinti skirtingų skaitinių modelių ypatybes, bet ir išvengti modeliavimo klaidų. LEI atlikti skaitiniai tyrimai aktualūs bet kuriai atominę elektrinę turinčiai šaliai, nes atidirbusio kuro baseinai yra kiekvienoje jėgainėje.

2019 m. kartu su VĮ Ignalinos atominė elektrinė LEI mokslininkai vykdė mokslo tiriamąjį projektą, kurio tikslas buvo atlikti galimų branduolinių ir radiologinių avarių Ignalinos AE branduoliniuose objektuose (panaudoto branduolinio kuro baseinuose, išardomame reaktoriuje, radioaktyvių medžiagų saugyklose) padarinių analizę. Šis projektas – tai unikalus, paremtas Tarptautinės atominės energijos agentūros rekomendacijomis ir neturintis analogų užsienyje kompleksinis darbas, kuris apėmė keletą sričių su skirtingais skaitinio modeliavimo metodais:

- konstrukcijų pažeidimo skaitinis modeliavimas ir analizė;
- gaisro skaitinis modeliavimas ir analizė;
- šilumos nuvedimo skaitinis modeliavimas ir analizė;
- radioaktyvių medžiagų išsiskyrimo frakcijos įvertinimas;
- radionuklidų išmetimo į aplinką vertinimas;
- radionuklidų sklaidos ir radiologinio poveikio vertinimas.

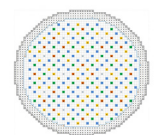
Darbe detalai išnagrinėtos postuluotos branduolinės ir radiologinės avarijos, susijusios su ekstremaliu seisminiu įvykiu bei lėktuvo sudužimu ant Ignalinos AE. Šiems darbams buvo pritaikyti pažangiausi mokslinių tyrimų metodai, naudoti naujausi ir pažangiausi skaitinio



AVARIJŲ  
BRANDUOLINIUOSE  
ENERGETINIUOSE  
ĮRENGINIUOSE  
TYRIMAI IR JŲ  
VALDYMO METODŲ  
KŪRIMAS LIETUVOJE

modeliavimo programų paketai, kurių patikra buvo anksčiau pagrįsta ir ta informacija jau buvo pristatyta mokslo straipsniuose. Šio darbo rezultatas – buvo sukurta unikali analizės metodika, tinkanti ne tik Ignalinos AE, bet ir bet kokiai uždaramai lengvojo vandens reaktorių elektrinei.

Dabartiniu metu LEI mokslininkai toliau vykdo avarių branduoliniuose energetiniuose įrenginiuose tyrimus ir plėtoja jų valdymo metodus, dalyvaudami tarptautiniuose Europos Sąjungos H2020 projektuose. Norėtusi pažymėti anksčiau vykdytus projektus: IVMR – „Sunkiųjų avarių valdymo strategijos, pagrįstos išsilydžiusios aktyviosios zonos sulaikymu reaktoriaus korpuse, taikymas dabartinėms ir ateities branduolinėms jėgainėms“, BRILLIANT – „Baltijos regiono iniciatyva dėl ilgalaikių branduolinių technologijų“, FASTNET – „Branduolinių avarinių situacijų greitas prognozavimas“, INCEFA-PLUS – „Atominių elektrinių saugos padidinimas, padengiant trūkumus, įvertinant medžiagų nuovargį“. Taip pat dabar vykdomus H2020 projektus: MUSA – „Sunkiųjų avarių neapibrėžtys ir jų valdymas“, R2CA – „Radiologinių pasekmių sumažinimas projektinėms ir išplėstinėms projektinėms avarijoms“, ELSMOR – „Mažų modulinų reaktorių licencijavimas Europoje“ ir kiti. LEI mokslininkų pasiekti rezultatai ir sukaupta patirtis įneša svarų indėlį didinant Lietuvos mokslininkų kompetenciją, kuri būtina siekiant naujų inovacijų energetikos srityje. Anksčiau vykdyti ir dabar vykdomi tyrimai ir aktyvus bendradarbiavimas su pagrindiniais Europos mokslo centrais suteiks galimybę ir ateityje dalyvauti kuriant naujas pažangiausias technologijas.



AVARIJŲ  
BRANDUOLINIUOSE  
ENERGETINIUOSE  
ĮRENGINIUOSE  
TYRIMAI IR JŲ  
VALDYMO METODŲ  
KŪRIMAS LIETUVOJE