

# FEMAXI-6 programų paketo taikymas modeliuojant procesus, vykstančius RBMK-1500 šilumą išskiriančiuose elementuose

**Aušra Jusevičiūtė,**

**Tadas Kaliatka,**

**Algirdas Kaliatka,**

**Eugenijus Ušpuras**

*Branduolinių įrenginių saugos  
laboratorija, Lietuvos  
energetikos institutas,  
Breslaujos g. 3, LT-44403 Kaunas  
El. paštas: ausinuke@mail.lei.lt*

Ignalinos atominė elektrinė (AE) yra vienintelė Lietuvoje atominė elektrinė, kurioje veikia kanalinio tipo verdančio vandens branduolinis reaktorius su grafito lėtikliu RBMK-1500. Iki šiol RBMK-1500 reaktoriaus šilumą išskiriančiuose elementuose (ŠIELuose) vykstantys procesai buvo analizuojami Rusijos specialistų. Pastaruoju metu Lietuvos energetikos instituto specialistai taip pat pradėjo modeliuoti Ignalinos AE reaktorių ŠIELuose vykstančius procesus. Modeliavimams pasirinktas FEMAXI-6 programų paketas, kuris leidžia atlikti išsamesnius ŠIELuose vykstančių procesų skaičiavimus, lyginant su kitais programų paketais. RBMK-1500 ŠIELo struktūra bei kuro ir apvalkalo medžiagos skiriasi nuo korpusinių reaktorių, todėl FEMAXI-6 programų paketas buvo pritaikytas (įvestos ŠIELo tabletės ir apvalkalo šiluminės savybės) RBMK-1500 ŠIELuose vykstantiems procesams modeliuoti.

Pritaikius FEMAXI-6 programų paketą buvo sumodeliuoti ŠIELuose vykstantys procesai normalios eksploatacijos metu. Skaičiavimų rezultatai palyginti su Kurčiatovo instituto mokslininkų skaičiavimų rezultatais. Palyginimas parodė, kad FEMAXI-6 programų paketo versija su įtrauktomis RBMK-1500 ŠIELo tabletėmis ir apvalkalo šiluminėmis savybėmis ir sukurtas modelis yra tinkami RBMK-1500 ŠIELuose vykstantiems procesams modeliuoti.

Naudojantis pakeistu FEMAXI-6 programų paketu, išnagrinėta reaktyvumo pokyčius sukelianti avarija, kai per klaidą reaktoriaus aktyviosios zonos centre ištraukiamas valdymo strypas. Tai sukelia žymius lokalinius galios padidėjimus greta esančiuose kuro kanaluose ir kartu, ŠIELo parametrų pokyčius. FEMAXI-6 programų paketo pagalba atliktos analizės rezultatai parodė, kad, nepaisant trumpam laikui viršijamos nustatytos leistinos linijinės galios, RBMK ŠIEL'ai išlieka nepažeisti ir galimas tolesnis jų eksploatavimas.

**Raktažodžiai:** šilumą išskiriantis elementas, FEMAXI-6, šiluminis laidis, savitoji šiluma, reaktyvumo pokyčius sukelianti avarija

## 1. ĮVADAS

Ignalinos atominė elektrinė (AE), kurią sudaro du blokai, pastatyti 1983 ir 1987 m., yra vienintelė Lietuvoje atominė elektrinė. Abiejuose blokuose yra įrengti kanalinio tipo verdančio vandens branduoliniai reaktoriai su grafito lėtikliu RBMK-1500 [1]. Ignalinos AE pirmasis blokas buvo sustabdytas 2004 m., o antrojo bloko eksploataciją numatyta nutraukti 2009 m. pabaigoje.

Ignalinos AE eksploatacijos pradžioje buvo naudojamas 2 %  $U^{235}$  įsodrinimo branduolinis kuras. Šiuo metu naudojamas 2,4 %, 2,6 % ir 2,8 %  $U^{235}$  įsodrinimo branduolinis kuras su išdegančiu sugėrikliu erbiu. Iki šiol RBMK-1500 reaktoriaus šilumą išskiriančiuose elementuose (ŠIEL) vykstantys procesai buvo analizuojami Rusijoje NIKIET ar Kurčiatovo instituto specialistų (NIKIET institutas – pagrindinis RBMK reaktoriaus projektuotojas), naudojančių pačių sukurtus programų paketus. Lietuvos energetikos instituto (LEI) specialistai pastaruoju metu taip pat pradėjo modeliuoti Ignalinos AE reaktorių ŠIELuose vykstančius procesus. Šiems procesams modeliuoti pasirinktas FEMAXI-6 programų paketas [2].

FEMAXI-6 programų paketas, skirtas modeliuoti procesams, vykstantiems korpusiniuose reaktoriuose naudojamuose ŠIELuose. Kaip parodyta įvairių autorių darbuose [3–7], FEMAXI-6 programų paketas gerai tinka verdančio vandens (BWR) ir kitų korpusinių lengvojo vandens (LWR) reaktorių ŠIELams modeliuoti. Šiuose darbuose nagrinėjami ŠIELe vykstantys įvairūs procesai normalios eksploatacijos ir pereinamųjų procesų (dažniausiai staigių galios pokyčių) metu. FEMAXI-6 programų paketas leidžia gauti išsamesnius skaičiavimų rezultatus, palyginti su kitais programų paketais [8] (pvz., TESPА–ROD [9], FUELSIM [10], TRANSURANUS [11], RAPTA [12], PULSAR [13]). Todėl LEI tyrimams buvo pasirinktas būtent šis programų paketas.

RBMK-1500 ŠIELų branduolinis kuras ir apvalkalo medžiagos bei struktūra skiriasi nuo korpusinių reaktorių. Į šiuos skirtumus būtina atsižvelgti sudarant RBMK-1500 ŠIELo modelį. Todėl FEMAXI-6 programų paketo algoritmas buvo pakoreguotas, įvestos RBMK-1500 ŠIELo savybės: kuro tabletės ir ŠIELo apvalkalo šiluminiai laidžiai ir savitosios šilumos priklausomybės nuo temperatūros. Toliau darbe aprašyta, kaip atlikus minėtus pakeitimus buvo sukurtas modelis tolesnei RBMK-1500

ŠIELų analizei. Tokios analizės pavyzdys pateiktas lokalinio galios padidėjimo efekto grupėje kuro kanalų tyrimas. Šis efektas sukelia kuro kanaluose patalpintų ŠIELų temperatūros ir kitų parametrų pokyčius.

## 2. RBMK-1500 ŠILUMĄ IŠSKIRIANTIS ELEMENTAS

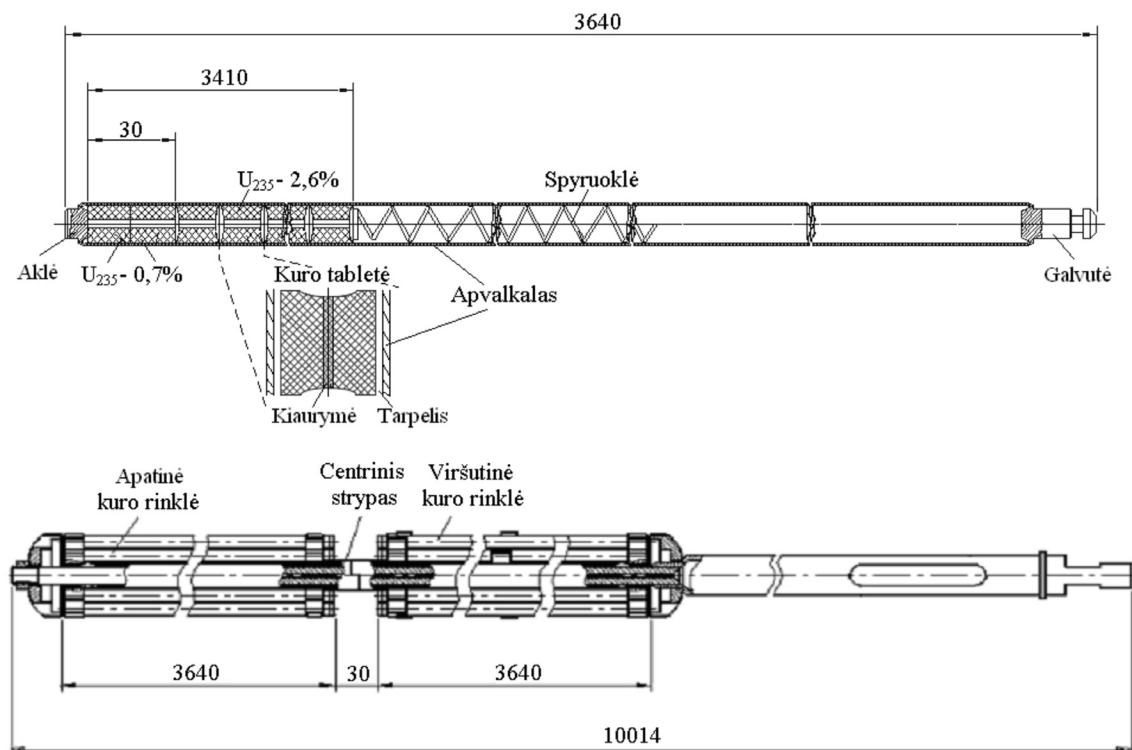
Kaip minėta, Ignalinos AE RBMK-1500 reaktoriuose naudojamas 2,0 % be erbio ir 2,4 %, 2,6 %, 2,8 % įsodrinimo kuras su erbio sugėrikliu. Erbio kiekis branduoliniame kure priklauso nuo kuro įsodrinimo – 2,4 % įsodrinimo kure yra 0,41 % erbio, 2,6 % įsodrinimo – 0,5 % erbio ir 2,8 % įsodrinimo – 0,6 % erbio. Branduolinis kuras supresuotas į 11,5 mm skersmens ir 15 mm aukščio tabletes [1]. Tablečių forma pritaikyta intensyviai, aukštos temperatūros darbo režimui. Siekiant sumažinti kuro tablečių stulpo terminį išsiplėtimą ir termomechaninę sąveiką su apvaskalu, tabletės turi sferinius įdubimus. Dėl tablečių centrinėje ašyje esančios 2 mm kiaurymės mažėja temperatūra centre ir lengviau išsiskiria tabletėje susidariusios dujos eksploatacijos metu. Kad nebūtų staigaus energijos išsiskyrimo impulso, ŠIELo gale prie aklės talpinamos mažiau įsodrintos (iki 0,7 % U235) kuro tabletės. Jos vadinamos ekranuojančiomis (1 pav.).

Kuro tabletės yra patalpintos į apvaskalą, kurio išorinis skersmuo yra 13,6 mm, sienelės storis 0,9 mm ir aktyvus ilgis 3410 mm (1 pav.). Kuro apvaskalas yra pagamintas iš cirkonio ir niobio lydinio (Zr + 1 % Nb), turinčio geras antikoroazines savybes ir mažą neutronų absorbcijos koeficientą [1]. Tarpelis tarp UO<sub>2</sub> tablečių ir apvaskalo yra ~0,1 mm. Normalios eksploatacijos ir pereinamųjų procesų metu tarpelio dydis kinta dėl

ŠIELė vykstančių procesų. Gamybos metu ŠIEL'as yra pripildomas helio dujų, kurių slėgis yra 0,5 MPa. Ašine kryptimi kuro tabletes prilaiko spyruoklė. Kuro išdegimas ribojamas saugos kriterijais, susijusiais su garo reaktyvumo koeficientu. Vidutinis projektinis išdegimas 2 % įsodrinimo kuro be erbio yra 22,5 MWd/kgU [1]. Panaudojus sugėriklių erbį ir padidinus kuro įsodrinimą pasiekiamas didesnis išdegimas. Pavyzdžiui, naudojant 2,6 % įsodrinimo kurą su 0,5 % sugėrikliu erbiu, galima pasiekti 25 MWd/kgU išdegimą [1].

RBMK reaktorių kuro tablečių ir ŠIELų konstrukcija panaši į korpusinių reaktorių. Skirtumai išryškėja lyginant kuro rinkles ir kuro kasetes, o ne atskirus ŠIEL'us. RBMK-1500 reaktoriuose kuro kasetės talpinamos į kuro kanalus, kurių vidinis skersmuo yra 80 mm ir aktyviosios zonos aukštis 7 m. Kad pasiektų reikiamą aktyviosios zonos aukštį, RBMK-1500 kuro kasetė susideda iš dviejų viena ant kitos uždėtų kuro rinklių (1 pav.). Kiekvienoje kuro rinklėje yra 18 ŠIELų, kurie išdėstomi dviem žiedais apie centrinį laikantįjį vamzdį. Centrinis vamzdis yra 15 mm išorinio skersmens ir 1,25 mm sienelės storio, gaminamas iš Zr + 2,5 % Nb lydinio. Kuro rinklės sujungtos į kasetę. Abiejų rinklių ŠIELų galai su ekranuojančiomis tabletėmis atsukti į kasetės vidurį (1 pav.). Kasetės viduryje nevyksta grandininė reakcija ir mažėja neutronų srautas, todėl tokia konstrukcija leidžia sumažinti atsiradusią neutronų srauto „duobę“. Abiejų rinklių ŠIELų galai su tabletėmis spaudžiančiomis spyruoklėmis yra kuro kasetės apačioje ir viršuje.

Kuro kasetė yra aušinama vandens–garo mišiniu. Į kanalą įtekantis vanduo yra nežymiai peraušintas (vanduo į kanalą įteka 260–266 °C temperatūros), o kanalo išėjime garas sudaro 23–29 %. Apatinės kuro rinklės karkasas sudarytas iš gali-



1 pav. RBMK-1500 reaktoriaus šilumą išskiriantis elementas ir kuro kasetė [1]

nės ir 10 distancionuojančių rėtinių. Rėtinės yra pagamintos iš nerūdijančio plieno ir pritvirtintos prie centrinio vamzdžio 360 mm atstumu viena nuo kitos. Viršutinė rinklė turi taip pat 10 distancionuojančių rėtinių, išdėstytų kas 360 mm. Papildomos rėtinės-intensifikatoriai viršutinėje rinklėje išdėstytos kas 120 mm, skirtos padidinti šilumos mainų intensyvumui [1].

### 3. FEMAXI-6 PROGRAMŲ PAKETAS IR ŠILUMĄ IŠSKIRIANČIO ELEMENTO MODELIS

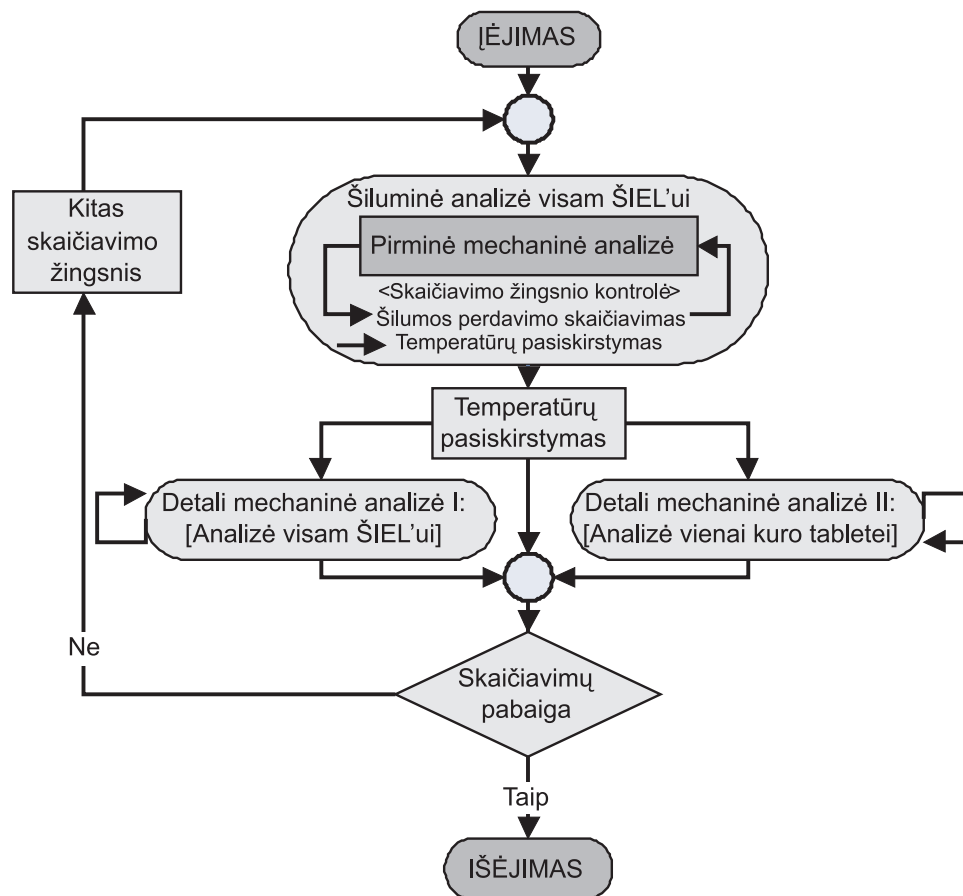
ŠIELė vykstantiems procesams modeliuoti buvo pasirinktas FEMAXI-6 programų paketas, nes šiuo programų paketu gaunami išsamesni skaičiavimų rezultatai [8]: gali būti atlikta viso ŠIELo analizė per visą jo darbo laikotarpį arba vietinė elgsenos analizė atskirai ŠIELo daliai. Kita svarbi priežastis, lėmusi šio programų paketo pasirinkimą, yra tai, kad jis yra atviros architektūros, t. y. jo algoritmą galima koreguoti.

FEMAXI-6 programų paketas skirtas viename ŠIELė eksploatacijos ir avarijų metu vykstantiems procesams modeliuoti. FEMAXI-6 susideda iš dviejų dalių – šiluminės ir mechaninės analizės [2] (2 pav.). Šiluminė analizė atliekama visam ŠIEL'ui. Šiluminės analizės rezultatai toliau panaudojami mechaninei analizei, kuri yra padalyta dar į dvi dalis: pirminė mechaninė viso ŠIELo analizė ir išsami mechaninė analizė pasirinktame ŠIELo segmente.

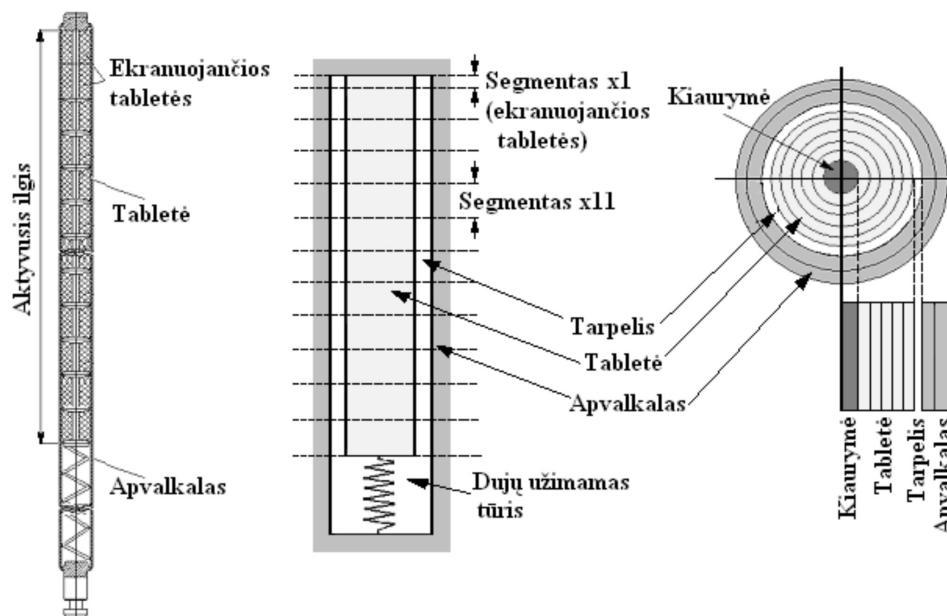
Šiluminės analizės metu skaičiuojamas temperatūrų pasiskirstymas ŠIELė, dujinių skilimo produktų išsiskyrimas iš kuro tablečių, slėgio kitimas tarpelyje tarp tablečių ir apvalkalo, šilumos perdavimas nuo tablečių į ŠIELo apvalkalą, šilumos perdavimas nuo apvalkalo šilumnešiu, temperatūros deformacijos ašies ir spindulio kryptimi, šiluminis plėtimasis ir t. t.

Mechaninės analizės dalyje yra skaičiuojami įtempimai tabletėje ir apvalkale bei atliekama tablečių–apvalkalo mechaninės sąveikos analizė, ŠIELo apvalkalo ir tablečių glaudžioji deformacija, apvalkalo oksidacija, tablečių sutrūkinėjimai, tablečių granuliu persislinkimas, sutankėjimas, išbrinkimas ir kt.

Analizei buvo pasirinktas ŠIEL'as iš apatinės kuro rinklės, kur išsiskiria daugiausiai šilumos. Modelyje ŠIEL'as buvo suskirstytas į 12 segmentų per visą aktyvų ilgį. Šiuose segmentuose aprašomos kuro tabletės („Segmentas  $\times 11''$ , 3 pav.). Vienas segmentų skirtas ekranuojančioms tabletėms (iki 0,7 %  $U^{235}$ ) aprašyti („Segmentas  $\times 1''$ , 3 pav.). Kiekviename segmente yra aprašomi tablečių skersmuo ir aukštis, tablečių centrinės kiaurymės skersmuo, išdrinimas, tablečių tankis ir kiti parametrai. Atskirai modeliuojamas ŠIELė esantis dujų tūris, sudėtis ir slėgis. Taip pat aprašomas ŠIELo apvalkalas (apvalkalo geometriniai matmenys). Sudarant modelį aprašoma linijinės galios, šilumnešio temperatūros, greičių neutronų srauto, šilumnešio slėgio, šilumnešio greičio arba šilumnešio masės srauto greičio priklausomybė nuo laiko arba nuo išdegimo. Taip pat kiekviename skaičiavimo žingsnyje turi būti aprašytas linijinės galios profilis.



2 pav. FEMAXI-6 programų paketo loginė schema [3]



3 pav. RBMK-1500 ŠIELo apatinės kuro rinklės modelis

#### 4. FEMAXI-6 PROGRAMŲ PAKETO PRITAIKYMAS

Šiame skyrelyje aptariamos RBMK-1500 ŠIELo savybės (kuro tabletės ir ŠIELo apvalkalo šiluminiai laidžiai ir savitosios šilumos priklausomybės nuo temperatūros), kurios buvo naujai įtrauktos į FEMAXI-6 programų paketą.

##### 4.1. Kuro tablečių šiluminės savybės

FEMAXI-6 programų pakete yra naudojami keli šiluminio laidžio modeliai. Šie modeliai skirti  $UO_2$ ,  $UO_2 + Gd$  ir MOX (plutonio ir natūralaus arba branduoliniame reaktoriuje panaudoto urano mišinys) kurui modeliuoti. RBMK-1500 tipo reaktoriuje naudojamas  $UO_2$  kuras su išdegančiu sugėrikliu erbiu. Programų pakete  $UO_2$  kuro tablečių modeliuoti yra skirti šie modeliai: Hirai, Modified Hirai, Forsberg, Ohira & Itagaki, Matro-Version09, Wasington Hirai, Weisnack (Halden) Hirai, Weisnack 4A-Revised (Halden) Hirai, Kjaer-Pedersen, Lucuta, Matzke & Hastings, Kinoshita [2]. Tiriant šiuos kuro tablečių šiluminio laidžio modelius, buvo pastebėta, kad juos sąlyginai galima suskirstyti į dvi grupes. Šios grupės toliau straipsnyje vadintos A ir B.

A grupės modeliuose kuro tablečių šiluminio laidžio reikšmė visame temperatūros intervale mažėja didėjant temperatūrai. Didžiausias šiluminio laidžio reikšmių mažėjimas yra intervale  $T < 1400$  °C, o aukštesnėse temperatūrose šis mažėjimas yra lėtesnis. B grupės modeliuose šiluminio laidžio reikšmės mažėja temperatūrų intervale  $T < 1600$  °C, tačiau pradeda didėti esant aukštesnėms temperatūroms. Tokia  $UO_2$  kuro tablečių šiluminio laidžio elgsena priklauso nuo urano dioksido medžiagos savybių: žemesnėje temperatūroje ( $T < 1600$  °C)  $UO_2$  kure pasireiškia dielektriko savybės ir šiluma pernešama fononais, t. y. dėl mechaninės gardelės vibracijos. Tuo tarpu aukštesnėse temperatūrose ( $T > 1600$  °C) laisvi elektronai vis labiau sužadunami ir dalyvauja šilumos pernešimo procesuose, kaip metaluose, taigi šiluminis laidis didėja didėjant temperatūrai.

Normalios eksploatacijos ir pereinamųjų procesų metu kuro tablečių temperatūra dažniausiai nepasiekia 1600 °C. Esant tokiai temperatūrai elektronai neturi didelės įtakos šilumos pernešimui, ir A tipo modeliai yra tinkami modeliuoti kuro tablečių šiluminėms savybėms, tačiau jei reikalinga aukštatemperatūrinė ŠIELo analizė, B grupės modeliais gaunami tikslesni rezultatai.

2,4 % ir 2,8 %  $U^{235}$  išsodrino kuro tablečių su išdegančiu sugėrikliu erbiu šiluminio laidžio reikšmės RBMK projektuotojų nustatytos eksperimentiniu būdu [14, 15]. Atsižvelgiant į šių eksperimentinių matavimų rezultatus kuro tablečių šiluminio laidžio priklausomybė nuo temperatūros gali būti išreikšta polinomine išraiška:

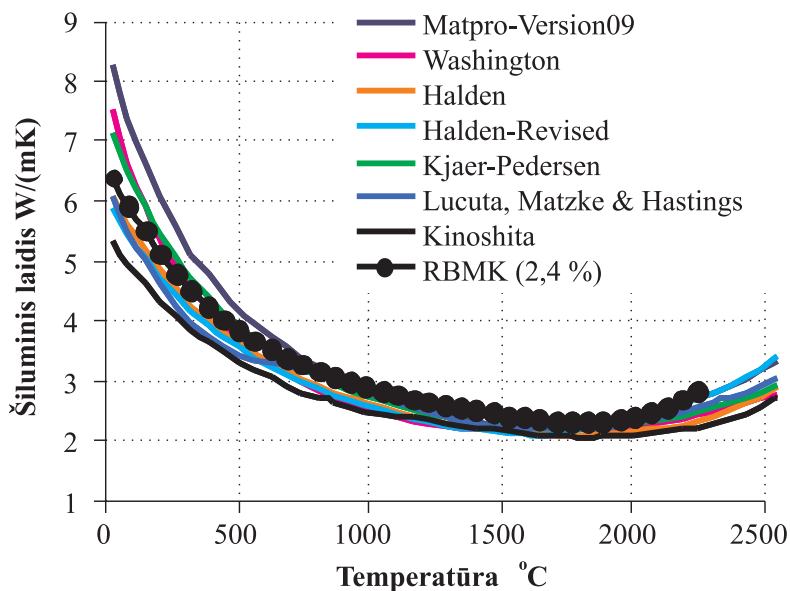
$$\lambda_{2,4\%} = 7,65 \cdot 10^{-13} \cdot T^4 - 3,948 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 + 8,1 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 8,62 \cdot 10^{-3} \cdot T + 6,6, \quad (1)$$

$$\lambda_{2,8\%} = 3,82 \cdot 10^{-13} \cdot T^4 - 2,53 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 + 6,60 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 7,98 \cdot 10^{-3} \cdot T + 6,20; \quad (2)$$

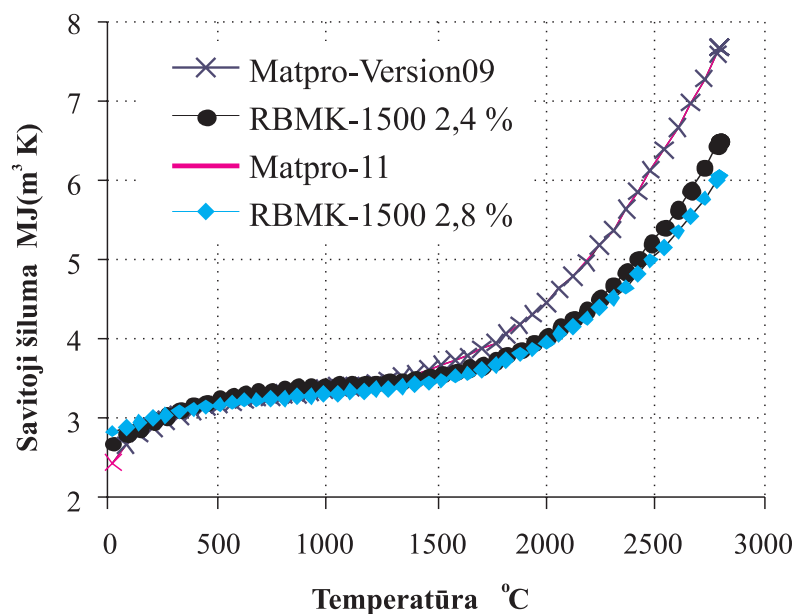
čia  $\lambda_{2,4\%}$  ir  $\lambda_{2,8\%}$  – 2,4 % ir 2,8 %  $U^{235}$  išsodrino kuro su erbiu šiluminis laidis  $W / (m \cdot K)$ ;  $T$  – kuro temperatūra °C.

Buvo palyginta RBMK-1500 kuro tablečių 2,4 %  $U^{235}$  išsodrino su erbiu šiluminio laidžio priklausomybė nuo temperatūros su FEMAXI-6 programų pakete naudojamais šiluminio laidžio modeliais (4 pav.). Skaičiavimuose buvo priimta vidutinė kuro išdegimo reikšmė (14 MWd/kg $UO_2$ ). Pateiktame paveiksle matyti, kad RBMK-1500 kuro tablečių šiluminio laidžio priklausomybė nuo temperatūros atitinka B grupės pobūdį, t. y. aukštesnėse temperatūrose šiluminis laidis pradeda didėti.

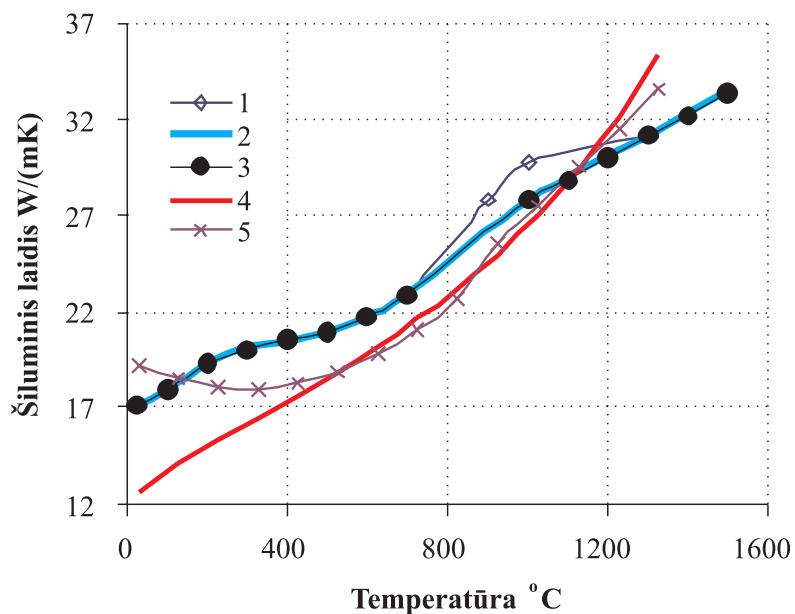
FEMAXI-6 programų paketo aprašyme [2] yra nurodomi du kuro tablečių savitosios šilumos modeliai (Matpro-11 ir Matpro-Version09). Palyginus šiuos modelius paaiškėjo, kad Matpro-11 modelis yra toks pat kaip ir Matpro-Version 09, tačiau Matpro-11 modelis yra skirtas ne tik  $UO_2$ , bet ir MOX kurui.



4 pav. RBMK-1500 kuro tabletės šiluminio laidžio ir FEMAXI-6 modelių palyginimas



5 pav. Kuro savitoji šiluma: Matpro-Version09, Matpro-11 ir RBMK-1500 kuro (2,4%  $U^{235}$  ir 2,8%  $U^{235}$  įsodrinimo su erbiu) savitosios šilumos polinominės aproksimacijos (3), (4)



6 pav. Apvalkalo šiluminis laidis: 1 – eksperimentiniai duomenys [17, 18], 2 – eksperimentiniai duomenys [19], 3 – eksperimentiniais duomenimis paremtas koreliacinis modelis [19], 4 – Matpro-Version09 modelis, 5 – Peletskio modelis [21]

RBMK-1500 reaktoriuje naudojamo kuro savitosios šilumos matavimai buvo atlikti RBMK projektuotojų [14, 15]. Atsižvelgiant į šiuos matavimus, savitosios šilumos priklausomybė nuo temperatūros buvo išreikšta polinomine išraiška:

$$C_{p2,4\%} = 5,08 \cdot 10^{-10} \cdot T_k^4 - 2 \cdot 10^{-6} \cdot T_k^2 + 2,8 \cdot 10^{-3} \cdot T_k + 2,0386, \quad (3)$$

$$C_{p2,8\%} = 3,65 \cdot 10^{-10} \cdot T_k^3 - 1,32 \cdot 10^{-6} \cdot T_k^2 + 1,8 \cdot 10^{-3} \cdot T_k + 2,4; \quad (4)$$

čia  $C_{p2,4\%}$  ir  $C_{p2,8\%}$  – 2,4 % ir 2,8 %  $U^{235}$  išsodinimo kuro su erbiu savitoji šiluma MJ / (m<sup>3</sup>K);  $T_k$  – kuro temperatūra K.

Pagal (3) ir (4) formules apskaičiuotos savitosios šilumos reikšmės buvo palygintos su FEMAXI-6 programų pakete esančiais Matpro-Version09 ir Matpro-11 modeliais (5 pav.). Paveiksle matyti, kad savitosios šilumos reikšmės tiek RBMK-1500 kuro tabletėms, tiek naudojamos standartiniame FEMAXI-6 programų pakete temperatūros intervale  $T < 1600$  °C yra panašios, didesni pokyčiai atsiranda tuomet, kai kuro tabletės temperatūra viršija 1600 °C.

RBMK kuro šiluminio laidžio ir savitosios šilumos priklausomybės ((1), (2) ir (3), (4) formulės) buvo įvestos į FEMAXI-6 programų paketą. Naujų savybių įtaka skaičiavimo rezultatams pateikta 5 skyriuje.

#### 4.2. Apvalkalo šiluminės savybės

FEMAXI-6 programų pakete naudojamas Matpro-Version09 modelis yra skirtas ŠIELo apvalkalo šiluminio laidžio priklausomybei nuo temperatūros apskaičiuoti. Šis modelis skirtas modeliuoti apvalkalą, pagamintą iš cirkalojaus. Modelis naudojamas dideliame temperatūrų intervale – nuo kambario temperatūros iki apvalkalo lydymosi temperatūros [16].

RBMK-1500 reaktoriuje ŠIELo apvalkalas gaminamas iš Zr + 1 % Nb lydinio. Tokio tipo apvalkalo šiluminio laidžio reikšmės buvo išmatuotos [17, 18]. Literatūroje [19] yra pateikta cirkonio ir 1 % niobio lydinio šiluminio laidžio priklausomybės nuo temperatūros aproksimacija:

$$\lambda = \begin{cases} 9,5 \cdot 10^{-3} \cdot (T_k - 273) + 17,01, & 293 \leq T_k \leq 373 \text{ K}; \\ 10,3848 \cdot (T_k - 273)^{0,12157} \cdot \exp(-0,115 \cdot 10^{-3} \cdot (T_k - 273)), & 373 < T_k \leq 673 \text{ K}; \\ 167,88 \cdot (T_k - 273)^{-0,429} \cdot \exp(1,169 \cdot 10^{-3} \cdot (T_k - 273)), & 673 < T_k \leq 1273 \text{ K}; \\ 0,0111 \cdot T_k + 13,663, & T_k > 1273 \text{ K}; \end{cases} \quad (5)$$

čia  $\lambda$  – apvalkalo (Zr + 1 % Nb) šiluminis laidis W / (mK),  $T_k$  – temperatūra K.

Labai panaši koreliacinė formulė pateikta ir darbe [20]. V.E. Peletskis 1994 m. pristatė Zr + 1 % Nb lydinio šiluminio laidžio formulę, kurią išvedė iš atliktų šiluminio laidžio matavimų per visą ŠIELo ilgį [21].

Kaip pavaizduota 6 paveiksle, 4 kreivė (Matpro-Version09 modelis) išsiskiria iš kitų. Lyginant 4 ir 3 (eksperimentiniai duomenys [19]) kreives, matyti, kad procentinė paklaida siekia 25 %. Matpro-Version09 modelis neįvertina perėjimo iš  $\alpha$  į  $\beta$  fazę metu susidariusios energijos. Kaip pavaizduota 6 paveiksle,

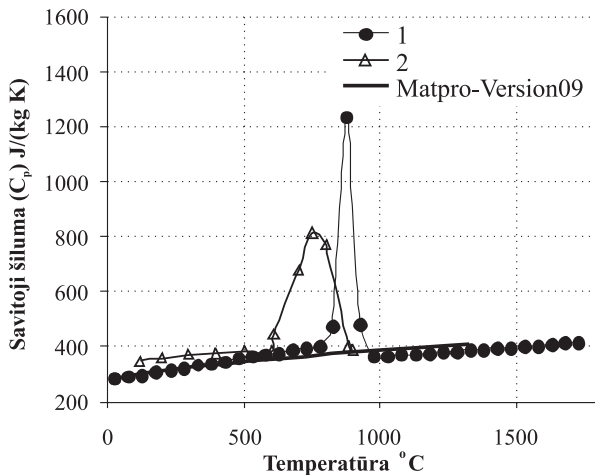
cirkonio ir 1 % niobio lydinio eksperimentinės reikšmės [17–19] yra panašios temperatūrų intervale  $T < 700$  °C. Temperatūrų intervale  $700 < T < 1300$  °C eksperimentų metu nustatytos reikšmės [17–19] išsiskiria, tačiau temperatūrai pasiekus 1300 °C eksperimentinės reikšmės vėl sutampa tarpusavyje. Peletskio gauti rezultatai [21] yra panašūs su pateiktais [19] literatūroje. Tačiau eksperimentiniai duomenys, pateikti [19] literatūroje, dėl savo eksperimentinių taškų gausos išsiskiria iš kitų eksperimentinių matavimų aprašymų. Dėl to buvo padaryta prielaida, kad šie eksperimentiniai duomenys yra tinkamiausi cirkonio ir 1 % niobio lydinio šiluminio laidžio priklausomybei nuo temperatūros išreikšti ir šiuos eksperimentinius duomenis aproksimuojanti (5) formulė buvo įvesta į FEMAXI-6 programų paketą.

Kaip ir šiluminis laidis, kuro apvalkalo savitosios šilumos priklausomybė nuo temperatūros FEMAXI-6 programų pakete modeliuojama naudojant Matpro-Version09 modelį. Šis modelis yra skirtas modeliuoti ŠIELo apvalkalui, pagamintam iš cirkalojaus. Pažymėtina, kad savitosios šilumos reikšmėms didelę įtaką turi cirkonio perėjimo iš  $\alpha$  į  $\beta$  fazę energija, kai temperatūra yra didesnė už 600 °C. Taip pat esant aukštai temperatūrai savitosios šilumos reikšmės labai priklauso nuo temperatūros kitimo greičio. Savitosios šilumos nustatymo eksperimentai, kuriuose buvo atsižvelgta į  $\alpha$  ( $T < 610$  °C) ir  $\beta$  ( $T > 880$  °C) fazes, taip pat į  $\alpha$ – $\beta$  fazių perėjimo energiją, pateikti literatūroje [20]. Šie savitosios šilumos duomenys buvo nustatyti esant mažam Zr + 1 % Nb lydinio temperatūros kitimo greičiui. Todėl tabletės analizei šiuos nustatytus savitosios šilumos duomenis rekomenduojama naudoti, kai reaktorius dirba normaliu režimu ir apvalkalo temperatūros pokyčiai yra nežymūs. Siekiant nustatyti savitosios šilumos priklausomybę nuo temperatūros plačiame temperatūrų kitimo intervale (nuo kambario temperatūros iki 1800 °C) ir esant įvairiems temperatūros kitimo greičiams, buvo atlikti išsamesni ir tikslesni tyrimai. Šie Zr + 1 % Nb lydinio savitosios šilumos priklausomybės nuo temperatūros eksperimentai buvo paskelbti Peletskio ir Petrovos [22]. Eksperimentų rezultatams gauti buvo taikomas *subsecond pulse-heating* metodas. Šiuos eksperimentinius duomenis galime apibendrinti išraiška:

$$C_p = \begin{cases} 5 \cdot 10^{-7} \cdot T_k^2 + 0,1592 \cdot T_k + 237,3, & 298 \leq T_k \leq 1050 \text{ K}; \\ 1,42 \cdot T_k - 108,6, & 1050 < T_k \leq 1100 \text{ K}; \\ 15,28 \cdot T_k - 16332, & 1100 < T_k \leq 1150 \text{ K}; \\ -15,2 \cdot T_k + 18720, & 1150 < T_k \leq 1200 \text{ K}; \\ -2,32 \cdot T_k + 3264, & 1200 < T_k \leq 1250 \text{ K}; \\ -2 \cdot 10^{-6} \cdot T_k^2 + 0,0712 \cdot T_k + 277,26, & 1250 < T_k \leq 2000 \text{ K}; \end{cases} \quad (6)$$

čia  $C_p$  – apvalkalo savitoji šiluma MJ / (m<sup>3</sup>K);  $T_k$  – apvalkalo temperatūra K.

Kaip matyti 7 paveiksle pavaizduotos ŠIELo apvalkalo savitosios šilumos priklausomybės nuo temperatūros grafike, Matpro-Version09 išsiskiria iš kitų priklausomybių, kurios paremtos eksperimentais [20, 22]. Matpro-Version09 modelis skirtas cirkalojui ir neįvertina  $\alpha$ – $\beta$  fazių perėjimo energijos. Peletskio ir Petrovos rekomendacijas [22] aprašanti (6) formulė yra tinkamiausia modeliuoti Zr + 1 % Nb lydinį, todėl ši formulė buvo įtraukta į FEMAXI-6 programų paketą.

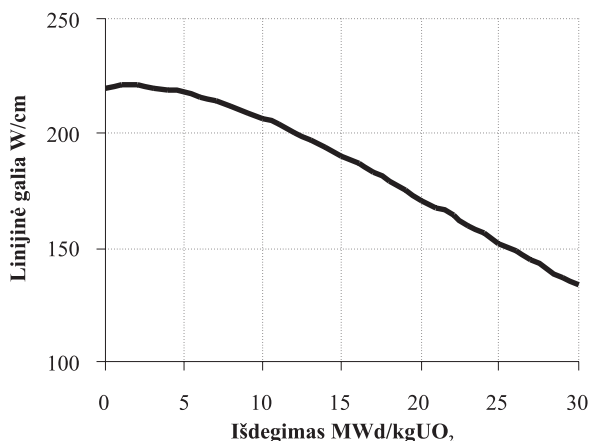


7 pav. Apvalkalo savitoji šiluma: 1 – Peletskio ir Petrovo rekomendacijos [22] aprašanti formulė, 2 – eksperimentiniai matavimai [20]

## 5. FEMAXI-6 SUKURTO MODELIO TESTAVIMAS

Kaip minėta, procesų, vykstančių RBMK-1500 ŠIELė, analizė iki šiol buvo atliekama tik NIKIET ir Kurčiatovo instituto specialistų. Pastaruoju metu tokios analizės imtos atlikti ir LEI naudojant FEMAXI-6 programų paketą. Šio programų paketo pritaikymas (įvestos RBMK-1500 kuro tablečių ir apvalkalo šiluminės medžiagų savybės) buvo aprašytas ankstesniame skyriuje. Prieš pradėdami taikyti sudarytą ŠIELo modelį Ignalinos AE pereinamiesiems ir avarijų metu vykstantiems procesams analizuoti, turime atlikti modelio testavimą. Tuo tikslu LEI specialistų atliktų ŠIELų parametrų priklausomybės nuo kuro išdegimo normalios eksploatacijos metu skaičiavimų rezultatai buvo palyginti su Kurčiatovo instituto specialistų gautais rezultatais.

Sudarant FEMAXI-6 programų paketo modelį naudoti tie patys ŠIELų parametrai, kurie buvo naudojami Kurčiatovo institute atliktuose skaičiavimuose (lentelė). Šiame modelyje buvo pasirinktas 2,8 %  $U^{235}$  įsodrinimo su erbiu urano dioksido kuras. Modelis aprašo ŠIELą, esantį vidutinės galios kanale (2,53 MW), apatinėje kuro rinklėje. ŠIELo linijinės galios priklausomybė nuo išdegimo (8 pav.) ir apatinės kuro rinklės ašinis galios pro-



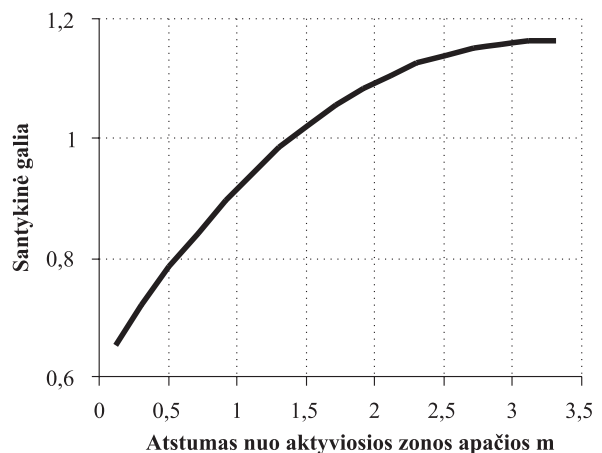
8 pav. Linijinės galios priklausomybė nuo išdegimo [23]

filis (9 pav.) vidutinės galios kuro kanalui paimti iš Kurčiatovo instituto ataskaitos [23].

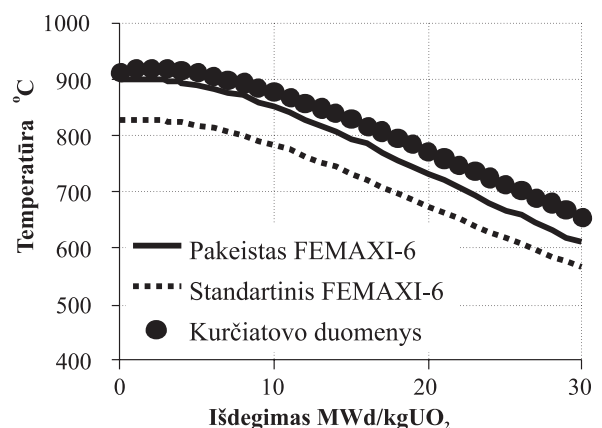
FEMAXI-6 programų paketu kuro tabletės centro temperatūros buvo apskaičiuotos visuose segmentuose. Segmentų vidutinė centro temperatūra buvo palyginta su Kurčiatovo instituto skaičiavimo rezultatais (10 pav.). Temperatūra kuro tabletės centre apskaičiuota pakeistu FEMAXI-6 programų paketu (įvedus RBMK kuro tablečių ir ŠIELo apvalkalo savybes) gerai sutampa su Kurčiatovo institute atliktais skaičiavimo rezultatais – kuro tabletės centro temperatūrų skirtumas neviršija 7 %, tuo tarpu kuro tabletės centro temperatūrų reikšmės, gautos standartiniu FEMAXI-6 programų paketu, yra 14 % mažesnės už Kurčiatovo instituto rezultatus.

Temperatūrų pasiskirstymas ŠIELo spindulio kryptimi pavaizduotas 11 paveiksle. Naudojant pakeistą FEMAXI-6 programų paketą tabletės centro temperatūra gaunama aukštesnė (2 %) nei apskaičiuota Kurčiatovo instituto, o naudojant standartinę programų paketo versiją – mažesnė (10 %). Kaip pavaizduota, išoriniame kuro tablečių paviršiuje ir apvalkale temperatūros gaunamos labai panašios naudojant abi programų paketo versijas, nes apvalkalo temperatūra yra skaičiuojama, įvertinant šilumos mainus tarp šilumnešio ir apvalkalo. Taigi šiuo atveju apvalkalo savybės vaidina mažesnę reikšmę.

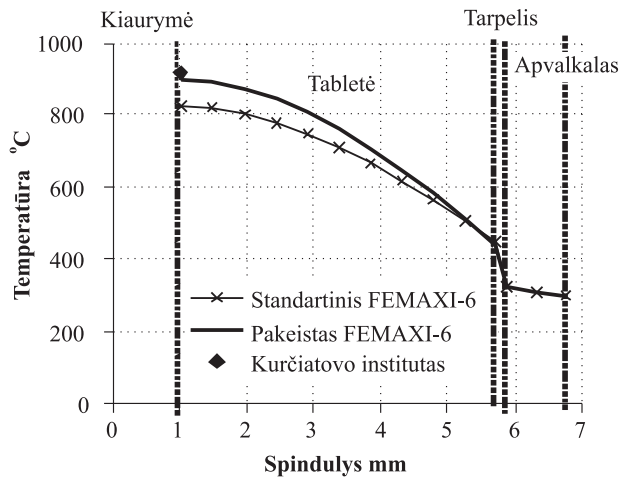
Lietuvos energetikos ir Kurčiatovo instituteuose atliktų skaičiavimo rezultatų palyginimas parodė gerą abiejų skaičiavimų



9 pav. Santykinis ašinis galios profilis apatinei rinklei [23]



10 pav. Vidutinės galios kanalo ŠIELo kuro centro temperatūra



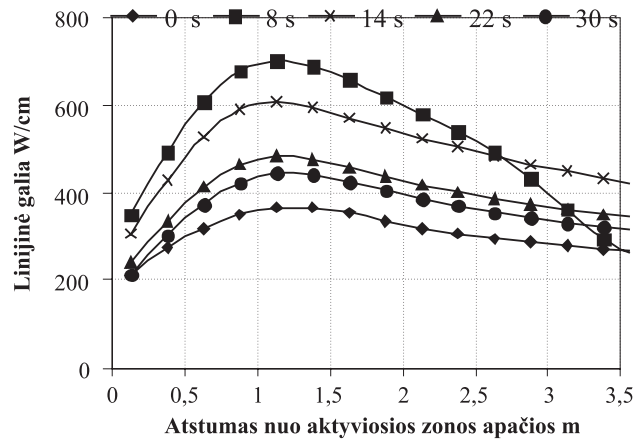
11 pav. Vidutinės galios kanalo ŠIELo temperatūrų pasiskirstymas  
ŠIELo spindulio kryptimi (maksimalios linijinės galios segmentas,  
2 MWd / kgUO<sub>2</sub> išdegimas)

rezultatų sutapimą. Tai leidžia daryti išvadą, kad sudarytas FEMAXI modelis ŠIEL'e vykstančius reiškinius modeliuoja ne blogiau nei tai atlieka Kurčiatovo instituto specialistai su savo programų paketais. Taigi RBMK-1500 ŠIELo modelis, sukurtas naudojant FEMAXI-6 programų paketą su įvestomis RBMK kuro tablečių ir ŠIELų apvalkalų šiluminėmis savybėmis, yra tinkamas Ignalinos AE ŠIELuose vykstantiems procesams modeliuoti.

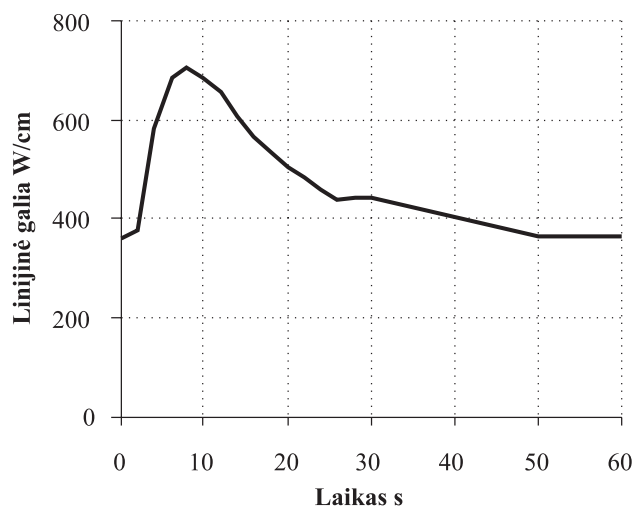
## 6. RBMK-1500 ŠILUMĄ IŠSKIRIANČIO ELEMENTO REAKTYVUMO POKYČIUS SUKELIANČIOS AVARIJOS MODELIAVIMAS

Dėl RBMK-1500 reaktoriaus savitos konstrukcijos reaktyvumo pokyčius sukeliančios avarijos metu galia didėja lėčiau nei korpusiniuose reaktoriuose [24]. Tačiau RBMK-1500 reaktyvumo pokyčius sukeliančių avarijų metu galimas žymus trumpalaikis (keliolikos sekundžių trukmės) galios padidėjimas atskiruose kuro kanaluose, kada ŠIELų linijinė galia gali viršyti maksimalią leistiną linijinę ŠIELo galią [1, 24]. RBMK-1500 reaktyvumo pokyčius sukeliančios avarijos buvo nagrinėjamos daugelyje darbų [25, 26], tačiau juose nebuvo ištirta, kaip toks trumpalaikis galios pokytis paveikia ŠIEL'us. Šiame darbe, remiantis ankstesne patirtimi, detalai analizei buvo pasirinktas inicijuojantis įvykis, kai per klaidą reaktoriaus aktyviosios zonos centre ištraukiamas vienas reaktoriaus valdymo strypas. Šios avarijos metu pasireiškia lokalinis galios padidėjimo efektas grupėje kuro kanalų. ŠIELo linijinė galia didžiausios galios kuro kanale nuo normalios linijinės galios (380 W/cm) padidėja iki 703 W/cm [27] (žr. 12 pav.). Didžiausia leistina linijinė galia RBMK-1500 reaktoriui yra 485 W/cm [1, 24]). Dėl galios padidėjimo pakyla ŠIELų temperatūros bei pakinta kiti parametrai. Siekiant įvertinti šių procesų įtaką ŠIEL'ams reikėjo atlikti išsamią analizę, ir ŠIELuose vykstantys procesai buvo sumodeliuoti pakeistu FEMAXI-6 programų paketu.

Šilumnešio parametru kaita kuro kanale buvo apskaičiuota naudojant QUABOX / CUBBOX-HYCA programų paketą [28]. Gauti rezultatai buvo panaudoti, kaip kraštinės sąlygos (šilumnešio greitis, šilumnešio slėgis, ŠIELo linijinė galia, neutronų srautas) [27] sudarant ŠIELo modelį FEMAXI-6 programų paketu. ŠIELo linijinės galios priklausomybė nuo laiko, apskaičiuo-



12 pav. Linijinės galios priklausomybė nuo aktyviosios zonos aukščio skirtingais laiko momentais (QUABOX / CUBBOX-HYCA) [27]



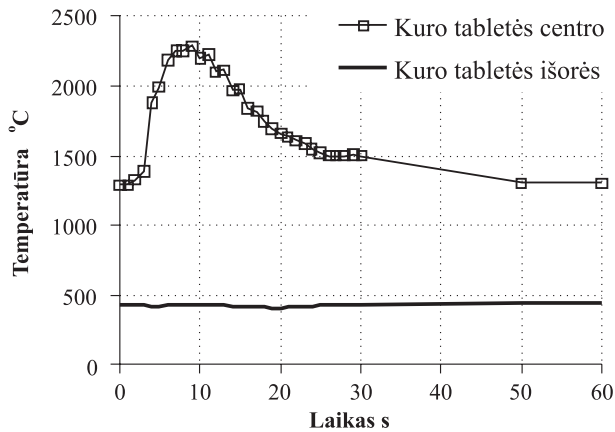
13 pav. ŠIELo vidutinės linijinės galios priklausomybė nuo laiko (QUABOX / CUBBOX-HYCA) [27]

Lentelė. ŠIELo charakteristikos [23]

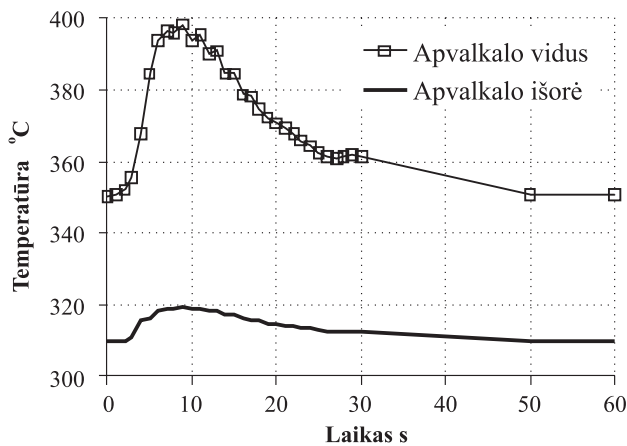
Parametrai	Reikšmės
ŠIELo ilgis	3640 mm
Aktyvus ŠIELo ilgis	3410 mm
Ekranuojančių kuro tablečių aukštis	30 mm
Dujų tūris	19000 mm <sup>3</sup>
ŠIELo apvalkalo išorinis skersmuo	13,55 mm
ŠIELo apvalkalo vidinis skersmuo	11,75 mm
Kuro tabletės vidinis skersmuo	11,46 mm
Kuro tabletės ertmės skersmuo	2,05 mm
Kuro įsodrinimas U <sup>235</sup>	2,8 %
Ekranuojančių tablečių įsodrinimas	0,7 %
Kuro tablečių tankis	10,55 g/cm <sup>3</sup>
ŠIEL'e esančių tablečių masė	3550 g
ŠIELo vidinis slėgis	0,6 MPa

ta QUABOX / CUBBOX-HYCA programų paketu, pavaizduota 13 paveiksle. Analizė buvo atlikta didžiausios galios, 3,18 MW, kuro kanalo ŠIEL'ui (maksimali linijinė galia 380 W/cm) pasiekus vidutinį išdegimą 3,8 MWd/kg UO<sub>2</sub> [27]. Modelyje pasirinktas 2,6 % U<sup>235</sup> įsodrinimo kuras su erbiu. Buvo modeliuojamas ŠIEL'as iš apatinės kuro rinklės, kadangi linijinės galios didžiau-

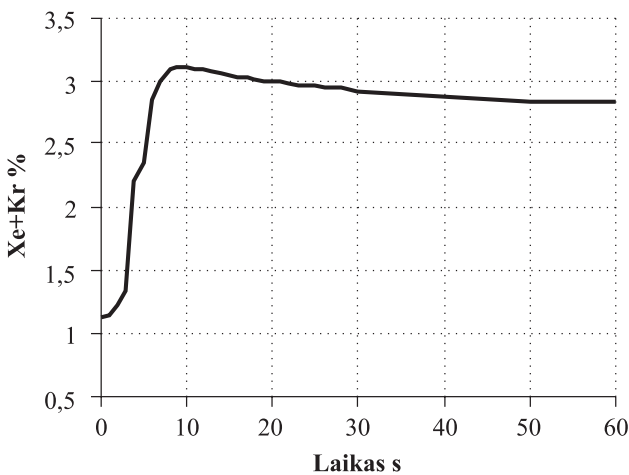




14 pav. Kuro tabletės centro ir paviršiaus temperatūros



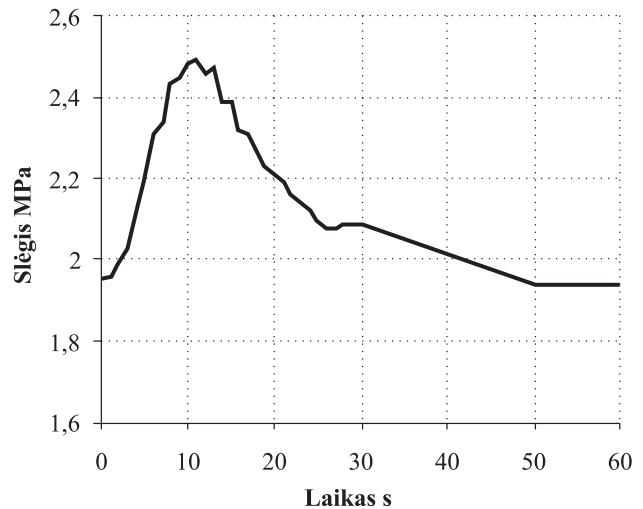
15 pav. Apvalkalo temperatūros



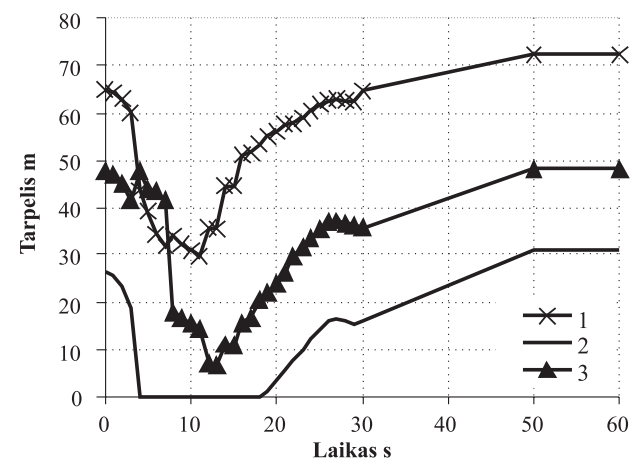
16 pav. Kr ir Xe dalis ŠIELo viduje

sias išsiskyrimas yra apie 1,07 m aukštyje nuo aktyviosios zonos apačios (12 pav.). Modelyje naudojami šie ŠIELo ir kuro tabletės parametrai – aktyvus ŠIELo ilgis, ekranuojančių kuro tablečių aukštis ir įsodrinimas, ŠIELo apvalkalo išorinis ir vidinis skersmenys, kuro tabletės ir kiaurymės skersmenys ir tablečių aukščiai, ŠIELe esančių tablečių masė, dujų tūris, ŠIELo vidinis slėgis ir kuro tablečių tankis – aprašyti lentelėje.

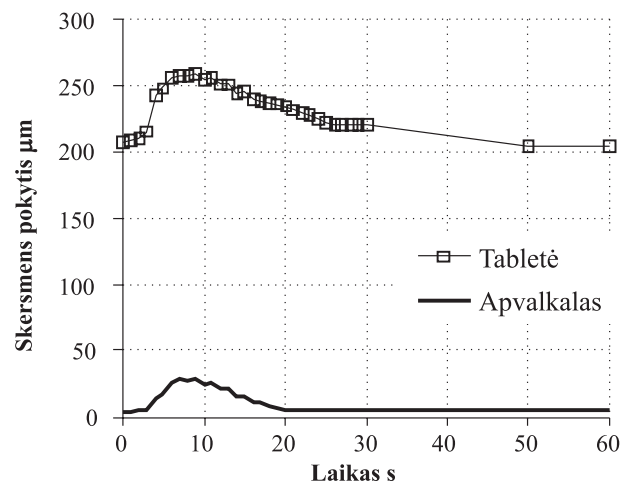
Nagrinėjamos reaktyvumo pokyčius sukeliančios avarijos metu linijinės galios pokytis turi įtakos kuro tabletės ir ŠIELo apvalkalo temperatūrų padidėjimui analizuojamame ŠIELe.



17 pav. Vidinis ŠIELo slėgis



18 pav. Tarpelis tarp tabletės ir apvalkalo: 1–3 – aukštis nuo aktyviosios zonos apačios atitinkamai 0,15 m, 1,07 m ir 2,9 m



19 pav. Kuro tabletės ir apvalkalo skersmenų pokyčiai

Kuro tabletės ir apvalkalo temperatūrų pokyčiai parodyti 14 ir 15 paveiksluose. Apskaičiuota tabletės centro temperatūra (~2300 °C) nepasiekia tabletės lydymosi temperatūros 2800 °C [24]. Kuro apvalkalo įkaista iki 400 °C (~700 °C – galimas ŠIELo apvalkalo pažeidimas) [24].

Dujos (Xe ir Kr), susidariusios kuro tabletėje, kaupiasi ŠIELo viduje. Išsiskyrusių Xe ir Kr kiekis ŠIELe šios analizės metu sudaro tik 3 % (16 pav.). Tokie maži dujų sudėties pokyčiai neturi įtakos ŠIELo vidiniam slėgiui. ŠIELo viduje esantis slėgis didėja tik dėl dujų plėtimosi, padidėjus temperatūrai. Mažėjant linijinei galiai, temperatūra ir ŠIELo vidinis slėgis mažėja (14, 15 ir 17 pav.).

Avarijos metu labiausiai keitėsi tarpelis tarp apvalkalo ir tablečių (18 pav.). Kuro tabletės išorinis ir apvalkalo vidinis skersmenys didžiausios galios išsiskyrimo vietoje pagal aukštį (apie 1,07 m aukštyje nuo aktyviosios zonos apačios) pavaizduoti 19 paveiksle. Dėl staigaus linijinės galios padidėjimo kuro tabletės plečiasi. Dėl temperatūros pokyčių, ŠIELo vidinio slėgio padidėjimo ir kitų procesų apvalkalas išsipučia lėčiau. Todėl tarpelis tarp apvalkalo ir tablečių užsidaro 0,4–2,9 m aukštyje nuo aktyviosios zonos apačios laiko momentu  $t = 5\text{--}20$  s, kada ŠIELo linijinė galia viršija 500 W/cm (18 pav.). Sumažėjus linijinei galiai tarpelis vėl atsistato (laiko momentu  $t > 20$  s). Daugumas parametrų (tabletės ir apvalkalo temperatūros, ŠIELo vidinis slėgis ir kt.) taip pat grįžta prie pradinių reikšmių. Gauti rezultatai leidžia daryti išvadą, kad analizuojamo įvykio metu RBMK-1500 reaktoriuje ŠIELai nebus pažeisti ir neįvyks esminių pokyčių, kurie turėtų įtakos tolesniam jų darbui normalios eksploatacijos metu. Tačiau atliekant analizę buvo naudojamos standartinės FEMAXI-6 mechaninės kuro tablečių ir ŠIELų apvalkalų savybės. Iš tikrųjų erbio ir niobio priemaišos urano dioksido kuro tabletėje bei ŠIELo apvalkale gali nežymiai keisti jų mechanines savybes. Taigi, norint gauti tikslius rezultatus, ateityje reikia įvertinti mechanines kuro tablečių ir ŠIELų apvalkalų savybes.

## 7. IŠVADOS

1. Kuriant RBMK-1500 reaktoriuje naudojamų ŠIELų modelį FEMAXI-6 programų paketu, RBMK-1500 kuro tablečių ir apvalkalo šiluminės savybės buvo įtrauktos į šį programų paketą.

2. Sukurtas modelis buvo patikrintas, modeliuojant ŠIELų parametrų kitimą, priklausomai nuo kuro išdegimo normalios eksploatacijos metu, o tai jau buvo apskaičiuavę Kurčiatovo instituto specialistai. Gautų skaičiavimų rezultatų palyginimas parodė, kad kuro tabletės temperatūra, apskaičiuota naudojant pakeistą FEMAXI-6 programų paketo versiją, gerai sutampa su Kurčiatovo instituto specialistų skaičiavimais – didžiausias kuro tabletės centro temperatūrų skirtumas neviršija 7 %, kai naudojant standartinę programų paketo versiją gaunamas 14 % kuro tabletės centro temperatūrų skirtumas. Tai rodo, kad pakeista FEMAXI-6 programų paketo versija ir sukurtasis modelis tinkami RBMK-1500 ŠIELuose vykstantiems procesams modeliuoti.

3. Sukurtas modelis buvo panaudotas analizuojant reaktyvumo pokyčius sukeliančios avarijos, kurios metu iš centrinės aktyviosios zonos dalies klaidingai ištraukiamas vienas valdymo strypas, pasekmes ŠIELams. Detali analizė atlikta apatinės rinklės ŠIELui, iš greta avarinio valdymo strypo esančio didžiausios galios kanalo. Šios avarijos metu maksimali linijinė ŠIELo galia per 8 sekundes nuo pradinės reikšmės 380 W/cm padidėja iki 700 W/cm, viršydama nustatytą didžiausią leistiną linijinę galią RBMK-1500 reaktoriui 485 W/cm. Rezultatai parodė, kad analizuojamo įvykio metu RBMK-1500 ŠIELas išlieka nepažeistas. Beveik visi ŠIELo parametrai grįžta prie pradinių reikšmių (ŠIELo linijinė galia po staigaus padidėjimo sumažėja) ir

neįvyksta esminių pokyčių, kurie turėtų įtakos tolesniam ŠIELų darbui normalios eksploatacijos metu. Pastebėtas įdomus kuro tabletės ir ŠIELo apvalkalo elgesys greito linijinės galios padidėjimo atveju: ŠIELo apvalkalo pūtimasis dėl temperatūros kilimo yra lėtesnis nei tabletės plėtimasis, todėl tarpelis tarp apvalkalo ir tablečių pranyksta, tačiau sumažėjus linijinei galiai, tarpelis atsistato. Ateityje, norint gauti tikslesnius analizės rezultatus, reikia įvertinti tai, kad RBMK mechaninės kuro tablečių ir ŠIELų apvalkalų savybės gali skirtis nuo standartinių, naudojamų FEMAXI-6 programų pakete.

Gauta 2009 02 23

Priimta 2009 05 07

## Literatūra

1. Almenas K., Kaliatka A., Ušpuras E. Ignalina RBMK-1500. A Source Book. Extended and Updated Version. Kaunas: LEI, 1998.
2. Suzuki M. Light Water Reactor Fuel Analysis Code FEMAXI-6 (Ver. 1). Report. Japan: Atomic E. R. I., 2005.
3. Takeda S. Analysis of Power History Effect for Cladding Stress during Power Ramp by FEMAXI-IV. Transactions of the 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SmiRT 17). Prague, Czech Republic, 2003.
4. Udagawa Y., Suzuki M., Fuketa T. Analysis of MOX Fuel Behavior in Halden Reactor by FEMAXI-6 Code. Nuclear Science and Technology. 2007. Vol. 44. N 8. P. 1070–1080.
5. Suzuki M., Uetsuka H., Saitou H. Analysis of mechanical load on cladding induced by fuel swelling during power ramp in high burn-up rod by fuel performance code FEMAXI-6 // Nuclear Engineering and Design. 2004. Vol. 229. P. 1–14.
6. Suzuki M., Saitou H., Iwamura T. Analysis of MOX fuel behavior in reduced-moderation water reactor by fuel performance code FEMAXI-RM // Nuclear Engineering and Design. 2004. Vol. 227. P. 19–27.
7. Suzuki M., Uetsuka H. Development of fuel performance code FEMAXI-6 and analysis of mechanical loading on cladding during power ramp for high burn-up fuel rod // IAEA-TECDOC-1345 Fuel Failure in Water Reactors: Causes and Mitigation. Proceedings of a Technical Meeting held in Bratislava, Slovakia, 2002.
8. Jusevičiūtė A., Kaliatka A., Urbonavičius E. RBMK-1500 šilumą išskiriančiuose elementuose vykstančių procesų modeliavimas // Energetika. 2007. T. 53. Nr. 4. P. 58–67.
9. Sonnenburg H. G., Hofer E., Kloos A. Development of Methods for the Analysis of the Fuel Rod Behaviour in the High Burnup Regime. Final Report. GRS, Garching, Germany, 2002.
10. Berna G., Allison C. Development of FUELSIM / MOD0 for the detailed analysis of LWR fuel rod behavior under normal operation conditions with extended burnup fuel // Nippon Genshiryoku Kenkyujo JAERI Journal L2150A, 1999.
11. Lassmann K. TRANSURANUS: a fuel rod analysis code ready for use // Journal of Nuclear Materials. 1992. Vol. 188.

12. Mironov Ju. V., Afremov D. A., Mingaleeva G. S. Thermo-mechanical Model of the Code TRAVS–RAPTA // NIKIET Report # 272-112. Moscow, Russia, 2004.
13. Tutnov Alexander A., Tutnov Anton A., Ulyanov A. I. Computer Code Pulsar. Report. Russian research center “Kurchatov Institute”. Moscow, Russia, 1993.
14. Analysis of Maximum Design Basis Accident in RBMK-1500 Reactor with Uranium-Erbium Fuel. Report 27.186 O<sub>1</sub>, RDIPE. Moscow, Russia, 1997.
15. Pabarčius R. The Analysis of Influence of Uncertainty and Sensitivity of Parameters Results of Modelling of Transients. LEI Report. Kaunas, Lithuania, 2006.
16. MATARO-09, A Handbook of Materials Properties for Use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod Behavior. USNRC TREE NUREG–1005, 1976.
17. Material Properties of Cladding and Fuel Pellets of VVER–1000. Moscow: GK AE USSR, 1983.
18. Zaimovsky A. S., Nikulina A. V., Reshetnikov N. G. Zirconium Alloys in Nuclear Industry. Moscow: Atomizdat, 1982.
19. Volkov Yu. B. et al. Material Property Library for H-1 Alloy Cladding. Preprint IAE-4941 / 11, 1989.
20. Shestopalov A. A., Proshin A. A., Zakharko Yu. A., Polismakov A. A., Andreev D. V., Fomichenko P. A., Mikitiouk K. O., Pylev S. S. Description of Zr + 1 % Nb Thermal and Mechanical Properties to be Implemented in SCDAP / RELAP5 / MOD3.1 code. Nuclear Safety Institute of Russian Research Centre “Kurchatov Institute” NSI (Russia), Moscow, 1995.
21. Peletky V. E., Grishchuk A. P., Musaeva Z. A. The kinetic properties of E-11-reactor alloy in the high temperature range // Teplofizika Vysshikh Temperatur. 1994. Vol. 32. No. 6. P. 820–824 (in Russian), High Temperature. 1994. Vol. 32. P. 766–770 (in English).
22. Peletsk V. E., Petrova I. I. Investigation of the thermal properties of the alloy Zr-0.01 Nb by a subsecond pulse-heating technique // High Temp. High Pressures. 1997. No. 29. P. 373–378.
23. Definition of Properties Uranium–Erbium Fuel. Report, Nuclear Safety Institute of Russian Research Centre “Kurchatov Institute”. Moscow, Russia, 2005.
24. Accident analysis for nuclear power plants with graphite moderated boiling water RBMK reactors // Safety Reports Series No. 43. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency, 2005.
25. Tonkūnas A., Pabarčius R., Clemente M., Listopadskis N. Uncertainty and sensitivity analysis of the CPS–CC Voiding in the RBMK reactor Ignalina-2 // Kerntechnik. 2006. Vol. 71. Iss. 3. P. 104–112.
26. Pabarčius R., Tonkūnas A., Bubelis E., Clemente M. Uncertainty and sensitivity analysis of void and power reactivity coefficients in an RBMK-1500 reactor core // Kerntechnik. 2005. Vol. 70. Iss. 3. P. 114–119.
27. Jusevičiūtė A., Kaliatka A., Pabarčius R., Ušpuras E. Analysis of RBMK-1500 fuel rod behaviour in case of reactivity initiating accidents // Proceedings of International Conference on Reactor Physics, Nuclear Power: A Sustainable Resource. Interlaken, Switzerland, 2008.
28. QUABOX / CUBBOX – manual, Report GRS, Garching, Germany, 1993.

Aušra Jusevičiūtė, Tadas Kaliatka,  
Algirdas Kaliatka, Eugenijus Ušpuras

#### THE FEMAXI-6 CODE ADAPTATION FOR MODELING THE PROCESSES IN RBMK-1500 FUEL RODS

##### Summary

The Ignalina NPP is the only nuclear power plant in Lithuania. It is equipped with the channel-type graphite-moderated boiling water reactor RBMK-1500. Up to now, analysis of the processes in RBMK-1500 fuel rods would be prepared only by the general designer of the RBMK. Recently, Lithuanians specialists have started modeling the processes in fuel rods of the Ignalina NPP. The FEMAXI-6 code was selected for such analysis, because it allows performing more particular calculations than do other fuel behaviour codes. Materials of fuel and cladding and the design of fuel rods in the RBMK-1500 differ from those of other vessel type reactors; therefore, the FEMAXI-6 code was adapted by incorporating material properties of fuel rod pallets and claddings.

Using the adapted FEMAXI-6 code and the developed model of the RBMK-1500 fuel rod, the processes of fuel rods during normal plant operation were calculated. The obtained results were compared with calculations performed by specialists from the Kurchatov Institute. A reasonable agreement of both calculation results shows that the adapted FEMAXI-6 code and the developed model are suitable for the future analysis of processes in fuel rods of the RBMK-1500.

A reactivity-initiating accident with a spurious withdrawal of the control rod in the centre of the reactor core was analysed using the adapted FEMAXI-6 code, and results of the study are also presented in the paper. Such an accident lead to a significant increase of the local power in adjacent fuel channels and consequently to changes in fuel rod parameters. Results of the analysis performed using the adapted FEMAXI-6 code have shown that after a short increase and a subsequent decrease of the linear power during an accident, the RBMK fuel rods remain intact and no phenomena occur to preclude the resumption of normal operation after the event.

**Key words:** fuel rod, FEMAXI-6, heat conductivity, specific heat, reactivity initiated accident

Аушра Юсевичюте, Тадас Калятка,  
Альгирдас Калятка, Еугениус Ушпурас

#### ПРИМЕНЕНИЕ ПАКЕТА ПРОГРАММ FEMAXI-6 ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ В ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТАХ РБМК-1500

##### Резюме

Игналинская АЭС – единственная в Литве атомная электростанция с эксплуатируемым каналным уран-графитовым реактором кипящей воды РБМК-1500. До сих пор исследования процессов в тепловыделяющих элементах (ТВЭлах) РБМК-1500 проводились только российскими специалистами. В настоящее время специалисты Литовского энергетического института начали моделировать процессы в ТВЭлах Игналинской АЭС. Для моделирования был выбран код FEMAXI-6, поскольку он позволяет более детально, чем другие пакеты, анализировать процессы, происходящие в ТВЭлах. Конструкция ТВЭлов РБМК-1500, а также материалы топлива и оболочек отличаются от применяемых в корпусных реакторах, поэтому код FEMAXI-6 был приспособлен для моделирования процессов в ТВЭлах РБМК-1500 путем ввода тепловых свойств топливных таблеток и оболочек ТВЭлов.

С использованием адаптированного для РБМК-1500 кода FEMAXI-6 и развитой модели твэла РБМК-1500 были смоделированы процессы, происходящие в твэлах при нормальной эксплуатации. Полученные результаты были сравнены с результатами расчетов, полученными специалистами Института им. Курчатова. Совпадение результатов показывает, что адаптированный код FEMAXI-6 и развитая модель пригодны для анализа процессов в твэлах РБМК-1500.

С помощью адаптированного кода FEMAXI-6 осуществлен анализ аварии с изменением реактивности, когда из центра актив-

ной зоны по ошибке извлекается регулирующий стержень. Такая авария вызывает значительное увеличение локальной мощности в рядом расположенных топливных каналах и, тем самым, изменение параметров твэлов. Результаты анализа показали, что, несмотря на кратковременное превышение допустимой линейной нагрузки, твэлы остаются неповрежденными и возможна дальнейшая их эксплуатация.

**Ключевые слова:** твэл, FEMAXI-6, теплопроводимость, теплоемкость, авария с изменением реактивности