# Reaktoriaus RBMK-1500 konstrukcinių elementų neutroninės aktyvacijos skaitinis vertinimas 3. Kuro kanalų neutroninės aktyvacijos vertinimas naudojant sumodeliuotus neutronų srautus

## Ernestas Narkūnas,

## Artūras Šmaižys,

## Povilas Poškas

Lietuvos energetikos institutas, Branduolinės inžinerijos problemų laboratorija, Breslaujos g. 3, LT-44403 Kaunas El. paštas: ernestas@mail.lei.lt Tai trečiasis publikacijų serijos "Reaktoriaus RBMK-1500 konstrukcinių elementų neutroninės aktyvacijos skaitinis vertinimas" straipsnis. Darbe ir toliau nagrinėjama RBMK tipo branduolinio reaktoriaus konstrukcinių medžiagų, o būtent reaktoriaus kuro kanalų, neutroninė aktyvacija, naudojant sumodeliuotus neutronų srautus. Tuo tikslu buvo sukurtas trimatis skaitinis Ignalinos AE rektoriaus RBMK-1500 vienos gardelės modelis, apimantis grafito koloną su jame esančiais elementais, apsaugines ir atramines plieno plokštes, viršutinę bei apatinę serpentinito struktūras bei kt., ir pagal šį modelį MCNP kompiuterine programa buvo įvertinti neutronų srautai nagrinėjamose reaktoriaus konstrukcijose. Tada, pasinaudojant sumodeliuotais neutronų srautais ir neutroninės aktyvacijos vertinimo modeliais, ORIGEN-S kompiuterine programa buvo įvertinti kuro kanalų aktyvumo lygiai ir jų priklausomumas nuo pradinės priemaišų koncentracijos bei laiko po galutinio reaktoriaus sustabdymo.

Darbo metu gauti patikslinti neutroninės aktyvacijos procesų kuro kanaluose modeliavimo, naudojant sumodeliuotus neutronų srautus ir realią reaktoriaus darbo istoriją, rezultatai parodė, jog suminio aktyvumo pasiskirstymas išilgai kuro kanalo atitinka šiluminių neutronų srauto pasiskirstymą, o aktyvumo reikšmės yra mažesnės, negu modeliuojant pastovų reaktoriaus darbą nominalia galia 20 metų.

Raktažodžiai: RBMK-1500 reaktorius, kuro kanalai, neutronų srautai, aktyvacija, skaitinis modeliavimas

## 1. ĮVADAS

Pirmajame ir antrajame šios publikacijų serijos straipsniuose [1, 2] buvo nagrinėjama RBMK tipo branduolinio reaktoriaus kuro kanalų ir apsauginių bei atraminių plokščių konstrukcinių medžiagų (cirkonio-niobio lydinio E125 ir 20-os markės plieno) neutroninė aktyvacija. Tuo tikslu buvo sukurti konservatyvūs skaitiniai Ignalinos AE reaktoriaus RBMK-1500 kuro kanalų ir apsauginių bei atraminių plokščių neutroninės aktyvacijos vertinimo modeliai, kuriuose priimta, kad reaktorius dirba 20 metų nominalia galia, o neutronų srautai atskiroje konstrukcijoje nekinta. Pagal šiuos modelius ORIGEN-S kompiuterine programa įvertinti lydinio E125 ir 20-os markės plieno aktyvumo lygiai ir jų priklausomumas nuo laiko po galutinio reaktoriaus sustabdymo bei nuo pradinių priemaišų koncentracijos. Darbo metu gauti neutroninės aktyvacijos procesų modeliavimo rezultatai parodė, jog radioaktyviosios taršos požiūriu svarbiausi aktyvacijos metu kuro kanaluose susidarę radionuklidai yra: <sup>3</sup>H, <sup>14</sup>C, <sup>41</sup>Ca, <sup>55</sup>Fe, <sup>59</sup>Ni, <sup>60</sup>Co, <sup>63</sup>Ni, <sup>93</sup>Zr, <sup>93m</sup>Nb ir <sup>94</sup>Nb, o 20-os markės pliene: <sup>3</sup>H, <sup>14</sup>C, <sup>36</sup>Cl, <sup>55</sup>Fe, <sup>59</sup>Ni, <sup>60</sup>Co ir <sup>63</sup>Ni.

Tai trečiasis publikacijų serijos "Reaktoriaus RBMK-1500 konstrukcinių elementų neutroninės aktyvacijos skaitinis ver-

tinimas" straipsnis. Jame yra pristatomas skaitinis RBMK-1500 reaktoriaus kuro kanalų neutroninės aktyvacijos įvertinimo modelis, kai aktyvacijos įvertinimui naudojamos sumodeliuotos neutronų srautų reikšmės nagrinėjamose konstrukcijose. Tuo tikslu buvo sukurtas trimatis Ignalinos AE rektoriaus RBMK-1500 vienos gardelės modelis, apimantis grafito koloną su joje esančiais elementais (kuro kanalais ir kt.), apsaugines ir atramines plieno plokštes, viršutinę bei apatinę serpentinito struktūras ir kt. Naudojant šį modelį MCNP 5 kompiuterine programa buvo įvertinti neutronų srautai kuro kanaluose. Tada, pasinaudojant sumodeliuotais neutronų srautais ir ankstesniuose serijos straipsniuose naudotais neutroninės aktyvacijos vertinimo modeliais, ORIGEN-S kompiuterine programa buvo įvertinti kuro kanalų patikslinti aktyvumai (įvertinant ir kitimą išilgai kuro kanalo) ir jų priklausomumas nuo pradinės priemaišų koncentracijos bei laiko po reaktoriaus sustabdymo.

## 2. NEUTRONINĖS AKTYVACIJOS ĮVERTINIMO METODIKA

Skaitinis reaktoriaus konstrukcinių elementų neutroninės aktyvacijos vertinimas paprastai susideda iš dviejų pagrindinių etapų. Pirmojo, kai tam tikromis programomis apskaičiuojamas neutronų srauto erdvinis bei energetinis pasiskirstymai nagrinėjamose konstrukcijose. Ir antrojo, kai kitų programų pagalba, įvedus jau apskaičiuoto neutronų srauto parametrus, apskaičiuojami neutroninės aktyvacijos metu susidariusių radionuklidų aktyvumai, koncentracijos ir t. t. Egzistuoja ir kombinuotos kompiuterinės programos, kuriose iškart atliekamas ir neutronų srauto parametrų, ir susidariusių radionuklidų įvertinimas, tačiau dažniausiai šie uždaviniai sprendžiami atskirai. Šiame darbe nagrinėjamų reaktoriaus kuro kanalų neutroninei aktyvacijai įvertinti buvo naudojamos atitinkamai MCNP 5 ir ORIGEN-S kompiuterinės programos, o pirmojo ir antrojo vertinimo etapų principinės schemos parodytos 1 pav.

а



**1 pav.** Principinės neutronų srauto (*a*) ir neutroninės aktyvacijos (*b*) modeliavimo schemos ir pradiniai duomenys

#### 2.1. Neutronų srautų modeliavimas

Energetinis bei erdvinis neutronų srautų pasiskirstymas gali būti vertinamas eksperimentiškai ar skaitiniu būdu. RBMK-1500 reaktoriuje neutronų srautai yra matuojami tik grafitinio klojinio ribose bei šoninėje biologinėje apsaugoje, iškart už reaktoriaus metalinio apvalkalo. Šiuos duomenis, apie išmatuotas neutronų srautų reikšmes, galima panaudoti reaktoriaus konstrukcinių elementų, esančių grafito klojinio ribose, preliminariam neutroninės aktyvacijos įvertinimui, kaip tai buvo atlikta ankstesniuose darbuose [1, 2]. Tačiau pažymėtina, jog tokiu būdu išmatuoti srautai yra vidutiniai tam tikroje reaktoriaus erdvės dalyje, kurioje yra pats srauto matuoklis, o ne konkrečiame konstrukciniame elemente, pvz., kuro kanale, todėl tikslios aktyvacijos analizės jais remiantis atlikti negalima. Taip pat matavimo taškų nėra tiek, kad būtų galima nustatyti srautų kitimą tam tikrame konstrukciniame elemente. Be to, už reaktoriaus metalinio apvalkalo neutronų srautai nėra matuojami, ir norint įvertinti čia esančių konstrukcinių elementų neutroninę aktyvacija matavimų rezultatais pasinaudoti negalima. Todėl šiame darbe buvo pasirinktas skaitinis neutronų srautų modeliavimas nagrinėjamose reaktoriaus konstrukcijose, siekiant įvertinti neutronų srautų energetinį bei erdvinį pasiskirstymą jose.

Neutronų srautų modeliavimui buvo naudota MCNP 5 kompiuterinė programa [3]. MCNP (A General Purpose Monte Carlo N-Particle Transport Code) – bendros paskirties dalelių pernašos modeliavimo Monte Karlo metodu kompiuterinė programa, kuri gali būti naudojama atskirai neutronų, fotonų, elektronų arba jungtiniam neutronų, fotonų ir elektronų pernašos modeliavimui, bei kritinių sistemų neutronų daugėjimo koeficiento vertinimams. MCNP – viena labiausiai paplitusių dalelių pernašos modeliavimo programų pasaulyje ir yra atlikta daug eksperimentinių jos patvirtinimų bei palyginamųjų skaičiavimų su kitomis skaitinio modeliavimo programomis [3].

Principinė neutronų srauto modeliavimo schema, naudota šiame darbe, yra parodyta 1a pav.

Modeliuojant neutronų srauto erdvinį ir energetinį pasiskirstymą reaktoriaus konstrukciniuose elementuose buvo vartojami įvairūs su RBMK-1500 reaktoriumi susiję duomenys. Šie duomenys - tai reaktoriaus konstrukcijų išsidėstymas ir geometriniai jų matmenys, konstrukcijas sudarančių medžiagų cheminė sudėtis ir tankiai, reaktoriaus darbo parametrai bei kt. Šie duomenys buvo parinkti atsižvelgus į informaciją, pateiktą [4-6] šaltiniuose. Ignalinos AE 1-ajame reaktoriuje nuo pat jo eksploatavimo pradžios 1984 metais buvo naudojamas UO, kuras su pradiniu 2 % 235U. Vėliau, pradedant nuo 1997 m., buvo pradėtas naudoti UO, kuras su pradiniu 2,4 % 235U įsodrinimu ir 0,41 % išdegančiu Er<sub>2</sub>O<sub>2</sub> sugėrikliu, o nuo 2002 m. – ir UO<sub>2</sub> kuras su pradiniu 2,6 % <sup>235</sup>U įsodrinimu ir 0,50 % išdegančiu Er<sub>2</sub>O<sub>2</sub> sugėrikliu. Reaktoriui dirbant jame esantis kuras išdega, o išdegusios kuro rinklės palaipsniui yra keičiamos į naujas. Vidutinis kuro išdegimas reaktoriuje jam dirbant nominalia 4200 MW (šilumine) galia yra apie 10 MWd/kgU. Siekiant įvertinti skirtingo kuro įtaką modeliuojamiems neutronų srautams (kuras su erbio išdegančiu sugėrikliu ir be jo) bei kuro išdegimo įtaką, buvo sukurti 3 skirtingi modeliavimo atvejai, priimant, kad kuro kanale yra patalpintas:

1. Vidutinio išdegimo (~10 MWd/kgU)  $UO_2$  kuras su pradiniu 2,4 % <sup>235</sup>U įsodrinimu ir 0,41 % išdegančiu  $Er_2O_3$  sugėrikliu;

2. Šviežias  $UO_2$  kuras su pradiniu 2,4 % <sup>235</sup>U įsodrinimu ir 0,41 % išdegančiu  $Er_2O_2$  sugėrikliu;

3. Šviežias UO, kuras su pradiniu 2 % <sup>235</sup>U įsodrinimu.

Išdegusio (iki ~10 MWd/kgU) kuro nuklidinė sudėtis buvo sumodeliuota kompiuterine programa SAS2 iš SCALE 5 kompiuterinių programų sistemos. Šilumnešio tankis grafitinio klojinio ribose buvo priimtas lygus 0,5 g/cm<sup>3</sup>, o viršutinėje ir apatinėje kuro kanalo dalyse atitinkamai 0,25 g/cm<sup>3</sup> ir 0,75 g/cm<sup>3</sup>. Aprašytų reaktoriaus komponentų temperatūros buvo parinktos taip, jog atitiktų kuro kanalo darbo režimą vidutine galia (~2,61MW), esant nominaliai 4200 MW reaktoriaus šiluminei galiai.

Kompiuterine programa MCNP 5 sukurto Ignalinos AE rektoriaus RBMK-1500 vienos gardelės (25 × 25 cm) modelio, apimančio grafito koloną su joje esančiais elementais, apsaugines ir atramines plieno plokštes ir kt. struktūras, skerspjūvis (per kuro pluoštą) yra pavaizduotas 2 pav.

Toks reaktoriaus segmento modelis, panaudojant periodines segmentą ribojančių šoninių paviršių sąlygas MCNP programoje, atitinka begalinę šių segmentų matricą ir yra tinkamas neutronų srautų modeliavimui reaktoriaus centrinės dalies (radialine kryptimi) gardelėje [5–7]. Tačiau šis modeliavimas yra kiek konservatyvus, nes nėra vertinami reaktoriaus technologiniai kanalai su valdymo strypais ir kt. 2 pav. Sumodeliuoto reaktoriaus RBMK-1500 segmento skerspjūvis (per kuro pluoštą)

MCNP programa modeliuojant neutronų srautus buvo panaudota šiuo metu viena plačiausiai naudojamų branduolių duomenų bibliotekų – ENDF (Evaluated Nuclear Data File, JAV) biblioteka, o gauti neutronų srautai buvo sugrupuoti į tris energetines grupes:

• Šiluminiai neutronai, kurių energija siekia iki 0,625 eV;

 Rezonansiniai (tarpinių energijų) neutronai, kurių energija yra 0,625 eV – 1 MeV intervale;

• Greitieji neutronai, kurių energija yra daugiau kaip 1 MeV.

Toks neutronų srauto suskirstymas į tris energetines grupes pasirinktas tam, jog vėliau, vertinant pačią medžiagų aktyvaciją, bus reikalinga informacija būtent apie tokių energetinių grupių srautus.

#### 2.2. Neutroninės aktyvacijos modeliavimas

Branduolių neutroninės aktyvacijos pagrindinės reakcijos yra neutrono pagavimas arba (n, γ) reakcijos. Pagrindinės aktyvacijos reakcijos, vykstančios kuro kanaluose, yra pateiktos [1] darbe.

Šiame darbe, kaip ir [2] darbe, aktyvacijos procesai buvo modeliuojami naudojant atnaujintą (palyginus su [1] darbe naudota) kompiuterinių programų paketo SCALE 5 programą ORIGEN-S [8], kuri yra įteisinta (validuota) ir verifikuota tokių procesų analizei [9] ir plačiai naudojama visame pasaulyje. ORI-GEN-S branduolių duomenų bibliotekose yra saugomi reakcijų skerspjūvių duomenys trims neutronų energijų grupėms: šiluminiams, rezonansiniams ir greitiesiems. ORIGEN-S naudojant kaip atskirą savarankišką programą, vartotojas nurodo spektrinius skerspjūvių koregavimo koeficientus THERM, FAST ir RES, kurie vartojami atitinkamai šiluminių, greitųjų ir rezonansinių energijų neutronų reakcijų skerspjūviams pakoreguoti ir suformuoti naujiems, vienos energijų grupės skerspjūviams.

Taigi kaip pradiniai įvesties duomenys, susiję su neutronų srautais, vertinant medžiagų aktyvaciją ORIGEN-S kompiuterine programa yra jau minėti spektriniai koeficientai THERM, FAST ir RES bei šiluminių neutronų srautas. Principinė neutroninės aktyvacijos modeliavimo schema, naudota šiame darbe, yra parodyta 1b pav.

Taigi modeliuojant atskiro reaktoriaus konstrukcinio elemento aktyvaciją buvo naudojami MCNP programa įvertinti šiluminių neutronų srautai atskirose to komponento zonose bei spektriniai šiluminių, greitųjų ir rezonansinių neutronų srautų koeficientai.

Aktyvacijos analizė, kaip ir ankstesniame darbe [1], kuro kanalams buvo atlikta dviem atvejais: priimant maksimalias (1 atvejis) ir minimalias (2 atvejis) priemaišų koncentracijas lydinyje E125, nagrinėjant 150 metų aušinimo laikotarpį po reaktoriaus galutinio sustabdymo.

Šiame darbe naudotas pagrindinių cheminių elementų ir priemaišų sąrašas nagrinėjamame lydinyje E125 toks pat, kaip ir naudotas [1] darbe, tiktai aliuminio (*Al*) koncentracija buvo priimta kiek konservatyvesnė (0,005 %, palyginus su 0,0046 %, kuri buvo naudota [1] darbe) remiantis [10] šaltiniu.

Kitaip nei [1, 2] darbuose, neutroninės aktyvacijos vertinimui buvo panaudota reali Ignalinos AE 1-ojo bloko reaktoriaus darbo istorija, parodyta 3 pav. Buvo priimta, kad pirmuosius 17 metų (17 periodų) reaktorius dirba skirtingais režimais nepertraukiamai, bet kiekvienu periodu (vienas periodas atitinka vienerių metų laikotarpį) reaktoriaus darbo režimas yra pastovus. Siekiant tiksliau įvertinti sąlyginai trumpaamžių (kurių skilimo pusėjimo trukmė neviršija keliolikos metų) radionuklidų aktyvumą, likę 4 reaktoriaus darbo metai buvo suskirstyti į 25 smulkesnius periodus, įskaitant ir visas reaktoriaus prastovas.

Kadangi reaktoriaus šiluminė galia yra tiesiog proporcinga šiluminių neutronų srautui, tai kiekvienam reaktoriaus darbo periodui (aprašytam ORIGEN-S programoje) neutronų srautai buvo perskaičiuoti atsižvelgiant į reaktoriaus šiluminę galią to periodo metu ir sumodeliuotus neutronų srautus, gautus reaktoriui dirbant 4200 MW (šilumine) galia.



3 pav. Analizėje naudota Ignalinos AE 1-ojo bloko reaktoriaus darbo 1984–2004 metais istorija

#### 3. REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ

## 3.1. Neutronų srauto erdvinio ir energetinio pasiskirstymo modeliavimo rezultatai

Neutronų srautai, gauti centrinei kuro kanalų daliai (cirkonioniobio lydiniui E125) 1-uoju modeliavimo atveju (žr. 2.1 skyrių), yra parodyti 4 pav. Čia pateiktos neutronų srauto reikšmės atitinka nominalų reaktoriaus darbo režimą, t. y. šios srautų reikšmės gautos reaktoriui dirbant 4200 MW (šilumine) galia, o ordinačių ašyje yra atidėtas atstumas nuo reaktoriaus aktyviosios zonos centro. Nagrinėjamų reaktoriaus RBMK-1500 kuro kanalų matmenys ir jų vieta / padėtis reaktoriuje yra pateikti [1] darbe.

Rezonansinių ir greitųjų neutronų srautų kitimo ašine kryptimi pobūdžiai sutampa, t. y. stebimi du maksimumai (iš kurių apatinis didesnis) ir minimumas centre, kur kuro pluoštai centriniu strypu yra sujungti tarpusavyje. Šiluminių neutronų srautui būdingas tik maksimumas centre. Tolstant nuo čia šiluminių neutronų srautas monotoniškai mažėja ir kuro kanalo dalies galuose sumažėja apie 7 (viršuje) ir 5 (apačioje) kartus, palyginus su maksimaliu jų srautu šioje konstrukcijoje. Greitųjų neutronų srautai centrinės kuro kanalų dalies galuose yra apie 10, o likusioje dalyje apie 5 kartus mažesni už rezonansinių. Čia vyraujantys yra rezonansinių neutronų srautai, išskyrus galus, kur 6 kartus didesni yra šiluminių neutronų srautai. Toks srautų kitimo pobūdis nesunkiai paaiškinamas tuo, jog greitieji neutronai, atsiradę daugiausia 235U branduolių dalijimosi metu, jau gana efektyviai yra lėtinami reaktoriaus šilumnešio ir, kol pasiekia kuro kanalą, nemaža jų dalis būna perėję į rezonansinių ar net šiluminių neutronų grupę. Be to, vidurinėje kuro kanalo dalyje (kuro pluoštų sujungimo vietoje) nėra kuro, t. y. šioje srityje nėra greitųjų neutronų šaltinio, todėl čia ir yra stebimi greitųjų bei rezonansinių neutronų srauto minimumai.

Modeliavimo metu gautas vidutinis greitųjų neutronų srautas kuro kanale yra ~1,4  $\cdot$  10<sup>13</sup> n/cm<sup>2</sup>  $\cdot$  s, o maksimali srauto reikšmė gauta apatinėje centrinės kuro kanalo dalies pusėje ir siekia ~2,2  $\cdot$  10<sup>13</sup> n/cm<sup>2</sup>  $\cdot$  s. Ties aktyviosios zonos kraštais (t. y. ~350 cm atstume nuo centro) šis srautas sumažėja iki ~5,2  $\cdot$  10<sup>12</sup> n/cm<sup>2</sup>  $\cdot$  s viršuje ir iki ~7,1  $\cdot$  10<sup>12</sup> n/cm<sup>2</sup>  $\cdot$  s apačioje. Šiluminių neutronų vidutinis srautas čia siekia apie 5,3  $\cdot$  10<sup>13</sup> n/cm<sup>2</sup>  $\cdot$  s, maksimali reikšmė yra centre (~8,7 · 10<sup>13</sup> n/cm<sup>2</sup> · s), o minimali – galuose ir siekia ~1,3 · 10<sup>13</sup> n/cm<sup>2</sup> · s (viršuje). Vidutinis rezonansinių neutronų srautas yra kiek didesnis – apie 6,6 · 10<sup>13</sup> n/cm<sup>2</sup> · s, o maksimali reikšmė – ~1,1 · 10<sup>14</sup> n/cm<sup>2</sup> · s. Vidutinis suminis neutronų srautas šioje konstrukcijoje yra apie 1,3 · 10<sup>14</sup> n/cm<sup>2</sup> · s, o maksimalus – 2,0 · 10<sup>14</sup> n/cm<sup>2</sup> · s.

Palyginus [1] darbe aktyvacijos analizei naudotą šiluminių neutronų srautą  $(3 \cdot 10^{13} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$  reaktoriui dirbant 4200 MW šilumine galia) su šiame darbe sumodeliuotais šiluminių neutronų srautais matyti, jog darbe [1] naudotas srautas yra kiek mažesnis už vidutinį (~5,3 · 10<sup>13</sup> n/cm<sup>2</sup> · s), tačiau yra intervale tarp minimalaus ir maksimalaus (atitinkamai ~1,3 · 10<sup>13</sup> ir ~8,7 · 10<sup>13</sup> n/cm<sup>2</sup> · s) šiluminių neutronų srautų, ir atitinka sumodeliuotus šiluminių neutronų srautus ~1 metro atstumu nuo kuro kanalo galų (žr. 4 pav.). Taigi galima teigti, jog [1] darbe naudota 3 · 10<sup>13</sup> n/cm<sup>2</sup> · s šiluminių neutronų srauto reikšmė visam (pagal ilgį) kuro kanalo aktyvumui įvertinti buvo parinkta gerai, tačiau jei išskirti kuro kanalą į atskiras zonas, tai centrinėje zonoje tokia srauto reikšmė yra kiek per maža, o galuose – kiek per didelė.

Darbuose [5, 6], analizuojant kuro kanalų degradaciją dėl greitųjų neutronų poveikio, buvo sumodeliuoti atitinkamų energijų (E > 0,5 MeV ir E > 1 MeV) neutronų srautai juose. Modeliavimas atliktas WIMS-D4 kompiuterine programa, priimant panašias pradines modeliavimo sąlygas, kaip ir šiame darbe. Gauti rezultatai kuro kanalui parodė, kad didžiausias neutronų, kurių energija didesnė nei 0,5 MeV, srautas yra ~3,3 · 10<sup>13</sup> n/cm<sup>2</sup>· s, vidutinis – ~2,5 · 10<sup>13</sup> n/cm<sup>2</sup>· s, o neutronams, kurių energija didesnė nei 1 MeV, – atitinkamai ~2 · 10<sup>13</sup> n/cm<sup>2</sup>· s ir ~1,5 · 10<sup>13</sup> n/cm<sup>2</sup>· s. Šiame darbe gauti analogiškų energijų neutronų srautų pasiskirstymai išilgai kuro kanalo parodyti 5 pav.

Srautų kitimo pobūdis sutampa su pateiktaisiais darbuose [5, 6] (šie grafikai parodyti ir [1, 2] darbuose), t. y. centre stebimas lokalinis minimumas, o tolstant nuo jo srautai didėja, pasiekia maksimumus ir toliau monotoniškai mažėja. Maksimali neutronų, kurių energija didesnė nei 0,5 MeV, srauto reikšmė čia yra apie 3,4 · 10<sup>13</sup> n/cm<sup>2</sup>· s, o neutronų, kurių energija didesnė nei 1 MeV, – ~2,2 · 10<sup>13</sup> n/cm<sup>2</sup>· s, t. y. praktiškai sutampa su [5, 6] rezultatais. Vidutiniai neutronų srautai atitinkamai yra ~2,1 · 10<sup>13</sup> n/cm<sup>2</sup>· s ir 1,4 · 10<sup>13</sup> n/cm<sup>2</sup>· s, t. y. kiek daugiau



4 pav. Neutronų srautai centrinėje kuro kanalo dalyje



5 pav. Greitųjų neutronų srautai centrinėje kuro kanalo dalyje

skiriasi nuo [5, 6] rezultatų, nei maksimalių srautų atveju. Pagrindinė priežastis, kodėl skiriasi vidutiniai srautai, yra tai, kad šiame darbe kuro kanalo galuose yra gaunamos mažesnės srautų reikšmės, nei darbų [5, 6] atvejais, nes juose kuro kanalo aprašymas pasibaigia ties grafito klojinio riba taikant visiško neutronų atspindžio sąlygą, ir tokiu būdu kuro kanalo galuose srautas gaunamas didesnis nei šiame darbe.

Kaip minėta, siekiant įvertinti skirtingo kuro bei išdegimo įtaką modeliuojamiems neutronų srautams, buvo sukurti 3 skirtingi neutronų srautų modeliavimo atvejai (žr. 2.1 skyrių). Atlikus modeliavimą gauti rezultatai parodė, jog šiluminių neutronų srautas per visą kanalo aukštį, palyginus visus tris modelius, gaunamas didžiausias 3-iojo modelio atveju, t. y. naudojant šviežią kurą be erbio. Mažiausias skirtumas tarp gautų srautų yra centre ir galuose (atitinkamai ~4 % ir ~7 %), o didžiausi skirtumai gaunami tarpinėse dalyse ties kuro pusrinklių buvimo vieta (maksimalus skirtumas ~16 %). Vidutinis skirtumas per visą kanalo aukštį sudaro apie 10 %, o neutronų srautų kitimo pobūdis vienodas. Rezonansinių ir greitųjų neutronų srautai, kitaip nei šiluminių neutronų atveju, didžiausi gaunami kuro su erbiu atvejais. Didžiausi gaunami skirtumai yra ~20 % rezonansiniams ir apie 24 % greitiesiems neutronams, o vidutiniai skirtumai – atitinkamai ~14 % ir ~18 %. Palyginus suminius neutronų srautus (žr. 6 pav.) visiems trims modeliams matyti, jog jie skiriasi nedaug – maksimalus skirtumas ~12 %, o vidutinis per visą kanalo aukštį – ~6 %, t. y. suminių srautų skirtumai yra mažiausi, palyginti su atskirų energijų grupių srautais.

Šie rezultatai rodo, jog kuro tipas ar kuro išdegimas gautam neutronų srautų intensyvumui ir jų energetiniam spektrui lemiamos įtakos neturi, ir atsižvelgus į tai, jog per visą reaktoriaus darbo laikotarpį jame naudotas įvairaus tipo kuras, o visiškai išdegęs kuras nuolat keičiamas šviežiu (žr. 2.1 skyrių), atliekant aktyvacijos įvertinimus tikslingiausia naudoti būtent 1-uoju modeliavimo atveju gautus srautus.

#### 3.2. Neutroninės aktyvacijos modeliavimo rezultatai

Atliktos neutroninės aktyvacijos analizės naudojant maksimalias priemaišų elementų koncentracijas (A vertinimo atvejis) rezultatai rodo, jog didžiausias suminis savitasis aktyvumas visu modeliuotu laikotarpiu yra indukuojamas kuro kanalų centrinėse dalyse, ir iškart po galutinio reaktoriaus sustabdymo siekia maždaug  $1,9 \cdot 10^{10}$  Bq/g lygį, kuris per 150 aušinimo metų sumažėja iki  $6,7 \cdot 10^6$  Bq/g (žr. 7a pav.). Savitojo aktyvumo pasiskirstymas išilgai kuro kanalo centrinės dalies nėra vienodas ir esti didžiausias aktyviosios zonos centre, kur yra didžiausias šiluminių neutronų srautas, t. y. aktyvumo pasiskirstymas atitinka šiluminių neutronų srauto pasiskirstymą (žr. 4 pav.).

Kuro kanalo centrinės dalies, kurios savitasis aktyvumas didžiausias reaktoriaus sustabdymo metu, radionuklidinė sudėtis ir nuklidų aktyvumo kitimas po reaktoriaus sustabdymo parodyti 8a pav. Per pirmuosius ~40 aušinimo metų kuro kanalų savitąjį aktyvumą praktiškai nulemia <sup>60</sup>Co savitasis aktyvumas, o 40–150 metų aušinimo laikotarpiu vyraujančiu radionuklidu tampa <sup>94</sup>Nb. Kuro kanalų aktyvumo požiūriu taip pat svarbūs <sup>63</sup>Ni ir <sup>14</sup>C radionuklidai.

Priėmus minimalias priemaišų elementų koncentracijas (B vertinimo atvejis), kuro kanaluose indukuoto aktyvumo lygis yra mažesnis, palyginus su A vertinimo atveju. Didžiausia suminio savitojo aktyvumo reikšmė ( $\sim$ 1,6  $\cdot$  10<sup>10</sup> Bq/g sustab-



6 pav. Suminiai neutronų srautai centrinėje kuro kanalo dalyje, gauti 3 skirtingais modeliavimo atvejais



7 pav. Suminio aktyvumo lygio centrinėje kuro kanalo dalyje ašinis pasiskirstymas ir priklausomumas nuo laiko po reaktoriaus sustabdymo esant maksimaliai (*a*) ir minimaliai (*b*) priemaišų koncentracijai.

SUMA – suminis visų radionuklidų aktyvumas

dymo metu) pasiekiama aktyviosios zonos centre (žr. 7b pav.), o aktyvumo pasiskirstymas išilgai kuro kanalo taip pat atitinka šiluminių neutronų srauto pasiskirstymą.

Kuro kanalo centrinės dalies, kurios savitasis aktyvumas didžiausias reaktoriaus sustabdymo metu, radionuklidinė sudėtis ir jos kitimas po reaktoriaus sustabdymo parodyti 8b pav. Palyginus su A vertinimo atveju indukuotas aktyvumas taip pat yra  $10^{10}$  Bq/g eilės, tačiau jį nulemia trumpaamžiai nuklidai, ir praėjus 5 metams po reaktoriaus sustabdymo suminis savitasis aktyvumas pasiekia  $5,7 \cdot 10^6$  Bq/g ribą, o likusiu nagrinėjamu aušinimo laikotarpiu praktiškai nebekinta dėl aktyvumą sąly-gojančių ilgaamžių radionuklidų. Tuo tarpu A vertinimo atveju arti aktyviosos zonos centro esančių kuro kanalų suminis savitasis aktyvumas pasiekia  $6,7 \cdot 10^6$  Bq/g tik praėjus 150 metų. Kitaip nei A atveju, čia nėra  $^{60}Co$  indėlio suminiam savitajam aktyvumui, ir kuro kanalų aktyvumą praktiškai nulemia ilgaamžis nuklidas  $^{94}Nb$ .

Palyginus A ir B atvejais įvertintą kuro kanalų centrinės dalies suminio savitojo aktyvumo pasiskirstymą ašine kryptimi matyti, kad priemaišų elementų koncentracijų skirtumai ašinio pasiskirstymo profilio nekeičia, tačiau labiausiai sąlygoja suminį savitąjį aktyvumą ~2–50 metų aušinimo laikotarpiu, kai A vertinimo atveju kuro kanalų aktyvumą nulemia kobalto priemaišos aktyvacijos produktas <sup>60</sup>Co.

Vidutinis (suvidurkinus ašiniu atstumu) kuro kanalo centrinės dalies aktyvumas reaktoriaus sustabdymo metu siekia apie  $1,2 \cdot 10^{10}$  ir  $9,8 \cdot 10^9$  Bq/g, atitinkamai A ir B vertinimo atvejais, o vidutinis kuro kanalų centrinės dalies aktyvumas praėjus 150 metų po reaktoriaus sustabdymo yra atitinkamai  $4,6 \cdot 10^6$ ir  $3,9 \cdot 10^6$  Bq/g (žr. 7 pav.). Taigi tiek reaktoriaus sustabdymo metu, tiek praėjus 150 aušinimo metų kuro kanalų vidutinis suminis savitasis aktyvumas skiriasi ~1,2 karto esant minimalioms ir maksimalioms pradinėms priemaišų koncentracijoms.

9 ir 10 pav. yra pavaizduotas gautų rezultatų palyginimas su ankstesniame darbe [1] atliktos konservatyvios analizės rezultatais ir rezultatais, publikuojamais Černobylio AE 1-ojo bloko reaktoriaus RBMK-1000 kuro kanalams [11]. 9 pav. matyti, jog ankstesniame [1] darbe atliktos konservatyvios analizės metu





8 pav. Aktyvumo lygio centrinėje kuro kanalo dalyje priklausomumas nuo laiko po reaktoriaus sustabdymo esant maksimaliai (*a*) ir minimaliai (*b*) priemaišų koncentracijai.

SUMA – suminis visų radionuklidų aktyvumas



**9 pav.** Maksimalaus suminio aktyvumo lygio centrinėje kuro kanalo dalyje kitimas po reaktoriaus galutinio sustabdymo dėl priemaišų koncentracijos ir palyginimas su Černobylio AE 1-ojo bloko reaktoriaus bei [1] publikacijos duomenimis.

A atvejis – maksimali priemaišų koncentracija; B atvejis – minimali priemaišų koncentracija; Maks. konc. [1] – publikacijos [1] duomenys esant maksimaliai priemaišų koncentracijai; Min. konc. [1] – publikacijos [1] duomenys esant minimaliai priemaišų koncentracijai; ČAE – publikacijos [11] duomenys



10 pav. Maksimalaus radionuklidų aktyvumo lygio centrinėje kuro kanalo dalyje (iškart po reaktoriaus galutinio sustabdymo) palyginimas su publikuojamais Černobylio AE 1-ojo bloko reaktoriaus ir [1] publikacijos duomenimis

A atvejis – maksimali priemaišų koncentracija; B atvejis – minimali priemaišų koncentracija; Maks. konc. [1] – publikacijos [1] duomenys esant maksimaliai priemaišų koncentracijai; Min. konc. [1] – publikacijos [1] duomenys esant minimaliai priemaišų koncentracijai; ČAE – pub-likacijos [11] duomenys

gauti suminiai savitieji aktyvumai yra didesni už šiame darbe gautus maksimalius suminius aktyvumus, o aktyvumo kitimo profiliai visu modeliuotu aušinimo laikotarpiu sutampa, atitinkamai A ir B vertinimo atvejams. Černobylio AE atveju [11] suminio savitojo aktyvumo kitimo profilis taip pat sutampa su šiame darbe bei [1] darbe gautais profiliais esant A modeliavimo atvejui (maksimalios priemaišų koncentracijos), tačiau pačios aktyvumo reikšmės yra mažesnės. Panašų kitimo profilį sąlygoja tai, jog visais šiais atvejais aktyvumą nulemiančių radionuklidų sąrašas yra tas pats (<sup>3</sup>H, <sup>14</sup>C, <sup>41</sup>Ca, <sup>60</sup>Co, <sup>59</sup>Ni, <sup>63</sup>Ni, <sup>93</sup>Zr, <sup>93m</sup>Nb ir <sup>94</sup>Nb). Reaktoriaus sustabdymo metu šiame darbe gautas maksimalus suminis savitasis aktyvumas (A vertinimo atveju) yra ~3 kartus mažesnis už gauta [1] darbe ( $\sim 5, 1 \cdot 10^{10}$  Bq/g) ir  $\sim 3$  kartus didesnis nei pateikta [11] darbe Černobylio AE (~6,3 · 10<sup>9</sup> Bq/g), o po 150 aušinimo metų šie santykiai yra mažesni ir atitinkamai siekia ~1,3 (~8,4 · 106 Bq/g) ir ~1,5 karto (~4,5 · 106 Bq/g).

Ignalinos AE (IAE) 1-ojo bloko reaktoriaus kuro kanalų cirkonio–niobio lydinio E125 aktyvacijos modeliavimo rezultatų palyginimas su [1] ir [11] duomenimis iškart po reaktoriaus galutinio sustabdymo yra parodytas 10 pav. Matyti, jog cirkonio lydinio E125 neutroninės aktyvacijos modeliavimo rezultatai (A vertinimo atveju), t. y. pagrindinių suminį aktyvumą nulemiančių nuklidų aktyvumai IAE atveju gaunami didesni tiek šiame darbe, tiek [1] darbo atveju, palyginti su Černobylio AE (ČAE). 10 pav. taip pat aiškiai matyti gaunami radionuklidinės sudėties ir nuklidų aktyvumų skirtumai, modeliavimui naudojant skirtingas pradines priemaišas ir jų koncentracijas šiame bei [1] darbe. Žymesnis IAE (A vertinimo atvejais) ir ČAE pateiktų aktyvumų skirtumas yra tiktai <sup>3</sup>H nuklidui, o pagrindinė šio skirtumo priežastis yra paminėta [1] darbe, t. y. skirtumai kompiuterinių programų branduolinių duomenų bibliotekose berilio (<sup>9</sup>*Be*) priemaišų aktyvacijos reakcijoms. Tai, kad kai kurių nuklidų (<sup>14</sup>*C*, <sup>55</sup>*Fe* ir <sup>63</sup>*Ni*) savitasis aktyvumas šiame darbe yra didesnis nei [1] darbe (10 pav.), daugiausia nulėmė šiame darbe naudota atnaujinta ORIGEN-S programa bei kitokie spektriniai neutronų srautų koeficientai, palyginus su [1] darbu.

## 4. IŠVADOS

Šiame darbe gauti patikslinti (palyginti su konservatyviu atveju, kuriame vertinimas atliktas priimant, kad reaktorius dirba nominalia galia 20 metų) neutroninės aktyvacijos procesų modeliavimo rezultatai kuro kanaluose, naudojant sumodeliuotus neutronų srautus ir realią reaktoriaus darbo istoriją, parodė, jog:

• Maksimalus suminis savitasis kuro kanalų aktyvumas iškart po reaktoriaus galutinio sustabdymo yra ~3 kartus, o praėjus 150 aušinimo metų – ~1,3 karto mažesnis nei konservatyviu atveju, kuomet priimama, jog reaktorius nominalia galia dirba 20 metų;

 Suminio savitojo aktyvumo pasiskirstymas išilgai kuro kanalo atitinka šiluminių neutronų srauto pasiskirstymą, gautą modeliuojant neutronų srautus kuro kanale;

• Kaip ir konservatyvaus vertinimo atveju, kuriame modeliavimas atliktas priimant, kad reaktorius dirba nominalia galia 20 metų, gauti suminiai ir atskirų nuklidų savitieji aktyvumai yra didesni nei Černobylio AE 1-ojo bloko reaktoriaus atveju, iškart po reaktoriaus sustabdymo ir visu modeliuotu 150 metų aušinimo laikotarpiu.

#### Literatūra

- Narkūnas E., Šmaižys A., Poškas P. Reaktoriaus RBMK-1500 konstrukcinių elementų neutroninės aktyvacijos skaitinis vertinimas. 1. Kuro kanalų (lydinio E125) neutroninės aktyvacijos skaitinis vertinimas // Energetika. 2005. Nr. 1. P. 1–8.
- Narkūnas E., Šmaižys A., Poškas P. Reaktoriaus RBMK-1500 konstrukcinių elementų neutroninės aktyvacijos skaitinis vertinimas. 2. Atraminių ir apsauginių plieno plokščių neutroninės aktyvacijos skaitinis vertinimas // Energetika. 2008. T. 54. Nr. 2. P. 26–32.
- MCNP A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. LANL Report, LA-UR-03-1987, LA-CP-03-0245, LA-CP-03-0284, X-5. Los Alamos National Laboratory, 2003.
- Almenas K., Kaliatka A., Ušpuras E. Ignalina RBMK-1500. A Source Book. Extended and Updated Version. Kaunas: LEI, 1998.
- 5. Ignalina NPP Safety Analysis Report. Ignalina, 1996.
- 6. Safety Analysis Report for INPP Unit 2. Ignalina, 2003.
- Alexeev N. et al. The Monte Carlo Codes MCNP and MCU for RBMK Criticality Calculations // Nuclear Engineering and Design.1998. Vol. 183. No. 3. P. 287–302.
- Gauld I. C., Hermann O. W., Westfall R. M. ORIGEN-S: SCALE system module to calculate fuel depletion, actinide transmutation, fission product buildup and decay, and associated radiation source terms. ORNL, 2005.
- Gauld I. C., Litwin K. A. Verification and Validation of the ORIGEN-S Code and Nuclear Data Libraries. Scientific Document Distribution Office (SDDO), AECL, Chalk River, Ontario, Canada K0J 1J0, 1995.
- Zaymovskiy A. S., Nikulina A. V., Reshyotnikov N. G. Tsirkoniyevye splavy v atomnoy energetike. Moskva: Energoizdat, 1981. 253 p.
- Bylkin B. K., Davydova G. B. et al. Induced radioactivity and waste classification of reactor zone components of the Chernobyl nuclear power plant unit 1 after final shutdown // Nuclear Technology. 2001. Vol. 136. P. 76–88.

#### Ernestas Narkūnas, Artūras Šmaižys, Povilas Poškas

## NUMERICAL MODELLING OF NEUTRON ACTIVATION PROCESSES IN REACTOR RBMK-1500 STRUCTURAL ELEMENTS

### 3. MODELLING OF NEUTRON ACTIVATION PROCESSES IN FUEL CHANNELS EMPLOYING MODELLED NEUTRON FLUXES

#### Summary

This is the third paper from the series called "Numerical Modelling of Neutron Activation Processes in Reactor RBMK-1500 Structural Elements". In this work, activation processes in reactor RBMK-1500 structural elements, namely in fuel channels, are further analysed using modelled neutron fluxes. For this purpose, the 3D numerical model of the Ignalina NPP reactor RBMK-1500 one-lattice cell segment was developed, enveloping a graphite column with other elements inside it, shield and support plates, top and bottom metal structures with serpentinite, and other structures. Using the proposed model with the MCNP computer code, neutron fluxes in the reactor structures under analysis were estimated. Then, using the estimated neutron fluxes and neutron activation estimation models, the activity levels in fuel channels and their dependence on the concentration of initial impurities and on the cooling time after the final reactor shutdown were estimated using the ORIGEN-S computer code.

The revised data on neutron activation in fuel channels employing the modelled neutron fluxes and the real reactor operating history show that the distribution of total activity along the fuel channel corresponds to the distribution of the thermal neutron flux, and their activity values are lower than those of modelling the constant reactor operating history for 20 years at its nominal power.

Key words: RBMK-1500 reactor, fuel channels, neutron fluxes, activation, numerical modelling

Эрнэстас Наркунас, Артурас Шмайжис, Повилас Пошкас

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙТРОННОЙ АКТИВАЦИИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РЕАКТОРА РБМК-1500 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙТРОННОЙ АКТИВАЦИИ ТОПЛИВНЫХ КАНАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЯ СМОДЕЛИРОВАННЫЕ НЕЙТРОННЫЕ ПОТОКИ

#### Резюме

В работе, третьей из единой серии статей "Численное моделирование нейтронной активации конструктивных элементов реактора РБМК-1500", продолжен анализ процессов активации в конструктивных элементах реактора РБМК-1500, а именно в его топливных каналах используя смоделированные нейтронные потоки. С этой целью была создана трехмерная численная модель одного сегмента ячейки решетки реактора РБМК-1500 Игналинской АЭС, включая колону графита с находящимися в ней элементами, защитные и опорные плиты, верхнюю и нижнюю структуру металла с серпентинитом и другие структуры. С использованием указанной модели и компьютерного кода MCNP были смоделированы потоки нейтронов в анализированных структурах реактора. Затем, используя смоделированные нейтронные потоки и модели оценки нейтронной активации, уровни активности в топливных каналах в зависимости от начальной концентрации примесей и от времени выдержки после окончательной остановки реактора были оценены с помощью компьютерного кода ORIGEN-S.

Уточненные результаты оценки нейтронной активации топливных каналов, используя смоделированные нейтронные потоки и реальную историю работы реактора, показывают, что распределение суммарной активности по высоте топливного канала соответствует распределению потока тепловых нейтронов, а значения этой активности меньше, чем при моделировании постоянной работы реактора за 20 лет на номинальной мощности.

Ключевые слова: реактор РБМК-1500, топливные каналы, нейтронные потоки, активация, численное моделирование