

Reaktoriaus RBMK-1500 konstrukcinių elementų neutroninės aktyvacijos skaitinis vertinimas

2. Atraminųjų ir apsauginių plieno plokščių neutroninės aktyvacijos skaitinis vertinimas

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 antrasis publikacijų serijos „Reaktoriaus RBMK-1500 konstrukcinių elementų neutroninės aktyvacijos skaitinis vertinimas“ straipsnis. Darbe toliau nagrinėjama RBMK tipo branduolinio reaktoriaus konstrukcinių medžiagų, o būtent apsauginių ir atraminųjų plieno plokščių, neutroninė aktyvacija. Tuo tikslu buvo sukurtas konservatyvus skaitinis Ignalinos AE reaktoriaus RBMK-1500 plieno plokščių neutroninės aktyvacijos vertinimo modelis ir pagal šį modelį ORIGEN-S kompiuterine programa (SCALE 5 programų sistema) įvertinti apsauginių bei atraminųjų plokščių (20-os markės plieno) radioaktyvumo lygiai ir jų priklausomybė nuo plieno esančių priemaišų koncentracijos bei laiko po galutinio reaktoriaus sustabdymo.

Darbo metu gauti neutroninės aktyvacijos procesų modeliavimo rezultatai parodė, jog radioaktyviosios taršos požiūriu svarbiausi aktyvacijos metu plieno plokštėse susidarę radionuklidai yra: 3H , ^{14}C , ^{36}Cl , ^{55}Fe , ^{59}Ni , ^{60}Co ir ^{63}Ni .

Raktažodžiai: RBMK-1500 reaktorius, atraminės ir apsauginės plieno plokštės, neutroninė aktyvacija, skaitinis modeliavimas

1. ĮVADAS

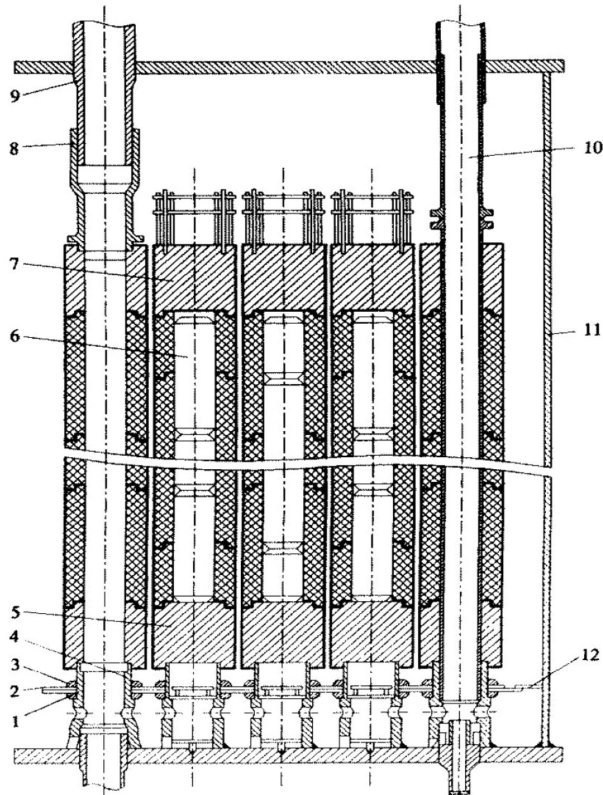
Pirmajame šios publikacijų serijos straipsnyje [1] buvo nagrinėjama RBMK tipo branduolinio reaktoriaus kuro kanalų konstrukcinės medžiagos (cirkonio ir niobio lydinio E125) neutroninė aktyvacija. Tuo tikslu buvo sukurtas konservatyvus skaitinis Ignalinos AE reaktoriaus RBMK-1500 kuro kanalų neutroninės aktyvacijos vertinimo modelis bei pagal šį modelį ORIGEN-S kompiuterine programa (SCALE 4.3 programų sistema) įvertintas cirkonio–niobio lydinio E125 aktyvumo lygis ir jo priklausomybė nuo laiko po galutinio reaktoriaus sustabdymo bei nuo priemaišų, esančių lydinyje E125, koncentracijos. Darbo metu gauti neutroninės aktyvacijos procesų modeliavimo rezultatai parodė, jog radioaktyviosios taršos požiūriu svarbiausi aktyvacijos metu kuro kanaluose susidarę radionuklidai yra: 3H , ^{14}C , ^{41}Ca , ^{55}Fe , ^{59}Ni , ^{60}Co , ^{63}Ni , ^{93}Zr , ^{93m}Nb ir ^{94}Nb .

Antrajame publikacijų serijos „Reaktoriaus RBMK-1500 konstrukcinių elementų neutroninės aktyvacijos skaitinis vertinimas“ straipsnyje pristatomas skaitinis RBMK-1500 reaktoriaus atraminųjų ir apsauginių plieno plokščių neutroninės aktyvacijos vertinimo modelis ir pagal šį modelį ORIGEN-S kompiuterine programa (SCALE 5 programų sistema) atliktos aktyvacijos analizės rezultatai. Ignalinos AE abiejų reaktorių apsauginės ir atraminės plokštės yra pagamintos iš 20-os markės plieno (kokybiškasis anglinis konstrukcinis 20-os markės plienas), kurio bendra masė yra apie 1008,2 tonos. Šios plokštės

yra greta reaktoriaus aktyviosios zonos ir veikiama intensyvaus neutronų srauto tampa radioaktyvios. Straipsnyje pristatomas modelis leidžia iš anksto identifikuoti aktyvuotose plokštėse susidariusius radionuklidus, įvertinti jų koncentracijas ir savituosius aktyvumus, o tai yra labai svarbu prognozuojant, kuriai radioaktyviųjų atliekų grupei priklausys šios aktyvuotos plieno plokštės ir koks radiacinis poveikis bus personalui, kuris išmontuos bei vėliau tvarkys šias medžiagas.

2. REAKTORIAUS RBMK-1500 APSAUGINĖS IR ATRAMINĖS PLOKŠTĖS

Ignalinos AE yra du kanaliniai RBMK-1500 tipo reaktoriai. Pagrindinė reaktoriaus dalis yra cilindro formos aktyvioji zona, sudaryta iš 2488 grafito kolonų, kurių pagrindas 250×250 mm. Kolonose yra ašinės kiaurymės, kuriose patalpinti kuro ir kiti specialūs kanalai. Kaip pavaizduota 1 pav., kiekviena grafito kolona stovi ant plieninės atraminės plokštės (5), kuri remiasi į plieninę įvorę (4). Ji privirinta prie apatinės metalo konstrukcijos viršutinės plokštės. Viršutinėje klojinio dalyje grafito kolonos tvirtinamos ir centruojamos su vamzdžiais-traktais (9), įvirintais viršutinėje metalo konstrukcijoje. Tai atliekama apsauginių plokščių (7) ir sujungimo įvorių (8) dėka. Apsauginės ir atraminės plokštės pagal konstrukciją yra identiškos – tai 250×250 mm pagrindo stačiakampiai gretasieniai (su ašinėmis kiaurymėmis kuro ir specialiesiems kanalams arba be jų), kurių



1 pav. Reaktoriaus RBMK-1500 grafito klojinio ir atraminių bei apsauginių plieno plokščių segmentas [2].

1 – apatinis žiedas; 2 – diafragma; 3 – viršutinis žiedas; 4 – įvorė; 5 – atraminės plokštės; 6 – grafito strypai; 7 – apsauginės plokštės; 8 – antvamzdis; 9 – vamzdis-traktas; 10 – reflektoriaus aušinimo kanalas; 11 – plieninis klojinio apvalkalas; 12 – žiedas

aukštis yra ~250 mm (apsauginės plokštės) ir ~200 mm (atraminės plokštės). Jos pagamintos iš 20-os markės plieno; iš viso viename reaktoriuje yra 2488 atraminės bei tiek pat apsauginių plokščių. Atlikdamos pagrindines – grafitinių kolonų tarpinių elementų tvirtinimo funkcijas, jos atlieka ir viršutinės bei apatinės metalo konstrukcijų šiluminės apsaugos ir, iš dalies, biologinės apsaugos funkcijas [2].

Visos minėtos konstrukcijos, veikiant reaktoriui, dirba intensyvaus neutronų / gamma srautų ir padidintų temperatūrų sąlygomis. Pavyzdžiui, apatinės metalo konstrukcijos viršutinėje dalyje atraminių konstrukcijų temperatūra siekia +350°C, apatinių atraminių plieno plokščių – +440°C, o maksimali apskaičiuota grafito temperatūra – +750°C.

Grafito klojinio, atraminių ir apsauginių plokščių temperatūros kontrolei grafito kolonų sandūrose įrengta 17 vertikalių 45 mm skersmens matavimo angų. 13-a angų yra aktyviojoje zonoje, o 4-ios – šoniniame reflektoriuje. Kiekvienoje angoje temperatūra matuojama 5-iuose skerspjūviuose pagal aukštį.

3. AKTYVACIJOS ĮVERTINIMO METODIKA

Kaip minėta, aktyvacijos modeliavimas buvo atliktas Ignalinos AE reaktoriaus RBMK-1500 atraminėms ir apsauginėms plokštėms, kurios yra pagamintos iš 20-os markės plieno. Šio plieno sudėtiniai cheminiai elementai bei maksimalios priemaišų kon-

centracijos yra pateiktos 1 lentelėje [3, 4]. Lentelėje taip pat pateikta ir tokia plieno sudėtis, kai priimamos minimalios legiruojančių priemaišų koncentracijos, o žalingos priemaišos iš viso nevertinamos [3]. Kadangi tiksliai Ignalinos AE naudojamo 20-os markės plieno sudėtis nėra žinoma, tai aktyvacija sumodeliuota dviem atvejams, kai priimamos maksimalios ir minimalios priemaišų koncentracijos. Toks aktyvacijos modeliavimas leidžia įvertinti intervalą, kuriame gali kisti gauti rezultatai (aktyvuotame pliene esančių radionuklidų sąrašas ir jų radioaktyvumai) dėl pradinės priemaišų koncentracijos, bei atlikti dalinę pliene indukuoto aktyvumo jautrumo sudėtiniais elementams ir jų koncentracijoms analizę.

Modeliuojant tam tikro cheminio elemento izotopinę sudėtis buvo priimta tokia pat, kaip natūraliai gamtoje aptinkamo to elemento izotopinė sudėtis, o pagrindinės aktyvacijos reakcijos, vykstančios atraminėse bei apsauginėse plieno plokštėse, yra pateiktos 2 lentelėje.

Šiame darbe plieno plokščių aktyvacijos procesai buvo modeliuojami naudojant atnaujintą SCALE 5 sistemos programą ORIGEN-S (lyginant su [1] darbe naudota) [5], kuri yra plačiai naudojama visame pasaulyje ir įteisinta (validuota) bei patikrinta (verifikuota) tokių procesų analizei [6]. Ši programa vertina radioaktyvųjų skilimą, dėl neutronų absorbcijos vykstančias

1 lentelė. 20-os markės plieno cheminė sudėtis ir elementų koncentracijos (% pagal masę) [3, 4]

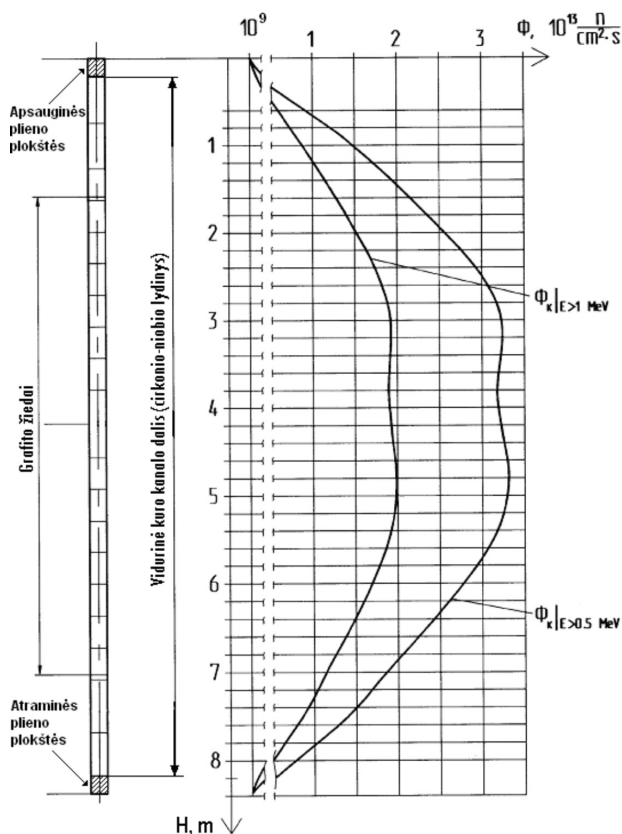
Elementas*	Maks. konc.	Min. konc.
As	0,08	–
C	0,24	0,17
Co	0,01	–
Cr	0,25	0,25
Cu	0,3	–
Mn	0,65	0,35
Ni	0,25	–
P	0,035	–
S	0,04	–
Si	0,37	0,17

* Likusių dalių sudaro geležies (Fe) koncentracija.

2 lentelė. Pagrindinės neutroninės aktyvacijos reakcijos plieno plokštėse

(X – motininis nuklidas, (x, y) – branduolinės reakcijos tipas, Y – dukterinis nuklidas, T – dukterinio nuklido skilimo pusėjimo trukmė (d – dienos, m – metai))

X	(x, y)	Y	T
¹³ C	n, γ	¹⁴ C	5730 m
³¹ P	n, γ	³² P	14,26 d
³⁴ S	n, γ	³⁵ S	87,4 d
⁵⁰ Cr	n, γ	⁵¹ Cr	27,7 d
⁵⁴ Fe	n, p	⁵⁴ Mn	312,5 d
⁵⁴ Fe	n, γ	⁵⁵ Fe	2,7 m
⁵⁵ Mn	n, 2n	⁵⁴ Mn	312,5 d
⁵⁶ Fe	n, 2n	⁵⁵ Fe	2,7 m
⁵⁸ Fe	n, γ	⁵⁹ Fe	44,6 d
⁵⁸ Ni	n, γ	⁵⁹ Ni	7,5 · 10 ⁴ m
⁵⁸ Ni	n, p	⁵⁸ Co	70,8 d
⁵⁹ Co	n, γ	⁶⁰ Co	5,272 m
⁶² Ni	n, γ	⁶³ Ni	101,1 m
⁶³ Cu	n, p	⁶³ Ni	101,1 m
⁷⁵ As	n, γ	⁷⁶ As	1,08 d



2 pav. Neutronų srauto pasiskirstymas išilgai Ignalinos AE 1-ojo bloko reaktoriaus aktyviosios zonos [7]

pagavos bei dalijimosi reakcijas medžiagoje ir įgalina nustatyti neutroninės aktyvacijos metu susidariusius nuklidus, jų radioaktyvumus bei koncentracijas.

Kaip ir pirmajame šios publikacijų serijos straipsnyje [1], preliminarium 20-os markės plieno aktyvacijos įvertinimui buvo remiamasi eksperimentiniais neutronų srauto matavimais Ignalinos AE ir srauto pasiskirstymu išilgai 1-ojo Ignalinos AE bloko reaktoriaus aktyviosios zonos reaktoriaus darbo metu, kuris pavaizduotas 2 pav. (neutronų energijos $E > 0,5$ MeV ir $E > 1$ MeV) [7].

Modeliuojant plieno aktyvaciją nebuvo panaudota reali reaktoriaus darbo istorija, bet konservatyviai buvo priimta, kad reaktorių 20 metų (20 ciklų) nenutrūkstamai dirba tuo pačiu pastoviu režimu esant nominaliai 4200 MW šiluminei galiai. Taip pat, remiantis anksčiau minėtais neutronų srautų matavimų rezultatais ir atsižvelgus į 2 paveikslą bei apsauginių ir atraminių plokščių buvimo vietą reaktoriuje, buvo priimta, kad šiluminių neutronų srauto tankis visais reaktoriaus darbo ciklais plieno plokštėse visomis kryptimis yra pastovus ir lygus:

- $6 \cdot 10^{10}$ n/(cm² · s) apsauginėse plieno plokštėse;
- $9 \cdot 10^{10}$ n/(cm² · s) atraminėse plieno plokštėse.

Apsauginių ir atraminių plieno plokščių aktyvacijos modeliavimas buvo atliktas dviem atvejais: esant maksimaliai („Atvejis-1“) ir minimaliai („Atvejis-2“) pradinei plieno priemaišų koncentracijai.

Abiem modeliavimo atvejais („Atvejis-1“ ir „Atvejis-2“) plieno plokštėse susidarantys radionuklidai ir jų aktyvumai buvo įvertinti laiko momentu iškart po apšvitinimo nutraukimo ir

keliais laiko momentais per 150 metų laikotarpį po apšvitinimo nutraukimo, t. y. po reaktoriaus galutinio sustabdymo.

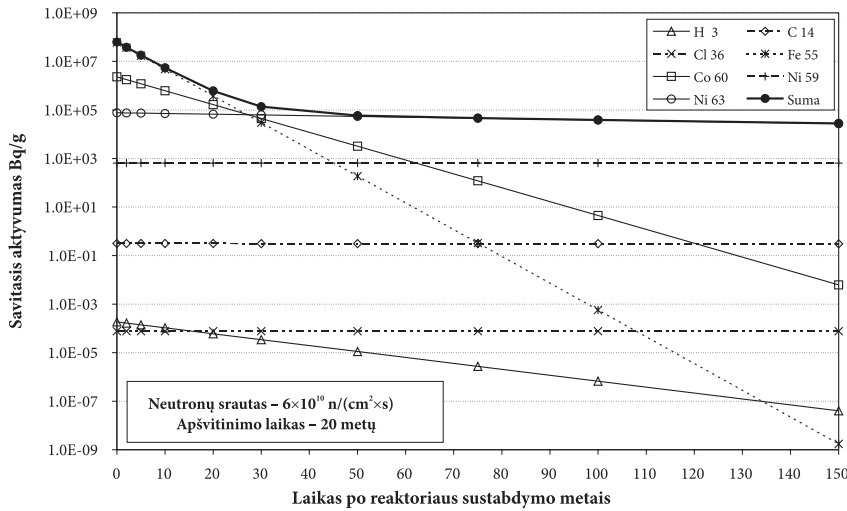
4. REZULTATAI IR JŲ ANALIZĖ

Aktyvacijos procesų metu, esant maksimaliai pradinei priemaišų koncentracijai, („Atvejis-1“) apsauginėse plieno plokštėse susidariusių pagrindinių radionuklidų (³H, ¹⁴C, ³⁶Cl, ⁵⁵Fe, ⁵⁹Ni, ⁶⁰Co ir ⁶³Ni) savitojo aktyvumo ir jų suminio savitojo aktyvumo lygio kitimas sustabdžius reaktorių parodytas 3 pav., o atraminėse plieno plokštėse – 4 pav. Apsauginių ir atraminių plokščių suminiai savitieji aktyvumai šiuo atveju yra atitinkamai apie $6,3 \cdot 10^7$ ir $9,5 \cdot 10^7$ Bq/g iškart po galutinio reaktoriaus sustabdymo. Pirmuosius 25 metus po reaktoriaus galutinio sustabdymo trumpaamžiai radionuklidai ⁵⁵Fe ir ⁶⁰Co pasižymi didžiausiais savitaisiais aktyvumais. Praėjus 150 metų po galutinio reaktoriaus sustabdymo, apsauginių ir atraminių plokščių suminiai savitieji aktyvumai sumažėja atitinkamai iki $2,8 \cdot 10^4$ ir $4,2 \cdot 10^4$ Bq/g, o per 25–150 metų po reaktoriaus galutinio sustabdymo vyraujančiu radionuklidu tampa ilgaamžis ⁶³Ni (3 ir 4 pav.). 20–40 metų laikotarpiu suminių plokščių aktyvumą praktiškai lemia visi trys minėti radionuklidai – ⁵⁵Fe, ⁶⁰Co ir ⁶³Ni. Likusių nuklidų aktyvumo lygis reaktoriaus sustabdymo metu nėra didelis ir per modeliuojamą 150 metų laikotarpį po reaktoriaus galutinio sustabdymo suminiam plieno plokščių aktyvumui praktiškai neturi įtakos.

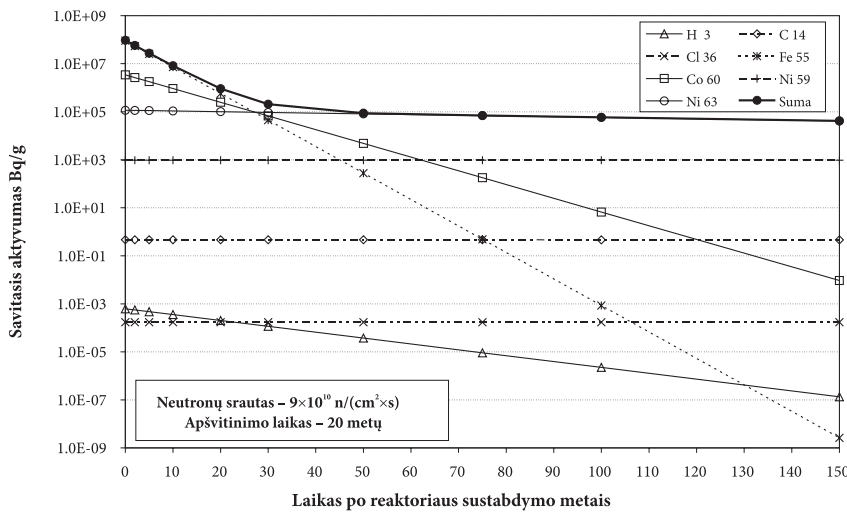
Vertinant plieno plokščių aktyvumą, svarbiausios yra aktyvumo reikšmės dviem laiko momentais: šių plokščių išmontavimo ir jų galutinio laidojimo metu. Remiantis galutiniu Ignalinos AE 1-ojo ir 2-ojo blokų eksploatavimo nutraukimo planu [8], apsauginės ir atraminės plokštės bus išmontuojamos, praėjus 11 metų po Ignalinos AE reaktorių galutinio sustabdymo, ir tikėtina, kad galutinai šios medžiagos bus palaidotos praėjus maždaug 50 metų po jų išmontavimo, t. y. maždaug po 60 metų po reaktorių galutinio sustabdymo [8].

3 ir 4 pav. matyti, kad apsauginių ir atraminių plokščių išmontavimo metu 20-os markės plieno suminiai savitieji aktyvumai yra daugiau nei 10 kartų mažesni, lyginant su atitinkamais plokščių aktyvumais reaktoriaus sustabdymo metu, ir neviršija $5,4 \cdot 10^6$ Bq/g apsauginėse ir $8,2 \cdot 10^6$ Bq/g atraminėse plokštėse. Apie 85% viso aktyvumo šiuo laiko momentu sudaro ⁵⁵Fe aktyvumas, apie 12% ⁶⁰Co aktyvumas, o likusių elementų indėlis mažesnis nei 3% suminio aktyvumo. Radioaktyviųjų atliekų, kurioms priklausys ir aktyvuotos plokštės, tikėtino laidojimo metu suminis savitasis aktyvumas sumažėja daugiau nei 1000 kartų, lyginant su plieno aktyvumu reaktoriaus sustabdymo metu, ir siekia maždaug $5,5 \cdot 10^4$ Bq/g apsauginėse ir $8,5 \cdot 10^4$ Bq/g atraminėse plokštėse. Apie 95% suminio aktyvumo sudaro ⁶³Ni aktyvumas, o praktiškai visą likusį suminį aktyvumą lygiomis dalimis sudaro ⁵⁹Ni ir ⁶⁰Co.

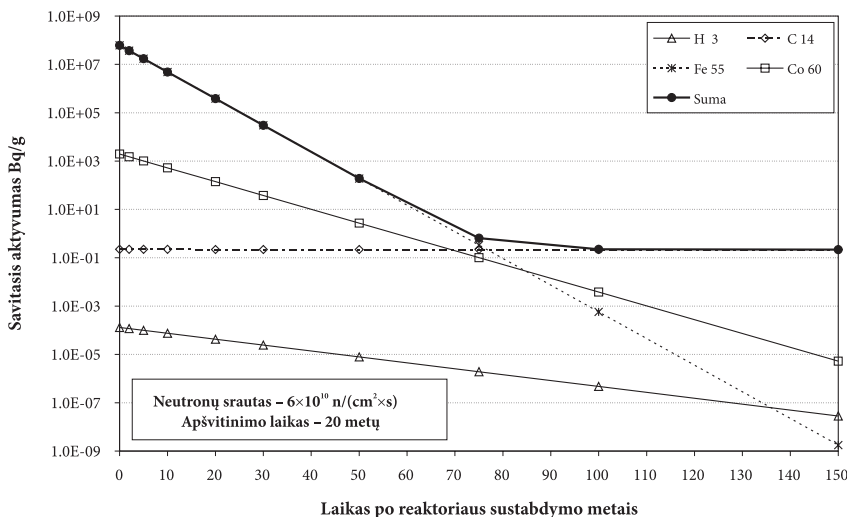
Aktyvacijos analizės rezultatai apsauginėms ir atraminėms plieno plokštėms esant minimaliai pradinei priemaišų koncentracijai („Atvejis-2“) yra parodyti atitinkamai 5 ir 6 pav. Kadangi tiksliai Ignalinos AE naudojamo 20-os markės plieno sudėtis ir priemaišų koncentracijos nėra žinomos, tai modeliavimas priimančiomis minimalias ir maksimalias priemaišų koncentracijas leidžia įvertinti aktyvacijos modeliavimo rezultatų intervalą, kuriame gali kisti reali aktyvuotame pliene esančių radionukli-



3 pav. Radioaktyvumo lygio apsauginėse plieno plokštėse priklausomybė nuo laiko po galutinio reaktoriaus sustabdymo (priemaišų koncentracija maksimali). SUMA – suminis visų radionuklidų aktyvumas



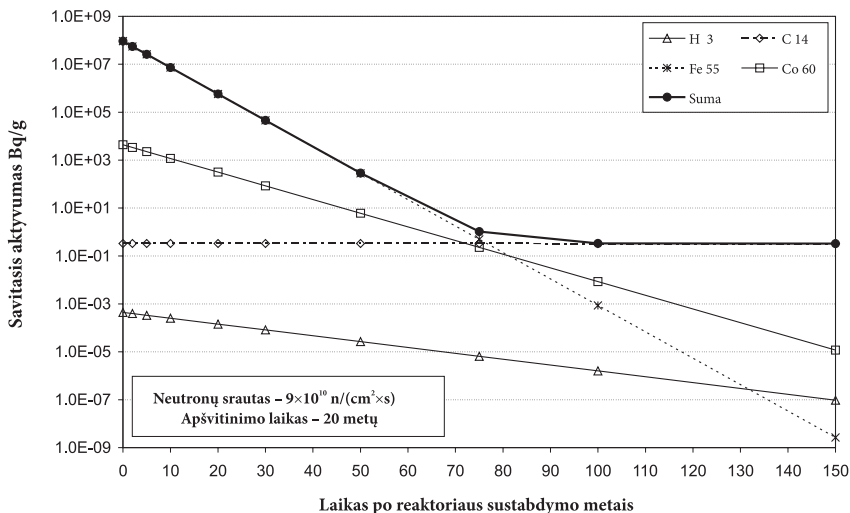
4 pav. Radioaktyvumo lygio atraminėse plieno plokštėse priklausomybė nuo laiko po galutinio reaktoriaus sustabdymo (priemaišų koncentracija maksimali). SUMA – suminis visų radionuklidų aktyvumas



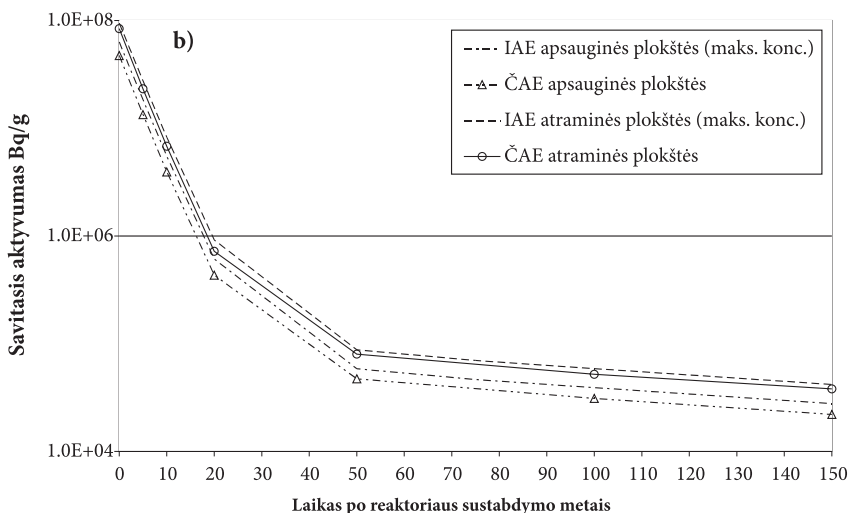
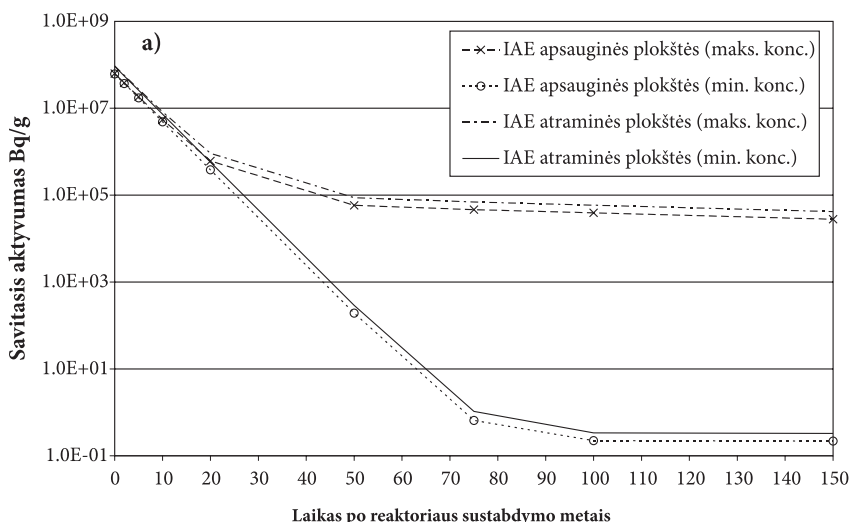
5 pav. Radioaktyvumo lygio apsauginėse plieno plokštėse priklausomybė nuo laiko po galutinio reaktoriaus sustabdymo (priemaišų koncentracija minimali). SUMA – suminis visų radionuklidų aktyvumas

dų sudėtis ir jų aktyvumai. Gauti rezultatai parodė, kad modelia-vime priėmus minimalias priemaišų koncentracijas, apsauginių plokščių suminis savitasis aktyvumas iškart po reaktoriaus galutinio sustabdymo neviršija $6,2 \cdot 10^7$ Bq/g, o atraminių plokščių – $9,3 \cdot 10^7$ Bq/g ir po 150 metų sumažėja iki atitinkamai $2,2 \cdot 10^{-1}$ ir $3,3 \cdot 10^{-1}$ Bq/g. Palyginus 3 ir 4 pav. su 5 ir 6 pav. ma-

tyti, jog esant minimaliai priemaišų koncentracijai („Atvejis-2“) praktiškai nesusidaro (arba susidaro labai maži kiekiai, t. y. savitiejį aktyvumai mažesni nei 10^{-9} Bq/g eilės) tokie ilgaamžiai radionuklidai kaip ^{59}Ni ir ^{63}Ni , kurie ankstesniu modeliavimo atveju („Atvejis-1“) nulėmė plieno suminį aktyvumą 60–150 metų laikotarpiu po reaktoriaus galutinio sustabdymo. Be to, ir



6 pav. Radioaktyvumo lygio atraminėse plieno plokštėse priklausomybė nuo laiko po galutinio reaktoriaus sustabdymo (priemaišų koncentracija minimali). SUMA – suminis visų radionuklidų aktyvumas

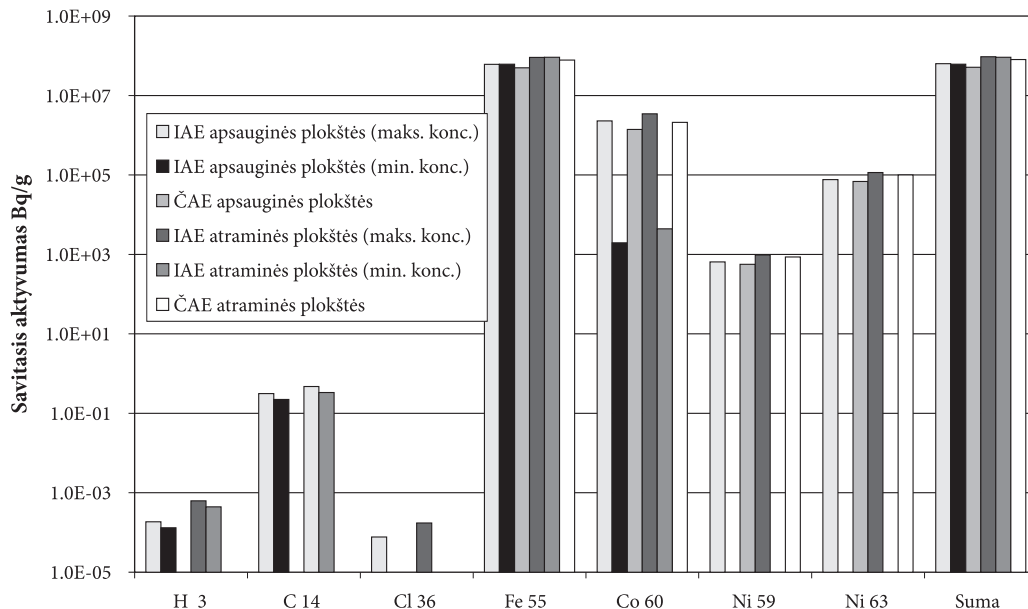


7 pav. Radioaktyvumo lygio apsauginėse ir atraminėse plieno plokštėse kitimo po reaktoriaus galutinio sustabdymo priklausomybė nuo priemaišų koncentracijos (a) ir palyginimas su publikuojamais skaičiais Černobylio AE 1-ojo bloko reaktoriui (b)

Maks. konc. – maksimali priemaišų koncentracija; Min. konc. – minimali priemaišų koncentracija; ČAE – publikacijos [4] duomenys

⁶⁰Co aktyvumas yra apie 1000 kartų mažesnis priėmus minimalias priemaišų koncentracijas. Šiuo atveju („Atvejis-2^c“) plieno suminį aktyvumą pirmuosius 60 metų po reaktoriaus galutinio sustabdymo nulemia vienintelio trumpaamžio ⁵⁵Fe aktyvumas, 60–90 metų laikotarpiu – ¹⁴C, ⁵⁵Fe ir ⁶⁰Co aktyvumai, o 90–150 metų laikotarpiu – ilgaamžio ¹⁴C aktyvumas.

Modeliavimo rezultatai parodė (3–7a pav.), jog atraminių plieno plokščių suminis radioaktyvumo lygis iškart po reaktoriaus sustabdymo ir visu modeliuotu 150 metų aušinimo laikotarpiu yra didesnis, lyginant su apsauginėms plieno plokštėms gautomis reikšmėmis, o pagrindiniai radionuklidai yra tie patys (lyginant atitinkamai to pačio modeliavimo atvejo rezulta-



8 pav. Radionuklidų aktyvumo lygio apsauginėse ir atraminėse plieno plokštėse (iškart po reaktoriaus galutinio sustabdymo) palyginimas su publikuojamais duomenimis Černobylio AE 1-ojo bloko reaktoriui.

Maks. konc. – maksimali priemaišų koncentracija; Min. konc. – minimali priemaišų koncentracija; ČAE – publikacijos [4] duomenys; SUMA – suminis visų radionuklidų aktyvumas

tus atraminėms ir apsauginėms plokštėms). Taip yra todėl, kad atraminė ir apsauginė plokščių plieno sudėtis yra tokia pati, tačiau atraminės plokštės yra veikiamos didesniu neutronų srautu, o tai ir sąlygoja intensyvesnius aktyvacijos procesus. Taip pat 7a pav. matyti, jog pirmus ~20 metų po galutinio reaktoriaus sustabdymo suminis plokščių aktyvumas praktiškai nepriklauso nuo pradinės priemaišų sudėties ir koncentracijos, nes suminį aktyvumą nulemia ^{55}Fe – trumpaamžis pagrindinio plieną sudarančio cheminio elemento (geležies) aktyvacijos produktas. Priemaišų aktyvacijos produktų įtaka labiau išryškėja vėlesniu laikotarpiu.

Ignalinos AE ir Černobylio AE 1-ojo bloko reaktoriaus plieno plokščių suminių aktyvumų priklausomybė nuo laiko po reaktoriaus galutinio sustabdymo yra parodyta 7 pav. b, kuriame matyti, kad Černobylio AE atveju plieno blokų suminio aktyvumo kitimo profilis sustabdžius reaktorių yra labai panašus į šiame darbe sumodeliuotą Ignalinos AE apsauginių ir atraminė plokščių aktyvumo kitimo profilį („Atvejis-1“), bet pačios aktyvumo reikšmės visais laiko momentais yra mažesnės už šio darbo metu gautas reikšmes, atitinkamai apsauginėms ir atraminėms plokštėms. Iš esmės šį rezultatų skirtumą lemia tai, kad Ignalinos AE reaktoriuose yra sukuriama didesnių tankių neutronų srautai (Ignalinos AE reaktorių RBMK-1500 galingumas yra didesnis už Černobylio AE reaktorių RBMK-1000 galingumą), todėl vyksta intensyvesni medžiagų aktyvacijos procesai bei tai, kad šiame darbe sukurtas aktyvacijos vertinimo modelis yra konservatyvus ir neįvertina realaus neutronų srauto plieno plokštėse bei neatsižvelgia į realią reaktoriaus darbo istoriją.

Ignalinos AE plieno plokščių aktyvacijos modeliavimo rezultatų palyginimas tarpusavyje ir su [4] duomenimis iškart po reaktoriaus galutinio sustabdymo yra pavaizduotas 8 pav. Matyti, jog 20-os markės plieno neutroninės aktyvacijos modeliavimo rezultatai didžiausią aktyvumą turintiems nuklidams („Atvejis-1“) nedaug skiriasi nuo Černobylio AE 1-ojo bloko

reaktoriaus 20-os markės plieno aktyvacijos modeliavimo rezultatų. 8 pav. taip pat aiškiai matyti gaunami radionuklidinės sudėties ir nuklidų aktyvumų skirtumai, modeliavimui naudojant skirtingas pradines priemaišas ir jų koncentracijas („Atvejis-1“ ir „Atvejis-2“).

5. IŠVADOS

Šiame darbe buvo sukurtas konservatyvus skaitinis Ignalinos AE reaktoriaus RBMK-1500 apsauginių ir atraminė plieno plokščių neutroninės aktyvacijos vertinimo modelis. Pagal šį modelį ORIGEN-S kompiuterine programa (SCALE 5 programų sistema) buvo įvertinti plieno plokščių aktyvumo lygiai. Gauti rezultatai buvo palyginti su publikuojamais Černobylio AE 1-ojo bloko RBMK reaktoriaus atraminė ir apsauginė plieno plokščių neutroninės aktyvacijos vertinimo rezultatais.

Konservatyviai įvertinus Ignalinos AE reaktoriaus RBMK-1500 apsauginių ir atraminė plieno plokščių neutroninę aktyvaciją, galima padaryti tokias išvadas:

- Suminio indukuoto aktyvumo lygiai apsauginėse ir atraminėse plokštėse per pirmuosius ~20 metų po galutinio reaktoriaus sustabdymo mažai priklauso nuo plieno priemaišų sudėties bei jų koncentracijos, nes suminį aktyvumą praktiškai nulemia ^{55}Fe – trumpaamžis pagrindinio plieną sudarančio cheminio elemento (geležies) aktyvacijos produktas. Priemaišų aktyvacijos produktų įtaka labiau išryškėja vėlesniu laikotarpiu.
- Naudojant maksimalias priemaišų koncentracijas, apsauginių ir atraminė plokščių savitieji aktyvumai atitinkamai yra $\sim 6,3 \cdot 10^7$ ir $\sim 9,5 \cdot 10^7$ Bq/g iškart po galutinio reaktoriaus sustabdymo. Praėjus 150 metų po reaktoriaus sustabdymo, apsauginių ir atraminė plokščių savitieji aktyvumai sumažėja atitinkamai iki $\sim 2,8 \cdot 10^4$ ir $\sim 4,2 \cdot 10^4$ Bq/g.
- Iki aktyvuotų plokščių išmontavimo jų suminis savitasis aktyvumas per 11 metų sumažėja daugiau nei 10 kartų,

lyginant su jų aktyvumu iškart po reaktoriaus galutinio sustabdymo („Atvejis-1“). Beveik visą aktyvumą, t. y. kiek daugiau nei 85% viso aktyvumo, sudaro trumpaamžis ^{55}Fe . Likusią aktyvumo dalį daugiausia sudaro trumpaamžis ^{60}Co (~12%) ir ilgaamžis ^{63}Ni (~2%).

- Radioaktyviųjų atliekų, kurioms priklausys ir aktyvuo-
tos plieno plokštės, tikėtino laidojimo metu (t. y. maždaug po
60 metų po reaktorių galutinio sustabdymo) plokščių suminis
savitasis aktyvumas sumažėja daugiau nei 1000 kartų, lyginant
su jų aktyvumu iškart po reaktoriaus sustabdymo („Atvejis-1“).
Šiuo laiko momentu didžiąją aktyvumo dalį, t. y. apie 95%, suda-
ro ilgaamžio ^{63}Ni aktyvumas.

Gauta 2007 12 14

Priimta 2008 01 22

Literatūra

1. 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.
2. Almenas K., Kaliatka A., Ušpuras E. Ignalina RBMK-1500. A Source Book. Extended and Updated Version. Kaunas: LEI, 1998.
3. Pavaras A., Žvinys J. Plienai. Kaunas: Technologija, 1995.
4. 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.
5. 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. Vol.
6. 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.
7. Ignalina NPP Safety Analysis Report. Ignalina, 1996.
8. Galutinis Ignalinos AE 1-ojo ir 2-ojo blokų eksploataavimo nutraukimo planas. Ignalina, 2004.

Ernestas Narkūnas, Artūras Šmaižys, Povilas Poškas

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

2. NUMERICAL MODELLING OF NEUTRON ACTIVATION PROCESSES IN SHIELDING AND SUPPORT PLATES

Summary

This is the second paper from the series called “Numerical Modelling of Neutron Activation Processes in Reactor RBMK-1500 Structural Elements”. Activation processes are further analysed in reactor RBMK-1500 structural elements, namely in shielding and support steel plates. For this purpose, the model for numerical modelling of neutron activation in the Ignalina NPP reactor RBMK-1500 steel plates was developed based on conservative assumptions. According to the proposed model, the assessment of radioactivity levels in shielding and support plates (steel grade 20) were performed using the ORIGEN-S computer code (SCALE 5 computer codes system). Dependence of induced radioactivity levels on the initial concentration of impurities in steel and on cooling time after final reactor shutdown is also analysed.

The results of neutron activation modelling show that from the radiological point of view the most important radionuclides induced during neutron activation in reactor shielding and support plates are ^3H , ^{14}C , ^{36}Cl , ^{55}Fe , ^{59}Ni , ^{60}Co ir ^{63}Ni .

Key words: reactor RBMK-1500, shielding and support steel plates, neutron activation, numerical modelling

Эрнэстас Наркунас, Артурас Шмайжис, Повилас Пошкас

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙТРОННОЙ АКТИВАЦИИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РЕАКТОРА РБМК-1500

2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙТРОННОЙ АКТИВАЦИИ В ЗАЩИТНЫХ И ОПОРНЫХ ПЛИТАХ

Резюме

В работе, второй из единой серии статей, продолжен анализ процессов активации в конструктивных элементах реактора РБМК-1500, а именно в защитных и опорных стальных плитах. С этой целью была создана модель для численной оценки нейтронной активации в стальных плитах реактора РБМК-1500 Игналинской АЭС, основанная на консервативных предположениях. По этой модели с использованием компьютерного кода ORIGEN-S (система компьютерных кодов SCALE 5) были оценены уровни наведенной радиоактивности в защитных и опорных плитах (сталь марки 20). Также проанализирована зависимость уровней наведенной радиоактивности от начальной концентрации примесей в стали и от времени после окончательной остановки реактора.

Оценка нейтронной активации показала, что с радиологической точки зрения наиболее важными радионуклидами, наведенными во время нейтронной активации в защитных и опорных плитах реактора, являются: ^3H , ^{14}C , ^{36}Cl , ^{55}Fe , ^{59}Ni , ^{60}Co и ^{63}Ni .

Ключевые слова: реактор РБМК-1500, защитные и опорные стальные плиты, нейтронная активация, численное моделирование