

# Reaktoriaus RBMK-1500 konstrukciniø elementø neutroninës aktyvacijos skaitinis vertinimas

## 1. Kuro kanalø (lydinio E125) neutroninës aktyvacijos skaitinis vertinimas

**Ernestas Narkûnas,**  
**Artûras Ðmailys,**  
**Povilas Poðkas**

*Lietuvos energetikos institutas,  
Branduolinës inþinerijos problemø  
laboratorija, Breslaujos g. 3,  
LT-44403 Kaunas*

Pradėjus Ignalinos atominës elektrinës (IAE) demontavimo darbus, didelë kieká radioaktyviøjø atliekø sudarys reaktoriaus konstrukcinës medþiagos (grafitas, betonas, metalinës dalys), kurios dirbant reaktoriams veikiamos intensyvaus neutronø srauto tampa radioaktyviomis. Kad bûtø galima numatyti iðmontavimo darbus, reikia preliminariø duomenø apie eksploataavimo nutraukimo metu susidarysianëiø radioaktyviøjø atliekø kieká radioaktyvumo lygá, nuklidinæ sudëtá ir kt.

Ðiame darbe nagrinëjama RBMK tipo branduolinio reaktoriaus kuro kanalø konstrukcinës medþiagos (cirkonio ir niobio lydinio E125) neutroninë aktyvacija. Tam tikslui buvo sukurtas konservatyvus skaitinis Ignalinos AE reaktoriaus RBMK-1500 kuro kanalø neutroninës aktyvacijos vertinimo modelis bei pagal ðá modelá ORIGEN-S kompiuterine programa (SCALE 4.3 programø sistema) ávertintas cirkonio lydinio E125 aktyvumo lygis ir jo priklausomybë nuo laiko po galutinio reaktoriaus sustabdymo bei nuo priemaiðø, esanëiø lydinyje E125, koncentracijos.

Gauti neutroninës aktyvacijos procesø modeliavimo rezultatai parodë, jog radioaktyviosios tarðos poþiûriu svarbiausi aktyvacijos metu kuro kanaluose susidaræ radionuklidai yra:  $^3H$ ,  $^{14}C$ ,  $^{41}Ca$ ,  $^{55}Fe$ ,  $^{60}Co$ ,  $^{59}Ni$ ,  $^{63}Ni$ ,  $^{93}Zr$ ,  $^{93m}Nb$ ,  $^{94}Nb$ .

**Raktaþodþiai:** Ignalinos AE, reaktoriaus RBMK-1500 kuro kanalai, neutroninë aktyvacija, skaitinis modeliavimas

### 1. ÁVADAS

Atominës elektrinës eksploataavimo nutraukimas yra ilgas ir sudëtingas procesas, reikalaujantis nemaþai lëðø. Pasirengimas ðiam procesui trunka ne vienerius metus ir apima pasiruoðimá saugiam elektrinës iðmontavimui, eksploataavimo metu susidariusiø radioaktyviøjø atliekø sutvarkymui, panaudoto branduolinio kuro saugojimui ir kt. Norint numatyti iðmontavimo darbus, ádiegti radioaktyviøjø atliekø apdorojimo technologijas, saugyklas ir kapinynus, reikia preliminariø duomenø apie eksploataavimo nutraukimo metu susidarysianëiø radioaktyviøjø atliekø kieká, radioaktyvumo lygá, nuklidinæ sudëtá ir kt.

Ignalinos AE 1-ojo ir 2-ojo blokø reaktoriø kuro kanalai yra pagaminti ið cirkonio ir niobio lydinio E125, kurio ið viso yra apie 215 tonø. Ðie kanalai, veikiami intensyvaus neutronø srauto, tampa radioaktyvûs. Reaktoriaus aktyviojoje zonoje neutronø srauto tankis siekia  $10^{13}$  n / (cm<sup>2</sup> · s), todël ir

nepasipýminëiø didele sáveikos tikimybe elementø branduoliai yra aktyvuojami. Sustabdþius Ignalinos AE ir pradėjus elektrinës demontavimo darbus, grafito klojinys, cirkonio kanalai, plieninës, betoninës ir kitos konstrukcijos turës bûti iðmontuotos, apdorotos, paliktos ilgalaikiam saugojimui arba palaidotos. Todël yra svarbu ið anksto identifikuoti aktyvuotose medþiagose susidariusius radionuklidus, ávertinti jø koncentracijas bei aktyvumus. Tokiu bûdu galima prognozuoti spinduliuotës poveiká personalui, kuris iðmontuos ir vëliau tvarkys ðias aktyvuotas medþiagas. Taip pat aktyvacijos procesø vertinimas yra reikalingas siekiant parinkti geriausią reaktoriaus konstrukcijø iðmontavimo, tvarkymo ir laidojimo bûdà.

Ðiame straipsnyje pristatomas skaitinis RBMK-1500 reaktoriaus kuro kanalø neutroninës aktyvacijos ávertinimo bûdas, kuris ágalina nustatyti aktyvuotose medþiagose susidariusius radionuklidus, jø aktyvumus bei koncentracijas.

## 2. REAKTORIAUS RBMK-1500 KURO KANALAI

Kuro kanalas yra vienas pagrindinio mazgø, lemianio reaktoriaus eksploatacijos ekonomiðkumà ir patikimumà. Jame talpinama branduolinio kuro rinklë, kurià apiplauna ðilumos neðëjas, t. y. vanduo.

Kuro kanalo korpusas suvirintas ið atskiro daliø (vidurinės ir iðorinės). Vidurinė dalis – tai 88 mm iðorinio skersmens, 8 m ilgio ir 4 mm sienelës storio vamzdis, pagamintas ið cirkonio ir niobio lydinio E125 ( $Zr + 2,5\% Nb$ ). Virðutinë ir apatinë kuro kanalo dalys pagamintos ið antikorozinio plieno vamzdpjø. Cirkonio ir niobio lydinio vidurinė kuro kanalo dalis parinkta atsilyvgus á tai, kad ði medþiaga esant aukðtesnei temperatûrai (350°C) ir santykinai maþam ðiluminio neutronø sugerties skerspjûviui (apie  $(0,2-0,3) \cdot 10^{-29} m^2$ ) pasiþymi gana geromis mechaninëmis ir antikorozinëmis savybëmis. Vidurinė ir kraðtinës kanalo dalys sujungiamos specialiomis tarpinëmis movomis, pagamintomis ið plieno ir cirkonio lydinio [1].

Á kuro kanalà gali bûti ádëta ðilumà iðskirianti (darbinë) rinklë, ðilumà iðskirianti rinklë su matuokliais pagal spindulá (neutronø srauto ar temperatûros) arba papildomas sugërikliis. Kuro kanalas gali bûti ir tuðeias (uþpildytas tik auðinanëiu vandeniu).

Ið viso viename RBMK-1500 reaktoriuje yra 2052 kanalai, ið kuriø 1661 yra kuro kanalas. Likusieji reaktoriaus kanalai yra vadinami specialiosios paskirties kanalais: reaktyvumo valdymo sistemos kanalai, kanalai su detektoriais energijos iðsiskyrimui nustatyti pagal aktyviosios zonos aukðtà, jonizacijos kamerø kanalai ir kt. Nors kai kuriø specialiojø kanalø konstrukcija ðiek tiek ir skiriasi nuo kuro kanalø, taëiau, analogiðkai kuro kanalams, virðutinës ir apatinës specialiojø kanalø dalys pagamintos ið nerûdijanëio plieno, o vidurinės dalys ið cirkonio ir niobio lydinio. Reaktoriaus ðoninio reflektoriaus auðinimo kanalai, kuriø yra 156, taip pat priskiriami prie specialiosios paskirties kanalø, taëiau jie yra pagaminti ið nerûdijanëio plieno, o ne ið cirkonio ir niobio lydinio [1].

## 3. AKTYVACIJOS ÁVERTINIMO METODIKA

Kaip minëta, aktyvacijos modeliavimas buvo atliktas Ignalinos AE reaktoriaus RBMK-1500 kuro kanalams, tiksliau jø vidurinėms dalims, kurios yra pagamintos ið cirkonio lydinio E125. Ðios medþiagos sudëtiniai cheminiai elementai bei jø koncentracijos yra pateiktos 1 lentelëje [2]. Kadangi tiksliai IAE lydinio E125 sudëtis nėra þinoma, tai norint ávertinti lydinio sudëtinio elementø ir jø koncentracijø neapibrëptumus, aktyvacijos modeliavimas taip pat buvo atliktas ir tokiam atvejui, kai priimama teorinë cirkonio lydinio E125 cheminë sudëtis bei elementø koncentracijos, t. y. nėra jokio priemaidø ir 97,5% lydinio masës sudaro cirkonis ( $Zr$ ), o likusius 2,5% –

niobis ( $Nb$ ). Ði lydinio sudëtinio elementø ir jø koncentracijø variacija taip pat leidþia atlikti ir lydyne indukuoto aktyvumo jautrumo analizæ (jautrumo sudëtiniam elementams ir jø koncentracijoms).

1 lentelë. Cirkonio lydinio E125 cheminë sudëtis ir elementø koncentracijos (%) [2]

Elementas	Konc.
Fe	0,018
Hf	0,04
Nb	2,5
Ni	0,011
Zr	97,21428
Al	0,0046
B	0,00008
Be	0,002
C	0,027
Ca	0,03
Cd	0,00004
Co	0,025
Cu	0,005
Mn	0,004
N	0,008
O	0,1
Pb	0,005
Ti	0,006

2 lentelë. Neutroninės aktyvacijos reakcijos branduolinio reaktoriaus kuro kanalø medþiagose ( $X$  – motininis nuklidai,  $(x, y)$  – branduolinës reakcijos tipas,  $Y$  – dukterinis nuklidai,  $T$  – dukterinio nuklido skilimo pusëjimo trukmë ( $d$  – dienos,  $m$  – metai))

$X$	$(x, y)$	$Y$	$T$
$^{13}C$	n, $\gamma$	$^{14}C$	5730 m
$^{14}N$	n, p	$^{14}C$	5730 m
$^{17}O$	n, $\gamma$	$^{14}C$	5730 m
$^{40}Ca$	n, p	$^{40}K$	$1,28 \cdot 10^9$ m
$^{40}Ca$	n, $\gamma$	$^{41}Ca$	$1,03 \cdot 10^5$ m
$^{44}Ca$	n, $\gamma$	$^{45}Ca$	165 d
$^{46}Ti$	n, p	$^{46}Sc$	83,8 d
$^{54}Fe$	n, p	$^{54}Mn$	312,5 d
$^{55}Mn$	n, 2n	$^{54}Mn$	312,5 d
$^{54}Fe$	n, $\gamma$	$^{55}Fe$	2,7 m
$^{56}Fe$	n, 2n	$^{55}Fe$	2,7 m
$^{58}Fe$	n, $\gamma$	$^{59}Fe$	44,6 d
$^{58}Ni$	n, $\gamma$	$^{59}Ni$	$7,5 \cdot 10^4$ m
$^{58}Ni$	n, p	$^{58}Co$	70,8 d
$^{62}Ni$	n, $\gamma$	$^{63}Ni$	101,1 m
$^{59}Co$	n, $\gamma$	$^{60}Co$	5,272 m
$^{63}Cu$	n, p	$^{63}Ni$	101,1 m
$^{93}Nb$	n, $\gamma$	$^{94}Nb$	$2,0 \cdot 10^4$ m
$^{93}Nb$	n, n $\gamma$	$^{93m}Nb$	13,6 m
$^{94}Zr$	n, $\gamma$	$^{95}Zr$	64,0 d
$^{174}Hf$	n, $\gamma$	$^{175}Hf$	70 d

Skaieivimuose tam tikro cheminio elemento izotopinė sudėtis buvo priimta tokia pat, kaip natūraliai gamtoje aptinkamo to elemento izotopinė sudėtis (pavyzdžiui, gamtiną kalcą ( $Ca$ ) sudaro šie izotopai:  $^{40}Ca$  – 96,941%,  $^{42}Ca$  – 0,647%,  $^{43}Ca$  – 0,135%,  $^{44}Ca$  – 2,086%,  $^{46}Ca$  – 0,004%,  $^{48}Ca$  – 0,187%).

2 lentelėje yra pateiktos pagrindinės aktyvacijos reakcijos, vykstančios branduolinio reaktoriaus aktyviosios zonos kuro kanaluose.

Diame darbe kuro kanalų aktyvacijos procesai buvo modeliuojami naudojant SCALE 4.3 sistemos programą ORIGEN-S [3], kuri yra atsisinta (validuota) bei verifikuota tokių procesų analizei [4] ir plačiai naudojama visame pasaulyje. Ši programa vertina radioaktyvumą skilimui ir neutronų absorbcijai (pagavimui bei dalijimuisi) ir apgalina nustatyti neutroninės aktyvacijos metu susidariusių izotopų sudėtį, jų radioaktyvumą bei koncentracijas. Pagrindinė lygtis, kurią sprendžia programa, yra tam tikro  $i$ -ojo nuklido koncentracijos  $N_i$  kitimas laike:

$$\frac{dN_i}{dt} = \sum_{j=i+1}^I \gamma_{ji} \sigma_{f,j} N_j \phi + \sigma_{c,i-1} N_{i-1} \phi + \lambda'_i N'_i - \sigma_{f,i} N_i \phi - \sigma_{c,i} N_i \phi - \lambda_i N_i, \quad i = 1, \dots, I;$$

čia

- $\sum_{j=i+1}^I \gamma_{ji} \sigma_{f,j} N_j \phi$  – nuklido  $N_i$  susidarymo greitis,

kurą sąlygoja visų  $N_j$  nuklidų dalijimosi reakcijos; čia  $\gamma_{ji}$  – reakcijos išėiga,  $\sigma_f$  – atitinkamos dalijimosi reakcijos skerspjūvis,  $\phi$  – neutronų srautas;

- $\sigma_{c,i-1} N_{i-1} \phi$  – virsmo į  $N_i$  greitis, kai nuklidas  $N_{i-1}$  pagauna neutroną; čia  $\sigma_c$  – atitinkamos pagavimo reakcijos skerspjūvis,  $\phi$  – neutronų srautas;

- $\lambda'_i N'_i$  –  $N_i$  susidarymo greitis, kai vyksta nuklido  $N'_i$  radioaktyvusis skilimas; čia  $\lambda'_i$  – nuklido  $N'_i$  skilimo konstanta;

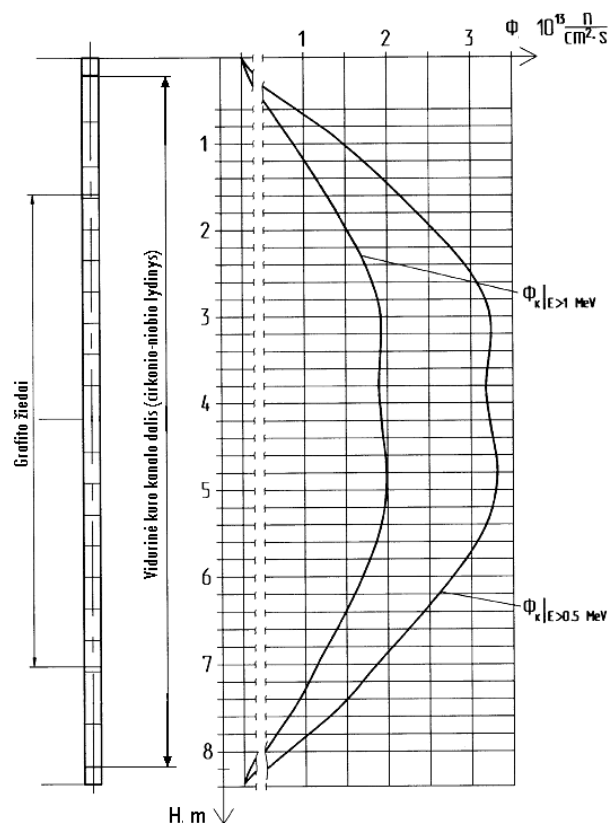
- $\sigma_{f,i} N_i \phi$  –  $N_i$  sunykimo greitis, kai vyksta dalijimosi reakcija; čia  $\sigma_f$  – atitinkamos dalijimosi reakcijos skerspjūvis,  $\phi$  – neutronų srautas;

- $\sigma_{c,i} N_i \phi$  –  $N_i$  sunykimo greitis, kai vyksta dvairių rūšių neutrono pagavimo reakcijos:  $(n, \gamma)$ ,  $(n, \alpha)$ ,  $(n, p)$ ,  $(n, 2n)$ ,  $(n, 3n)$ ; čia  $\sigma_c$  – atitinkamos pagavimo reakcijos skerspjūvis,  $\phi$  – neutronų srautas;

- $\lambda_i N_i$  – nuklido  $N_i$  radioaktyviojo skilimo greitis; čia  $\lambda_i$  – nuklido  $N_i$  skilimo konstanta;

- $i$  ir  $j$  – indeksai, išreiškiantys tam tikro nuklido masės skaičius,  $I$  – didžiausias masės skaičius.

RBMK-1500 reaktoriaus kuro kanalų vamzdžių vidurinė dalys yra pagamintos iš cirkonio ir niobio lydinio E125. Kadangi šios vamzdžių dalys yra reaktoriaus aktyviojoje zonoje, tai dirbant reaktoriui jos yra veikiamos  $10^{13} \text{ n} / (\text{cm}^2 \cdot \text{s})$  eilės šiluminio neutronų srautu ir todėl E125 lydinį sudarantys elementai yra aktyvuojami. Tiksliam reaktoriaus konstrukcinio medžiagų aktyvacijos vertinimui reikėtų



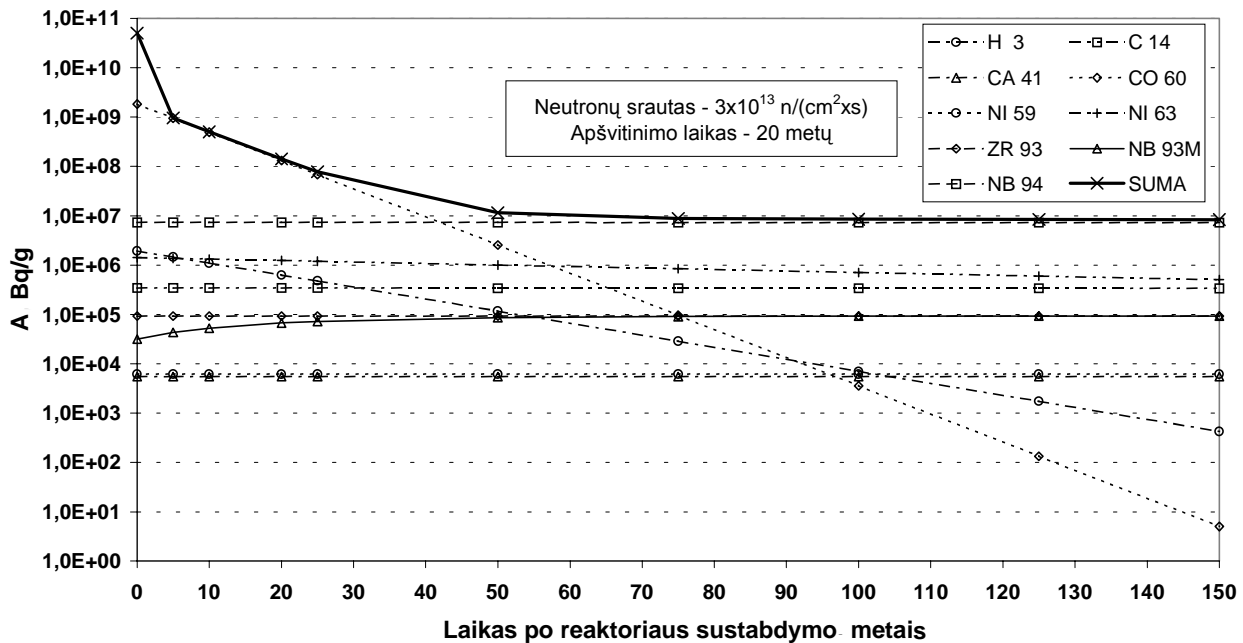
1 pav. Neutronų srauto pasiskirstymas IAE 1-ojo bloko reaktoriaus kuro kanale [5]

sukurti trimatą Ignalinos AE reaktoriaus modelą ir atitinkamos programos pagalba apskaičiuoti erdvinį neutronų srauto pasiskirstymą bei energijų spektrą. Tačiau preliminariam aktyvacijos vertinimui buvo remiamasi eksperimentiniais neutronų srauto matavimais Ignalinos AE. Greitėjose ir šiluminio neutronų srautai reaktoriuje buvo matuoti neutronų detektoriais, kurių veikimas pagrįstas aktyvaciniu principu. Šiluminio neutronų srautai buvo nustatomi pagal  $^{63}Cu(n, \gamma)^{64}Cu$ ,  $^{71}Ga(n, \gamma)^{72}Ga$ ,  $^{50}Cr(n, \gamma)^{51}Cr$  reakcijas, greitėjose –  $^{27}Al(n, n\alpha)^{24}Na$ ,  $^{58}Ni(n, p)^{58}Co$ . Tokiu būdu išmatuoti neutronų srautai Ignalinos AE 1-ojo bloko reaktoriaus aktyviojoje zonoje yra [5]:

- šiluminio neutronų:  $(2,8-3,4) \cdot 10^{13} \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ;
- neutronų, kurių energija didesnė nei 7,25 MeV:  $(2,5-3,8) \cdot 10^{11} \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ ;
- neutronų, kurių energija didesnė nei 8,15 MeV:  $(1,2-1,8) \cdot 10^{11} \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ .

Neutronų, kurių energijos  $E > 0,5 \text{ MeV}$  ir  $E > 1 \text{ MeV}$ , srauto pasiskirstymas išilgai kuro kanalo 1-ojo Ignalinos AE bloko reaktoriaus aktyviojoje zonoje reaktoriaus darbo metu yra pavaizduotas 1 pav. [5].

Vertinant aktyvuotą medžiagų radioaktyvumo lygio kitimą po reaktoriaus sustabdymo bei priklausomybę nuo priemaidų koncentracijos buvo priimta prielaida, kad kuro kanalų apdūvintimas yra nenutrūkstamas ir trunka 20 metų. Taip pat, remiantis anksčiau pateiktais Ignalinos AE atliktais neutronų srauto



2 pav. Radioaktyvumo lygio lydinyje E125 priklausomybė nuo laiko.

SUMA – suminis visų radionuklidų aktyvumas

matavimais aktyviojoje zonoje [5] bei 1 pav., buvo padaryta prielaida, kad ūluminio neutronų srauto tankis visais apšvitinimo periodais reaktoriaus aktyviojoje zonoje tiek radialine, tiek aksialine kryptimis yra pastovus ir lygus  $3 \cdot 10^{13} \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ .

Lydinio E125 aktyvacijos modeliavimas buvo atliktas dviem atvejais:

- „Atvejis-1“: Aktyvuoto cirkonio lydinio radioaktyvumo lygio kitimas sustabdžius apšvitinimą, t. y. po reaktoriaus sustabdymo;

- „Atvejis-2“: Aktyvuoto cirkonio lydinio radioaktyvumo lygio priklausomybė nuo priemaiðų koncentracijos.

Abiems skaiðiavimo atvejams („Atvejis-1“ ir „Atvejis-2“) kuro kanalų medþiagose susidarantys radionuklidai ir jø aktyvumas buvo ávertinti laiko momentu iðkart po apšvitinimo, t. y. reaktoriaus sustabdymo metu, ir keliems skilimo periodams po apšvitinimo, t. y. po reaktoriaus sustabdymo.

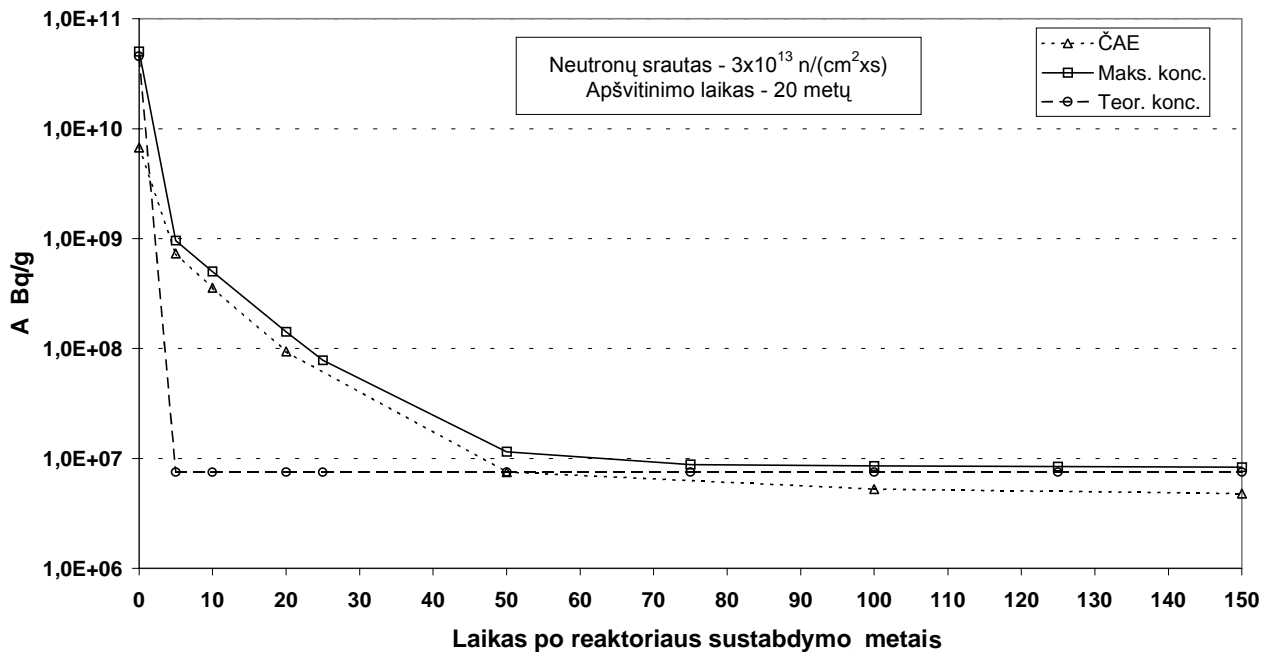
#### 4. REZULTATAI IR JØ ANALIZË

Aktyvacijos proceso metu cirkonio ir niobio lydinyje susidariusiø pagrindiniø devyniø radionuklidø ( $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{41}\text{Ca}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{59}\text{Ni}$ ,  $^{63}\text{Ni}$ ,  $^{93}\text{Zr}$ ,  $^{93\text{m}}\text{Nb}$  ir  $^{94}\text{Nb}$ ) ir suminio aktyvumo lygio („Atvejis-1“) kitimas sustabdžius reaktoriø pavaizduotas 2 pav. Sustabdžius reaktoriø, aktyvuotø priemaiðø suminis radioaktyvumas lydinyje nevirðija  $5,1 \cdot 10^{10} \text{ Bq/g}$ , o per 150 metø sumaþėja iki  $8,4 \cdot 10^6 \text{ Bq/g}$ . Reaktoriø sustabdžius, beveik visà E125 lydinio aktyvumą lemia vienintelis  $^{60}\text{Co}$ , taèiau bégant laikui jo aktyvumas þenkliai maþėja ir jau maþdaug po 40 metø  $^{60}\text{Co}$  aktyvumas susilygina su  $^{94}\text{Nb}$ , ir

toliau praktiškai visas aktyvumas priklauso  $^{94}\text{Nb}$ , kurio pusėjimo trukmė yra didesnė. Sàlyginai trumpaamþio nuklido  $^3\text{H}$  (skilimo pusėjimo trukmė ~ 12 metø) aktyvumas per 150 metø irgi þenkliai sumaþėja. Likusiø nuklidø aktyvumo lygis reaktoriaus sustabdymo metu nėra didelis ir per modeliuojamà 150 metø laikotarpà po reaktoriaus sustabdymo suminiam lydinio aktyvumui praktiškai neturi átakos.

Vertinant kuro kanalø aktyvumo kitimà po galutinio reaktoriaus sustabdymo, svarbiausios yra aktyvumo reikðmės dvejais laiko momentais: tai aktyvumo reikðmės kuro kanalø iðmontavimo ir jø galutinio laidojimo metu. Remiantis galutiniu Ignalinos AE 1-ojo ir 2-ojo blokø eksploataavimo nutraukimo planu, kuro kanalai bus iðmontuojami praėjus 10 metø po reaktoriø sustabdymo, taip pat tikėtina, kad galutinai ðios medþiagos bus palaidotos praėjus maþdaug 50 metø po kanalø iðmontavimo, t. y. maþdaug po 60 metø po reaktoriø galutinio sustabdymo (tiksliai radioaktyviøjø atliekø, kurioms priklauso ir iðmontuoti kuro kanalai, laidojimo data dar nėra galutinai nuspræsta) [6].

2 pav. matyti, kad kuro kanalø iðmontavimo metu cirkonio ir niobio lydinio suminis aktyvumas yra 100 kartø maþesnis, palyginti su lydinio aktyvumu reaktoriaus sustabdymo metu, ir nevirðija  $5,1 \cdot 10^8 \text{ Bq/g}$ . Beveik visà aktyvumą, t. y. kiek daugiau nei 97% viso aktyvumo, sudaro  $^{60}\text{Co}$  aktyvumas, o likusiø elementø indėlis labai maþas (maþesnis nei 3% suminio aktyvumo). Remiantis ðiais ávertinimais radioaktyviøjø atliekø, kurioms priklauso ir aktyvuotas kuro kanalø cirkonio lydinys, laidojimo metu suminis aktyvumas sumaþėja apytiksliai 5000 kartø, palyginti



**3 pav.** Radioaktyvumo lygio lydinyje E125 kitimas laikui bėgant, priklausomai nuo priemaidž koncentracijos, ir palyginimas su publikuojamais skaičiavimais Ėrnobylio AE 1-ojo bloko reaktoriui.

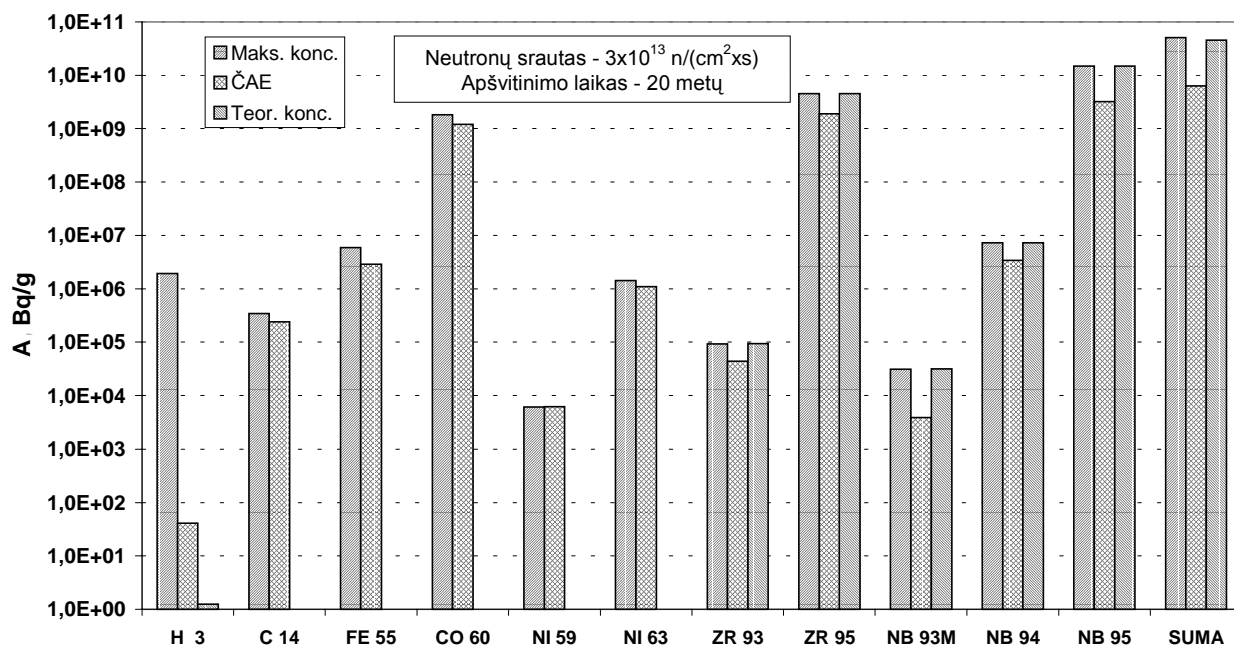
Maks. konc. – elementų koncentracija remiantis [2]; Teor. konc. – teorinė elementų koncentracija; ĖAE – publikacijos [2] duomenys

su lydinio aktyvumu reaktoriaus sustabdymo metu, ir siekia maždaug  $1 \cdot 10^7$  Bq/g. Šiuo laiko momentu didžiają suminio aktyvumo dalį t. y. per 70%, sudaro  $^{94}\text{Nb}$  aktyvumas, kuris siekia  $7,3 \cdot 10^6$  Bq/g. Beveik visą likusiojo suminio aktyvumo dalį sudaro  $^{63}\text{Ni}$  ir  $^{60}\text{Co}$ , kurių aktyvumai ne didesni kaip atitinkamai  $7 \cdot 10^5$  Bq/g ir  $9,5 \cdot 10^5$  Bq/g.

2 pav. matyti, kad sustabdžius reaktorių ir vykstant tiksliai radioaktyviojo skilimo procesams nuklido  $^{93\text{m}}\text{Nb}$  aktyvumas laikui bėgant didėja. Iš pirmo žvilgsnio tai gali atrodyti paradoksalu, tačiau iš tikrųjų taip nėra. Nuklidas  $^{93\text{m}}\text{Nb}$  yra radioaktyvus, todėl savaime skyla į stabilų  $^{93}\text{Nb}$  nuklidą vykstant izomeriniam perėjimui, o šio proceso pusėjimo trukmė yra apie 16 metų. Dėl šio proceso sustabdžius reaktorių  $^{93\text{m}}\text{Nb}$  aktyvumas mažėja. Tačiau tuo pat metu vyksta ir kitas procesas –  $^{93\text{m}}\text{Nb}$  nuklidų susidarymas, kadangi radioaktyvūs  $^{93}\text{Zr}$  branduoliai dėl  $\beta^-$  skilimo transformuojasi kaip tik į  $^{93\text{m}}\text{Nb}$  branduolius. Šio proceso pusėjimo trukmė yra maždaug  $1,5 \cdot 10^6$  metų. Taigi atsižvelgus į šiuos abu procesus,  $^{93\text{m}}\text{Nb}$  aktyvumo didėjimas sustabdžius reaktorių neatrodo paradoksalus, nes šis nuklidas pastoviai susidaro dėl  $^{93}\text{Zr}$  skilimo, ir dėl didelio šio nuklido pusėjimo trukmių santykio laikui bėgant  $^{93\text{m}}\text{Nb}$  aktyvumas praktiškai susilygina su  $^{93}\text{Zr}$  aktyvumu, nes kiek  $^{93\text{m}}\text{Nb}$  susidaro, tiek jo praktiškai iškart ir suskyla. Yra ir daugiau nuklidų, kuriems būdingas toks aktyvumo didėjimo procesas po reaktoriaus uždarymo.

Kadangi tikslios IAE reaktorių kuro kanalų lydinio E125 komponentų ir priemaidž koncentracijos nėra

žinomos ([2] yra pateikiamos Ėrnobylio AE (ĖAE) 1-ojo bloko reaktoriui nustatytos lydinio E125 atskirų sudedamųjų elementų ir priemaidž koncentracijos, kurios gali skirtis IAE, nors lydinio markė ir ta pati), todėl buvo įvertinta, kaip cirkonio lydinyje kinta radionuklidų suminis aktyvumas, kai cirkonio lydinio komponentų ir priemaidž koncentracijos yra identiškos ĖAE, ir esant teorinei cirkonio lydinio sudėčiai („Atvejis-2“). Šie rezultatai palyginti su publikuojamais [2] ĖAE 1-ojo bloko reaktoriaus kuro kanalų (lydinys E125) aktyvumo rezultatais (3 pav.). Skaičiavimai parodė, kad modeliavime priėmus teorinę lydinio sudėtį kuro kanalų aktyvumas iškart po apšvitinimo neviršija  $4,6 \cdot 10^{10}$  Bq/g, o po 150 metų sumažėja iki maždaug  $7,5 \cdot 10^6$  Bq/g. Taigi esant teorinei lydinio E125 sudėčiai, suminis radioaktyvumo lygis reaktoriaus sustabdymo metu ir praėjus 150 metų po sustabdymo yra mažesnis, palyginti su atitinkamai  $5,1 \cdot 10^{10}$  ir  $8,4 \cdot 10^6$  Bq/g vertėmis, esant [2] koncentracijoms. Kaip matyti, šis skirtumas tarp gautų rezultatų yra nedidelis, gautos aktyvumo reikšmės yra tos pačios eilės. Tačiau aktyvumo lygiai laikotarpiu nuo 5 iki 75 metų po reaktoriaus galutinio sustabdymo labai skiriasi (3 pav.). Šis skirtumas galima paaiškinti remiantis 4 pav., kuriame matyti, jog esant teorinei cirkonio lydinio sudėčiai, neutroninės aktyvacijos metu nesudaro sąlyginai trumpaamžiai ( $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ) nuklidai, kurie iš esmės ir nulemia suminą lydinio aktyvumą pirmaisiais, 75-aisiais, metais (2 pav.) po reaktoriaus uždarymo.



**4 pav.** Radionuklidų aktyvumo lygio lydinyje E125 palyginimas su publikuojamais duomenimis Ėrnobylio AE 1-ojo bloko reaktoriui

Maks. konc. – elementų koncentracija remiantis [2]; Teor. konc. – teorinė elementų koncentracija; ĖAE – publikacijos [2] duomenys; SUMA – suminis visų radionuklidų aktyvumas

3 pav. taip pat matyti, kad ĖAE atveju lydinio E125 suminio aktyvumo lygio kitimo profilis sustabdžius reaktorių yra labai panašus į šiame darbe sumodeliuoto IAE lydinio E125 aktyvumo kitimo profilą (ne teoriniu atveju), tačiau pati aktyvumo reikšmė reaktoriaus sustabdymo metu ir bet kuriuo laiko momentu po sustabdymo yra šiek tiek mažesnė už šio darbo metu gautas vertes. Bene labiausiai rezultatų skirtumą lemia tai, kad Ignalinos AE reaktorių galinumas yra didesnis už Ėrnobylio AE 1-ojo bloko reaktoriaus galinumą, o tai reiškia, kad Ignalinos AE reaktoriuose yra sukuriama didesnė tankio neutronų srautai, todėl vyksta intensyvesnis medžiagų aktyvacijos procesas. Be to, rezultatų skirtumą nulemia ir tai, kad IAE sukurtas aktyvacijos modelis yra konservatyvus ir neįvertina realaus neutronų srauto pasiskirstymo reaktoriaus aktyviojoje zonoje, taip pat neatsižvelgta į reaktoriaus darbo istoriją.

IAE cirkonio lydinio aktyvacijos modeliavimo rezultatų palyginimas su [2] duomenimis reaktoriaus sustabdymo metu yra pateiktas 4 pav. Matyti, jog cirkonio lydinio E125 neutroninės aktyvacijos modeliavimo rezultatai (išskyrus teorinį atvejį) nedaug skiriasi nuo ĖAE 1-ojo bloko reaktoriaus lydinio E125 aktyvacijos modeliavimo rezultatų. Labiau skiriasi tiksliai  $^3\text{H}$  aktyvumai. Šis radionuklidas susidaro iš priemaišų ( $^9\text{Be}$ ) aktyvacijos produktų, vykstant šviesos branduolinių reakcijų grandinėms. Viena

minėto rezultato skirtumo priežastis yra tai, kad aktyvumo skaičiavimams (šiuo ir [2] darbe) buvo naudotos skirtingos kompiuterinės programos, kuriose naudojamos skirtingos branduolinių reakcijų duomenų bibliotekos.

## 5. IŠVADOS

Šiame darbe buvo sukurtas konservatyvus skaitinis Ignalinos AE reaktoriaus RBMK-1500 kuro kanalų medžiagos neutroninės aktyvacijos vertinimo modelis. Pagal šį modelį ORIGEN-S kompiuterine programa (SCALE 4.3 programos sistema) įvertinti cirkonio lydinio E125 aktyvumo lygiai. Gauti rezultatai palyginti su kitų autorių publikuojamais RBMK reaktorių konstrukcinių medžiagų neutroninės aktyvacijos vertinimo rezultatais.

Konservatyviai įvertinus IAE reaktoriaus RBMK-1500 kuro kanalų medžiagų neutroninę aktyvaciją, galima padaryti šias išvadas:

- Indukuoto aktyvumo lygis reaktoriaus kuro kanaluose labai priklauso nuo cheminės medžiagų sudėties bei jų koncentracijos; tai ypač pasireiškia per pirmuosius, 75-uosius, metus po reaktoriaus sustabdymo, kai didžiąją dalį kuro kanaluose indukuoto aktyvumo sudaro aktyvuotų priemaišų elementai, nors paėių priemaišų kiekiai (pagal masę) yra labai maži.

- Beveik visą kuro kanalų lydinio E125 aktyvumą iškart po reaktoriaus sustabdymo lemia vienintelis

(nevertinant trumpaamžių) nuklidais –  $^{60}\text{Co}$ . Po maždaug 40 metų  $^{60}\text{Co}$  aktyvumas susilygina su  $^{94}\text{Nb}$ , ir toliau praktiškai visas aktyvumas priklauso  $^{94}\text{Nb}$ . Kitose nuklidose ( $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{41}\text{Ca}$ ,  $^{59}\text{Ni}$ ,  $^{63}\text{Ni}$ ,  $^{93}\text{Zr}$ ,  $^{93\text{m}}\text{Nb}$ ) indėlis nėra esminis, nes jų aktyvumai yra kur kas mažesni už ilgaamžio  $^{94}\text{Nb}$ .

- Iki aktyvuotose kuro kanalose išmontavimo cirkonio ir niobio lydinio suminis aktyvumas per 10 metų sumažėja 100 kartų, palyginti su lydinio aktyvumu iškart po reaktoriaus sustabdymo. Beveik visą aktyvumą, t. y. kiek daugiau nei 97% viso aktyvumo, sudaro  $^{60}\text{Co}$ , o likusio elemento indėlis nedidelis.

- Radioaktyvųjų atliekų, kurioms priklauso ir aktyvuotas kuro kanalo cirkonio lydinys, tikėtino laidojimo metu (60 metų po reaktoriaus sustabdymo) suminis aktyvumas sumažėja apytiksliai 5000 kartų, palyginti su lydinio aktyvumu iškart po reaktoriaus sustabdymo. Dėjuo laiko momentu didžioji dalis suminio aktyvumo dalį, t. y. per 70%, sudaro  $^{94}\text{Nb}$  aktyvumas. Beveik visą likusio lydinio aktyvumo dalį sudaro  $^{63}\text{Ni}$  ir  $^{60}\text{Co}$ .

Gauta 2004 12 20

#### Literatūra

1. Almenas K., Kaliatka A., Ušpuras E. Ignalina RBMK-1500. A Source Book. Kaunas: LEI, 1998.
2. Bylkin B. K., Davydova G. B., Zverkov Y. A., Krayushkin A. V., Neretin Y. A., Nosovsky A. V., Seyda V. A., Short S. M. 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.
3. 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 // NUREG/CR-0200, Revision 5, Volume 2, Section F7, ORNL/NUREG/CSD-2/V2/R5, March 1997.
4. <http://www.ornl.gov/sci/scale/pubs/rc1429.pdf>.
5. Ignalina NPP Safety Assessment Report. Ignalina, 1996.
6. Galutinis Ignalinos AE 1-ojo ir 2-ojo blokų eksploatavimo nutraukimo planas. Ignalina, 2004.

Ernestas Narkūnas, Artūras Džaišys, Povilas Poška

#### NUMERICAL MODELLING OF NEUTRON ACTIVATION PROCESSES IN THE REACTOR RBMK-1500 STRUCTURAL ELEMENTS 1. NUMERICAL MODELLING OF NEUTRON ACTIVATION PROCESSES IN FUEL CHANNELS (ALLOY E125)

##### Summary

As soon as the decommissioning activities at the Ignalina NPP start, the arising radioactive waste will contain also construction materials of the reactor core (graphite, concrete, metal parts). These materials become radioactive due to neutron irradiation during the INPP operation. In order

to plan the dismantling works, it is necessary to know the preliminary amounts, radioactivity levels and activity inventory of future decommissioning waste.

An assessment methodology and results of neutron activation of RBMK-type nuclear reactor construction materials is presented in this work. A model for numerical evaluation of neutron activation in the Ignalina NPP reactor fuel channels was developed based on conservative assumptions. According to the proposed model, the assessment of radioactivity levels in the zirconium alloy of E125 type (fuel channels) was performed using the ORIGEN-S computer code (SCALE 4.3 computer code system).

The results of neutron activation estimation show that the induced radioactivity level in the reactor fuel channels strongly depends on the chemical composition of materials and their concentration. It is especially notable during the first 75 years after the reactor final shutdown, when most of induced radioactivity is exerted by the radioactive elements of impurities, despite the fact that the amount of these impurities (mass) is very small. From the radiological point of view, the most important radionuclides induced during neutron activation in the reactor fuel channels are:  $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{41}\text{Ca}$ ,  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{59}\text{Ni}$ ,  $^{63}\text{Ni}$ ,  $^{93}\text{Zr}$ ,  $^{93\text{m}}\text{Nb}$ ,  $^{94}\text{Nb}$ .

**Key words:** Ignalina NPP, reactor RBMK-1500 fuel channels, neutron activation, numerical modelling

Эрнэстас Наркунас, Артурас Шмайжис, Повилас Пошка

#### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙТРОННОЙ АКТИВАЦИИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РЕАКТОРА РБМК-1500 1. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЙТРОННОЙ АКТИВАЦИИ ТОПЛИВНЫХ КАНАЛОВ (СПЛАВ Э125)

##### Резюме

При снятии с эксплуатации Игналинской АЭС определённую часть возникающих радиоактивных отходов составят также и конструктивные элементы ядерного реактора (графит, бетон, металлические части). Эти материалы становятся радиоактивными при облучении нейтронами во время работы реакторов АЭС. Для успешного планирования демонтажных работ необходимо иметь предварительную информацию о количестве и активности этих элементов.

В настоящей работе представлены методология оценки и результаты нейтронной активации конструктивных материалов ядерного реактора типа РБМК. Была создана модель для численной оценки нейтронной активации топливных каналов реактора Игналинской АЭС, основанная на консервативных предположениях. Согласно предложенной модели, используя компьютерный код ORIGEN-S (система компьютерных кодов SCALE 4.3), была выполнена оценка уровней наведенной радиоактивности в сплаве циркония типа Э125 (топливных каналов).

Результаты оценки нейтронной активации показывают, что уровень наведенной радиоактивности в топливных каналах реактора сильно зависит от химического состава материалов

и их концентрации. Это видно по результатам оценки до 75 лет после окончательного останова реактора, когда бóльшая часть наведенной радиоактивности создаётся за счёт радиоактивных элементов примесей, несмотря на то, что массовая доля этих примесей очень малая. Анализ результатов показал, что с радиологической точки зрения самыми

важными радионуклидами, наведенными во время нейтронной активации в топливных каналах реактора, являются:  ${}^3\text{H}$ ,  ${}^{14}\text{C}$ ,  ${}^{41}\text{Ca}$ ,  ${}^{55}\text{Fe}$ ,  ${}^{60}\text{Co}$ ,  ${}^{59}\text{Ni}$ ,  ${}^{63}\text{Ni}$ ,  ${}^{93}\text{Zr}$ ,  ${}^{93\text{m}}\text{Nb}$ ,  ${}^{94}\text{Nb}$ .

**Ключевые слова:** Игналинская АЭС, топливные каналы реактора РБМК-1500, нейтронная активация, численное моделирование