
Ignalinos AE reaktorių dujų tarpelio tarp grafito bei technologinių kanalų įvertinimas ir rezultatų neapibrėžtumo analizė

Juozas Augutis

*Lietuvos energetikos institutas,
Branduolinių įrenginių saugos
laboratorija,
Breslaujos g. 3,
LT-3035 Kaunas*

Straipsnyje nagrinėjamas vienas veiksnių, ribojančių reaktoriaus RBMK-1500 darbo išteklių. Tai dujų tarpelio tarp grafito klojinio ir technologinių kanalų vamzdžių praradimas. Yra žinoma, kad veikiant neutronų srautui ir temperatūrai grafito kolonos angų skersmenys mažėja, o technologinio kanalo vamzdžio – plečiasi, tokiu būdu tarpelis tarp jų mažėja. Kadangi vėliau grafitas pradeda trauktis, tai tarpelio įvertinimas yra netiesinis uždavinys. Šiame darbe išnagrinėta grafito kolonų ir kuro kanalų vamzdžių skersmenų matavimų statistika, sudarytas tarpelio kitimo matematinis modelis, sukurta grafito kolonų matavimo strategija ir įvertinti rezultatų neapibrėžtumai. Apskaičiuotos dujų tarpelio užsivėrimo tikimybės per artimiausius reaktoriaus darbo metus.

Raktažodžiai: dujų tarpelis, technologinis kanalas, grafito klojinys, tarpelio praradimo tikimybė

1. ĮVADAS

Ignalinos AE reaktoriaus pirmojo ir antrojo blokų dujų tarpeliai kontroliuojami nuo pat elektrinės eksploatavimo pradžios. Šiuo metu čia sukaupta didžiausia duomenų bazė ir tarpelio tarp visų RBMK tipo reaktorių vertinimo patirtis. Pagal technologinių kanalų (TK) eksploatacinės kontrolės reikalavimus, Ignalinos AE kanalams ir grafito klojiniai (GK) atliekama daugelis matavimų, apibrėžiančių Ignalinos IAE reaktoriaus pirmojo ir antrojo blokų dujų tarpelio kitimą.

Dabar dujų tarpelis nuo pradinio lygio 3–2,7 mm pirmojo bloko reaktoriuje sumažėjo 3–4 kartus ir nedaug antrame bloke. Tokio mažo tarpelio įvertinimas yra labai jautrus matavimų paklaidoms, naudojamų modelių neapibrėžtumams ir technologinių kanalų pasirinkimo matavimams, strategijoms.

Pagrindiniai šio darbo uždaviniai buvo:

- statistinių matavimo duomenų analizė;
- matematiniai TK ir GK skersmenų kitimo modeliai;
- tarpelio dydžio tikimybinis įvertis;
- rezultatų neapibrėžtumo analizė;
- matuojamų kanalų parinkimo strategijos sukūrimas.

Pagal TK eksploatacinės kontrolės reikalavimus, Ignalinos AE, kaip eksploatuojančioji organizacija, privalo parodyti, kad su 0,95 tikimybe iki kito pla-

ninio prevencinio remonto neatsiras kanalo su išnykusiu tarpeliu [1].

Kuriant tarpelio vertinimo metodiką ir matavimų strategiją buvo panaudoti termohidrauliniai struktūriniai ir tikimybiniai skaičiavimai.

Pirmojo Ignalinos AE energetinio bloko reaktoriaus dujų tarpelio analizė ir įvertinimas buvo atliktas SAR [2] ir pačios elektrinės ataskaitose. Tik tiesiniais deterministiniais skaičiavimais gauti rezultatai buvo per daug pesimistiniai ir konservatyvūs, prognozuojantys tarpelio užsidarymą daugumoje kanalų 2000–2004 m. Pastarieji tarpelio matavimai bei šio ir kitų darbų [3] rezultatai parodė, kad tarpelio užsidarymo tikimybė yra gerokai mažesnė ir reaktorius gali dirbti nepažeisdamas reglamento reikalavimų.

Dujų tarpelio egzistavimo įvertinimas antrojo bloko reaktoriuje buvo atliktas pirmą kartą. Šiame energetiniame bloke dujų tarpelio padėtis smarkiai skiriasi nuo pirmojo, nes reaktoriuje panaudoti kuro kanalų cirkonio vamzdžiai turi dujinį paviršiaus užgrūdinimą ir jų plėtimosi greitis yra mažesnis daugiau negu 2 kartus, palyginus su pirmojo bloko reaktoriumi.

2. DUJŲ TARPELIS RBMK-1500 REAKTORIUJE

RBMK-1500 reaktoriaus korpusą sudaro grafito klojinys iš atskirų grafito blokų, sudėtų į kolonas. Grafito blokų matmenys yra 248,8 mm x 248,8 mm.

Blokų aukštis yra 600 mm, tačiau apatiniai blokai turi skirtingus matmenis – 200, 300 ir 500 mm. Kiekvienoje kolonoje yra 14 grafito blokų, grafito aukštis – 7 m, svoris – 1700 t. Kuro kanalai yra įleisti į vertikalias angas grafito kolonose ir prilaikomi angose skirtingo skersmens grafitiniais žiedais. Vidinis kuro kanalo skersmuo yra 79,5 mm, išorinis – 88,0 mm. Didžiojo grafito žiedo skersmenys yra atitinkamai 91,0 mm ir 114,3 mm, mažojo – 88,0 mm ir 111,0 mm. Taigi susidaro maždaug 3 mm tarpelis tarp grafito žiedų ir kuro kanalo arba grafito blokų, kaip parodyta 1 pav.

Technologiniai kanalai ir grafito klojinys reaktoriui dirbant veikiami aukštos temperatūros (grafitas apie 500°C, kuro kanalai apie 300°C) ir neutronų srauto. Be to, kuro kanalai veikiami vidinio slėgio. Reaktoriuje esančiomis sąlygomis šios medžiagos elgiasi skirtingai. Kuro kanalai plečiasi beveik pasto-

viu greičiu. Artėjant į reaktoriaus centrą plėtimosi greitis didėja, o į viršų ir apačią – mažėja. Grafito blokai kintamu greičiu iš pradžių plečiasi, o vėliau, pasiekęs tam tikrą kritinę ribą, grafitas pradeda trauktis. Ši grafito savybė gana gerai išnagrinėta [4]. Nors bendras kuro kanalų ir grafito kitimas žinomas, tačiau tarpelio įvertinimo problema gana sudėtinga, nes tarpelis santykinai mažas, o kuro kanalai ir grafito blokai dirba skirtingomis sąlygomis (2 pav.).

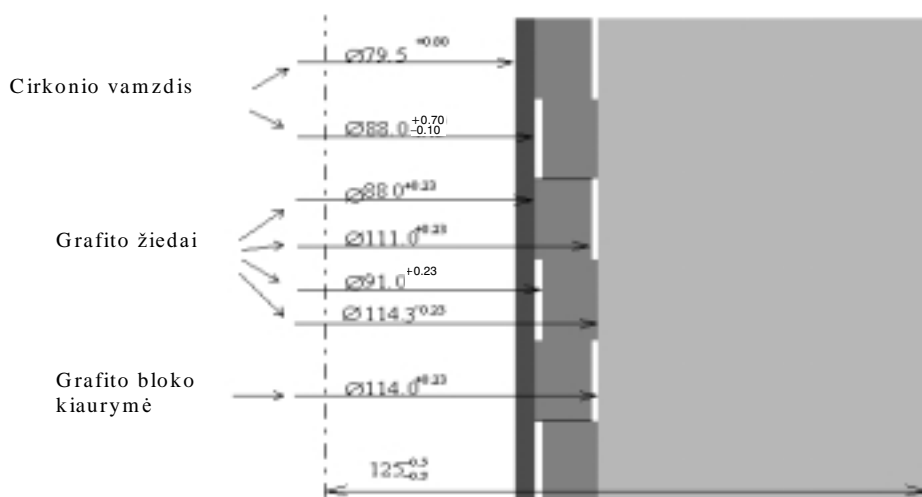
3. DUJŲ TARPELIO UŽSIVĖRIMO PASEKMĖS

Tarpelio užsidarymas yra vienas svarbių veiksnių, ribojančių RBMK-1500 reaktorių eksploatacijos laiką. Šis dujų tarpelis svarbus dėl kelių priežasčių:

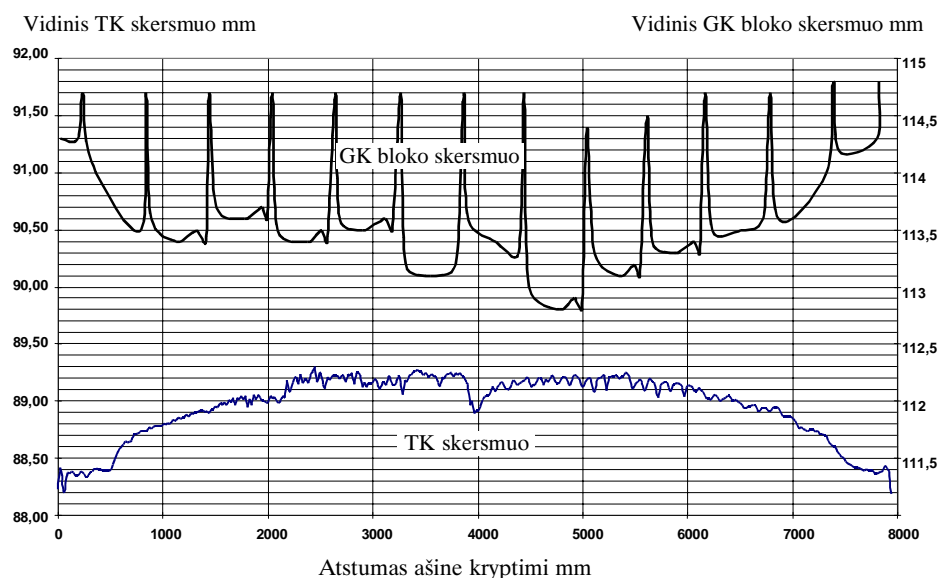
- jam esant galimas technologinių kanalų vertikalus terminis išsiplėtimas;
- užtikrina nekontaktinius šilumos mainus tarp grafito kolonų, kurių temperatūra aukštesnė nei 500°C, ir kuro kanalų sienelių, kurių temperatūra reaktoriaus darbo metu 300–320°C;

• sudaro sąlygas azoto ir helio dujų mišinio cirkuliacijai, kuri ne tik šaldo grafito klojinį, bet ir padeda nustatyti kanalo trūkį pagal padidėjusią dujų temperatūrą ir drėgnumą.

Užsivėrus dujų tarpeliui, ne tik prarandamos minėtos funkcijos, bet ir pablogėja kai kurios reaktoriaus savybės. Padidėja kanalo pažeidimo ir grafito deformacijos tikimybės, pasunkėja kanalo ištraukimas iš reaktoriaus esant būtinybei, keičiasi grafito ir kuro kanalo temperatūra. Darbe [5] nuodugniai išnagrinėti pereinamieji procesai reaktoriuje užsivėrus dujų tarpeliui. Čia buvo atlikta termohidraulinė analizė, kai eksploatacija yra normali ir labiausiai apribota pereinamųjų procesų, parinktų pagal technologinio kanalo sienelės maksimalios temperatūros kitimo sąlygas, kai du-



1 pav. Kuro kanalo padėtis grafito kolonoje



2 pav. Tarpelio vaizdas grafito kolonos skerspjūvyje

jų tarpelis tarp TK ir grafito klojinio išnyksta. Cirkuliacinio kontūro termohidraulinių procesų skaičiavimams, remiantis projektinių avarijų analize, kai tarpelis užsivėręs, buvo išrinkti tokie pradiniai įvykiai:

- klaidingas reaktoriaus avarinio aušinimo sistemos (RAAS) įsijungimas, kai reaktorius dirba esant minimaliam kontrolės lygiui (144 MW),
- srauto sumažėjimas viename arba keliuose technologiniuose kanaluose, kai reaktorius dirba maksimaliu leistinu šiluminiu galingumu 4200 MW.

Pirmuoju atveju technologiniai kanalai greičiau ataušinami, o antruoju atveju, atvirkščiai, – greičiau įkaista. Skaičiavimai parodė, kad tarpelio išnykimas tarp technologinių kanalų ir grafito klojinio sąlygoja grafito klojinio išorinio paviršiaus temperatūros sumažėjimą 50°C. Tai susiję su šilumos pernešimu nuo grafito klojinio su normaliu tarpeliu į grafito klojinį be tarpelio per dujų kontūrą. Kai eksploatacija normali, išnykus dujų tarpeliui tarp technologinio kanalo ir grafito klojinio, išorinio technologinių kanalų paviršiaus temperatūra pakyla apytiksliai 20–25°C, o temperatūrų skirtumas tarp išorinio ir vidinio technologinių kanalų sienelių paviršių yra 2,6 karto didesnis, kai tarpelio nėra. Tarpelio praradimas praktiškai neturi įtakos vidiniam technologinių kanalų sienelių paviršiui.

Tuo atveju, kai maksimaliai apkrauto technologinio kanalo slėgio reguliavimo sklendė dalinai uždaryta ir tarpelio tarp kanalo ir grafito nėra, jo temperatūra vidutiniškai 10–15°C aukštesnė, palyginus su atveju, kai tarpelis egzistuoja.

Klaidingai įsijungus RAAS, kai reaktorius dirba minimaliu kontroliuojamu galingumu (144 MW) ir tarpelio tarp technologinio kanalo ir grafito klojinio nėra, kanalo sienelės RAAS akumuliatorių sistemos vandeniui aušinamos lėčiau, nei esant tarpeliui. Kuro rinklių temperatūra nuo tarpelio egzistavimo praktiškai nepriklauso. Kanaluose be tarpelio ji 2–5°C žemesnė.

Termohidraulinė analizė parodė, kad tarpelio išnykimo metu reaktoriaus saugumas bus garantuojamas, tačiau ilgą laiką eksploatuoti reaktorių su išnykusiu tarpeliu draudžia reaktoriaus darbą reguliuojantys dokumentai.

4. DUJŲ TARPELIO MATAVIMAS

Tarpelis tarp technologinio kanalo ir grafito klojinio Ignalinos AE matuojamas dviem prietaisais. Ultragarso kontrolės įrenginys TCM TOOL priklauso normalios eksploatacijos AE elementų 4H klasei, neturinčiai įtakos saugumui, ir skirtas technologinio kanalo skersmens geometriniais išmatavimams. Įrenginiu TCM TOOL atliekama cirkonio vamzdžio vi-

dinio skersmens ir sienelės storio matavimai. Išorinis skersmuo apskaičiuojamas atlikus vidinio skersmens ir sienelės storio matavimus. Kontrolės metodai: ultragarso, aido-impulso. Duomenys surenkami daugiakanaliu defektoskopu TC 5700. Vidinis skersmuo ir sienelės storis matuojamas iš vidinės kanalo pusės su aštuoniais vertikaliai užfiksuotais ultragarso davikliais, pateikiančiais matavimus pagal 4 skersmenis ir 8 sienelės storius per 45°.

Matavimų tikslumas:

- sienelės storio $\pm 0,05$ mm;
- vidinio skersmens $\pm 0,1$ mm;
- išorinio skersmens $\pm 0,15$ mm.

Ištraukus technologinį kanalą, jo ir grafito angos skersmenys matuojami įrenginiu ИДК. Pagrindinės ИДК techninės charakteristikos:

- matuojamųjų dydžių diapazonas TK 79,5–82,0 mm;
- skersmenų matavimų paklaida $\pm 0,05$ mm;
- matuojamųjų dydžių diapazonas GK 111,75–114,75 mm;
- skersmenų matavimų paklaida $\pm 0,05$ mm.

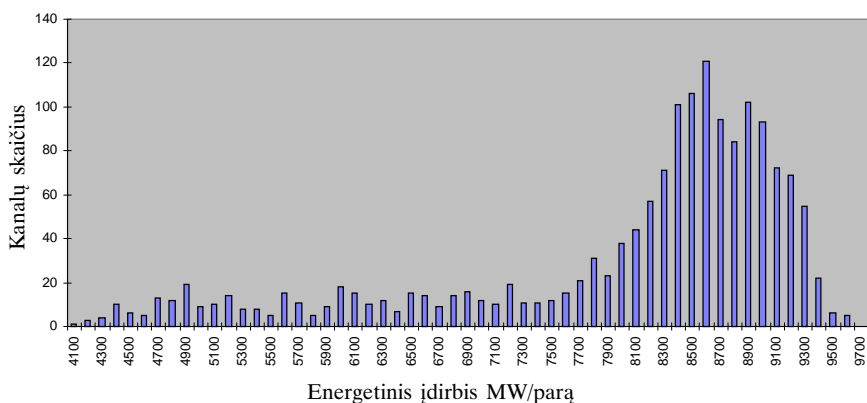
5. MATAVIMŲ DUOMENYS IR JŲ ANALIZĖ

Per visą IAE eksploatacijos laikotarpį pirmojo energetinio bloko reaktoriuje buvo atlikta 1557 technologinių kuro kanalų skersmenų ir 244 grafito klojinio angų skersmenų matavimai, antrojo energetinio bloko reaktoriuje – atitinkamai 826 ir 63. Kadangi pagrindinis uždavinys, atliekant tarpelio analizę, yra jo egzistavimo tikimybės įvertis kanaluose, kuriuose grafito angos skersmuo dar neišmatuotas, tai būtina sukurti tarpelio kitimo matematinį modelį. Pirmasis žingsnis kuriant šį modelį yra gauti matavimų priklausomybės nuo reaktoriaus parametrų tyrimas. Šiame darbe buvo atlikta koreliacinė statistinių duomenų analizė, kuri parodė, kad tarpelio tarp technologinio kuro kanalo ir grafito klojinio kitimas priklauso nuo kiekvieno kanalo suminio energetinio įdirbio (MW/para) ir kanalo atstumo nuo reaktoriaus centro. Tačiau svarbiausia, kad grafito blokai, esantys vienoje kolonoje, kinta skirtingai. Tačiau praktiškai tarpelį tenka vertinti tarp kiekvieno grafito bloko ir technologinio kanalo atskirai. Koreliacinės analizės rezultatai pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė. GK, TK skersmenų, tarpelio ir energetinio įdirbio priklausomybė	
Priklausomybės tipas	Koreliacijos koeficientas
GK angos skersmuo – tarpelis	0,88
TK skersmuo – tarpelis	-0,49
Energetinis įdirbis – tarpelis	-0,24

Ši koreliacinė duomenų analizė parodė, kad tarpelis labiausiai sąlygojamas grafito klojinio angos skersmens kitimo ir beveik dvigubai mažiau priklauso nuo technologinio kuro kanalo skersmens didėjimo. Tačiau ši išvada yra teisinga tik tol, kol grafito plėtimasis priartėja prie maksimalios ribos. Toliau seka laikotarpis, kai tarpelį labiau veikia didėjantis technologinio kuro kanalo skersmuo, o vėliau, kai grafitas pradeda trauktis, jo įtaka tarpeliui vėl pradeda didėti. Dėl šios priežasties santykinai nėra stiprios koreliacijos tarp energetinio įdirbio ir tarpelio. Dar viena išvada, kurią galima padaryti iš šios analizės, yra tai, kad dėl atsitiktinumo grafito kolonose, kuriose angos skersmuo yra mažiausias, technologiniai kuro kanalai nebūtinai turi didžiausią išorinį skersmenį. Taigi negalima įvertinti tarpelio vien išmatavus kuro kanalų skersmenis.

Suminis energetinis technologinių kuro kanalų įdirbis atskiruose kanaluose yra skirtingas. Pirmojo energetinio bloko reaktoriaus kuro kanalų pasiskirstymas pagal energetinį įdirbį parodytas 3 pav. Panašus TK pasiskirstymas pagal įdirbį ir antrojo energetinio bloko reaktoriuje.



3 pav. TK pasiskirstymas pagal energetinį įdirbį 2000 m.

Dar viena svarbi charakteristika, apibūdinanti tarpelį (ypač tada, kai tarpelis labai mažas), yra TK ištraukimo iš grafito kolonos jėga. Kanalas ištraukiamas jį keičiant arba atliekant tiesioginius grafito kolonos angos skersmens matavimus. Pagal 50 paskutinių matavimų buvo nustatyta, kad aiškios priklausomybės tarp TK skersmenų, tarpelio ir kanalo ištraukimo jėgos dar nėra. Koreliacinės analizės rezultatai pateikti 2 lentelėje.

2 lentelė. Koreliacijos koeficientai tarp TK skersmenų, tarpelio ir kanalų ištraukimo jėgos

Priklausomybės tipas	Koreliacijos koeficientas
TK skersmuo – kanalo ištraukimo jėga	0,28
Tarpelis – kanalo ištraukimo jėga	-0,30

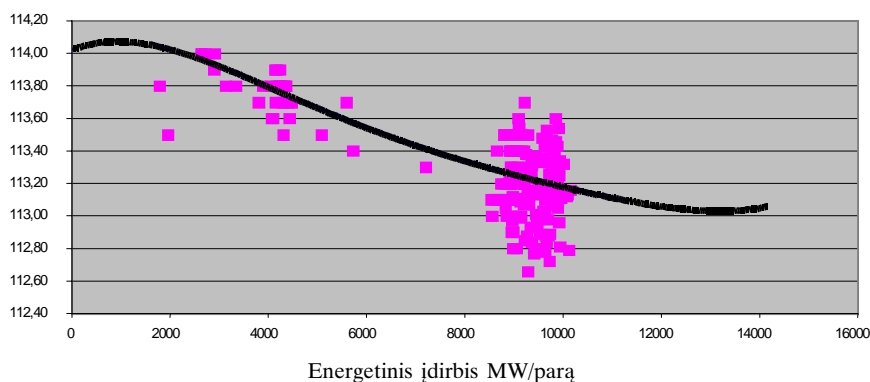
Dalis technologinių kuro kanalų skersmenų pirmojo energetinio bloko reaktoriuje buvo išmatuoti pakartotinai ar net po keletą kartų. Ši informacija taip pat buvo išanalizuota ir panaudota kanalų skersmenų matematiniam modeliui patikrinti ir derinti. Nustatyta, kad TK skersmenų kitimo priklausomybė nuo energetinio įdirbio yra tiesinė:

$$y = 0,0000557x + 111,71.$$

6. GRAFITO KITIMO DETERMINISTINIS IR TIKIMYBINIS VERTINIMAS

RBMK-1500 reaktoriaus grafito blokų, žiedų bei kuro kanalo vamzdžio matmenų pokyčio eksploatacijos metu analizė buvo atlikta naudojant baigtinių elementų kompiuterinį kodą ABAQUS bei integruotą į ABAQUS paketą specializuotą paprogramę įrangą, modeliuojančią grafito mechaninių savybių priklausomybę nuo neutronų srauto poveikio.

Kadangi radiacinė ir temperatūrinė kuro kanalo būklė išilgai kanalo yra kintanti, tai matmenų pokyčiai buvo skaičiuojami aštuoniuose skerspjuviuose – atitinkamai 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 ir



4 pav. 8-ojo grafito bloko kiaurymės skersmens priklausomybė nuo energetinio įdirbio

11 blokuose. Apskaičiuoti grafito blokų kiaurymių skersmenys buvo palyginti su išmatuotaisiais (4 pav.).

Turint grafito trendo priklausomybę nuo energetinio įdirbio galima sudaryti grafito blokų angų skersmenų matematinį modelį, kaip trendo ir atsitiktinio dydžio suma:

$$X_{\Gamma p}^3 = X_A^3 + \xi;$$

čia $X_{\Gamma p}^3$ – grafito bloko angos skersmens reikšmė, atitinkanti energetinio įdirbio reikšmę A;

X_A^3 – grafito bloko angos skersmens vidutinė reikšmė, apskaičiuota kodu ABAQUS;

ξ – atsitiktinis dydis, kurio skirstinys ir parametrai nustatomi statistiškai iš matavimo duomenų.

Pagal χ^2 kriterijų atsitiktinis dydis ξ gali būti normalinis arba pasiskirstęs pagal maksimalių reikšmių skirstinį. Pastarasis skirstinys lengviau paaiškinamas, nes matavimams buvo parenkamos grafito kolonos, turinčios maksimalų energetinį įdirbį. Kita vertus, normaliniu skirstiniu, kurio matematinė išraiška paprastesnė, gaunami kiek konservatyvesni rezultatai. Išmatuoti dujų tarpeliai atskiruose grafito blokuose pavaizduoti 5 pav.

Antrojo, kaip ir pirmojo, energetinio bloko reaktoriaus TK skersmenų matavimo rezultatai buvo apytiksliai tiesine priklausomybe. Mažiausių kvadratų metodu nustatyta, kad šią priklausomybę galima aprašyti lygtimi:

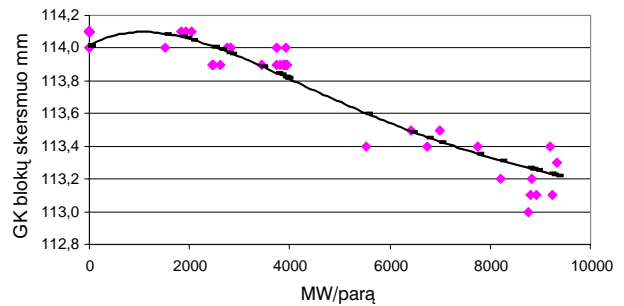
$$y = 0,000021x + 111,67.$$

Vidutinis TK skersmenų kvadratinis nuokrypis nuo šio trendo yra lygus 0,11 mm. Taigi antrojo bloko reaktoriuje TK skersmenų plėtimosi koeficientas yra daugiau nei 2,5 karto mažesnis nei pirmojo bloko reaktoriuje.

Pasikartojantys TK skersmenų matavimai parodo didelį rezultatų išsibarstymą ir neapibrėžtumą. Kai kurios vėliau išmatuotos to paties kanalo reikšmės

yra mažesnės už anksčiau išmatuotas reikšmes. Tai galima paaiškinti intensyvesniu oksidinės plėvelės susidarymu antrojo bloko reaktoriaus kuro kanaluose.

1986–2001 m. antrojo bloko reaktoriuje buvo išmatuotos 63 grafito kolonos. Vidutinis grafito blokų skersmenų kitimas, kaip ir pirmojo bloko atveju, buvo modeliuojamas kompiuteriniu kodu ABAQUS. Gauta kreivė ir 10-o kanalo grafito klojinio (GK) blokų skersmenų matavimo taškai parodyti 6 pav.

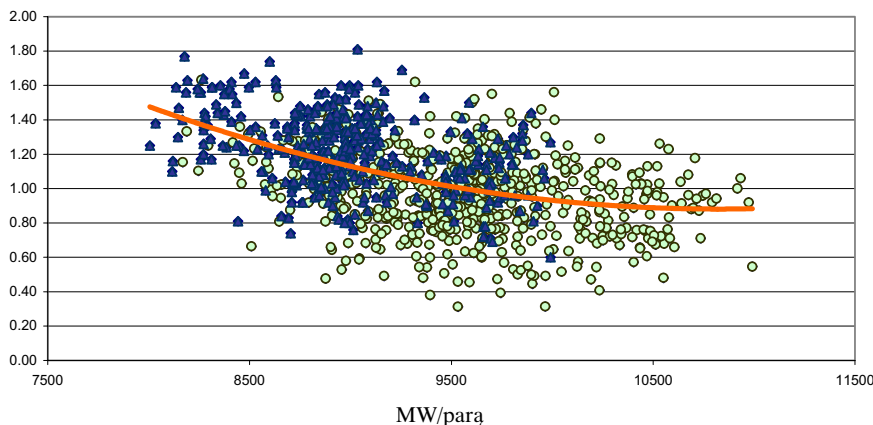


6 pav. Grafito blokų skersmenų modeliavimo ir matavimo rezultatai

Pažymėtina, kad antrojo bloko reaktoriaus grafito matavimų dispersija apie 20% mažesnė negu pirmojo bloko reaktoriaus.

Pagal TK ir grafito blokų matavimų rezultatus 2001 m. buvo nustatyti mažiausi tarpeliai kiekviename kanale ir kiekviename bloke. Mažiausi tarpeliai antrojo bloko reaktoriaus kanaluose pateikti 3 lentelėje.

3 lentelė. Mažiausi tarpeliai antrojo bloko reaktoriaus kuro kanaluose			
Nr.	Kolonos Nr.	Energetinis įdirbis MW/paraž	Tarpelis mm
1	24–31	3645	1,9
2	30–42	7247	1,6
3	32–14	5086	1,6
4	32–26	6246	1,7



5 pav. Dujų tarpeliai grafito blokuose. ▲ – matavimų iki 2000 m. duomenys, ● – 2001 m. matavimų duomenys

Dujų tarpelis yra dviejų atsitiktinių dydžių skirtumas. Toliau vertinama tikimybė, kada šis skirtumas bus lygus nuliui. Žinant abiejų atsitiktinių dydžių skirstinius ir jų parametrus galima apskaičiuoti tikimybę, kad tarpelis bus lygus nuliui bent vienoje reaktoriaus grafito kolonoje.

Modeliui sudaryti buvo nustatytos tokios sąlygos:

1. Dujų tarpelio praradimo tikimybė apskaičiuojama kiekvienam grafito blokui atskirai,

po to tarpelio tikimybė perskaičiuojama atskiroms grafito kolonom ir visam reaktoriui. Į modelį buvo įtraukti 8 viduriniai grafito blokai iš 14, priimant matavimais paremtą prielaidą, kad trijuose apatiniuose ir viršutiniuose grafito klojinio blokuose tarpeliai pakankamai dideli ir jų praradimo tikimybė artimiausiais metais labai maža.

2. Tarpelio praradimu tarp grafito klojinio ir TK yra laikomas faktas, kad bent vieno grafito bloko angos skersmuo bus lygus TK išoriniam skersmeniui nors viename taške per visą grafito bloko aukštį. Ši prielaida yra konservatyvesnė už tarpelio praradimo apibrėžimą reaktoriaus naudojimo Techninėse sąlygose, kur tarpelio praradimu laikomas faktas, kad grafito angos ir TK išorinis skersmenys susilygina ištisiniame intervale, ne trumpesniame kaip 20 cm. Be to, tarpelis turi būti išnykęs šioje zonoje pagal visą perimetrą.

3. Tarpelio praradimo tikimybės buvo skaičiuotos pagal normalinį skirstinį, kurio rezultatai yra konservatyvesni, palyginus su maksimalių reikšmių skirstiniu.

Turėdami grafito bloko angos skersmens kitimo formulę

$$X_{\Gamma p}^3 = X_A^3 + \xi,$$

atsitiktinio dydžio ξ vidutinį kvadratinį nuokrypį σ gauname iš formulės:

$$\sigma = \sqrt{\frac{n \cdot \sum (d_i - G(x_i))^2 - (\sum (d_i - G(x_i)))^2}{n \cdot (n-1)}};$$

- čia i – indeksas visiems matavimams,
- d – GK bloko skersmuo,
- $G(x)$ – GK bloko skersmens kitimo trendas,
- x – GK bloko įdirbis,
- n – GK blokų energijos įdirbis.

Tikimybė, kad dujų tarpelis bloke egzistuoja, yra $P(GK > TK)$. Tada tarpelio praradimo tikimybė bus:

$$P(\Gamma K \leq TK) = \int_{-\infty}^{\infty} F_{\Gamma}(x) p_{\Gamma}(x) dx ;$$

$$\text{čia } F_{\Gamma}(x) = \int_{-\infty}^x p_{\Gamma}(x) dx ,$$

$$p_{\Gamma}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Gamma}} e^{-\frac{(x-M_{\Gamma})^2}{2\sigma_{\Gamma}^2}}, \quad p_{\Gamma}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Gamma}} e^{-\frac{(x-M_{\Gamma})^2}{2\sigma_{\Gamma}^2}} ;$$

čia σ_{Γ} – GK bloko skersmens vidutinis kvadratinis nuokrypis,

σ_{Γ} – TK skersmens vidutinis kvadratinis nuokrypis,

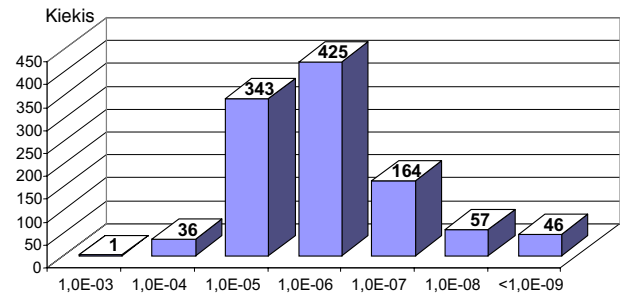
M_{Γ} – grafito skersmens aritmetinis vidurkis,

M_{Γ} – TK skersmens matematinis vidurkis.

Jei dujų tarpelio praradimo tikimybė viename bloke lygi P_i , tai tarpelio egzistavimas visuose reaktoriaus blokuose apskaičiuojamas pagal formulę:

$$P = 1 - \prod_{i=1}^{1661} (1 - P_i).$$

2002 metams ši tikimybė lygi 0,98. 7 pav. pavaizduotas kanalų pasiskirstymas pagal jų dujų tarpelio išnykimo tikimybes 2002 m.



7 pav. Kanalų pasiskirstymas pagal jų dujų tarpelio išnykimo tikimybes

7. REZULTATŲ JAUTRUMO IR NEAPIBRĖŽTUMO ANALIZĖ

Sukurti matematiniai modeliai tarpelio praradimo tikimybėms vertinti remiasi integraliniais metodais, t. y. naudojami struktūriniai ir tikimybiniai skaičiavimai. Kai kurie šio modelio parametrai buvo nustatyti statistiškai, kiti – ekspertiskai. Skaičiavimo rezultatai jautriausi grafito blokų angų ir technologinių kanalų skersmenų standartinių nuokrypių nuo trendų įvertinimams (4 lentelė). Jie buvo gauti pakeitus šių parametrų reikšmes ir apskaičiavus tarpelio praradimo tikimybes.

$\sigma_{TK} + 7\%$	$\sigma_{TK} + 5\%$	σ_{TK}	$\sigma_{TK} + 5\%$	$\sigma_{TK} + 7\%$
0,95	0,96	0,98	0,99	0,998
$\sigma_{TK} + 50\%$	$\sigma_{TK} + 30\%$	σ_{TK}	$\sigma_{TK} + 30\%$	$\sigma_{TK} + 50\%$
0,96	0,97	0,98	0,98	0,99

Kaip matyti, norint įvykdyti Reglamento reikalavimus dėl 0,95 tarpelio egzistavimo tikimybės, technologinių kanalų standartinių nuokrypių galima didinti 50%, tuo tarpu grafito blokų – tik 7%.

Neapibrėžtumų analizė atskirai buvo atlikta tikimybiniai modeliui ir kompiuterinio kodo ABAQUS rezultatams. Tikimybinio modelio neapibrėžtumų analizė aprėpia padarytų prielaidų ir prognozių neapibrėžtumų tyrimą. Statistiškai šiuos neapibrėžtumus galima įvertinti pasikliautinių intervalų skaičiavimais.

Pasikliautiniai intervalai buvo sudaryti tiek grafito angų skersmenų, tiek TK cirkonio vamzdžių išorinių skersmenų prognozėms, tačiau su vienodu, bet n nustatytu pasiklovimo lygmeniu α . Toliau ieškoma tokios α reikšmės, kad prognozuojamo laikotarpio pabaigoje grafito skersmenų pasiklovimo intervalo apatinė riba sutaptų su viršutine TK skersmenų pasiklovimo intervalo riba. Matematiškai tai galima išreikšti tokia lygtimi:

$$t_{n_r} \left(\frac{\alpha}{2} \right) \sigma_r \sqrt{1 + \frac{1}{n_r} + \frac{(E_0 - \bar{E}_r)^2}{\sum (E_{r_i} - \bar{E}_r)^2}} + t_{n_r} \left(\frac{\alpha}{2} \right) \sigma_r \sqrt{1 + \frac{1}{n_r} + \frac{(E_0 - \bar{E}_r)^2}{\sum (E_{r_i} - \bar{E}_r)^2}} = M_r - M_T ;$$

čia M_r , M_T – grafito ir TK skersmenų matavimų statistiniai vidurkiai;

E_0 – vidutinis energetinis įdirbis prognozuojamo laikotarpio pabaigoje;

\bar{E}_r – vidutinis išmatuotų GK energetinis įdirbis;

E_{r_i} – i -ojo GK energetinis įdirbis;

\bar{E}_T – vidutinis išmatuotų TK energetinis įdirbis;

E_{T_i} – i -ojo TK energetinis įdirbis;

$t_{n_r} \left(\frac{\alpha}{2} \right)$ – Stjudento skirstinys su n laisvės laipsniais;

σ_r ir σ_T – GK ir TK vidutiniai standartiniai nuokrypiai.

Tarpelio praradimo tikimybė prognozuojamo intervalo pabaigoje yra:

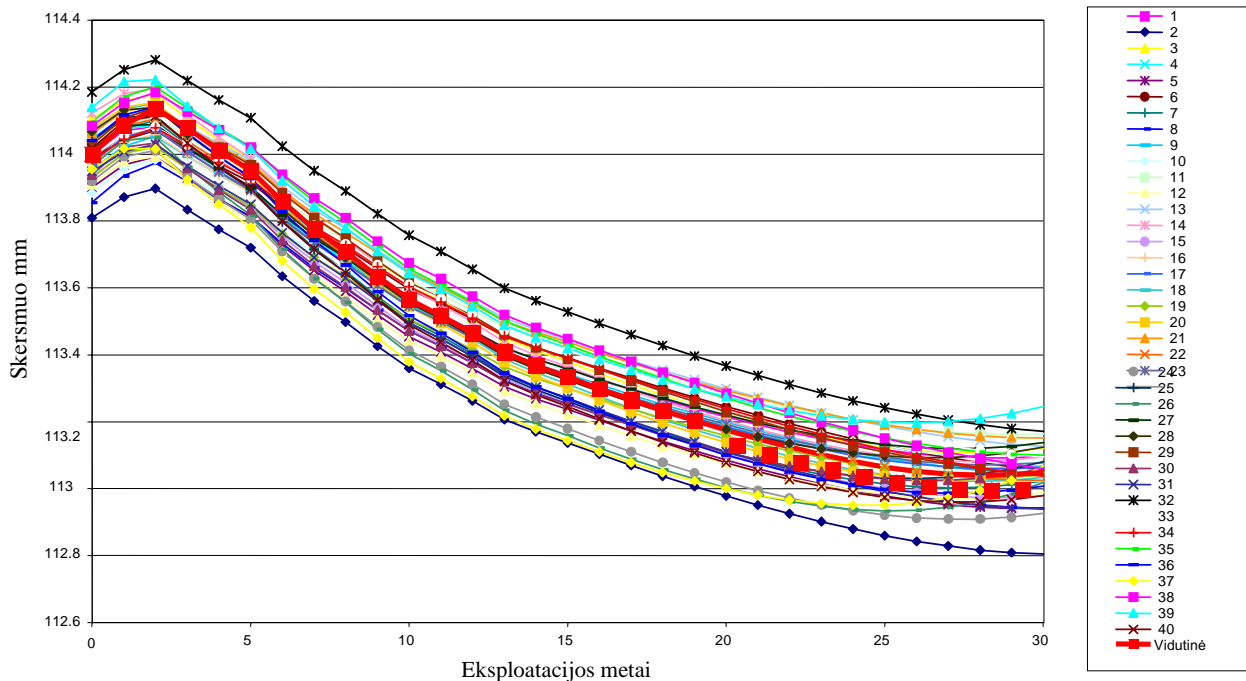
$$P = \left(\frac{\alpha}{2} \right)^2 ; \text{ čia } \alpha - \text{ sudarytos lygties sprendinys.}$$

Išsprendę lygtį, gauname, kad su patikimumo lygmeniu $\alpha = 0,99$ tarpelio praradimo tikimybės įvertis P yra 0,985, o tai patvirtina pagrindinių skaičių rezultatus.

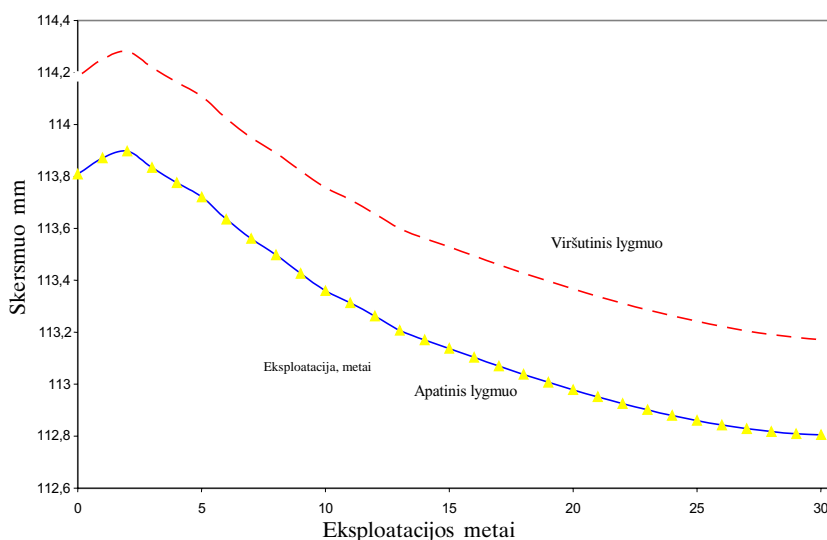
Deterministinių skaičių rezultatų neapibrėžtumų analizė buvo atliekama naudojant patį modeliavimo kodą ABAQUS, pagal tam tikrą dėsningumą keičiant pradinių parametrų reikšmes. Pradinių parametrų reikšmės turi būti kiekybiškai apibrėžtos reikšmių intervalu ir jų neapibrėžtumo skirstiniu. Daugumai parametrų buvo priskirtas normalusis skirstinys. 8 pav. parodytos visos modeliavimo kreivės, o 9 pav. – 0,9 patikimumo viršutinė ir apatinė kreivės.

Dujų tarpelio praradimo tikimybė 2002 metams buvo apskaičiuota naudojant apatinę kreivę. Rezultatai parodė, kad Reglamento reikalavimas tarpelio egzistavimui su tikimybe, ne mažesne už 0,95, bus įvykdytas ir šiuo atveju.

Tiek 1-ojo energetinio bloko reaktoriaus, tiek 2-ojo energetinio bloko reaktoriaus dujų tarpelio išnykimo tikimybėms apskaičiuoti buvo naudojamas matematinis modelis, kuris parodė, kad yra didelė tarpelio atsarga ir jo praradimo tikimybė per artimiausius metus bus gerokai mažesnė negu to reikalauja reglamentas.



8 pav. Neapibrėžtumo analizės kreivės



9 pav. 0,9 patikimumo intervalai grafito kitimo kreivėms

8. TARPELIO SUMAŽĖJIMO RIZIKOS VALDYMAS

Rizikos valdymas kiekvienu atveju priklauso nuo valdymo parametrų ir jų įtakos rizikai. Dujų tarpelio atveju praktiškai yra tik vienas veiksnys, kurį galima ribotai valdyti, – tai grafito kolonų parinkimas kontrolei. Kadangi tiesiogiai matuojant grafito kolonų skersmenis technologinis kanalas yra ištraukiamas, o po matavimo įstatomas naujas, tai grafito matavimai turi dvigubą poveikį tarpelio praradimo rizikai. Visų pirma tai nauji statistiniai duomenys, kurie patikslina modelio parametrus ir sumažina neapibrėžtumą. Be to, įstaičius naują technologinio kuro kanalo vamzdį, dujų tarpelis atstatomas iki 40–50% buvusio jo dydžio.

Tačiau turint omenyje, kad matuojamų kanalų skaičius yra griežtai apribotas dėl didelės jų kainos ir stoties personalo spinduliuotės dozių, gaunamų šių darbų metu, būtina labai optimaliai atrinkti grafito kolonas matavimui. Matavimui tinkamiausios grafito kolonos, kuriose prognozuojama tarpelio praradimo tikimybė yra didžiausia. Tačiau, be šio kriterijaus, būtina atsižvelgti ir į suminių grafito kolonos energetinį įdirbį, taip pat į matuojamų kolonų tolygų išsidėstymą reaktoriuje. Kitas svarbus klausimas yra matavimų apimtis n . Tačiau žinant reglamento reikalavimą, kad tarpelio praradimo tikimybė nebūtų mažesnė už 0,95, galima apskaičiuoti grafito kolonų minimalią matavimų apimtį n .

Kadangi tikimybė 0,95 yra bendra visoms grafito kolonomis, tai norint gauti tokią tikimybę kiekvienoje atskiroje grafito kolonoje tarpelio egzistavimo tikimybė turėtų būti vidutiniškai 0,99996.

Norint gauti tokį tikslumą, su prielaida, kad tarpelio dydis yra pasiskirstęs pagal normalinį skirstinį su žinoma dispersija, matavimų skaičius n gaunamas iš lygties:

$$P(\bar{x} - m / < \varepsilon_{\beta}) = \beta = 0,99996,$$

arba

$$\frac{\varepsilon_{\beta} \sqrt{n}}{\sigma} = \Psi^{-1}\left(\frac{\beta}{2}\right).$$

Pasirinkus paklaidą $\varepsilon_{\beta} = 0,1$ mm (matavimų vidutinė paklaida), standartinį kvadratinį nuokrypį $\sigma = 0,25$ mm ir apskaičiavus $\Psi^{-1}\left(\frac{\beta}{2}\right) = 4,2$, gaunama, kad

$$n = \left(\frac{4,2 * 0,25}{0,1}\right)^2 = 110.$$

Taigi norint gauti 95% statistinių įverčių patikimumą (0,2 mm intervale), reikia naudoti ne mažiau kaip 110 tarpelio matavimų. Šis reikalavimas pirmajame bloke yra įvykdytas, tačiau kiekvienų metų matavimų apimtis būtina įvertinti atskirai.

Pirmojo energetinio bloko reaktoriaus dujų tarpelio egzistavimo tikimybių skaičiavimai buvo atlikti 2002, 2003, 2004 ir 2005 metams su 3% energetinio įdirbio augimu kasmet (vidutiniškai 350 MW/parą) kiekviename TK, pradedant 2001 metais.

Skaičiavimai parodė, kad be papildomų matavimų, patikimumo kriterijus 0,95 išpildomas iki 2002 metų. Kitų metų rezultatai priklauso nuo grafito blokų matavimo strategijų, tačiau minimalus matavimų skaičius per metus yra ne mažesnis kaip 50 grafito kolonų. Skaičiavimų rezultatai su skirtingomis GK kontrolės strategijomis surašyti į 5 lentelę.

5 lentelė. Tarpelio egzistavimo tikimybės 2002–2004 metams					
2002 metai		2003 metai		2004 metai	
matavimų kiekis	tarpelio egzistavimo tikimybės	matavimų kiekis	tarpelio egzistavimo tikimybės	matavimų kiekis	tarpelio egzistavimo tikimybės
0	0,978	0	0,955	0	0,909
50	0,989	0	0,975	0	0,948
50	0,989	50	0,982	50	0,97
50	0,989	50	0,982	0	0,96

9. IŠVADOS

Remiantis skaičiavimų rezultatais, galima padaryti šias išvadas:

1. Dujų tarpelio egzistavimo tikimybė visose pirmojo energetinio bloko reaktoriaus grafito kolonose iki 2002 metų yra 0,98 ir atitinka reglamento reikalavimus.

2. Dujų tarpelio egzistavimo tikimybė 2003 ir tolimesniais metais priklausys nuo strategijos ir matavimų apimčių.

3. Minimalus matuojamų grafito kolonų skaičius iki 2004 metų pirmojo energetinio bloko reaktoriui yra 50 grafito kolonų kiekvienais metais.

4. Dujų tarpelio egzistavimo tikimybė visuose Ignalinos AE antrojo energetinio bloko reaktoriaus kanaluose per kitus metus artima vienetui ir atitinka reglamento kriterijų.

Gauta
2002 04 23

Literatūra

1. Регламент эксплуатационного контроля технологических каналов СУЗ и графитовой кладки реакторов Игналинской АЭС. ПТОэг-1125-241, 1993.
2. SAR, Ignalina Safety Analysis Report, Final Edition, Vattenfall Nuclear Project AB for the Ignalina Nuclear Power Plant, 1996.
3. Augutis J., Ušpuras E., Liaukonis M. Ignalina NPP RBMK-1500 gas gap evaluation. Nuclear Engineering and Design, 2001. P. 195–207.
4. Барабанов Б., Виргильев Э. Радиационная прочность конструкционного графита. Москва: Атомиздат, 1976.
5. Ушпукас Е., Калятка А. Аварийные переходные процессы на АЭС с РБМК-1500. Каунас. ЛЭИ, 1998.

Juozas Augutis

THE ASSESSMENT AND UNCERTAINTY ANALYSIS OF GAS GAP BETWEEN GRAPHITE AND FUEL CHANNELS IN REACTORS OF THE IGNALINA NPP

S u m m a r y

One of the factors that limit the lifetime of the RBMK-1500 reactors is considered. It is the closure of gas gap

between graphite bricks and fuel channel. It is known that gaps contract as a result of radiation and temperature induced expansion of graphite and outward creep of the pressure tubes. Since later graphite begins to shrink, so the evaluation of gas gap is a non-linear problem. In the present work the statistics of diameter measurements of graphite bricks and fuel channels is considered, the mathematical model of gas gap changing is developed, the strategy of graphite bricks measurement is created and the uncertainties of the results are estimated. The probabilities of gas gap closure in the nearest future of the reactor operation are calculated.

Key words: gas gap, fuel channel, graphite bricks, gap closure probability

Юозас Аугутис

ОЦЕНКА И АНАЛИЗ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИСЧЕРПАНИЯ ГАЗОВОГО ЗАЗОРА МЕЖДУ ГРАФИТОВОЙ КЛАДКОЙ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ КАНАЛАМИ В РЕАКТОРАХ ИГНАЛИНСКОЙ АЭС

Р е з ю м е

В данной работе рассматривается один из факторов, ограничивающих ресурс работы реакторов РБМК-1500. Это потеря газового зазора между графитовой кладкой и трубой технологического канала. Известно, что под влиянием температуры и нейтронного флуенса диаметры графитовых отверстий сокращаются, а диаметры циркониевых труб расширяются и таким образом газовые зазоры постепенно исчерпываются. Также известно, что через некоторое время графит начинает сокращаться, т. е. оценка газового зазора является нелинейной задачей. В настоящей работе были исследованы статистические данные измерений диаметров графитовых отверстий и технологических каналов, создана модель изменения газового зазора, предложена стратегия выбора каналов для измерения и проведена оценка неопределенности результатов. Также сделаны расчеты вероятностей исчерпания газовых зазоров в ближайшие годы работы реактора.

Ключевые слова: газовый зазор, технологический канал, графитовая кладка, вероятность исчерпания газового зазора