ENERGETIKA. 2010. T. 56. Nr. 3–4. P. 225–231
© Lietuvos mokslų akademija, 2010
© Lietuvos mokslų akademijos leidykla, 2010

Panaudoto branduolinio kuro pervežimo konteinerio temperatūrų pasiskirstymo įvertinimas

Aurimas Tonkūnas,

Darius Laurinavičius,

Raimondas Pabarčius

Branduolinių įrenginių saugos laboratorija, Lietuvos energetikos institutas, Breslaujos g. 3, LT-3035, Kaunas
El. paštas: auris@mail.lei.lt

Uždarius Ignalinos AE pirmąjį RBMK-1500 bloką, jo reaktoriaus aktyviojoje zonoje liko daug dalinai išdegusio branduolinio kuro. Ekonominiais tikslais buvo sukurtas panaudoto branduolinio kuro pervežimo konteineris, kuriame panaudotos pirmajame bloke kuro rinklės perkeliamos į antrąjį bloką. Konteineris vienu metu gali pervežti iki šešių RBMK-1500 kuro rinklių. Naudojant baigtinių elementų programą ALGOR (JAV), buvo sudarytas panaudoto branduolinio kuro pervežimo konteinerio skaitinis modelis ir nustatyta aplinkos temperatūros bei skirtingų kuro rinklių ašinio šilumos išsiskyrimo profilių įtaka konteinerio sienelės temperatūroms. Skaičiavimo metodika buvo patikrinta palyginus kito IAE aikštelėje esančio panaudoto kuro saugojimui skirto konteinerio (CASTOR-RBMK) modeliavimo rezultatus su matavimo rezultatais.

Raktažodžiai: RBMK-1500, pervežimo konteineris, liekamoji šiluma, temperatūros profiliai

1. ĮVADAS

Iki 2004 m. gruodžio 31 d. pirmojo energijos bloko uždarymo Ignalinos AE (IAE) veikė du kanalinio tipo šiluminių neutronų vandens–grafito branduoliniai reaktoriai RBMK-1500 [1]. Uždarius pirmąjį Ignalinos AE bloką iškilo klausimas dėl tolesnio nevisiškai išdegusio kuro panaudojimo. Atliktas techninis-ekonominis pagrindimas parodė, kad apie 1 000 1-ojo bloko reaktoriuje likusių urano–erbio kuro rinklių gali būti panaudotos 2-ajame veikiančiame bloke [2]. Tokiu būdu ne tik būtų sutaupoma apie 600 šviežio kuro rinklių, bet ir sumažinamas radioaktyviųjų atliekų kiekis panaudoto branduolinio kuro (PBK) saugojimo aikštelėje. Norint įgyvendinti šį sumanymą buvo suprojektuotas ir pagamintas kuro pervežimo iš Ignalinos AE 1-ojo energijos bloko reaktoriaus į 2-ąjį kompleksas [2].

Panaudoto branduolinio kuro pervežimo kompleksą (1 pav.) sudaro autovežis su geležinkelio platforma, ant kurios patalpintas PBK konteineris. Konteineris – tai cilindrinis indas su 6 vietų rinklių dėklu RBMK-1500 kuro rinklėms patalpinti.

PBK iš 1-ojo IAE bloko į 2-ąjį perkeliamas šiais pagrindiniais etapais:

- panaudotų kuro rinklių pakrovimas į konteinerį;
- panaudoto kuro konteinerio transportavimas iš 1-ojo bloko į 2-ąjį autovežiu;

1 pav. Ignalinos AE PBK pervežimo kompleksas

- kuro rinklių iškrovimas;
- kuro rinklių pakrovimas į IAE 2-ojo bloko reaktorių.

Minėtą kuro pervežimą buvo numatoma vykdyti iki IAE 2-ojo bloko eksploatacijos nutraukimo, t. y. 2009 m. pabaigos. Pakartotiniam naudojimui tinkamas kuras pradėtas pervežti po 1,5 metų išlaikymo kuro aušinimo baseinuose. Pervežamo kuro nuklidinė sudėtis priklauso nuo pradinio kuro įsodrinimo, buvusio darbo režimo reaktoriuje, kuro išdegimo gylio bei jo išlaikymo kuro aušinimo baseinuose laiko. PBK sudėtis savo ruožtu lemia konteinerio šilumines, radiacines savybes bei įkrovos kritiškumą. Tęsiant PBK pervežimo konteinerio tyrimų ciklą [3, 4] šiame darbe buvo tyrinėjama įkrovos bei

aplinkos temperatūros įtaka konteinerio išorinės sienelės temperatūroms. Temperatūrai įvertinti pasitelktas ALGOR (JAV) programų paketas. Pasirinktos metodikos taikymo tinkamumui pagrįsti pradžioje buvo modeliuojamas CASTOR RBMK konteineris, skirtas Ignalinos AE PBK ilgalaikiam sausam saugojimui iki 50 metų. Gauti rezultatai palyginti su matavimo duomenimis. Taip pat tyrimo metu modeliuojant tiek pervežimo, tiek saugojimo (CASTOR) konteinerius, buvo tikrinamas vienas pramoninės saugos kriterijų – temperatūra ant konteinerio išorinės sienelės turi būti ne aukštesnė kaip 85 °C [5].

Šiame darbe pateiktas PBK pervežimo konteinerio šiluminių charakteristikų įvertinimas yra tęstinis tyrimas. Anksčiau atlikta branduolinė saugos analizė [3] parodė, kad normaliomis pervežimo sąlygomis konteinerio su jame patalpintomis 6-iomis šviežiomis 2,8 % pradinio įsodrinimo ^{235}U kuro rinklėmis be išdegančio neutronų absorberio – erbio kritiškumas neviršys leistino branduolinės saugos kriterijaus, t. y. $K_{eff} < 0{,}95$. Nustatyta, kad maksimali kritiškumo vertė 0,42 pasiekiama esant 0,3 g/cm^3 vidutinei vandens tankio koncentracijai konteinerio viduje. Radiacinės saugos analizė [4] parodė, kad didžiausia suminė dozės galia ant konteinerio paviršiaus, esant PBK įkrovai su maksimaliu 18,9 MWd/kgU kuro išdegimo gyliu (ekonomiškai pagrįstas tolesniam kuro naudojimui) bei minimaliu 1,5 metų aušinimo laiku, lygi 214 μSv/h. Gauta reikšmė ne didesnė už leistiną suminės dozės galios vertę – 2 000 μSv/h [5].

2. TYRIMO METODIKA

Panaudoto branduolinio kuro konteinerio skaitinio modelio sudarymui ir temperatūros nustatymui buvo pasitelktas baigtinių elementų programų paketas ALGOR (JAV). Programų paketas gali modeliuoti dvejopus šilumos perdavimo procesus, t. y. šilumos perdavimo dinaminį procesą ir statinės būsenos šilumos perdavimą. Abiem atvejais šilumos perdavimo skaičiavimai gali būti tiesiniai ir netiesiniai. Tiesinis šilumos perdavimo skaičiavimas atliekamas tada, kai medžiagos laidumas nepriklauso nuo temperatūros ir kai šilumos mainai spinduliavimu nėra vertinami.

Šiame darbe buvo naudotas netiesinis šilumos perdavimo būdas. Kai šilumos laidumo koeficientas yra temperatūros funkcija (ortotropinis medžiagų modelis) arba kai šilumos mainai spinduliavimu yra vertinami, šilumos perdavimo uždavinys sprendžiamas naudojant iteracinius skaičiavimo metodus. Šiuo atveju priartėjimo keliu, keičiant pradinę temperatūrą, atliekami šilumos laidumo ir spinduliavimo skaičiavimai, kol pasiekiama uždavinio konvergencija (2 pav.).

Šiluma per sienelę perduodama trimis būdais, t. y. šilumos laidumu per medžiagą, konvekcija ir spinduliavimu.

Šilumos srautas laidumu per medžiagą yra skaičiuojamas remiantis Furjė dėsniu:

$$q = -\frac{kA}{\Delta x}(T_2 - T_1); \tag{1}$$

čia Δx – sienelės storis, T_1 ir T_2 – sienelės paviršių temperatūros, k – šilumos laidumo koeficientas, A – paviršiaus plotas.

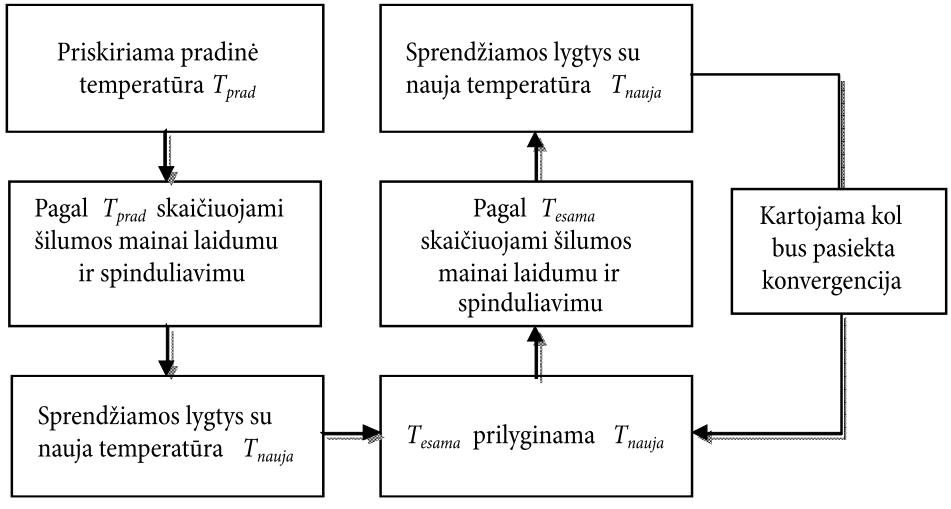
Konvekcija – šilumos perdavimas judančiomis skysčių ar dujų srovėmis. Šilumos srautą galima apskaičiuoti naudojant Niutono lygtį:

$$q = \alpha A \cdot (T_s - T_a); \tag{2}$$

čia α – konvekcijos šilumos atidavimo koeficientas, A – sienelės plotas, T_s – sienelės temperatūra, T_a – aplinkos temperatūra. Konvekcijos koeficientas α tiek apribotoje, tiek neapribotoje erdvėje randamas naudojant šias lygtis:

$$\mathrm{Nu} = c \cdot (\mathrm{Gr} \cdot \mathrm{Pr})^n = c\left(\frac{\beta \cdot g \cdot l^3 \cdot \Delta T}{\nu^2} \cdot \mathrm{Pr}\right)^n; \tag{3}$$

čia β – terminis plėtimosi koeficientas, g – laisvojo kritimo pagreitis, l – būdingas kūno paviršiaus matmuo, ΔT – temperatūrų skirtumas, ν – dinaminė klampa. c ir n koeficientai randami iš lentelių, atsižvelgus į kriterijaus Ra = Gr · Pr vertę,



2 pav. Netiesinė temperatūros skaičiavimo schema (ALGOR)

tiriamo paviršiaus geometrinę formą ir ar tiriama erdvė yra uždara, ar atvira. Gr, Pr – atitinkamai Grashofo ir Prandtlio kriterijai.

Konvekcijos koeficiento vertė nustatoma taip:

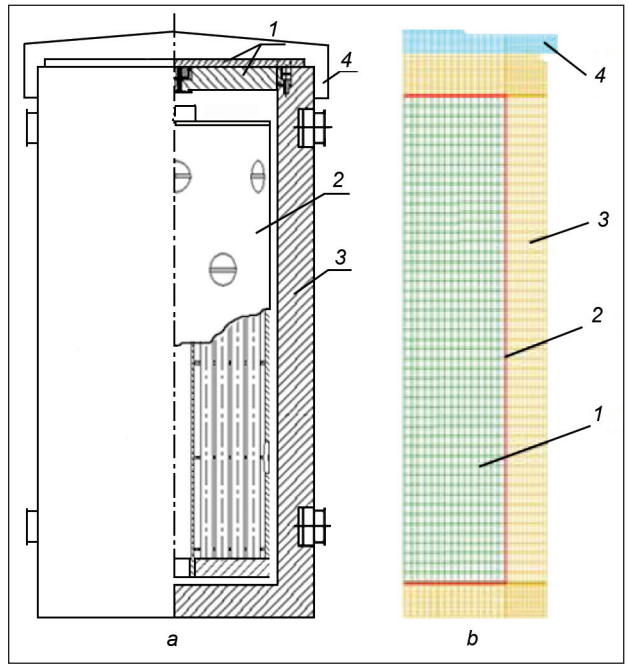
$$\alpha = \frac{\mathrm{Nu} \cdot \lambda}{l}; \quad (4)$$

čia λ – šilumos laidumo koeficientas, *l* – būdingas kūno matmuo.

Spinduliavimas – šilumos perdavimas dujinei ar tuščiai erdvei elektromagnetinėmis bangomis. Spinduliavimo intensyvumas priklauso nuo paviršiaus juodumo laipsnio bei nuo spinduliavimo formos. Juodumo laipsnis parodo, kurią viso srauto dalį kūnas išspinduliuoja ar sugeria dėl aplinkos temperatūros. Tuo tarpu spinduliavimo forma parodo, kurią energijos dalį per ploto vienetą vienas kūnas perduoda kitam kūnui. Šilumos srautas spinduliavimo būdu, įvertinant spinduliavimo formos veiksnį ir juodumo laipsnį, apskaičiuojamas naudojant šią bendrą išraišką:

$$q = \frac{A_1 \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)}; \quad (5)$$

čia σ – Bolcmano konstanta, ε – paviršiaus juodumo laipsnis, T_i – paviršiaus temperatūra, *A* – paviršiaus plotas.



3 pav. CASTOR-RBMK konteineris su įkrova. *a* – principinė schema: *1* – dangčiai; *2* – 102 vietų krepšys kuro rinklių pluoštams; *3* – metalinio konteinerio sienelė; *4* – apsauginis gaubtas; *b* – skaitinis modelis: *1* – homogeninė zona (kuras-krepšys); *2* – helio tarpas; *3* – sienelė; *4* – apsauginis gaubtas

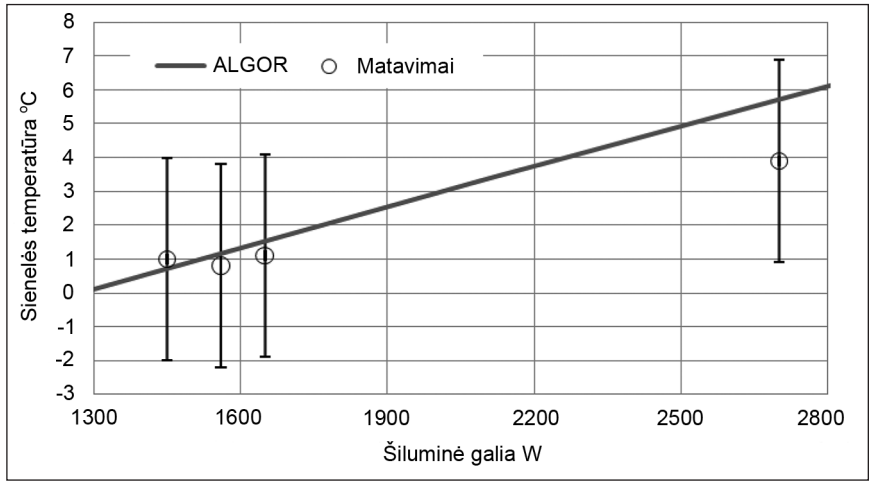
3. METODIKOS PATIKRA

PBK pervežimo konteineris pradėtas eksploatuoti neseniai, todėl eksperimentinių matavimų atlikta nedaug, o kai kurie jų nėra publikuoti. Todėl PBK pervežimo konteinerio šiluminei analizei atlikti taikytinos metodikos patikrinimui buvo pasirinktas kitas objektas – CASTOR-RBMK konteineris (toliau CASTOR), skirtas ilgalaikiam sausam PBK saugojimui Ignalinos AE aikštelėje. Šiluminė analizė šiam konteineriui atlikta naudojant minėtą ALGOR programą. Gauti rezultatai palyginti su matavimo duomenimis [6].

CASTOR konteineris – tai cilindrinis metalinis indas, kurio aukštis apie 4,4 m, išorinis skersmuo 2,1 m ir sienelės storis 0,3 m (3 pav.). Kitaip nei PBK pervežimo konteineris, CASTOR talpina kuro rinklių pluoštus, kuriems taikomi griežtesni reikalavimai kuro išlaikymo baseinuose bei kuro įsodrinimo atžvilgiu (juose saugojamas kuras ne didesnio nei 2 % įsodrinimo). RBMK-1500 kuro rinklė sudaryta iš dviejų kuro rinklių pluoštų, sujungtų centriniu juos laikančiu vamzdžiu. Kiekvienas pluoštas sudarytas iš 18 kuro elementų, išsidėsčiusių dviem koncentriniais apskritimais. Vidiniame apskritime, kurio skersmuo – 3,2 cm, vienodais atstumais išdėstyti 6 kuro elementai. Išoriniame apskritime (skersmuo 6,2 cm) vienodais atstumais išdėstyta 12 kuro elementų. Į konteinerį talpinamas krepšys su 102 RBMK tipo branduolinio kuro rinklių pluoštais.

Sudarytame skaitiniame CASTOR modelyje (3 pav. *b*) kuro rinklių pluoštai kartu su krepšio konstrukcija sujungti į vieną homogeninę zoną, kurią iš visų pusių nuo metalinio konteinerio sienelių skiria helio dujos. Siekiant palyginti skaičiavimo rezultatus modeliavimo metu priimta prielaida, kad aplinkos temperatūra yra pastovi ir lygi –6 °C (matavimai taip pat atlikti žiemą). Skaitinio tyrimo metu buvo modeliuotas CASTOR konteineris su didžiausiu (vidutinis kuro rinklės išlaikymas 7 metai) ir su mažiausiu (vidutinis kuro rinklės išlaikymas 15 metų) liekamuoju šilumos išsiskyrimu jame. Taip pat priimta, jog šiluma per helio tarpą nuo įkrovos yra perduodama laidumu, spinduliavimu ir konvekcija. Šiluma nuo konteinerio paviršiaus nukreipiama laisvąja konvekcija bei spinduliavimu. Remiantis (3), (4) kriterinėmis lygtimis buvo nustatytas CASTOR konteinerio išorinės sienelės konvekcijos koeficientas (5 W/m · K). Apskaičiuota, kad helio tarpo konvekcijos koeficientas lygus 2,2 W/m · K. Kadangi du cilindrus skiriantis helio tarpas yra labai mažas, tai spinduliavimo veiksnys priimtas lygus 1. CASTOR konteinerio homogeninės zonos juodumo laipsnis priimtas 0,45, o vidinės ir išorinės konteinerio sienelės juodumo laipsniai atitinkamai 0,7 ir 0,8 [6]. Atliekant konteinerio CASTOR skaitinį tyrimą buvo priimta, jog kuro likutinės šilumos kiekis pagal kuro rinklės aukštį nekito (tolygus pasiskirstymas).

Gautų skaičiavimų rezultatų palyginimas su matavimo duomenimis pavaizduotas 4 pav. Čia pateiktos vertikaliai pastatyto CASTOR konteinerio išorinio paviršiaus temperatūros (konteinerio viduryje pagal aukštį). Ilgėjant kuro aušinimo laikui, dėl sumažėjusios PBK likutinės šilumos temperatūra ant konteinerio išorinės sienelės mažėja. Daugiausia likutinės šilumos (iki 90 proc. 2 % ^{235}U įsodrinimo kurui su 7 metų išlaikymu kuro aušinimo baseinuose) kure išsiskiria



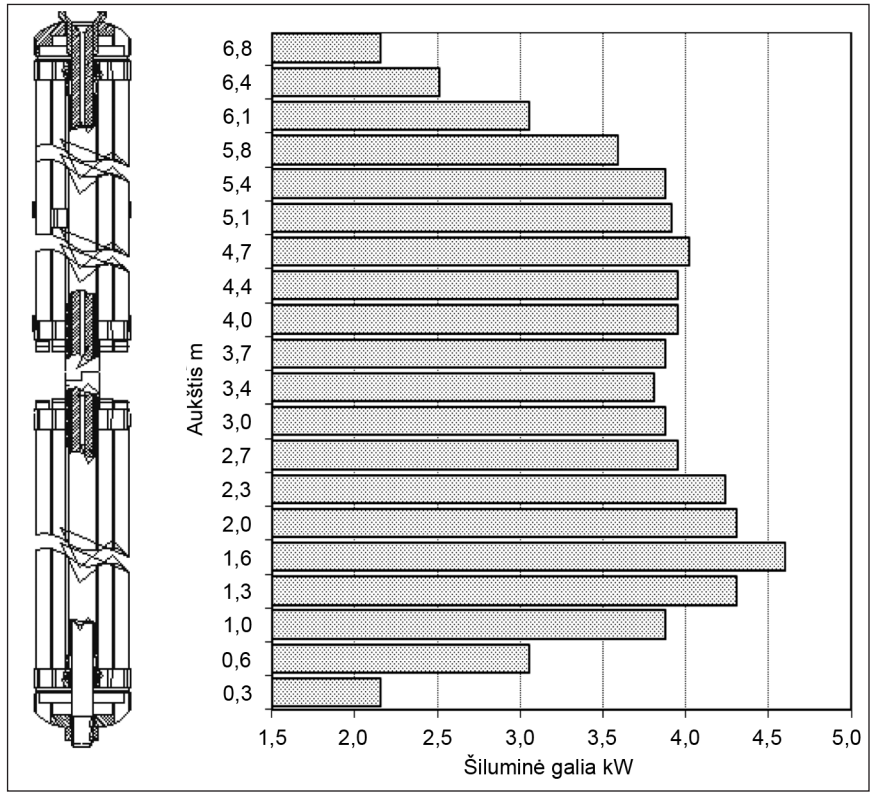
4 pav. CASTOR RBMK konteinerio išorinio paviršiaus temperatūros kitimas didėjant kuro įkrovos šiluminei galiai ($t_{apl} = -6$ °C)

dėl nestabilių skilimo produktų dalijimosi. Didėjant kuro išlaikymui (aušinimui) dauguma trumpaamžių skilimo produktų suskyla, todėl gaunama mažesnė likutinė šiluma. Taigi atlikti tyrimai parodė, kad ALGOR programų paketas gerai įvertina šiluminius skaičiavimus, kurie matavimo paklaidų ribose (±3 °C) gerai sutampa su matavimo rezultatais.

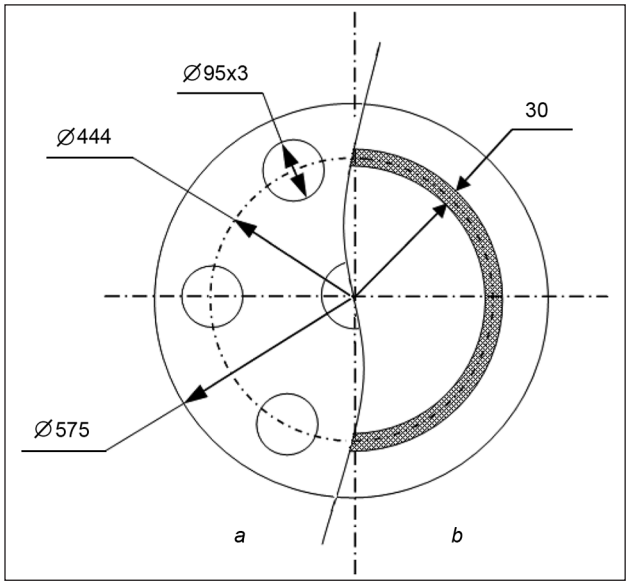
4. PBK PERVEŽIMO KONTEINERIO MODELIAVIMO PRIELAIDOS IR TEMPERATŪRŲ ĮVERTINIMAS

Toliau buvo atlikta PBK pervežimo konteinerio temperatūrų pasiskirstymo analizė, įvertinant tiek tolygų, tiek netolygų šilumos išsiskyrimo profilį pagal kuro rinklės aukštį (5 pav.). Kaip minėta, ekonomiškai pagrįstas maksimalus pervežamo 2,6 % įsodrinimo ^{235}U kuro išdegimas pakartotiniam jo panaudojimui yra 18,9 MWd/kgU [7]. Skaičiavimuose priimta, kad vienos kuro rinklės liekamoji šiluma po minimalaus 1,5 metų išlaikymo kuro baseinuose lygi 600 W [7]. Modeliavimo metu naudojant tolygų šilumos išsiskyrimo profilį suminė 6 rinklių likutinė šiluma priimta lygi 3 600 W. Antruoju atveju (netolygus profilis) likutinė šiluma buvo tokia pat, tik šilumos išsiskyrimas pagal konteinerio aukštį kito, kaip parodyta 5 pav. Šiuo atveju šilumos išsiskyrimo pagal aukštį netolygumo koeficientas buvo lygus 1,27.

PBK pervežimo konteinerio skerspjūvis bei priimtas modelis parodytas 6 pav. Vienu metu PBK gali pervežti iki 6 kuro rinklių, išdėstytų vienodu atstumu viena nuo kitos koncentriniu apskritimu, kurio skersmuo 44,4 cm. Krepšio centre yra vamzdis Ø 10,2 cm. Priimtame skaitiniame modelyje (6 pav. *b*)



5 pav. Netolygus liekamosios šilumos išsiskyrimas pagal RBMK-1500 kuro rinklės aukštį [8]

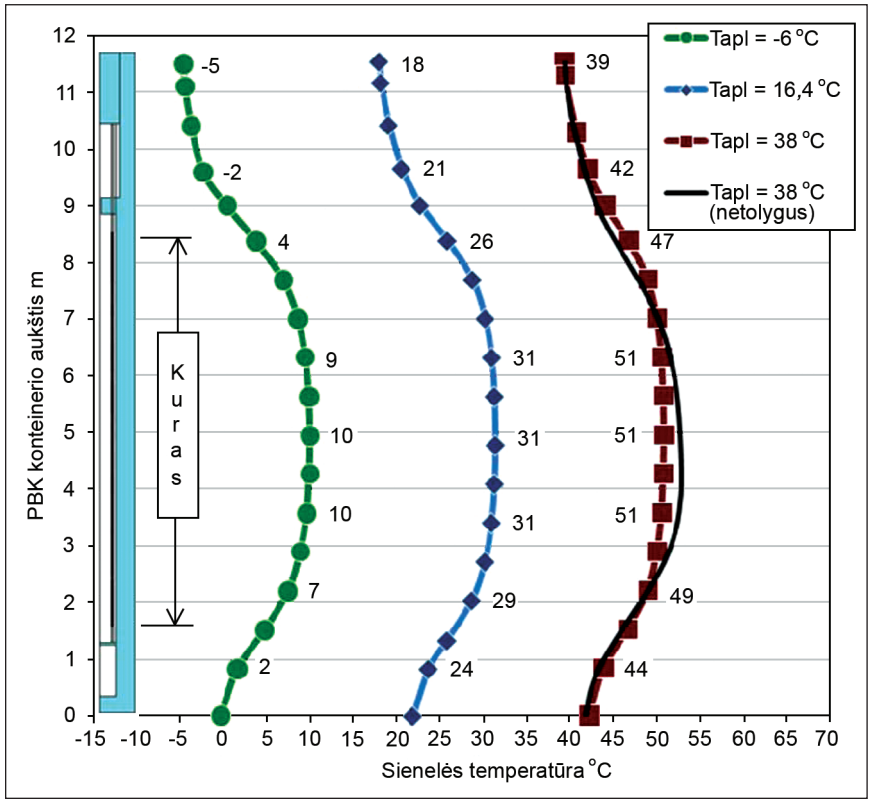


6 pav. PBK pervežimo konteinerio skerspjūvis (*a*) ir skaitinis modelis (*b*)

kuro rinklės kartu su krepšio konstrukcija sudaro homogeninį 3,05 cm pločio žiedą (0,175 + 2,7 + 0,17), kurio skerspjūvio plotas lygus šešių kuro rinklių kartu su jų krepšiais plotų sumai. Kadangi šilumos generacija krepšio vamzdžiuose negalima (modeliavimo ypatybė), tai šilumos šaltinis (kuras) apibrėžtas kaip 2,7 cm pločio žiedinė zona. Konteinerio sienelės storis – 32,75 cm. Modeliuojamas aktyvus kuro rinklės aukštis lygus 6,85 m, viso konteinerio aukštis ~11,5 m.

Kuro rinklės matricoje generuojama šiluma spinduliavimo, konvekcijos ir laidumo būdu perduodama krepšio konstrukcijai bei masyviam konteinerio korpusui, o nuo konteinerio paviršiaus šiluma į aplinką nuvedama konvekcija bei spinduliavimu. Konvekcijos koeficientai prie išorinės ir vidinės sienelių (atitinkamai 4,0 ir 3,2 W/m · K) buvo apskaičiuoti naudojant (3) kriterines lygtis. Tyrimo metu PBK pervežimo konteinerio išorinės sienelės temperatūros nustatytos esant –6 °C, 16,4 °C ir 38 °C aplinkos temperatūroms; čia –6 °C atitinka Ignalinos krašto žiemos vidutinę temperatūrą, 16,4 °C – Ignalinos krašto vasaros vidutinę temperatūrą, 38 °C – galima maksimali vasaros temperatūra padidinta 10 laipsnių įvertinant saulės spinduliavimo įtaką. PBK pervežimo konteinerio homogeninės kuro zonos juodumo laipsnis priimtas 0,45, konteinerio vidinės ir išorinės sienelės juodumo laipsniai atitinkamai 0,46 ir 0,8 [7].

Naudojant programų paketą ALGOR pirmiausia buvo nustatyta, kaip skirtingos aplinkos temperatūros veikia PBK konteinerio paviršiaus temperatūrą, kai suminis visų 6 kuro rinklių šilumos išsiskyrimas (3 600 W) per visą rinklės aukštį yra tolygus. Temperatūrų kitimas ant PBK konteinerio sienelės išorinio paviršiaus parodytas 7 pav. Didėjant aplinkos temperatūrai, temperatūros profilis ant konteinerio išorinės sienelės paviršiaus tampa lėkštesnis. Konteinerio paviršiaus temperatūros didėjimas tiesiogiai proporcingas aplinkos temperatūros padidėjimui, t. y. pakilus 1 °C aplinkos temperatūrai, konteinerio paviršiaus temperatūra pakinta ~1 °C. Esant 38 °C aplinkos temperatūrai palyginimui pateiktas kuro rinklės su netolygaus šilumos išsiskyrimo profiliu temperatūros pasiskirstymas. Matyti, kad PBK konteinerio sienelės išorinio paviršiaus maksimali temperatūra persislenka į apatinę konteinerio dalį dėl didesnio šilumos išsiskyrimo ties apatine



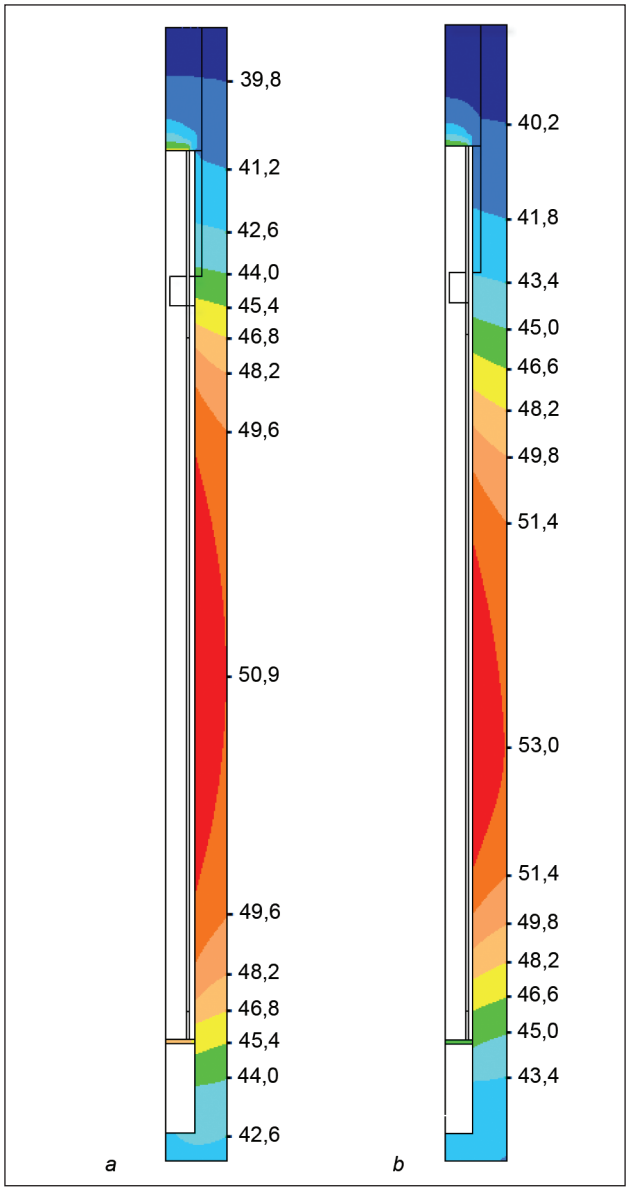
7 pav. PBK pervežimo konteinerio išorinės sienelės temperatūrų profiliai esant skirtingai aplinkos temperatūrai (tolygus šilumos išsiskyrimas pagal aukštį; įkrovos galia 3 600 W)

kuro rinklės pluošto dalimi (5 pav.). Tokiam pasiskirstymui kuro rinklėje turi įtakos valdymo strypų padėtys RBMK reaktoriaus aktyviojoje zonoje. Kadangi įprastai ir beveik visą kuro rinklės eksploatavimo laiką reaktoriuje valdymo strypai nėra visai įleisti į aktyviąją zoną, galios pikas yra persislinkęs į apatinę kuro pluošto dalį. Ties kuro rinklės vidurine dalimi gaunamas šilumos išsiskyrimo sumažėjimas dėl esančios tarp kuro pluoštų 3 cm jungties.

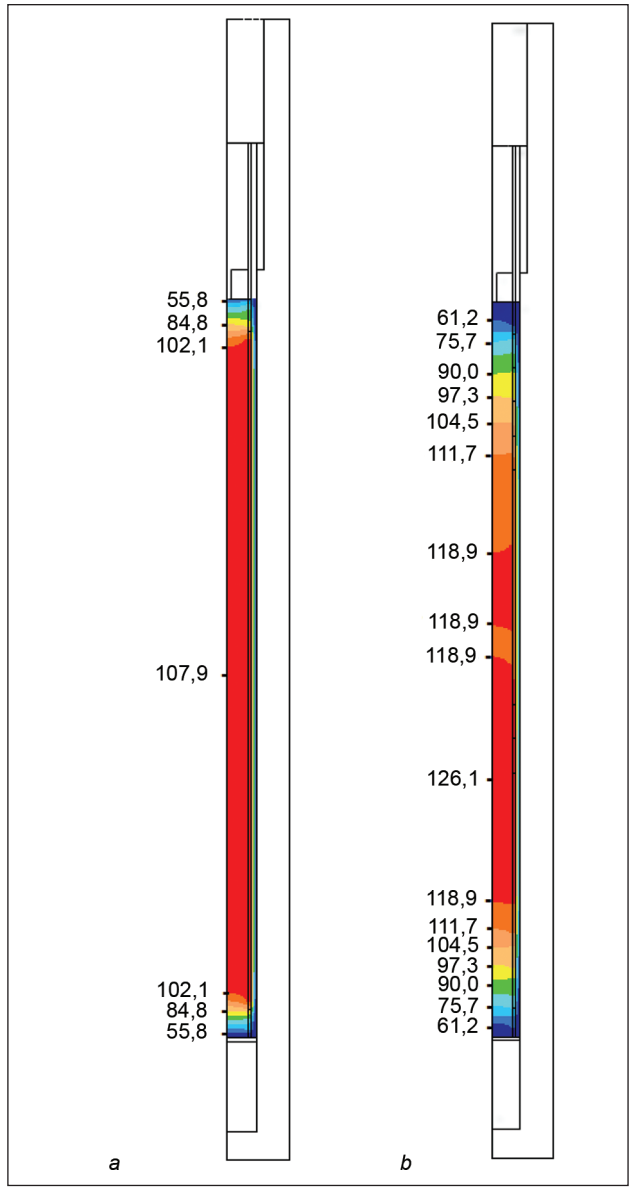
Lyginant skaičiavimo rezultatus (8 pav.), gautus su tolygiu ir netolygiu kuro rinklės liekamosios šilumos išsiskyrimu, matyti, jog maksimali PBK pervežimo konteinerio išorinės sienelės temperatūra skiriasi 2 °C. Abiem atvejais aplinkos temperatūra lygi 38 °C. Esant tai pačiai aplinkos temperatūrai ir analogiškai kuro įkrovai, įvertinant netolygų kuro rinklės šilumos išsiskyrimo profilį, ANSYS programų paketu apskaičiuota maksimali konteinerio išorinės sienelės temperatūra yra lygi 53 °C [7]. PBK pervežimo konteinerio centrinės dalies temperatūrų pasiskirstymas parodytas 9 pav. Gaunama žymi profilių įtaka maksimaliai įkrovos temperatūrai konteinerio viduje, netolygaus kuro rinklės liekamosios šilumos išsiskyrimo atveju maksimali temperatūra yra lygi 126 °C ir aukštesnė 18 °C nei tolygaus profilio atveju. Tiek išorinio konteinerio paviršiaus temperatūra, tiek įkrovos maksimali temperatūra esant maksimaliai PBK pervežimo konteinerio įkrovai neviršija leistinų (atitinkamai 85 °C [5] ir 300 °C [9]) temperatūrų.

5. IŠVADOS

Naudojant baigtinių elementų programų paketą ALGOR (JAV) PBK konteinerio temperatūrų įvertinimui pirmiausia atlikta metodikos patikra su CASTOR konteineriu, palyginant skaičiavimo rezultatus su eksperimento duomenimis.



8 pav. PBK konteinerio sienelės temperatūrų profiliai: *a* – esant tolygiam, *b* – esant netolygiam kuro liekamosios šilumos išsiskyrimo profiliui (T_{apl} = 38 °C)



9 pav. PBK konteinerio vidinės dalies temperatūrų profiliai: *a* – esant tolygiam, *b* – esant netolygiam kuro liekamosios šilumos išsiskyrimo profiliui (T_{apl} = 38 °C)

Gauti rezultatai parodė, kad minėtas programinis įrankis gerai įvertina temperatūras ant konteinerio sienelės, apskaičiuotos vertės patenka į matavimo paklaidų ribas.

Nustatyta didelė išorinės aplinkos temperatūros įtaka PBK konteinerio paviršiaus temperatūrai. Konteinerio paviršiaus temperatūros didėjimas tiesiogiai proporcingas aplinkos temperatūros padidėjimui, t. y. pakilus 1 °C aplinkos temperatūrai, konteinerio paviršiaus temperatūra pakinta ~1 °C.

Pritaikyti skirtingi kuro rinklės šilumos išsiskyrimo profiliai labiausiai veikia vidinę PBK pervežimo konteinerio temperatūrą. Netolygaus kuro rinklės ašinio šilumos išsiskyrimo profilio atveju centrinės konteinerio dalies maksimali temperatūra aukštesnė kaip 18 °C, o sienelės išorinio paviršiaus maksimali temperatūra – 2 °C. Visais nagrinėtais atvejais PBK pervežimo konteinerio išorinio paviršiaus temperatūra ne aukštesnė už leistinąją – 85 °C.

Naudojamas netolygus ašinio kuro rinklės šilumos išsiskyrimo profilis leidžia tiksliau įvertinti konteinerio viduje įkrovos temperatūras, kurios nagrinėtais atvejais ne aukštesnės už leistiną 300 °C kriterijų.

Gauta 2010 02 10
Priimta 2010 09 27

Literatūra

1. Almenas K., Kaliatka A., Ušpuras E. *Ignalina RBMK-1500*. Kaunas, 1998.
2. *Ignalinos AE 1-ojo energijos bloko kuro sudeginimo 2-ojo energijos bloko reaktoriuje komplekso projektavimas ir gamyba*. Lietuvos energetikos institutas, 2006.
3. Laurinavičius D., Tonkūnas A. Transportavimo konteinerio, skirto panaudoto kuro pervežimui iš vieno Ignalinos AE bloko į kitą, kritiškumo įvertinimas. *Konferencijos „Jaunoji energetika 2007“ pranešimų medžiaga*. Kaunas, 2007.
4. Tonkūnas A., Laurinavičius D., Pabarčius R. Kuro pervežimo iš Ignalinos AE pirmojo energijos bloko reaktoriaus į antrąjį įrangos radiacinės dozės galios įvertinimas. *Energetika*. 2008. T. 54. Nr. 4. P. 35–40.
5. Regulations for the safe transport of radioactive material. *IAEA Safety Standards Series*. No. TS-R-1 (ST-1, Revised), 2000.
6. Šimonis V., Poškas P., Šmaižys A. Ignalinos AE saugyklos panaudoto branduolinio kuro konteinerių temperatūrų pasiskirstymo įvertinimas. *Energetika*. 2008. T. 53. Nr. 2. P. 10–14.
7. *Dozhiganiye topliva 1-go energobloka v reaktore 2-go energobloka IAES*, 2006.
8. *Otchet po rezultatam „goryachikh“ ispytaniy oborudovaniya kompleksa obespechivayuschego dozhiganiye topliva 1-ogo energobloka v reaktore 2-ogo energobloka IAES*, PTOota-1145-4, 2006.
9. Bochvar A. A. All Russia research institute of inorganic materials, classification of fuel failures for WWER- and RBMK-fuel and its impact on long term storage. *IAEA Technical Meeting / Workshop on Dry Spent Fuel Management for WWER / RBMK Reactors. Russia*, 2002.

Aurimas Tonkūnas, Darius Laurinavičius, Raimondas Pabarčius

ASSESSMENT OF TEMPERATURE FIELD OF IRRADIATED NUCLEAR FUEL TRANSPORTATION CONTAINER

Summary

After shutting down the Ignalina NPP RBMK-1500 Unit 1, a large quantity of partly burnt nuclear fuel remained in the reactor core. Based on economic considerations, a transportation container was developed, in which the irradiated fuel assemblies from Unit 1 are moved to Unit 2 for energy production. Up to six RBMK-1500 fuel assemblies can be transported in the container simultaneously. Using the finite element code, the irradiated fuel transportation container model was developed and the influence of the environment temperature and of different axial fuel power density profiles on the container temperature field was determined. The calculation methodology was proven by comparing the modelling results for the Ignalina NPP spent fuel cask (CASTOR-RBMK) for fuel storage with measurement data.

Key words: RBMK-1500, transportation container, residual heat, temperature profiles

Ауримас Тонкунас, Дарюс Лауринавичюс, Раймондас Пабарчюс

ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР ТРАНСПОРТНОГО КОНТЕЙНЕРА ДЛЯ ПЕРЕВОЗА ОБЛУЧЕННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Резюме

После останова 1-ого блока Игналинской АЭС в активной зоне реактора РБМК-1500 осталось большое количество частично выгоревшего ядерного топлива. Опираясь на экономические соображения, был создан транспортный контейнер для облученного ядерного топлива, с использованием которого частично отработавшие в первом блоке топливные сборки транспортируются во 2-ой блок Игналинской АЭС. Одновременно контейнер может перевезти до 6 топливных сборок РБМК-1500. С помощью программы конечных элементов была создана численная модель транспортного контейнера для облученного топлива и было определено влияние температуры окружающей среды, а также разных максимальных профилей энерговыделения сборок на температурные поля контейнера. Расчетная методика была проверена, сопоставив результаты моделирования по контейнеру CASTOR-RBMK, предназначенного для хранения отработанного топлива на Игналинской АЭС, с экспериментальными данными.

Ключевые слова: РБМК-1500, транспортный контейнер, остаточное энерговыделение, температурные профили