

Ignalinos AE saugyklos panaudoto branduolinio kuro konteinerių temperatūrų pasiskirstymo įvertinimas

Vytautas Šimonis,

Povilas Poškas,

Artūras Šmaižys

*Lietuvos energetikos institutas,
Branduolinės inžinerijos problemų
laboratorija, Breslaujos g. 3,
LT-44403 Kaunas
El. paštas: simonis@mail.lei.lt*

Darbe pateiktas Ignalinos AE tarpinėje panaudoto branduolinio kuro saugykloje patalpintų saugojimo konteinerių CASTOR RBMK-1500 ir CONSTOR RBMK-1500 paviršiaus temperatūrų matavimo ir modeliavimo rezultatų palyginimas. Konteinerių paviršiaus temperatūros išmatuotos nešiojamu bekontakčiu Optex Thermo-Hunter temperatūros matuokliu žiemos sąlygomis, esant vidutinei paros aplinkos temperatūrai -6°C . Modeliuota tomis pat sąlygomis JAV sukurtu programų paketu (kodu) ALGOR.

Būdingų konteinerių modeliavimo realiomis sąlygomis rezultatai parodė, kad konteinerio su panaudotu branduoliniu kuru, išlaikytu ilgiau kaip 7 metus, ir konteinerio su 15 metų išlaikytu kuru įkrovos temperatūros atitinkamai siekia 77 ir 40°C , šoninio paviršiaus viduryje $-5,5$ ir $0,7^{\circ}\text{C}$, šoninio paviršiaus apačioje $-4,5$ ir $0,1^{\circ}\text{C}$ ir gaubto -2 ir $-3,5^{\circ}\text{C}$. Taigi, ilgėjant panaudoto branduolinio kuro išlaikymui (mažėjant liekamajam konteinerio įkrovos šilumos išsiskyrimui), labiausiai sumažėja įkrovos temperatūros ($\Delta t = 37^{\circ}\text{C}$), o paviršiaus temperatūros žiemos sąlygomis kinta nedaug ($\Delta t = 1,5-5^{\circ}\text{C}$). Analizės rezultatai parodė, kad saulės neveikiamų konteinerių išmatuotos paviršiaus temperatūros konteinerių viduryje (pagal aukštį) yra artimos modeliavimo rezultatams, o konteinerių apačioje išmatuotos paviršiaus temperatūros yra apie $2-5^{\circ}\text{C}$ mažesnės už apskaičiuotas. Parodyta, kad tomis pačiomis kuro saugojimo sąlygomis CONSTOR konteinerių paviršiaus temperatūros yra $1-2^{\circ}\text{C}$ mažesnės negu CASTOR konteinerių.

Raktažodžiai: RBMK-1500 panaudotas branduolinis kuras, „sausos“ tipo saugykla, konteinerio temperatūros, modeliavimas ir matavimai

1. ĮVADAS

Ignalinos atominėje elektrinėje (IAE) panaudoto branduolinio kuro tarpiniam saugojimui pasirinktas vadinamasis „sausos“ saugojimo būdas. Tuomet panaudotas kuras, jį privalomai išlaikius vandens baseinuose ne mažiau kaip 5 metus, yra sudedamas į Vokietijos gamybos metalinius CASTOR RBMK-1500 (toliau tiesiog CASTOR) arba gelžbetoninius CONSTOR RBMK-1500 (toliau tiesiog CONSTOR) konteinerius ir atviroje aikštelėje (saugykloje) gali būti laikomas dar apie 50 metų. Norint taip ilgai saugoti panaudotą branduolinį kurą, reikia gerai suprasti įvairius procesus, vykstančius pačiame konteineryje ir jam sąveikaujant su aplinka, bei įgyvendinti daugelį reikalavimų kuro pluoštams, konteineriui ir saugyklai, kurioje konteineriai laikomi.

Šiuo metu prie IAE įrengtoje tarpinėje panaudoto branduolinio kuro saugykloje yra saugomi CASTOR ir CONSTOR tipo konteineriai. Visiškai uždarius atominę elektrinę, panaudoto branduolinio kuro saugojimo konteineriai esamoje saugykloje netilps. Todėl šiuo metu projektuojama nauja tarpinė panaudoto RBMK branduolinio kuro rinklių iš 1-ojo ir 2-ojo Ignalinos AE energijos blokų saugykla. Joje numatoma patalpinti apie 200 naujos konstrukcijos daug talpesnių CONSTOR tipo konteinerių.

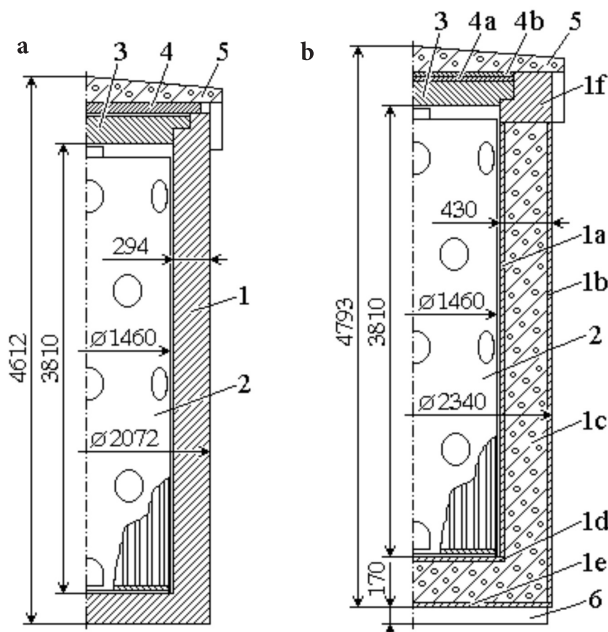
Ankstesniuose darbuose [1, 2] buvo pateikti konteinerių CASTOR ir CONSTOR šiluminio modeliavimo rezultatai.

Konservatyviai priėmus maksimalų liekamąjį 102 panaudoto branduolinio kuro pluoštais pakrauto konteinerio šilumos išsiskyrimą, įvairiomis saugojimo sąlygomis (pavienis konteineris ir konteineris saugykloje su ką tik pakrautu po 5 metų išlaikymo vandens baseine panaudotu branduoliniu kuru ir po 50 metų saugojimo, vasarą ir žiemą, įvertinus ir neįvertinus saulės spinduliuavimo) apskaičiuotos būdingos ribinės konteinerių temperatūros. Modeliuojant gauta, kad visais atvejais maksimalios konteinerių įkrovos (kuro pluoštų) temperatūros neviršija maksimalios leistinos 300°C šilumą išskiriančių elementų temperatūros, o šoninio paviršiaus temperatūros neviršija maksimalios transportavimo konteineriams leistinos 85°C temperatūros. Nustatyta, kad šiluminiu požiūriu konteineriai CASTOR ir CONSTOR visiškai tinka panaudoto branduolinio kuro, išlaikyto vandens baseinuose ne mažiau kaip 5 metus, ilgalaikiam saugojimui.

Siekiant pagrįsti modeliavimo patikimumą, tikslinga atlikti modeliavimą keliais metodais su keliomis programomis ir, jei tai įmanoma, palyginti su realiais matavimais. Ankstesniuose darbuose [1, 2] buvo atliktas konteinerių šiluminis modeliavimas priimant konservatyvias liekamojo šilumos išsiskyrimo ir aplinkos temperatūros prielaidas. Šiame darbe pateikiamas realiomis sąlygomis IAE tarpinėje panaudoto branduolinio kuro saugykloje saugomų konteinerių išmatuotų ir sumodeliuotų paviršiaus temperatūrų palyginimas.

2. METODINIAI KLAUSIMAI

Metalinis konteineris CASTOR (1 pav., a) – tai specialaus metalo liejinio cilindrinis indas (korpusas) (1), kurio aukštis didesnis nei 4 m, skersmuo – apie 2 m ir sienelės storis – apie 0,3 m. Į tokį konteinerį dedamas specialus nerūdijančio plieno cilindrinis krepšys (2) su išlaikytais vandens baseine panaudoto branduolinio kuro pluoštais. Į krepšį telpa 51 pusiau perpjauta panaudoto branduolinio kuro kasetė, t. y. 102 kuro pluoštai. Visos pakrovimo operacijos atliekamos vandenyje. Konteineris sandariai uždarymas dangčiu (3), uždengiamas apsaugine plokšte (4) ir, išsiurbus



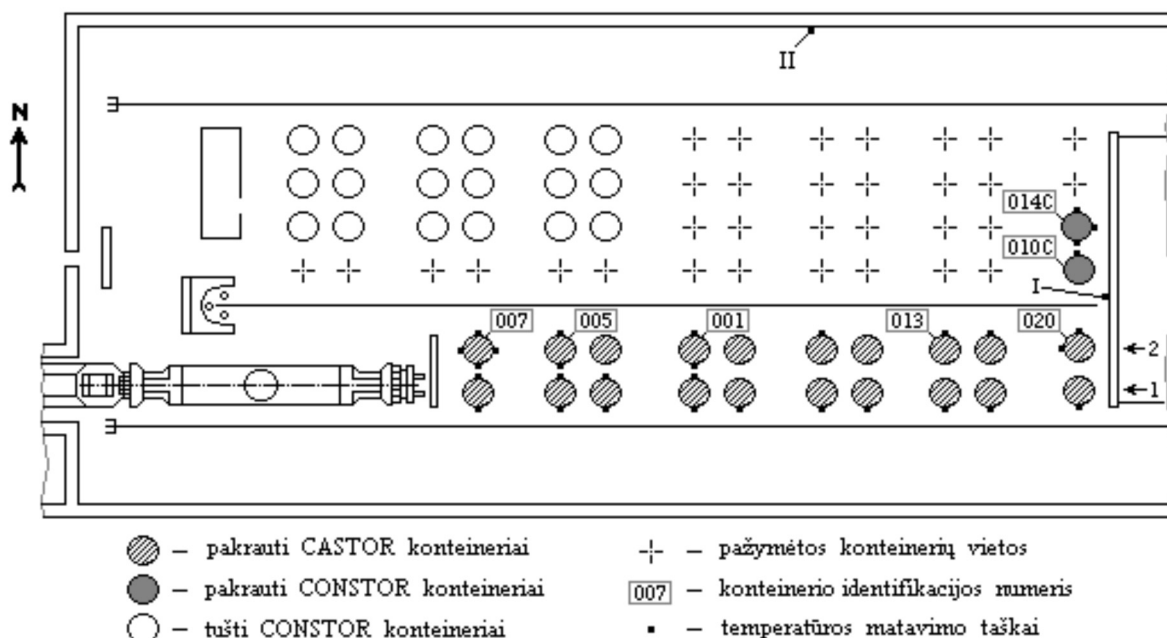
1 pav. Principinės metalinio CASTOR (a) ir gelžbetoninio CONSTOR (b) konteinerių schemas: 1 – metalinis korpusas (1a, 1b – vidinis ir išorinis cilindrai; 1c – sunkusis betonas; 1d, 1e – dugno plokštės; 1f – žiedas); 2 – krepšys; 3 – dangtis; 4 (4a, 4b) – apsauginės plokštės; 5 – apsauginis gaubtas; 6 – slopinanti atrama

vandenį, išdžiovinus bei vakuumavus, užpildomas heliu. Po to konteineris išvežamas į saugyklą. Čia konteineris pastatomas išbetonuotoje aikštelėje ir uždengiamas gelžbetoniniu apsauginiu gaubtu (5). Pakrautas konteineris sveria apie 75 tonas.

Gelžbetoninio konteinerio CONSTOR (1 pav., b) korpuso šoną sudaro du skirtingų gabaritų plieniniai cilindrai: vidinis (1a) ir išorinis (1b), kurių sienelės storis yra 0,04 m. Tarpvazdinė erdvė yra užpildyta sunkiuoju betonu (1c). Analogiškai sudarytas korpuso dugnas – erdvę tarp dviejų plokščių (1d) ir (1e) užpildant sunkiuoju betonu. Bendras konteinerio sienelės storis yra 0,43 m. Konteinerio viršų formuoja masyvus metalinis žiedas (1f), kuris privirintas prie cilindrų galų. Žiede tvirtinami ir fiksuojami konteinerio dangtis (3) ir dvi apsauginės plokštės (4a) ir (4b). Iš viršaus konteinerį gaubia gelžbetoninis apsauginis gaubtas (5), o konteinerio apačioje pritvirtinta transportavimo metu galimus smūgius slopinanti atrama (6). Vidiniai gelžbetoninio ir metalinio konteinerių gabaritai yra tokie patys, o iš išorės gelžbetoninis konteineris yra šiek tiek didesnis. Pakrautas gelžbetoninis konteineris sveria apie 88 tonas.

Konteinerių paviršiaus temperatūrų matavimai atlikti IAE panaudoto branduolinio kuro saugykloje 2001 m. kovo 27 d., kai ji dar nebuvo visiškai užpildyta. Tuo metu saugykloje (2 pav.) buvo patalpinta 20 CASTOR ir 2 CONSTOR (Nr. 010C ir 014C) konteineriai su panaudotu branduoliniu kuru, taip pat saugyklos tolesniame kampe buvo 18 tuščių CONSTOR konteinerių.

Temperatūrų matavimai buvo atliekami dieną, apie 12 val. Buvo giedra ir saulėta diena, maksimali oro temperatūra dieną buvo +1,5°C, o minimali temperatūra naktį – -13,4°C. Vidutinė paros temperatūra buvo -6°C. Matavimai atlikti daugumai konteinerių nuo 1 iki 4 matavimo taškų pagal perimetrą, dviejuose aukščiuose nuo konteinerio apačios: 0,4–0,5 m ir 2,3–2,4 m. Taip pat išmatuotos ir saugyklos betoninių sienų, orientuotų statmenai ir lygiagrečiai saulės spinduliams, temperatūros. Matavimai atlikti Japonijos gamybos bekontaktiniu portatyviu paviršių temperatūros matuokliu Optex Thermo-Hunter PT-3L, kurio matavimo ribos yra -20–+400°C. Matuoklio paso



2 pav. Konteinerių išdėstymo schema saugykloje ir temperatūros matavimo taškai aplink konteinerius ir ant saugyklos sienų (I, II). 1, 2 – konteinerių eilės

duomenimis, esant mažoms temperatūroms matavimai nėra labai tikslūs ($\pm 3^{\circ}\text{C}$, kai matuojamos mažesnės už 0°C temperatūros, ir $\pm 2^{\circ}\text{C}$ esant didesnėms nei 0°C temperatūroms), tačiau prietaisais yra rekomenduojamas tokiems matavimams.

Konteinerių šiluminis režimas modeliuotas JAV sukurtu programų paketu (kodu) ALGOR. Tai universali programa, leidžianti atlikti dvimatį ir trimatį šiluminį modeliavimą. Šiame darbe nagrinėjamas stacionarus dvimatis simetrinis konteinerio modelis cilindrinėse koordinatėse. Skaičiavimo modelyje visi konteinerio elementai modeliuojami atskiromis zonomis. Pagal aukštį įkrova (krepšys be dugno su panaudoto branduolinio kuro pluoštais) modeliuojama trimis homogeninėmis zonomis: 1 – pagrindinė aktyvioji, šilumą išskirianti įkrovos dalis, 2 – apatinė neaktyvi įkrovos dalis, kurią sudaro kuro rinklių galai, ir 3 – analogiška viršutinė neaktyvi įkrovos dalis. Krepšio dugnas yra apie 0,05 m storio ir sudaro atskirą zoną. Metalinio konteinerio korpusas buvo modeliuojamas kaip viena zona, o gelžbetoninio konteinerio korpuso metalinės dalys ir gelžbetoninis užpildas – kaip atskiros zonos.

Per įkrovą ir helio plyšius šiluma perduodama laidumu, spinduliavimu bei konvekcija. Per konteinerio korpusą – tik laidumu, o nuo konteinerio paviršiaus – spinduliavimu bei natūraliąja konvekcija. Modeliuojant šilumos perdavimas per įkrovą įvertinamas, panaudojant efektyvinį radialinį kiekvienos homogeninės zonos šilumos laidumo koeficientą, kuris nustatytas branduolinių reaktorių projektavimo organizacijose modelinių eksperimentų metu. Sąlygojanti aplinkos temperatūra yra vidutinė paros temperatūra (-6°C).

Diferencialinės šilumos laidumo lygtys sprendžiamos baigtinių elementų metodu. Apskaičiuojami temperatūrų bei šilumos srautų pasiskirstymai konteinerio įkrovoje, korpuse ir paviršiuje. Išsamus atskirų šilumos perdavimo būdų modeliavimo metodikos aprašymas pateiktas ankstesniuose darbuose [1, 2].

Atsižvelgiant į konteinerių išdėstymą saugykloje, modeliavimui pasirinktas pavienio konteinerio variantas, kadangi saugykla nebuvo visiškai užpildyta. Saulės spinduliavimui vertinti vasarą naudojamos TATENA (Tarptautinės atominės energijos agentūros) rekomendacijos [3]. Tokių rekomendacijų saulės spinduliavimui vertinti žiemą nėra, todėl modeliavimui pasirinkti konteineriai, esantys antroje saugyklos eilėje, kur jie nebuvo veikiami saulės spinduliavimo. Modeliuotų konteinerių vieta saugykloje ir jų identifikavimo numeriai parodyti 2 paveiksle.

Modeliuoti būdingi CASTOR konteineriai: Nr. 007 su didžiausiu liekamuoju šilumos išsiskyrimu Q (kuro rinklės išlaikytos trumpiausiai – vidutiniškai 7 metus ir 2 mėnesius) ir Nr. 020 su mažiausiu Q (kuro rinklės išlaikytos ilgiausiai – vidutiniškai 15 metų) ir kiti CASTOR Nr. 001, 005, 013 bei abu CONSTOR Nr. 010C ir 014C konteineriai, kurie nebuvo veikiami saulės spinduliavimo ir kuriems buvo atlikta daugiau matavimų pagal perimetrą. Modeliuojant gautas temperatūrų pasiskirstymas bet kuriame konteinerių įkrovos, korpuso ir paviršiaus taške.

3. MATAVIMŲ IR MODELIAVIMO REZULTATŲ Palyginimas

Konteinerių paviršiaus temperatūrų matavimai parodė, kad paviršiaus temperatūras ir žiemos sąlygomis veikia saulės spinduliavimas. Visų konteinerių, kurių bent vienas matavimo taškas

buvo prieš saulę (pirmoji konteinerių eilė 2 pav.), paviršiaus temperatūra buvo aukštesnė negu konteinerių, esančių šešėlyje (antroje eilėje) ir kurių saulės spinduliavimas neveikė. Temperatūros siekė $7-8^{\circ}\text{C}$ konteinerio viduryje (2,3–2,4 m aukštyje) ir $5-6^{\circ}\text{C}$ konteinerio apačioje (0,4–0,5 m aukštyje) praktiškai nepriklausomai nuo liekamojo šilumos išsiskyrimo. Tai lėmė ir vidutinės temperatūras pagal perimetrą, kurios pirmoje eilėje buvo aukštesnės už antroje eilėje esančių konteinerių.

Antroje eilėje esančio konteinerio Nr. 007 su didžiausiu liekamuoju šilumos išsiskyrimu, kurio saulės spinduliavimas neveikė, vidutinė išmatuota paviršiaus temperatūra viduryje (4°C) dėsningai buvo didesnė už konteinerio Nr. 020 su mažiausiu liekamuoju šilumos išsiskyrimu temperatūrą (1°C), nors apačioje abiejų konteinerių temperatūros buvo vienodos ($-1,5^{\circ}\text{C}$). CONSTOR konteinerių Nr. 010C ir 014C taip pat neveikė saulė, ir jų išmatuotos paviršiaus temperatūros buvo atitinkamai: viduryje – 1°C ir apačioje – $-2,5^{\circ}\text{C}$.

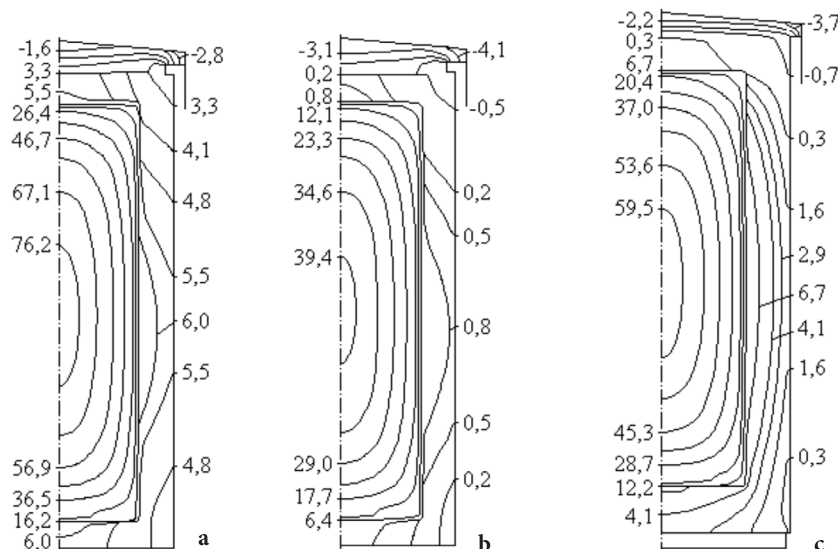
Saulės spinduliavimo įtaka išmatuotoms temperatūroms akivaizdi ir ant saugyklos betoninių sienų. Lygiagrečios saulės spinduliams betoninės sienos (I taškas 2 pav.) paviršiaus temperatūra buvo $-3--2^{\circ}\text{C}$, tuo tarpu betoninės sienos prieš saulę (II taškas 2 pav.) paviršiaus temperatūra siekė net $16-18^{\circ}\text{C}$. Tačiau sienų įtakos konteinerių temperatūroms praktiškai nebuvo, nes dauguma konteinerių buvo toli nuo saugyklos sienų, ir antroje eilėje esančių konteinerių temperatūros buvo vienodos iš abiejų konteinerių pusių.

Izotermų pasiskirstymas būdinguose CASTOR Nr. 007 ir 020 ir CONSTOR Nr. 010C konteineriuose (3 pav.) parodė, kad maksimalios temperatūros yra įkrovos centre ir mažėja visomis kryptimis link konteinerių išorės. Konteinerių šoninio paviršiaus didžiausios temperatūros pagal aukštį yra apie vidurį ir mažėja į abu galus. Mažiausios temperatūros yra konteinerių gaubto viršuje.

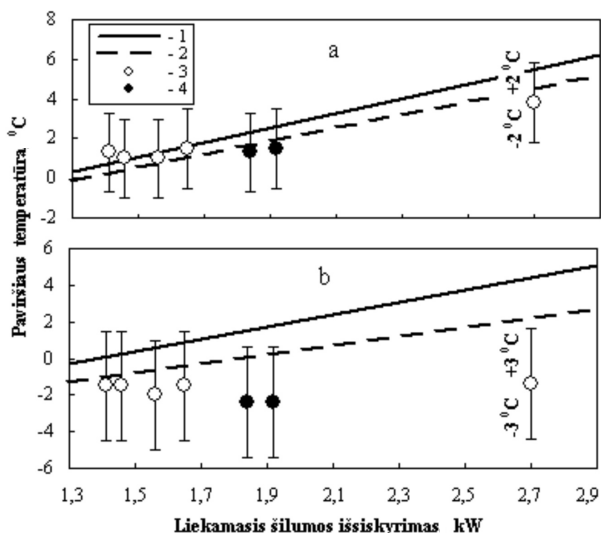
Būdingų CASTOR konteinerių modeliavimo realiomis sąlygomis rezultatai parodė, kad konteinerio su panaudotu branduoliniu kuru, išlaikytu ilgiau kaip 7 metus (Nr. 007, 3 pav., a), ir konteinerio su 15 metų išlaikytu kuru (Nr. 020, 3 pav., b) įkrovos temperatūros siekia atitinkamai 77 ir 40°C , šoninio paviršiaus viduryje – $5,5$ ir $0,7^{\circ}\text{C}$, šoninio paviršiaus apačioje – $4,5$ ir $0,1^{\circ}\text{C}$ ir gaubto – -2 ir $-3,5^{\circ}\text{C}$. Matyti, kad ilgėjant panaudoto branduolinio kuro išlaikymui (mažėjant liekamajam konteinerio įkrovos šilumos išsiskyrimui) labiausiai sumažėja įkrovos temperatūros ($\Delta t = 37^{\circ}\text{C}$), o paviršiaus temperatūros žiemos sąlygomis kinta nedaug ($\Delta t = 1,5-5^{\circ}\text{C}$). Dėl CONSTOR konteinerio blogesnio korpuso laidumo jame yra didesnės temperatūros gradientai negu CASTOR konteineriuose (3 pav., c). Tačiau visumoje temperatūrų pasiskirstymas CASTOR ir CONSTOR konteineriuose yra panašus.

Konteinerių paviršiaus temperatūrų kitimas didėjant liekamajam šilumos išsiskyrimui (trumpėjant kuro rinklių išlaikymo laikotarpiui) parodytas 4 paveiksle. CONSTOR konteinerių paviršiaus temperatūros dėl blogesnio gelžbetoninio korpuso laidumo yra $1-2^{\circ}\text{C}$ mažesnės negu metalinių CASTOR konteinerių. Be to, konteinerių apačioje paviršiaus temperatūros mažesnės nei ties konteinerių viduriu.

Lyginant suvidurkintas pagal perimetrą išmatuotas ir apskaičiuotas konteinerių paviršiaus temperatūras konteinerių viduryje (4 pav., a) matyti, kad apskaičiuotos temperatūros ge-



3 pav. Izotermų pasiskirstymas CASTOR Nr. 007 (a), CASTOR Nr. 020 (b) ir CONSTOR Nr. 010C (c) konteinerių viduje, korpuse ir ant paviršiaus



4 pav. Apskaičiuotų ir išmatuotų konteinerių paviršiaus temperatūrų 2,3–2,4 m (a) ir 0,4–0,5 m (b) aukštyje nuo konteinerio apačios palyginimas. 1, 2 – CASTOR ir CONSTOR konteinerių modeliavimas atitinkamai; 3, 4 – CASTOR ir CONSTOR konteinerių matavimai atitinkamai

rai sutampa su išmatuotomis temperatūros matuoklio tikslumo ribose ($\pm 2^\circ\text{C}$). Konteinerių apačioje (4 pav., b) išmatuotos paviršiaus temperatūros yra 2–5°C mažesnės už apskaičiuotas ir beveik nepriklauso nuo įkrovos liekamojo šilumos išsiskyrimo. Tai gali būti paaiškinta tuo, kad konteinerių paviršiaus temperatūros apačioje, be kita ko, gali būti veikiamos neigiamų grunto, ant kurio stovi konteineris, temperatūrų, o tai modeliuojant nebuvo vertinama.

Taigi, atlikus konteinerių su panaudotu branduoliniu kuru CASTOR RBMK-1500 ir CONSTOR RBMK-1500, saugomų Ignalinos AE tarpinėje saugykloje, šiluminį modeliavimą ir paviršiaus temperatūrų matavimus realiomis saugojimo sąlygomis, gauti artimi rezultatai. Gauti rezultatai šiame ir ankstesniuose darbuose parodė, kad programų paketas (skaičiavimo kodas) ALGOR ir naudojama metodika aplinkos įtakai įvertinti yra tinkami panaudoto branduolinio kuro saugojimo konteinerių šiluminiam modeliavimui.

4. IŠVADOS

Darbe pateiktas IAE tarpinėje panaudoto branduolinio kuro saugykloje patalpintų saugojimo konteinerių CASTOR RBMK-1500 ir CONSTOR RBMK-1500 paviršiaus temperatūrų matavimo ir temperatūrų pasiskirstymo modeliavimo su skaičiavimo kodu ALGOR (JAV) rezultatų palyginimas. Matavimai atlikti žiemos sąlygomis, kai vidutinė paros aplinkos temperatūra buvo -6°C . Gautos tokios išvados:

1. Ilgėjant panaudoto branduolinio kuro išlaikymui (mažėjant liekamajam konteinerio įkrovos šilumos išsiskyrimui) labiausiai sumažėja įkrovos temperatūros (didžiausias ištirtų konteinerių temperatūrų skirtumas Δt yra 37°C), o paviršiaus temperatūros žiemos sąlygomis kinta nedaug ($\Delta t = 1,5\text{--}5^\circ\text{C}$).
2. Saulės neveikiamų konteinerių išmatuotos paviršiaus temperatūros konteinerių viduryje (pagal aukštį) yra artimos modeliavimo rezultatams, o konteinerių apačioje išmatuotos paviršiaus temperatūros yra apie 2–5°C mažesnės už apskaičiuotas.
3. Modeliuojant ir matuojant patvirtinta, kad tomis pačiomis kuro saugojimo sąlygomis CONSTOR konteinerių paviršiaus temperatūros yra 1–2°C mažesnės negu CASTOR konteinerių.

Gauta 2007 06 16
Priimta 2008 02 05

Literatūra

1. Poškas P., Šimonis V., Makarevičius R. Panaudoto branduolinio kuro saugojimo konteinerių šiluminis įvertinimas // Energetika. 1999. Nr. 4. P. 20–25.
2. Poškas P., Šimonis V. Thermal analysis of cask for interim storage of RBMK-1500 spent nuclear fuel // Advances in Heat Transfer Engineering. Proceedings of the 4th Baltic Heat Transfer Conference. Eds.: B. Sunden, J. Vilemas. Kaunas. 2003. P. 629–636.
3. Regulations for the safe transport of radioactive material. 2005 Edition. IAEA Safety Standards Series. Safety Requirements No. TS-R-1. IAEA, Vienna, 2005.

Vytautas Šimonis, Povilas Poškas, Artūras Šmaižys

TEMPERATURE DISTRIBUTION ASSESSMENT FOR SPENT NUCLEAR FUEL CASKS AT THE IGNALINA NPP STORAGE FACILITY

Summary

A comparison of modelling results of temperature distribution and measured surface temperatures of the CASTOR RBMK-1500 and CONSTOR RBMK-1500 casks for RBMK-1500, spent nuclear fuel in the storage facility at the Ignalina Nuclear Power Plant is presented. The numerical calculation code ALGOR (USA) was used for modelling. The temperatures of cask surfaces were measured with a noncontacting portable Optex Thermo-Hunter measuring instrument in winter conditions at a daily average ambient temperature $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

The modelling of characteristic casks in real-life environment has shown that the temperatures of the cask with spent nuclear fuel stored over 7 years and the cask with fuel stored 15 years reach inside the casks 77 and $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, in the middle of the lateral surface 5.5 and $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, at the bottom of the lateral surface 4.5 and $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ and on the cover -2 and $-3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Thus, the largest decrease of temperatures ($\Delta t = 37\text{ }^{\circ}\text{C}$) takes place inside the casks with increasing the storage time of spent nuclear fuel (with decreasing the decay heat power of spent nuclear fuel), and on the surface the temperature of these casks differs by only $1.5\text{--}5\text{ }^{\circ}\text{C}$ in winter conditions. The modelling was performed only for the casks that are not influenced by solar radiation. In this case there is a good agreement between the modelled and measured cask surface temperatures, especially in the central part of the casks. At the bottom of the casks, the measured surface temperatures are $2\text{--}5\text{ }^{\circ}\text{C}$ lower than the modelled temperatures. Modelling and measurements have shown that for the same conditions the surface temperatures of the CONSTOR casks is $1\text{--}2\text{ }^{\circ}\text{C}$ lower than of the CASTOR casks.

Key words: RBMK-1500 spent nuclear fuel, “dry” type interim storage, container temperatures, modelling and measurements

Витаутас Шимонис, Повилас Пошкас, Артурас Шмайжис

ОЦЕНКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР ДЛЯ КОНТЕЙНЕРОВ ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА В ХРАНИЛИЩЕ ИГНАЛИНСКОЙ АЭС

Резюме

Сравниваются результаты моделирования распределения температур и измеренные температуры поверхностей контейнеров CASTOR RBMK-1500 и CONSTOR RBMK-1500, предназначенных для хранения отработанного ядерного топлива и находящихся в промежуточном хранилище на Игналинской АЭС. Моделирование выполнено с использованием расчетного кода ALGOR (США). Температура поверхностей контейнеров измерялась с помощью бесконтактного переносного измерителя Optex Thermo-Hunter в зимних условиях при среднесуточной температуре окружающей среды $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Моделирование характерных контейнеров в реальных условиях показало, что температуры контейнера с отработанным ядерным топливом, выдержанным свыше 7 лет, и контейнера со сроком выдержки топлива в 15 лет достигают соответственно: оболочки твэлов -77 и $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, на середине боковой поверхности $-5,5$ и $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, в нижней части боковой поверхности $-4,5$ и $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ и на крышке -2 и $-3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Таким образом, с увеличением срока выдержки отработанного ядерного топлива (с уменьшением остаточного тепловыделения отработанного ядерного топлива) более значительно понижаются температуры оболочки твэлов ($\Delta t = 37\text{ }^{\circ}\text{C}$), а температуры поверхности контейнеров в зимних условиях изменяются незначительно ($\Delta t = 1,5\text{--}5\text{ }^{\circ}\text{C}$). Измеренные температуры поверхности контейнеров, не подверженных воздействию Солнца, на середине контейнера (по высоте) близки к результатам моделирования, а внизу контейнеров измеренные температуры поверхности на $2\text{--}5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже рассчитанных. Моделирование и измерения показали, что при одинаковых условиях температуры поверхности контейнеров CONSTOR на $1\text{--}2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже, чем температуры контейнеров CASTOR.

Ключевые слова: RBMK-1500 отработанное ядерное топливо, хранилище „сухого“ типа, температуры контейнера, моделирование и измерения