

Naujų panaudoto branduolinio kuro saugojimo konteinerių naujojoje Ignalinos AE saugykloje šiluminis įvertinimas

Vytautas Šimonis,

Artūras Šmaižys,

Povilas Poškas

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

Pateiktas naujojoje Ignalinos AE panaudoto branduolinio kuro tarpinio saugojimo saugykloje numatomų naudoti saugojimo konteinerių CONSTOR® RBMK-1500/M2 šiluminis įvertinimas. Skaitinis modeliavimas atliktas naudojant JAV sukurtą programų paketą (kodą) ALGOR pavieniame konteineryje ir konteineryje, esančiame saugykloje, su ką tik pakrautu panaudotu branduoliniu kuru, prieš tai laikytu vandens baseinuose 7(5) metus, ir po 50 metų saugojimo saugykloje. Konservatyviai priėmus ribinius žiedinio krepšio su kuro pluoštais efektyvius laidumus, sutampančius su krepšio iš aliuminio lydinio laidumu (pirmasis atvejis) arba su vidinio krepšio įkrovos efektyviu laidumu (antrasis atvejis), nustatytas temperatūrų pasiskirstymas ir ribinės konteinerių temperatūros.

Skaičiavimai parodė, kad pavienio konteinerio su ką tik pakrautu panaudotu branduoliniu kuru, prieš tai laikytu baseinuose 7(5) metus, maksimalios įkrovos (ŠIELų paviršiaus) ir konteinerio išorinio šoninio paviršiaus temperatūros pirmuoju atveju siekia 238 ir 56 °C, o antruoju atveju – 302 ir 58 °C. Konteinerio, esančio saugykloje, atitinkamos temperatūros pirmuoju atveju siekia 257 ir 87 °C, o antruoju atveju – 318 ir 90 °C. Po 50 metų saugojimo saugykloje konteinerių su panaudotu branduoliniu kuru maksimalios įkrovos temperatūros sumažėja 120–140°, o šoninio paviršiaus – apie 30°. Tikrasis žiedinio krepšio efektyvus laidumas yra tarp pirmojo ir antrojo atvejų laidumų, todėl po 7(5) metų kuro laikymo baseinuose maksimalios ŠIELų paviršiaus temperatūros bus ne didesnės už maksimalią leistiną 300 °C temperatūrą, o pavienio konteinerio išorinio paviršiaus temperatūros – už transportuojamiems konteineriams leistiną 85 °C temperatūrą.

Raktažodžiai: RBMK-1500 panaudotas branduolinis kuras, konteineris, saugykla, šilumą išskiriantis elementas, temperatūra, liekamasis šilumos srautas

ĮVADAS

Ignalinos atominėje elektrinėje panaudoto branduolinio kuro tarpiniam saugojimui pasirinktas vadinamasis „sausas“ saugojimo būdas. Šiuo atveju panaudotas kuras po tam tikro privalomo laikymo vandens baseinuose (ne trumpiau kaip 5 metai) yra sudedamas į GNS (Vokietija) gamybos metalinius CASTOR® RBMK-1500 arba gelžbetoninius CONSTOR® RBMK-1500 konteinerius ir atviroje arba dengtoje aikštelėje (saugykloje) gali būti laikomas dar apie 50 metų. Šiuo metu prie IAE įrengtoje ir kelis kartus modifikuotoje tarpinėje panaudoto branduolinio kuro saugykloje yra saugoma 120 CASTOR ir CONSTOR tipo konteinerių, kuriuose patalpinta per 6 000 PBK rinklių. Saugykla jau yra užpildyta.

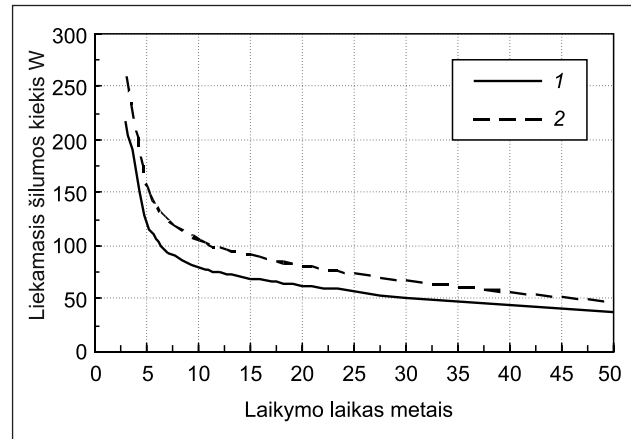
Visiškai uždarius atominę elektrinę, susidarys dar iki 18 000 PBK rinklių, kurias reikia atitinkamai patalpinti į konteinerius ir saugoti. Šiuo metu baigiama statyti nauja tarpinė panaudoto RBMK branduolinio kuro rinklių iš 1-ojo ir 2-ojo Ignalinos AE energetinių blokų saugykla, kurioje numatoma patalpinti iki 200 naujos konstrukcijos daug talpesnių GNS gamybos CONSTOR® RBMK-1500/M2 tipo konteinerių su visu likusiu PBK.

Šiluminiu požiūriu pagrindiniu parametru, lemiančiu pasirinktų konteinerių panaudojimą, yra maksimali leistina ŠIELų paviršiaus temperatūra saugojimo metu ir konteinerių išorinio paviršiaus leistina temperatūra jų transportavimo metu. Projektuojančių organizacijų yra nustatyta, kad RBMK-1500 reaktorių panaudoto branduolinio kuro, laikyto vandens

baseinuose ne trumpiau kaip 5 metus, maksimalios ŠIELų paviršiaus temperatūros turi būti ne didesnės nei 300 °C [1], nors kiti šaltiniai panašiam kurui nurodo ir aukštesnes leistinas temperatūras – 350 °C [2] ir net iki 380 °C [3]. Konteinerių išorinio paviršiaus leistina temperatūra transportavimo metu pagal TATENA reikalavimus [4] turi būti ne didesnė nei 85 °C.

Konteinerių šiluminį režimą sąlygoja patalpinto PBK liekamasis šilumos išsiskyrimas ir, aišku, konteinerio konstrukcija bei saugojimo sąlygos. Ignalinos AE buvo naudojamas įvairaus įsodrinimo – nuo 2 iki 2,8 % su erbio sugėrikliu ir be jo – branduolinis kuras. LEI mokslininkų skaičiavimai [5] parodė, kad labiausiai šilumos išsiskyrimas keičiasi pirmuosius 7 metus, kol kuras laikomas vandens baseinuose (1 pav.), vėliau tas kitimas stabilizuojasi ir monotoniškai mažėja per visą saugojimo laikotarpį. 1 pav. parodytas minimalaus (2 %) ir maksimalaus (2,8 % su erbio sugėrikliu) įsodrinimo vienos PBK rinklės liekamojo šilumos išsiskyrimo kitimas per 50 metų. IAE naudoto kitokio įsodrinimo branduolinio kuro liekamasis šilumos išsiskyrimas patenka tarp šių ribinių kreivių.

Norint saugoti panaudotą branduolinį kurą tokį ilgą laikotarpį, reikia gerai suprasti įvairius procesus, vykstančius pačiame konteineryje ir jam sąveikaujant su aplinka, bei užtikrinti daugelį reikalavimų tiek kuro pluoštams, tiek konteineriui, tiek saugyklai, kurioje konteineriai laikomi. Ankstesniuose darbuose [6, 7] buvo pateikti CASTOR® RBMK-1500 ir CONSTOR® RBMK-1500 konteinerių šiluminio modeliavimo naudojant skaičiavimo kodą ALGOR (JAV) rezultatai. Nustatyta, kad šiluminiu požiūriu šie konteineriai visiškai tinka panaudoto branduolinio kuro, laikyto vandens baseinuose ne trumpiau kaip 5 metus, ilgalaikiam saugojimui. Metodiškai



1 pav. Liekamojo šilumos išsiskyrimo priklausomumas nuo PBK rinklės laikymo, esant 2 % (1) ir 2,8 % su erbio sugėrikliu (2) kuro įsodrinimui [5]

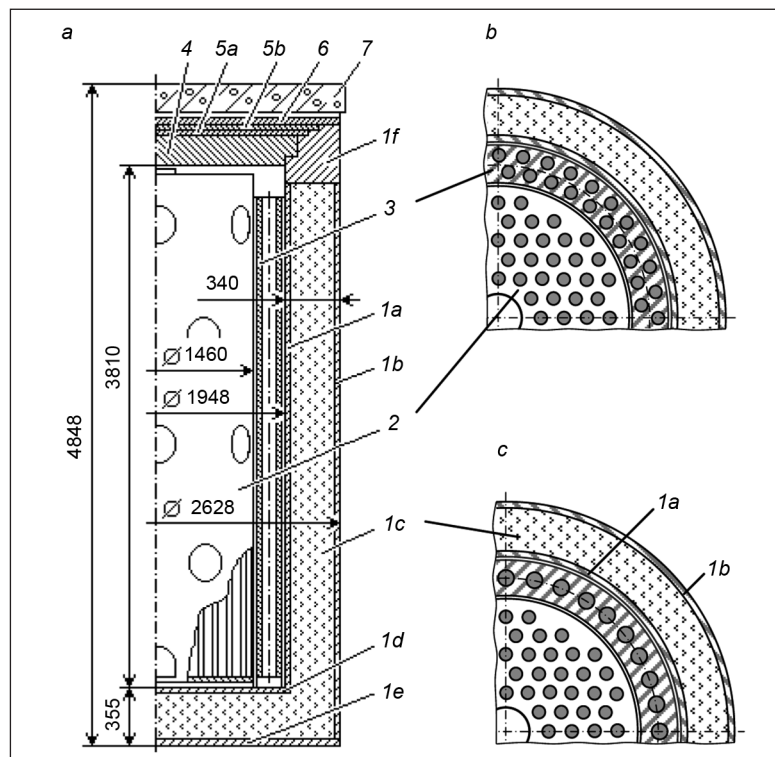
panašūs tyrimai buvo atlikti [8] darbe taikant skaičiavimo kodą FLUENT (JAV) konteinerių su panaudotu branduoliniu kuru iš suslėgto vandens reaktorių (PWR) analizei.

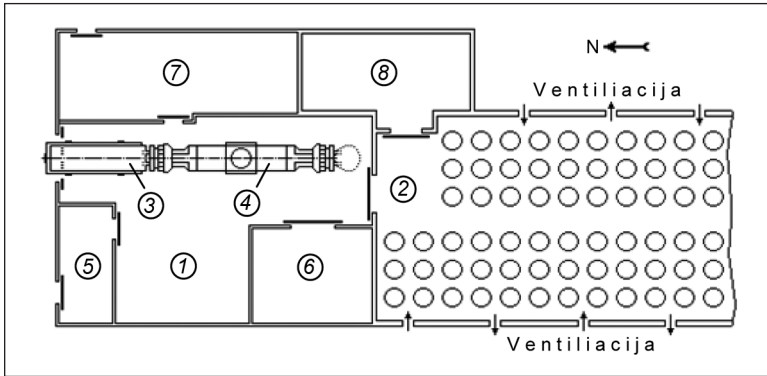
Šiame darbe pateikiamas naujo tipo gelžbetoninių konteinerių CONSTOR® RBMK-1500/M2 panaudotam branduoliniam kurui saugoti naujojoje Ignalinos AE panaudoto branduolinio kuro tarpinio saugojimo saugykloje šiluminis įvertinimas normaliomis eksploataavimo sąlygomis.

METODINIAI KLAUSIMAI

Gelžbetoninio konteinerio CONSTOR® RBMK-1500/M2 (2 pav.) korpuso šoną sudaro du skirtingų gabaritų plieniniai cilindrai: vidinis (1a) ir išorinis (1b), kurių sienelės storis yra

2 pav. Principinės naujo tipo konteinerio (a) ir žiedinio krepšio (b, c) schemos: 1a, 1b – korpuso vidinis ir išorinis cilindrai; 1c – korpuso užpildas; 1d, 1e – korpuso dugno plokštės; 1f – žiedas; 2 – vidinis krepšys; 3 – žiedinis krepšys; 4 – dangtis; 5a, 5b – sandarinimo plokštės; 6 – apsauginė plokštė; 7 – apsauginis gaubtas





3 pav. Principinė saugyklos schema: 1 – konteinerių priėmimo salė, 2 – konteinerių saugojimo salė, 3 – atvežtas konteineris, 4 – verstuvai (tuščiam konteineriui), 5 – iškonservavimo patalpa, 6 – konteinerių paruošimo patalpa, 7 – aptarnavimo patalpos, 8 – „karštoji kamera“

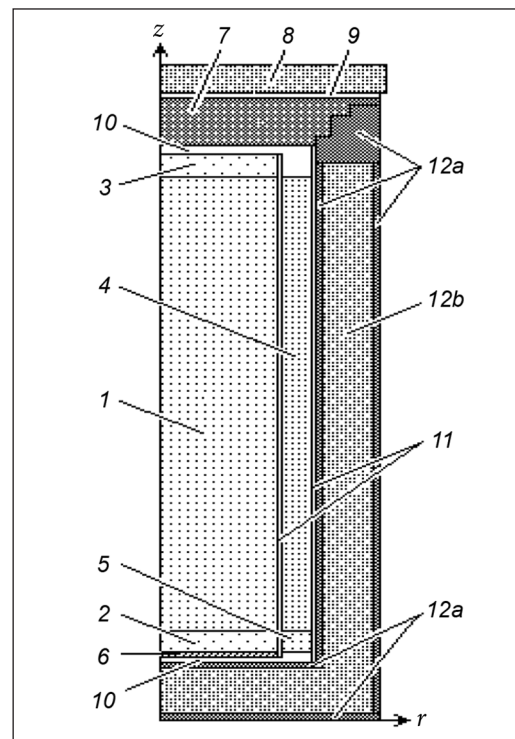
0,04 m. Tarpcilindrinė erdvė yra užpildyta ekranuojančia medžiaga – sunkiuoju betonu CONSTORIT^u (1c). Analogiškai sudarytas korpuso dugnas – erdvė tarp dviejų plokščių 1d ir 1e užpildoma sunkiuoju betonu. Bendras konteinerio sienos storis yra 0,34 m. Konteinerio viršų formuoja masyvus metalinis žiedas 1f, kuris privirintas prie cilindrų galų. Žiede tvirtinami metalinis konteinerio dangtis 4, dvi metalinės sandarinimo plokštės 5a ir 5b ir metalinė apsauginė plokštė 6. Stacionariai laikomą konteinerį saugykloje iš viršaus gaubia gelžbetoninis apsauginis gaubtas 7.

Į konteinerio vidų talpinami du krepšiai su PBK: vidinis 32M tipo krepšys 2, naudotas ir ankstesniuose konteineriuose, ir papildomas, tik šiame konteineryje naudojamas, žiedinis krepšys 3 (2 pav.). Vidinis krepšys – tai specialus nerūdijančio plieno cilindrinis krepšys su dugnu ir 102 vamzdžiais, į kuriuos dedami 102 panaudoto branduolinio kuro pluoštai (t. y. 51 pusiau perpjauta PBK rinklė). Žiedinis krepšys – tai specialaus aliuminio lydinio karkasas, atsižvelgus į konfiguraciją su 80 arba 40 kiaurymių (2 pav., b, c), į kurias dedami PBK pluoštai arba nerūdijančio plieno penalai su pažeistais kuro pluoštais ar kuro liekanomis. Taigi maksimaliai į tokį konteinerį galima pakrauti $102 + 80 = 182$ PBK pluoštus (ankstesniuose konteineriuose buvo kraunama tik po 102 PBK pluoštus). Konteinerio gabaritai yra: skersmuo – $\varnothing 2,63$ m, aukštis – 4,85 m, pakrauto konteinerio masė – apie 116 t.

Visos konteinerio pakrovimo operacijos atliekamos vandenyje. Pakrovus abu krepšius, konteineris sandariai uždaromas dangčiu ir, išsiurbus vandenį, išdžiovinus bei vakuumavus, užpildomas heliu. Po to konteineris uždengiamas apsaugine plokšte ir išvežamas į saugyklą. Čia konteineris galutinai paruošiamas saugojimui (užvirinamos sandarinimo plokštės), konteineris uždengiamas gelžbetoniniu apsauginiu gaubtu ir pastatomas saugyklos saugojimo salėje.

Principinė baigiamos statyti naujos IAE PBK saugyklos schema parodyta 3 pav. Tai karkasinis dengtas statinys su sienomis, stogu ir labai tvirtu pagrindu. Iš esmės saugyklą sudaro dvi salės: konteinerių priėmimo salė 1 ir 200 konteinerių saugojimo salė 2. Siekiant palaikyti reikiamą šiluminį režimą, saugojimo salė yra natūraliai ventiliuojama. Saugykloje taip pat numatyta vadinamoji „karštoji kamera“ 8, kurioje saugojimo laikotarpiu, reikalui esant, PBK bus perkraunamas į kitą konteinerį.

Konteinerių šiluminei analizei, kaip ir ankstesniuose darbuose [6, 7], buvo panaudotas JAV sukurtas programų paketas (kodas ALGOR [9]). Tai pakankamai universali programa, leidžianti atlikti dvimatį ir trimatį šiluminį modeliavimą. Šiame darbe nagrinėjamas stacionarus dvimatis simetrinis konteinerio modelis cilindrinėje r - z koordinatėse (4 pav.). Skaičiavimo modelyje visi konteinerio elementai modeliuojami atskiromis zonomis. Pagal aukštį VK (krepšys be dugno su PBK pluoštais) modeliuojamas trimis homogeninėmis zonomis: 1 – pagrindinė aktyvioji, šilumą išskirianti įkrovos zona 1 bei 2, 3 – apatinė (2) ir viršutinė (3) neaktyvios įkrovos zonos, kurias sudaro kuro rinklių galai.



4 pav. Konteinerio šiluminio modeliavimo konceptualus modelis: 1 – VK aktyvioji įkrovos zona; 2, 3 – VK apatinė ir viršutinė neaktyvios įkrovos zonos; 4 – ŽK aktyvioji įkrovos zona; 5 – ŽK apatinė neaktyvi įkrovos zona; 6 – krepšio dugnas; 7 – dangčių sistema; 8 – apsauginis gaubtas; 9 – oro plyšys; 10 – horizontalūs helio plyšiai; 11 – vertikalūs helio plyšiai; 12a – metalinės korpuso dalys; 12b – korpuso užpildas

Krepšio dugnas yra apie 0,05 m storio ir sudaro atskirą zoną 6. ŽK su PBK pluoštais modeliuojamas dviem homogeninėmis zonomis: 1 – pagrindinė aktyvioji, šilumą išskirianti įkrovos zona 4 ir 2 – apatinė neaktyvi įkrovos zona 5 su kuro rinklių galais.

Konteinerio korpuso metalinės dalys modeliuojamos viena zona 12a, o sunkiojo betono užpildas – kita zona 12b. Konteinerio dangtis, sandarinimo ir apsauginė plokštės modeliuojami viena zona 7, o gelžbetoninis apsauginis gaubtas – kita zona 8. Horizontalūs helio plyšiai 10, vertikalūs helio plyšiai 11 ir oro plyšys 9 taip pat modeliuojami atskiromis homogeninėmis zonomis.

Faktiškai per vidinio ir žiedinio krepšių įkrovas bei 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 įkrovas buvo vertinamas, panaudojant efektingus kiekvienos įkrovos homogeninės zonos šilumos laidumo koeficientus, o per kitas zonas – panaudojant realius atitinkamų zonų šilumos laidumo koeficientus. Vidinio krepšio įkrovos efektingi laidumo koeficientai yra nustatyti branduolinių reaktorių projektavimo organizacijose modelinių eksperimentų metu. Tačiau žiedinio krepšio įkrovos efektingi laidumo koeficientai nėra žinomi, todėl skaičiuojant konservatyviai buvo analizuoti du ribiniai žiedinio krepšio efektingo laidumo atvejai: 1 – laidumas – kaip krepšio karkaso medžiagos, t. y. aliuminio lydinio; 2 – laidumas – kaip vidinio krepšio įkrovos efektingis laidumas. Tikrasis žiedinio krepšio įkrovos efektingis laidumas turėtų būti tarp šių dviejų ribinių atvejų.

Šilumos perdavimas per helio plyšius buvo vertinamas tik laidumu. Tačiau, siekiant įvertinti šilumos perdavimą ir kitais būdais, vertikalųjų helio plyšių šilumos laidumo koeficientai, remiantis [10] darbo rekomendacijomis, buvo padvigubinti.

Šilumos kiekis perduodamas natūraliąja konvekcija nuo konteinerio vertikalaus šoninio ir apsauginio gaubto horizontalaus viršutinio paviršiaus (konteinerio dugnas priimtas adiabatiniu) nustatomas iš lygties:

$$q_{konv} = \alpha_{konv} (T_{kont} - T_a). \quad (1)$$

Šilumos atdavimo koeficientas dėl natūraliosios konvekcijos nuo vertikalaus šoninio konteinerio paviršiaus randamas iš kriterinės lygties [11]:

$$Nu = 0,13 Ra^{1/3}, \text{ kai } Ra > 4 \cdot 10^{10}, Pr > 0,5. \quad (2)$$

Lemiantysis geometrinis dydis panašumo kriterijuose Nu ir Ra yra konteinerio aukštis.

Šilumos atdavimo koeficientas dėl natūraliosios konvekcijos nuo konteinerio apsauginio gaubto horizontalaus viršutinio paviršiaus randamas iš kriterinės lygties [11]:

$$Nu = 0,15 Ra^{1/3}, \text{ kai } Ra > 8 \cdot 10^6, Pr > 0,5. \quad (3)$$

Lemiantysis geometrinis dydis šiuo atveju yra pusė konteinerio spindulio. Taip nustatyti šilumos atdavimo koeficientai patikslinti iteraciniais skaičiavimais pagal realias paviršių temperatūras.

Šilumos kiekis, perduodamas spinduliavimu nuo konteinerio paviršiaus aplinkai, nustatomas iš lygties

$$q_{rad} = \sigma \varepsilon (T_{kont}^4 - T_a^4); \quad (4)$$

čia $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W / (m}^2 \cdot \text{K}^4)$ – spinduliavimo konstanta; ε – specialiai padengto konteinerio paviršiaus juodumo laipsnis $\varepsilon = 0,93$.

Saulės spinduliavimo įtakos konteineriams naujojoje saugykloje vertinti nereikia, nes konteineriai saugomi uždaroje saugykloje ir tiesioginės Saulės įtakos šiuo atveju nepatiria.

Skaičiuojant priimama: vidinio ir žiedinio krepšių įkrovų liekamieji šilumos išsiskyrimai, visų konteinerių sudarančių medžiagų šilumos laidumo (arba efektingo laidumo) koeficientai pagal konteinerio spindulį ir aukštį dėl temperatūros, aplinkos temperatūra, šilumos atdavimo nuo konteinerio paviršių natūraliąja konvekcija koeficientai bei konteinerio išorinio spinduliavimo paviršiaus juodumo laipsnis.

Skaičiavimo kode ALGOR visų konteinerio elementų fizikinės savybės ir ribinės sąlygos nurodomos specialiose elektroninėse lentelėse. Toliau, baiginių elementų metodu sprendžiant diferencialines šilumos laidumo lygtis, atlikus skaičiavimus gaunami temperatūrų bei šilumos srautų pasiskirstymai konteinerio įkrovose ir korpusė.

Yra numatytos įvairios PBK patalpinimo konteinerio vidiniame ir išoriniame krepšiuose schemas. Tačiau realiai į vidinį krepšį bus dedamas tik 2 % įsodrinimo PBK, kurio yra daugiausia [12] ir kuris šiuo metu vandens baseinuose laikomas 7–10 metų ir ilgiau. Į žiedinį krepšį bus talpinamas likęs įvairių įsodrinimų (tarp jų ir maksimalaus – 2,8 %) kuras, baseinuose laikomas trumpiau. Todėl skaičiavimai atlikti realiai situacijai, t. y. vidiniame krepšyje yra 2 % įsodrinimo PBK, prieš tai vandens baseinuose laikytas 7 metus, o žiediniame krepšyje yra maksimalaus – 2,8 % įsodrinimo PBK, prieš tai vandens baseinuose laikytas 5 metus (toliau sąlyginai žymima 7(5)).

SKAIČIAVIMO REZULTATAI

Skaičiavimai atlikti panaudotu branduoliniu kuru maksimaliai pakrautų pavienio konteinerio ir konteinerio, esančio saugykloje tarp kitų konteinerių, sąlygomis, konservatyviai priėmus du ribinius žiedinio krepšio įkrovos efektingų laidumų atvejus: 1 – laidumas – kaip krepšio karkaso medžiagos – aliuminio lydinio (t. y. maksimalus galimas laidumas); 2 – laidumas – kaip vidinio krepšio įkrovos efektingis laidumas (t. y. minimalus laidumas).

Kaip minėta, į ką tik pakrauto konteinerio vidinį krepšį dedamas ne trumpiau kaip 7 metus, o į žiedinį krepšį –

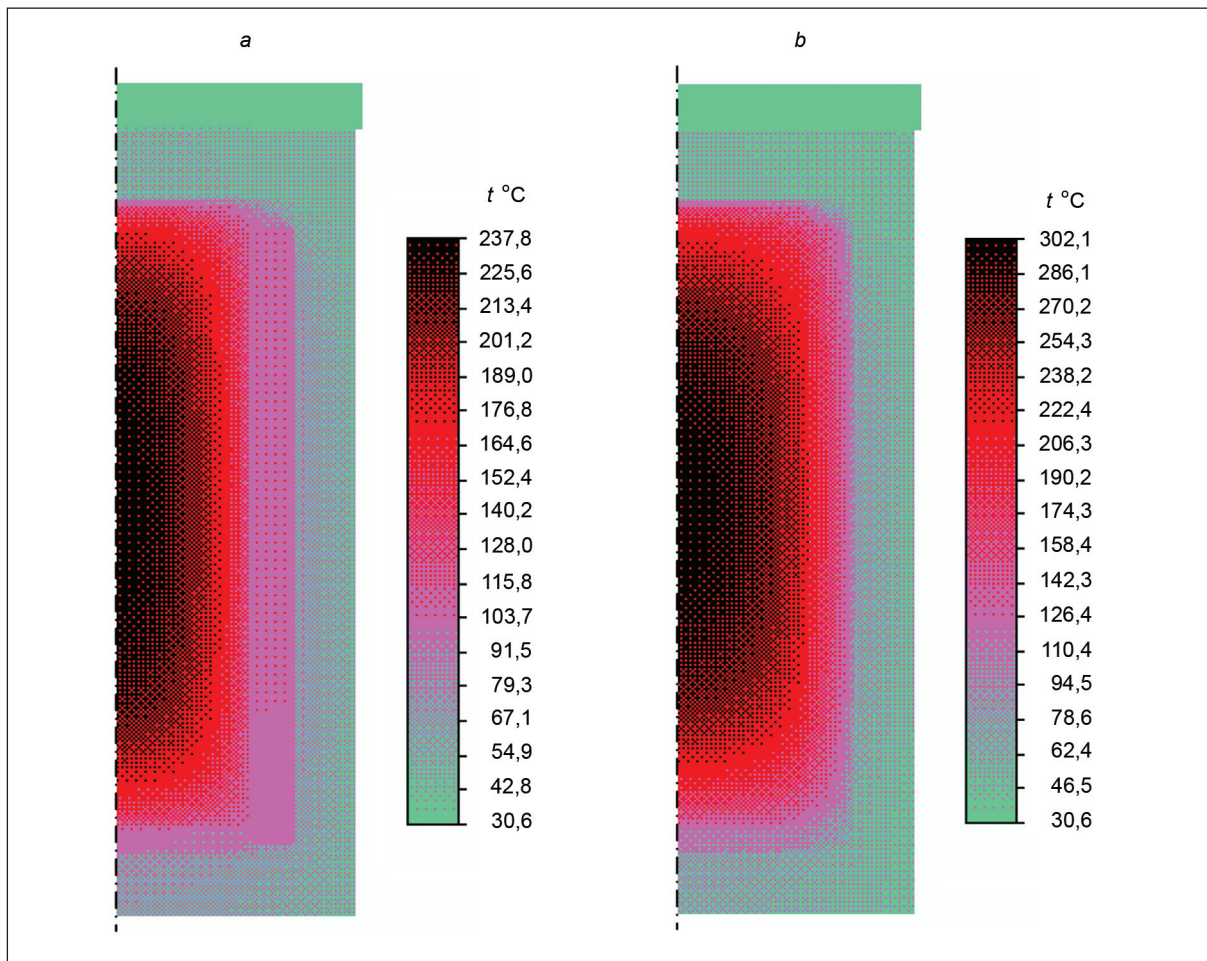
ne trumpiau kaip 5 metus vandens baseinuose laikytas panaudotas branduolinis kuras. Tokių 102 kuro pluoštų, patalpintų vidiniame krepšyje, liekamasis šilumos išsiskyrimas – $Q_v = 4,77$ kW, o 80 kuro pluoštų, patalpintų žiediniame krepšyje – $Q_z = 6,21$ kW ir suminis liekamasis šilumos išsiskyrimas – $Q = 10,98$ kW. Aplinkos temperatūra pavienio konteinerio atveju priimta $t_a = 30$ °C, kuri atitinka vidutinę daugiametę karščiausio metų laiko temperatūrą Ignalinos regione. Aplinkos temperatūra konteinerio, esančio saugykloje, atveju priimta $t_a = 35$ °C, kuri yra 5° didesnė dėl gretimų konteinerių įtakos.

5 pav. parodytas skaičiavimais gautas temperatūrų pasiskirstymas paviniame kūr tik pakrautame konteinerielyje pirmuoju (a) ir antruoju (b) ribiniais atvejais. Kaip matyti, maksimali temperatūra yra vidinio krepšio įkrovos centre ir siekia 238 °C pirmuoju atveju (a) ir 302 °C antruoju atveju (b). Laikoma, kad ši temperatūra atitinka centrinio įkrovos pluošto ŠIELŲ paviršiaus temperatūras. Tolstant nuo centro tiek ašine, tiek radialine kryptimis temperatūros mažėja, tik radialine kryptimi temperatūros gradientai yra didesni. Žiedinio krepšio zonoje maksimalios temperatūros 107 °C (a) ir 207 °C (b) yra monotoniškai mažėjančios. Be to, konteinerių apsauginio gaubto maksimalios temperatūros (~32 °C)

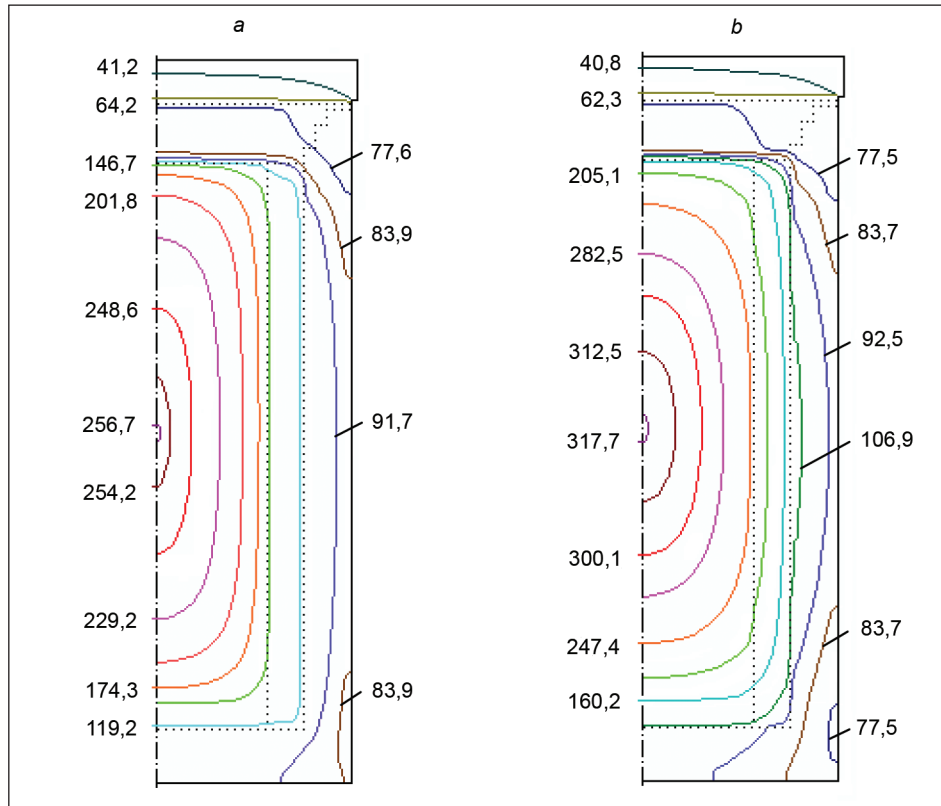
yra ženkliai mažesnės už konteinerių dugno maksimalias temperatūras (~69 °C). Taip yra todėl, kad modeliuojant dugne buvo priimtos adiabatinės sąlygos, nors realiai tarp konteinerio dugno ir betoninio pagrindo bus apie 2 cm oro tarpas, ir dėl natūralios konvekcijos dugno temperatūros bus mažesnės.

5 pav. taip pat matyti, kad antruoju atveju maksimali vidinio krepšio įkrovos temperatūra yra apie 60° didesnė negu pirmuoju atveju ir siekia maksimalią leistiną – 300 °C. Konteinerių šoninio paviršiaus maksimalios temperatūros (56–58 °C) yra mažesnės už maksimalią leistiną (85 °C) temperatūrą, nustatytą pagal konteinerių transportavimo reikalavimus.

Izotermų pasiskirstymas konteinerielyje, esančiame saugykloje, rodo, kad visos temperatūros gautos didesnės negu paviniame konteinerielyje (6 pav.). Įkrovos maksimalios temperatūros padidėja iki 20°, šoninio paviršiaus ir dugno – apie 30°, o apsauginio gaubto – apie 7°. Taip maksimali įkrovos temperatūra siekia 257 °C pirmuoju atveju (a) ir 318 °C antruoju atveju (b). Žiedinio krepšio zonoje maksimalios temperatūros yra 136 °C (a) ir 227 °C (b). Šoninio paviršiaus temperatūros siekia 90 °C, dugno – 99 °C ir apsauginio gaubto – 39 °C.



5 pav. Temperatūrų pasiskirstymas paviniame konteinerielyje pirmuoju (a) ir antruoju (b) skaičiavimo atvejais

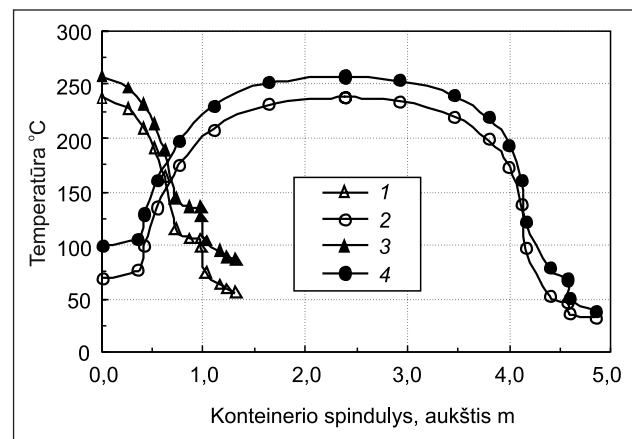


6 pav. Izotermų pasiskirstymas konteineryje, esančiame saugykloje, pirmuoju (a) ir antruoju (b) skaičiavimo atvejais

Palyginus 5 ir 6 pav. matyti, kad tiek paviniame konteineryje, tiek konteineryje, esančiame saugykloje, pirmuoju atveju, kai žiedinio krepšio įkrovos efektingas laidumas priimamas toks kaip krepšio karkaso iš aliuminio lydinio, maksimalios įkrovos temperatūros yra ne didesnės už maksimaliai leistiną – 300 °C. Antruoju atveju, kai žiedinio krepšio įkrovos efektingas laidumas priimamas toks, kaip vidinio krepšio įkrovos, maksimalios įkrovos temperatūros yra šiek tiek didesnės už maksimalią leistiną temperatūrą. Tačiau realiai žiedinio krepšio su aliuminio lydinio karkasu efektingas laidumas bus tarp konservatyviai priimtų ribinių aliuminio lydinio (pirmasis atvejis) ir vidinio krepšio įkrovos (antrasis atvejis) laidumų. Todėl maksimali leistina 300 °C temperatūra nebus viršyta.

7 pav. pavaizduotas temperatūrų kitimas pavienio konteinerio ir konteinerio, esančio saugykloje, būdingose vietose radialine ir ašine kryptimis pirmuoju skaičiavimo atveju, kai dar aiškiau išryškinti anksčiau minėti dėsniniai ypatumai. Tai yra: konteinerio, esančio saugykloje, visos temperatūros yra aukštesnės negu pavienio konteinerio; nuo karščiausios vietos konteinerio centre link išorės radialine ir ašine kryptimis visos temperatūros mažėja; konteinerių dugne yra aukštesnės temperatūros negu apsauginio gaubto paviršiuje; radialine kryptimi temperatūros gradientai yra didesni negu ašine kryptimi. Akivaizdūs staigūs temperatūros kritimai ties ~1 m spinduliu radialine kryptimi, ties ~0,4, ~4,1 ir ~4,6 m ašine kryptimi yra susiję su šilumos perdavimu per helio ir oro plyšius.

Skaičiavimai taip pat atlikti konteineriams su PBK po 50 metų saugojimo saugykloje. Tai yra aktualu, nes po 50 metų tarpinio saugojimo konteineriai bus transportuojami į galutinio saugojimo – laidojimo vietas, todėl šiluminės charakteristikos reikia žinoti. Šiuo atveju 102 kuro pluoštų, patalpintų vidiniame krepšyje, liekamasis šilumos išsiskyrimas – $Q_v = 1,85$ kW, o 80 kuro pluoštų, patalpintų žiediniame krepšyje – $Q_z = 1,87$ kW ir suminis liekamasis šilumos išsiskyrimas $Q = 3,72$ kW. Skaičiavimai atlikti abiem anksčiau minėtais atvejais.



7 pav. Temperatūrų kitimas paviniame konteineryje (1, 2) ir konteineryje, esančiame saugykloje, (3, 4) radialine (1, 3) ir ašine (2, 4) kryptimis pirmuoju skaičiavimo atveju

Lentelė. Būdingos ribinės konteinerių temperatūros

Skaičiavimo atvejis, trumpa charakteristika	Temperatūros po 5(7) ir 50 metų PBK laikymo °C								
	Įkrova (ŠIELų paviršius) VK / ŽK		Išorinis šoninis paviršius		Viršutinis gaubto paviršius		Apatinis dugno paviršius		
	7(5) m.	50 m.	7(5) m.	50 m.	7(5) m.	50 m.	7(5) m.	50 m.	
Pavienis konteineris, ką tik pakrautas: $Q_v = 4,77$ kW (PBK po 7 metų laikymo), $Q_z = 6,21$ kW (PBK po 5 metų laikymo).	I	237,8 / 107,2	126,3 / 58,1	56,1	40,2	32,2	30,9	69,1	45,2
Pavienis konteineris po 50 metų saugojimo: $Q_v = 1,85$ kW, $Q_z = 1,87$ kW. $t_a = t_{konv} = t_{rad} = 30$ °C	II	302,2 / 206,8	159,4 / 104,9	57,9	40,7	32,3	31,0	68,3	45,6
Konteineris saugykloje, ką tik pakrautas: $Q_v = 4,77$ kW (PBK po 7 metų laikymo), $Q_z = 6,21$ kW (PBK po 5 metų laikymo).	I	256,7 / 135,6	139,2 / 74,6	87,2	57,4	39,2	36,9	98,8	62,1
Konteineris saugykloje po 50 metų saugojimo: $Q_v = 1,85$ kW, $Q_z = 1,87$ kW. $t_a = t_{konv} = t_{rad} = 35$ °C	II	317,7 / 227,4	170,9 / 118,8	89,8	58,2	39,1	36,9	95,4	61,7

Visų skaičiavimų rezultatai pateikti lentelėje. Čia pateiktos būdingos ribinės temperatūros karščiausios įkrovos vietos (ŠIELų paviršiaus) vidiniame ir žiediniame krepšiuose, išorinio šoninio paviršiaus, apsauginio gaubto viršutinio paviršiaus ir dugno apatinio paviršiaus temperatūros. Kaip matyti, po 50 metų saugojimo konteinerio saugykloje maksimalios įkrovos temperatūros siekia 140 °C (pirmuoju atveju) ir 171 °C (antruoju atveju), šoninio paviršiaus ir dugno – 57–62 °C, viršutinio gaubto – 37 °C. Lyginant konteinerius su ką tik pakrautu PBK, laikytu vandens baseinuose 7(5) metus, ir po 50 metų saugojimo saugykloje, akivaizdu, kad po 50 metų visos temperatūros yra ženkliai mažesnės: maksimalios vidinio krepšio įkrovos temperatūros sumažėja 110–140°, žiedinio krepšio įkrovos – 50–110°, šoninio paviršiaus – 15–30°, dugno – 20–30° ir apsauginio gaubto – apie 2°. Po 50 metų konteinerių saugojimo visais atvejais maksimalios įkrovos temperatūros yra ženkliai mažesnės už maksimalią leistiną 300 °C temperatūrą, o išorinio paviršiaus temperatūros ne didesnės už transportuojamiems konteineriams leistiną 85 °C temperatūrą.

Taigi, atlikus naujo tipo konteinerių CONSTOR® RBMK-1500/M2 su panaudotu branduoliniu kuru, numatomu saugoti baigiamoje statyti naujojoje Ignalinos AE tarpinėje saugykloje, šiluminį modeliavimą ir temperatūrų įvertinimą, galima teigti, kad naujieji konteineriai pagal šiandieninę realią PBK laikymo vandens baseinuose situaciją tinka ilgalaikiam PBK saugojimui.

IŠVADOS

1. Panaudojus JAV sukurtą skaičiavimo kodą ALGOR, atliktas naujo tipo gelžbetoninių konteinerių CONSTOR® RBMK-1500/M2 panaudotam branduoliniui kuru saugoti naujojoje Ignalinos AE saugykloje šiluminis įvertinimas. Skaičiavimai atlikti: pavienio konteinerio ir konteinerio, esančio saugykloje, su ką tik pakrautu panaudotu branduoliniu kuru, prieš tai laikytu vandens baseinuose 7(5) metus, ir po 50 metų sau-

gojimo saugykloje, konservatyviai priėmus ribinius žiedinio krepšio įkrovos efektinius laidumus, sutampančius su krepšio iš aliuminio lydinio (pirmasis atvejis) arba su vidinio krepšio įkrovos (antrasis atvejis) laidumais.

2. Skaičiavimai parodė, kad pavienio konteinerio su ką tik pakrautu panaudotu branduoliniu kuru, prieš tai laikytu vandens baseinuose 7(5) metus, maksimalios įkrovos (ŠIELų paviršiaus) ir konteinerio išorinio šoninio paviršiaus temperatūros pirmuoju atveju siekia 238 ir 56 °C, antruoju atveju – 302 ir 58 °C, o konteinerio, esančio saugykloje, atitinkamos temperatūros pirmuoju atveju siekia 257 ir 87 °C, antruoju atveju – 318 ir 90 °C ir realiai yra ne didesnės už maksimalią leistiną (300 °C) ŠIELų paviršiaus temperatūrą.

3. Po 50 metų saugojimo pavienio konteinerio ir konteinerio, esančio saugykloje, maksimalios įkrovos temperatūros sumažėja 110–140°, šoninio paviršiaus – 15–30° ir yra ženkliai mažesnės už maksimalią leistiną (300 °C) ŠIELų paviršiaus temperatūrą bei ne didesnės už transportuojamiems konteineriams leistiną 85 °C išorinio paviršiaus temperatūrą.

4. Šiluminiu požiūriu nauji konteineriai CONSTOR® RBMK-1500/M2 tinka panaudoto branduolinio kuro, realiai laikyto IAE vandens baseinuose, ilgalaikiam saugojimui.

Žymėjimai

- a – temperatūros laidumo koeficientas m^2/s ,
- d – konteinerio skersmuo m ,
- g – laisvojo kritimo pagreitis, $9,81$ m/s^2 ,
- l – lemiantysis parametras m ,
- Q – liekamasis šilumos išsiskyrimas kW ,
- q – šilumos srauto tankis W/m^2 ,
- T – temperatūra, $T = t + 273,2$, K ,
- t – temperatūra °C,
- α – šilumos atidavimo koeficientas $W / (m^2 \cdot K)$,
- β – tūrinio plėtimosi koeficientas $1/K$,
- ε – juodumo laipsnis,
- λ – šilumos laidumo koeficientas $W / (m \cdot K)$,

ν – kinematinio klampio koeficientas m^2/s ,
 Gr – Grashofio skaičius, $Gr = g\beta l^3(T_{kont} - T_a) / \nu_0^2$,
 Nu – Nuselto skaičius, $Nu = \alpha_{konv} l / \lambda_0$,
 Pr – Prandtlio skaičius, $Pr = \nu_0 / a$,
 Ra – Reilėjaus skaičius, $Ra = Gr \cdot Pr$.

Indeksai

0 – oras,
 a – aplinka,
 kont – konteineris,
 konv – konvekcija,
 rad – radiacija,
 ν – vidinis krepšys,
 ž – žiedinis krepšys.

Santrumpos

7(5) – konteinerio pakrovimo schema, kai VK yra PBK, prieš tai laikytas vandens baseinuose ≥ 7 metus, o ŽK – ≥ 5 metus,
 IAE – Ignalinos atominė elektrinė,
 LEI – Lietuvos energetikos institutas,
 PBK – panaudotas branduolinis kuras,
 ŠIEL'as – šilumą išskiriantis elementas,
 TATENA – Tarptautinė atominės energijos agentūra,
 VK – vidinis krepšys,
 ŽK – žiedinis krepšys.

Gauta 2011 05 10
 Priimta 2011 06 20

Literatūra

1. Kalinkin V. I., Kritskij V. G., Davidenko N. N. i dr. Tekhnologicheskii protsess perevoda OJAT RBMK-1500 s „mokrogo“ na „suchoye“ khraneniye. OAO „Golovnoi institut „VNIPIET“ i OAO „Koncern Rosenergoatom“. Sankt-Peterburg, Rossiya, 2010 (rusų kalba).
2. Vatulin A. V., Ioltukhovskiy A. G., Kadarmetov I. M. et al. Validation of dry storage modes for RBMK-1000 spent fuel assemblies (SFA) (IAEA-CN-102/39). In: *Storage of Spent Fuel from Power Reactors. Proceedings of International Conference*. IAEA, Vienna, 2003. P. 422–430.
3. *Technical Basis for Storage of Zircalloy-Clad Spent Fuel Inert Gases*. PNL-4835. 1983.
4. *Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material*. 2009 Edn. IAEA Safety Standards Series. Safety Requirements No. TS-R-1. IAEA, Vienna, 2009.
5. Rimkevicius S. et al. *Comprehensive fuel data report for RBMK 1500 fuel assemblies used at Ignalina NPP*. Final Report S/17-760.5.6-G-V:01. Laboratory of Nuclear Installation Safety, Lithuanian Energy Institute, 2006.
6. Poškas P., Šimonis V., Makarevičius R. Panaudoto branduolinio kuro saugojimo konteinerių šiluminis įvertinimas. *Energetika*. 1999. Nr. 4. P. 20–25.
7. Poškas P., Šimonis V. Thermal analysis of casks for interim storage of RBMK-1500 spent nuclear fuel. In: Sundén B., Vilemas J. (eds.). *Advances in Heat Transfer Engineering*.

Proceedings of the 4th Baltic Heat Transfer Conference. Kaunas, 2003. P. 629–636.

8. Lee J. C., Choi W. S., Bang K. S., Seo K. S., Yoo S. Y. Thermal-fluid flow analysis and demonstration test of a spent fuel storage system. *Nuclear Engineering and Design*. 2009. Vol. 239. P. 551–558.
9. *ALGOR: An Interactive Demonstration. An Introduction to Steady-State Heat Transfer*. Pt. No. 3118.401, Rev. 2, Pittsburgh, USA, 1992.
10. Wärmeübergang durch freie Konvektion in geschlossenen Fluidschichten. *VDI-Wärmeatlas*. Auflage 6, 1991. Blatt Fc. S. 66–73.
11. Kutateladze S. S. *Teploperedacha i gidrodinamicheskoye soprotivleniye*. Moskva: Energoatomizdat, 1990 (rusų kalba).
12. Poškas P., Beese A. ir kt. *Panaudoto RBMK branduolinio kuro iš Ignalinos AE 1 ir 2 blokų laikinas saugojimas*. Poveikio aplinkai vertinimo ataskaita S/14-658.5.9/EIA-R-04. GNS-NUKEM (Vokietija), Lietuvos energetikos institutas, 2007.

Vytautas Šimonis, Artūras Šmaižys, Povilas Poškas

THERMAL ANALYSIS OF NEW CASKS FOR SPENT NUCLEAR FUEL STORAGE AT THE NEW IGNALINA NPP STORAGE FACILITY

Summary

The thermal analysis was performed on new-type CONSTOR® RBMK-1500/M2 casks for the interim storage of spent nuclear fuel in the new storage facility at the Ignalina Nuclear Power Plant. The ALGOR numerical calculation code (USA) was used for modeling a single cask and a cask in storage, directly loading it with spent nuclear fuel pre-stored for 7(5) years in water pools and after 50 years of cask storage. The temperature distribution and the limiting cask temperatures were calculated in two cases, conservatively assuming the limiting effective thermal conductivity of a ring basket with fuel bundles, which is the same as the conductivity of a basket made of aluminum alloy (first case) or as an effective conductivity of the inner basket with fuel bundles (second case).

The maximum temperatures of fuel cladding and of the external surface in a single cask just loaded with spent nuclear fuel pre-stored for 7(5) years were found to reach 238 °C and 56 °C in the first case and 302 °C and 58 °C in the second case. The respective temperatures of the cask in storage reached 257 °C and 87 °C in the first case and 318 °C and 90 °C in the second case. After 50 years of cask storage in a storage facility, the maximum temperatures of fuel cladding decreased by 120–140° and of the side-surface by about 30°. Practically, the effective thermal conductivity of the ring basket is between the conductivities of the first and second cases; therefore, for casks loaded with spent nuclear fuel pre-stored for 7(5) years, the maximum temperatures of fuel cladding will never exceed the maximum allowed temperature of 300 °C. The outer surface temperatures of a single cask never exceed the allowed temperature of 85 °C for transport casks.

Key words: RBMK-1500 spent nuclear fuel, cask, storage facility, fuel element, temperature, decay heat flux

Витаутас Шимонис, Артурас Шмайжис, Повилас Пошкас

**ТЕПЛОВАЯ ОЦЕНКА НОВЫХ КОНТЕЙНЕРОВ,
ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ
ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА НА
НОВОМ ХРАНИЛИЩЕ ИГНАЛИНСКОЙ АЭС**

Резюме

Представлена тепловая оценка новых контейнеров CONSTOR® RBMK-1500/M2, предназначенных для хранения отработанного ядерного топлива на новом промежуточном хранилище Игналинской АЭС. Численное моделирование выполнено с использованием расчетного кода ALGOR (США) в одиночном контейнере и в контейнере, находящемся в хранилище, с только что загруженным отработанным ядерным топливом, предварительно выдержанным в бассейнах выдержки 7(5) лет, и после 50-летнего хранения контейнера в хранилище. Консервативно приняв предельные эффективные коэффициенты теплопроводности кольцевой корзины с пучками топлива, совпадающие с материалом корзины из алюминиевого сплава (первый случай) или с эффективной теплопроводностью внутренней корзины с пучками топлива (второй случай), определены распределение температур и предельные температуры контейнеров.

Расчеты показали, что в одиночном контейнере с только что загруженным отработанным ядерным топливом, выдержанным в бассейнах 7(5) лет, максимальные температуры оболочки ТВЭЛов и наружной боковой поверхности контейнера в первом случае достигают 238 и 56 °С, а во втором – 302 и 58 °С. Соответствующие температуры контейнера, находящегося в хранилище, составляют в первом случае 257 и 87 °С, а во втором – 318 и 90 °С. После 50-летнего хранения контейнеров в хранилище максимальные температуры ТВЭЛов понижаются на 120–140°, а боковой поверхности – примерно на 30°. Фактически эффективная теплопроводность кольцевой корзины находится между теплопроводностями первого и второго случаев, поэтому после 7(5)-летней выдержки топлива в бассейнах максимальные температуры ТВЭЛов не будут превышать максимально допустимую температуру 300 °С, а температуры наружной поверхности одиночного контейнера не превышают допустимую температуру 85 °С для транспортных контейнеров.

Ключевые слова: отработанное ядерное топливо RBMK-1500, контейнер, хранилище, тепловыделяющий элемент, температура, остаточный тепловой поток