

Termo-hidro-mechaninių procesų panaudoto branduolinio kuro giluminiam kapinyne modeliavimas

Darius Justinavičius,

Povilas Poškas

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

Įrengtas panaudoto branduolinio kuro kapinynas geologinėse struktūrose sutrikdys stabilumą, per ilgus amžius nusistovėjusią geologinę aplinką, o palaidoti PBK konteineriai emituos likutinį šilumos kiekį. Šie pokyčiai geologinio kapinyno aplinkoje lems vienalaikius ir tarpusavyje susijusius šilumos mainų (T), fluidų (drėgmės ir oro) pernašos (H) ir mechaninius (M) procesus. Kompleksinis šių procesų vertinimas yra svarbus bendrajai kapinyno saugai.

Šiame straipsnyje pateikiami kompleksinių termo-hidro-mechaninių procesų (THM) aplink vieną iš konteinerių su jame esančiu RBMK-1500 PBK, patalpintu hipotetinio giluminio kapinyno kristalinėse uolienose, skaitinio vertinimo rezultatai. Analizės metu nustatytas temperatūros pasiskirstymas modeliuojamoje sistemoje, aukščiausia temperatūra, įvertinta inžinerinių barjerų medžiagos prisotinimo vandeniui dinamika bei mechaniniai poslinkiai inžineriniuose barjeruose. Šilumos sklaidos modeliavimo rezultatai parodė šiluminių ir hidrodinaminių procesų bei jų sąveikos kompleksinio vertinimo svarbą aukščiausios temperatūros inžineriniuose barjeruose vertei, tuo tarpu mechaninių procesų įtaka pastarajai buvo nedidelė. Taip pat buvo nustatyta, kad aukščiausia temperatūra prieš laidojimo konteinerio paviršiaus neviršija leistinos 100 °C temperatūros.

Raktažodžiai: giluminis kapinynas, kristalinės uolienos, RBMK-1500 panaudotas branduolinis kuras, termo-hidro-mechaniniai procesai, skaitinis modeliavimas

ĮVADAS

Šiuo metu vyrauja tarptautinė nuomonė, kad panaudoto branduolinio kuro ir kitų ilgaamžių didelio aktyvumo radioaktyviųjų atliekų laidojimas žemės gelmėse yra vienintelis aplinkosaugos požiūriu darnus ir saugus sprendimas, kol kas neturintis alternatyvų [1]. Šio kuro negalima laidoti žemės paviršiuje dėl PBK esančių radionuklidų skleidžiamos intensyvios jonizuojančiosios spinduliuotės keliamo pavojaus žmonėms ir aplinkai.

Dar nė viena valstybė neturi įrengto panaudoto branduolinio kuro kapinyno, todėl visas PBK saugomas „šlapio“ tipo (kuras laikomas vandens baseinuose) arba „sausos“ tipo (kuras laikomas specialiuose konteineriuose) laikinose saugyklose. Ilgaamžių radioaktyviųjų atliekų ir PBK tvarkymo srityje intensyviausiai dirba JAV, Kanados, Japonijos, Suomijos, Švedijos, Prancūzijos, Belgijos, Šveicarijos mokslininkai [1]. Šiose valstybėse projektuojami laidojimo konteineriai ir statomos požeminės laboratorijos, kuriose eksperimen-

tiškai tiriamos inžinerinių barjerų ir geologinių formacijų savybės realiomis kapinyno sąlygomis. Tyrimai rodo, kad priimtinas ir saugus PBK laidojimas yra tam tikrose geologinėse formacijose, 500–1000 m gylyje, taikant daugiabarjerės sistemos koncepciją, kurią sudaro šiluminio elemento apvaskalas, konteineris, specialus vandens nepraleidžiantis molis (bentonitas¹) ir natūrali uoliena [2]. Kapinynas išliktų saugus, net jeigu viename barjerų atsirastų defektų arba jis neatliktų numatytų funkcijų.

Be eksperimentinių tyrimų požeminėse laboratorijose, vykdomi ir skaitiniai geologinio kapinyno aplinkoje vykstančių procesų tyrimai. Sparčiai tobulėjant skaičiavimo technikai, kuriami vis sudėtingesni skaitiniai modeliai, leidžiantys vertinti vienalaikius tarpusavyje susijusius procesus bei suteikiantys galimybę išanalizuoti šių procesų įtaką inžineriniams barjerams ir bendrajai kapinyno saugai. Dide-

¹ Bentonitas – speciali molio rūšis, kurio sudėtyje daugiausia montmorilonitinio molio ir panašių smektitų grupės mineralų. Bentonitas yra numatomas naudoti kaip kapinynų inžinerinių barjerų medžiaga.

lis skaitinių modelių pranašumas, palyginti su eksperimentiniais tyrimais, yra galimybė santykinai greitai prognozuoti sudėtingus procesus ilgalaikėje (šimtų ar tūkstančių metų) perspektyvoje. Prieš laidojant PBK geologiniuose kapinyuose turi būti kompleksiskai įvertintas šilumos išsiskyrimas iš konteinerių, drėgmės ir oro judėjimas inžinerinių barjerų bei uolienu poromis ir mechaninis inžinerinių struktūrų stabilumas [3, 4].

Modeliuojant temperatūros kitimą geologinio kapinyne aplinkoje dažniausiai atliekama šiluminė (T) analizė (angl. *pure thermal analysis*). Tačiau ji nėra tiksli, kadangi neįvertinama fluidų tekėjimo dinamika tiriamoje sistemoje, t. y. laikoma, kad medžiagose yra tam tikras vandens kiekis, kuris nekinta bėgant laikui. Realiosiomis kapinyne sąlygomis iš PBK konteinerio išsiskirianti šiluma sąlygoja trumpalaikį inžinerinių barjerų ir artimojo lauko (kontaktojančių su bentonitu) uolienu sausėjimą, bet ilgalaikėje perspektyvoje dėl požeminio vandens pritekėjimo iš uolienu visos medžiagos taps visiškai prisotintomis vandeniu. Taip pat reikia įvertinti, kad dėl PBK konteinerio emituojamos šilumos atsiranda šiluminiai įtempimai medžiagose, o dėl jų – deformacijos ir poslinkiai įvairiomis kryptimis. Dėl besikeičiančio inžinerinių medžiagų prisotinimo vandeniu medžiagos taip pat deformuojasi – jos plečiasi arba traukiasi. Deformuotose medžiagose kinta porų dydžiai ir poringumo laipsnis, o tai savo ruožtu gali keisti fluidų tekėjimo režimą.

Tyrėjų pasirinkimą, kuriuos procesus vertinti, labai dažnai lemia turima programinė įranga. Šiuo metu nėra sukurta daug komercinių programų, leidžiančių kompleksiskai įvertinti termo-hidro (TH) bei termo-hidro-mechaninius (THM) procesus, todėl dažniausiai atliekama T tipo analizė. Šiame straipsnyje pateikiami ir palyginami T, TH ir THM analizės rezultatai, gauti naudojant baigtinių elementų programą COMPASS (Jungtinė Karalystė) [5]. Skaitinis modeliavimas buvo atliekamas aplink vieną iš konteinerių su jame esančiu RBMK-1500 PBK, atsižvelgiant į geologinio kapinyne kristalinėse Lietuvos uolienose bendrinę koncepciją [6, 7].

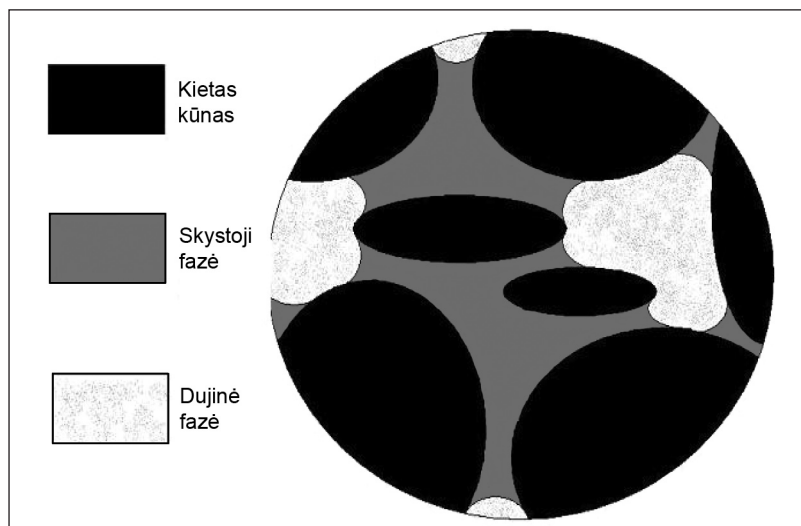
VERTINIMO METODIKA

Analizuojamai sistemai – inžineriniams barjerams (bentonitui, tunelio užpildui) ir kristalinėms uolienoms – buvo taikytas porėtos aplinkos (angl. *porous medium*) modelis. Pagal jį, kietą kūną sudaro skeletas, o jo viduje egzistuoja susisiekiančios poros, kurios gali būti užpildytos skysčiu (vandeniu ir vandenyje ištirpusiomis dujomis) arba dujomis (sausu oru ir vandens garais). Visiškai vandeniu prisotinta aplinka (angl. *saturated media*) laikoma tokia, kurioje visos poros užpildytos skysčiu. Nevisiškai vandeniu prisotinta aplinka (angl. *unsaturated media*) laikoma tokia, kurioje dalis porų užpildyta skysčiu, o dalis – dujine faze (1 pav.). Medžiagų prisotinimas vandeniu (drėgnis) yra procentinis porose esančių vandens ir dujų tūrių santykis.

Nagrinėjamus THM procesus apibūdina kintamieji – temperatūra T , medžiagų prisotinimas vandeniu S ir mechaniniai poslinkiai ašių kryptimis u_x , u_y . Bendruoju atveju yra sprendžiamos energijos ir masės pernašos deformuojamoje aplinkoje diferencialinės lygtys [5].

Pagrindinis parametras, lemiantis šilumos sklaidą, yra šilumos laidžio koeficientas λ , kuris mažėja medžiagoms sausėjant ($S \downarrow$) [8]. Tai būdinga inžinerinėms medžiagoms, tuo tarpu kristalinėse uolienose λ išlieka pastovus kintant S .

Medžiagų prisotinimas vandeniu S yra lemiantis drėgmės judėjimo veiksnys. Nuo jo priklauso vidinių jėgų, veikiančių drėgmę porose, pobūdis ir intensyvumas. Mažesnis medžiagos drėgnis lemia sudėtingesnę šių jėgų poveikį ir drėgmės judėjimo mechanizmą [9]. Didžiausią reikšmę drėgmės judėjimui turi gravitacinės, kapiliarinės ir sorbcinės jėgos. Šių jėgų bendras poveikis apibūdinamas poringos erdvės sorbciniu kapiliariniu potencialu – darbu, kurį reikia atlikti, norint išsiurbti iš medžiagos tam tikrą skysčio masę. Praktiškai, tai ne darbas, o slėgis į vandens tūrio vienetą, kuris vadinamas įsiurbiamuoju slėgiu P_{is} (angl. *suction*). Dydžio P_{is} priklausomybė nuo medžiagos drėgnio S yra viena svarbiausių medžiagų charakteristikų vertinant drėgmės judėjimą. Ši charakteristika



1 pav. Nevisiškai vandeniu prisotintos porėtos aplinkos mikroskopinis vaizdas

1 lentelė. Medžiagų parametų vertės ir galimi kitimo intervalai

Parametras	Medžiaga		
	bentonitas	tunelio užpildas	kristalinės uolienos
Tankis ρ_s (kg/m ³)	2 700	2 750	2 770
Poringumo rodiklis n (m ³ /m ³)	0,4	0,39	0,005
Pradinis medžiagų prisotinimas vandeniu S (%)	85	70	100
Savitoji šiluma C_p (J/(kg · K))	800	850	750
Šlyties modulis G (Pa)	$1 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^7$	$2,76 \cdot 10^{10}$
Puasono koeficientas ν (-)	0,5	0,5	0,25
Terminio plėtimosi koeficientas α_T (K ⁻¹)	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	0
Šilumos laidžio koeficientas λ (W/(m · K))	0,4–1,35	0,4–2	2,4
Įsiurbiamasis slėgis P_{is} (MPa)	2,5–660	0,003–27	0,05–65
Hidraulinio laidžio koeficientas k (m/s)	$1 \cdot 10^{-15}$ – $1 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-15}$ – $1,5 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-15}$ – $1 \cdot 10^{-10}$

yra nevienoda skirtingoms medžiagoms, tačiau pastebima tendencija, kad medžiagoms sausėjant ($S \downarrow$), P_{is} yra kelis kartus didesnis nei medžiagoms drėgnėjant ($S \uparrow$) [8].

Kita svarbi medžiagų charakteristika yra hidraulinio laidžio (filtracijos) koeficiento k priklausomybė nuo drėgnio S . Tyrimai rodo, kad hidraulinis laidis mažėja medžiagoms sausėjant ($S \downarrow$) [8].

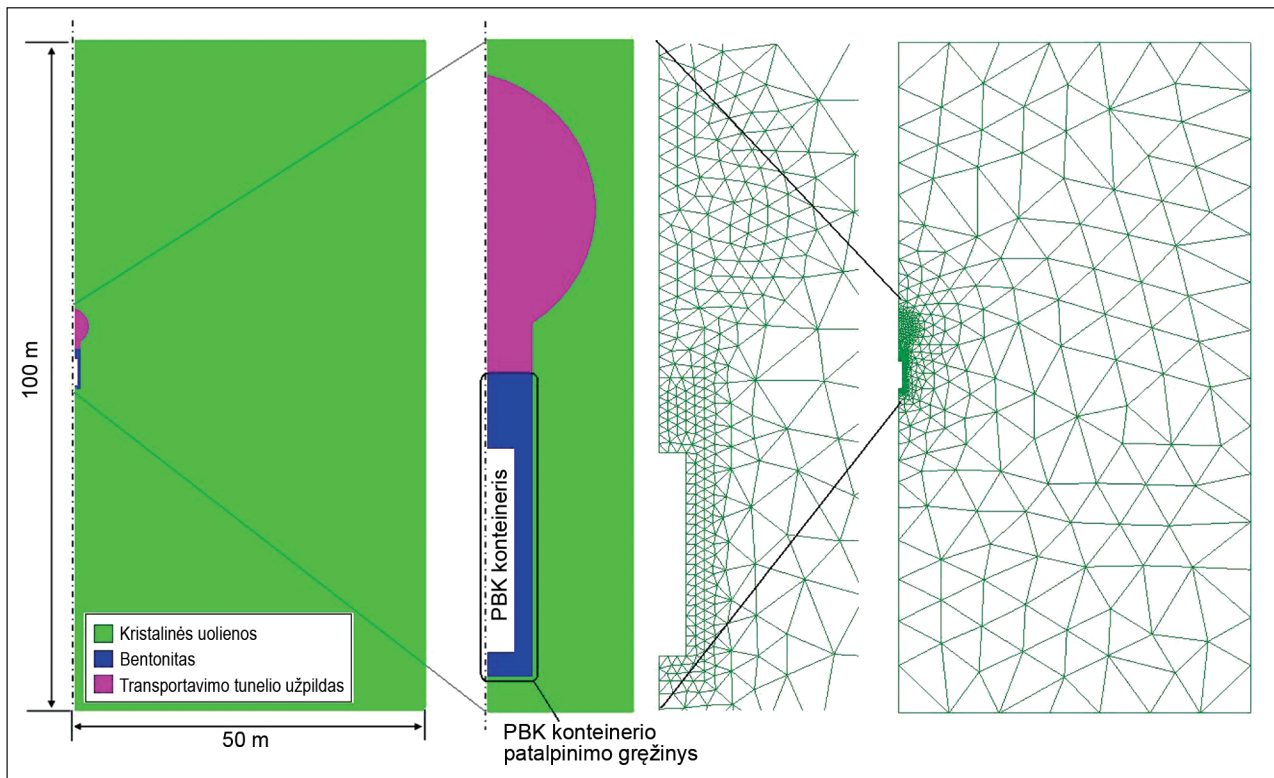
Tiriamose sistemoje nagrinėjami procesai, kurie vyksta skirtingose medžiagose, o kiekvienai iš jų būdingos skirtingos charakteristikos. Vykstant kompleksiniams procesams, kai kurie medžiagas apibūdinantys parametrai yra pastovūs, o kitų parametų vertės kinta laike. Šilumos laidžio koeficientas λ , įsiurbiamasis slėgis P_{is} ir hidraulinio laidžio koeficientas k priklauso nuo laike kintančio medžiagų drėgnio S . Lietuvoje kol kas neatlikti tyrimai, nustatantys geotechnines

inžinerinių barjerų bei geologinių formacijų charakteristikas, todėl skaičiavimuose vartotos medžiagų parametų vertės, gautos eksperimentinių tyrimų metu Äspö (Švedija) požeminėje tyrimų laboratorijoje [8]. Medžiagų parametų vertės bei kitimo intervalai apibendrinti 1 lentelėje.

Skaitinis modelis

Pagal siūlomą geologinio kapinyno Lietuvoje bendrinę koncepciją, PBK būtų talpinamas transportavimo tunelių apačioje (~500 m gylyje) vertikaliai įrengtuose gręžiniuose. Sukurtas dvimatis (2D) modelis apima dalį transportavimo tunelio, vieną gręžinių su jame vertikaliai patalpintu RBMK-1500 PBK konteineriu ir supančias kristalines uolienas² (2 pav.).

² Modelio matmenys (100 × 50 m) nereprezentuoja atstumų tarp gretimų talpinimo gręžinių ar tunelių.



2 pav. Modeliuojamos kapinyno dalies vaizdas ir skaičiavimo tinklėlis

Atlikus kritiškumo, dozės ir šilumos mainų įvertinimus bei atsižvelgus į konteinerio perkėlimo ir patalpinimo technologijas, buvo priimta [7], kad į laidojimo konteinerį tikslinga talpinti 32 RBMK-1500 PBK pluoštus. Laidojimo konteinerio aukštis – 4,07 m, spindulys – 0,525 m. Tarpas tarp konteinerio šoninių sienelių ir uolienų užsandarinamas 0,35 m storio bentonito žiedais, o po konteineriu ir virš jo esanti tuščia erdvė užsandarinama 1,5 ir 0,5 m aukščio bentonito blokais. Numatomas transportavimo tunelio aukštis ~6 m, o po PBK konteinerio patalpinimo jis būtų užpilamas smulkintų uolienų (70 %) bei bentonito (30 %) mišiniu.

Kadangi PBK talpinimo gręžinys yra simetriškas, tai siekiant optimizuoti skaičiavimo laiką modeliavimas atliktas plokštumoje, lygiagrečioje simetrijos ašiai (angl. *axis-symmetric analysis*). Visą modelio tinklą (2 pav.) sudarė ~1 000 trikampių elementų, o sistema diskretizuotesnė inžineriniuose barjeruose, nes juose tikėtina didžiausia nagrinėjamų parametrų kaita.

Pradinės ir kraštinės sąlygos

Pasirėmus anksčiau atliktais temperatūros skaičiavimais laidojant RBMK-1500 PBK kristalinėse uolienose [10] bei geologiniais duomenimis Lietuvoje [11], konservatyviai priimta pradinė 32 °C temperatūra visoje modeliuojamoje sistemoje. Šilumos išsiskyrimas iš PBK konteinerio po 50 metų saugojimo buvo įvertintas naudojant programą ORIGEN-S [12] laikant, kad RBMK-1500 PBK pradinis išsodinimas 2,8 %, o išdegimas 30 MW/kgU. Pats PBK laidojimo konteineris nėra modeliuojamas, tačiau reprezentuojamas kraštine sąlyga, kuri atitinka mažėjantį šilumos srautą nuo išorinės konteinerio sienelės. Aukščiausia temperatūra ant išorinės PBK konteinerio sienelės yra laikoma vienu kritinių kapinyno parametrų [13] ir turi būti ne didesnė kaip 100 °C. Šitaip išvengiama vandens virimo prie konteinerio paviršiaus, dėl kurio pasikeistų bentonito savybės, o susidariusios druskos paspartintų konteinerio koroziją [14]. Šilu-

mos srautai per išorines modelio ribas buvo priimti lygūs nuliui.

Pradinis prisotinimas vandeniu inžineriniuose ir gamtiniame barjeruose yra nevienodas. Jis priklauso nuo realių kapinyno sąlygų patalpinus PBK konteinerius bei užsandarinus tunelius. Pasirėmus eksperimentinių tyrimų požeminėje laboratorijoje rezultatais [8] buvo priimta, kad bentonitas ir tunelio užpildo medžiaga vandeniu prisotintos nevisiškai – atitinkamai 85 ir 70 %, o kristalinės uolienos vandeniu prisotintos visiškai (100 %). Priimtos kraštinės sąlygos atitinka numatomą požeminio vandens pritekėjimą į modeliuojamą sistemą.

Deformacijoms medžiagose įvertinti buvo priimta, kad pradiniai mechaniniai įtempimai koordinacių ašių kryptimis lygūs 200 kPa inžinerinėse medžiagose ir 22 MPa kristalinėse uolienose [8]. Poslinkiai ašių kryptimis negalimi inžinerinių struktūrų ir kristalinių uolienų sankirtoje.

REZULTATŲ ANALIZĖ

Atlikta tiek kompleksinė THM procesų, tiek atskirai šiluminių ir hidraulinių procesų, įvertinant ir neįvertinant jų tarpusavio sąveiką, analizės (T, H, TH). Toliau pateikiami ir aptariamai temperatūros kaitos, medžiagų prisotinimo vandeniu dinamikos bei mechaninių poslinkių skaitinio vertinimo rezultatai. Analizė atlikta 200 metų periodui po PBK konteinerio patalpinimo ir transportavimo tunelių užsandarinimo.

Temperatūros kitimo modeliavimo rezultatai

Termoinžinerinė analizė aplink vieną iš PBK laidojimo konteinerių atlikta atsižvelgus į vykstančių procesų kompleksumą (2 lentelė). T analizėje modeliuojami šilumos mainai, nevykstant kompleksiniams fluidų pernašos (H) ir mechaniniams (M) procesams. Temperatūros pasiskirstymas sistemoje nustatytas atskirais atvejais, esant skirtingoms pirminio inžinerinio barjero (bentonito) šilumos laidžio koeficiento λ

2 lentelė. Termoinžinerinėje analizėje tirti atvejai

Analizė	Atvejis	Apibūdinimas	Bentonito šilumos laidžio koeficientas $\lambda W / (m \cdot K)$
T	T_p	Pesimistinis atvejis – vertinami šiluminiai procesai, kai bentonitas mažai prisotintas vandeniu (20 %)	0,4
	T_t	Tikėtinas atvejis – vertinami šiluminiai procesai, kai bentonitas iš dalies prisotintas vandeniu (85 %)	1,1
	T_o	Optimistinis atvejis – vertinami šiluminiai procesai, kai bentonitas visiškai prisotintas vandeniu (99,9 %)	1,35
TH	TH_1	Vertinami šiluminiai ir hidrauliniai (kinta medžiagų drėgnis) procesai	Tiesiškai kintantis (1–1,35), priklauso nuo bentonito drėgnio
	TH_2	Vertinami šiluminiai, hidrauliniai procesai ir konvekcinio šilumos perdavimo įtaka	Tiesiškai kintantis (1–1,35), priklauso nuo bentonito drėgnio
THM	THM	Vertinami šiluminiai, hidrauliniai ir mechaniniai procesai	Tiesiškai kintantis (1–1,35), priklauso nuo bentonito drėgnio

vertėms (pesimistinei, tikėtina, optimistinei). TH analizėje šilumos mainai vertinami kompleksiskai fluidams tekant bei ištiriama konvekcinio šilumos perdavimo mechanizmo įtaka temperatūros pasiskirstymui. THM analizėje tiriama šilumos sklaida iš konteinerio vienalaikiai vykstant ir mechaniniams procesams.

Temperatūros kaita analizuojama P1–P4 taškuose. P1 – taškas transportavimo tunelyje, 2,5 m virš PBK konteinerio. P2 – taškas ant išorinio PBK konteinerio paviršiaus. P3 – taškas ant išorinio bentonito paviršiaus. P4 – taškas kristalinėse uolienose, 2,5 m atstumu nuo PBK konteinerio.

T analizė

Šilumos sklaidos efektyvumas nagrinėtas esant skirtingiems bentonito drėgniams S (šilumos perdavimo koeficientams λ). Temperatūros kitimo kreivės analizuojamuose taškuose parodytos 3 pav. Aukščiausia bentonito, kontaktuojančio su išorine konteinerio sienele (P2 taškas), temperatūra ženkliai priklauso nuo bentonito drėgnio. Maksimali temperatūra (~ 90 °C) nustatyta (T_p) atveju, esant pesimistinei prielaidai, jog bentonitas yra sausas – jo šilumos laidžio koeficientas λ yra mažiausias, palyginti su (T_t) ir (T_o) atvejais. Skirtumas tarp nustatytų aukščiausių temperatūros verčių pesimistiniu (T_p) ir optimistiniu (T_o) atvejais P2 taške yra ~ 27 °C. Temperatūrų vertės tikėtiniu (T_t) atveju yra tarp nustatytų esant pesimistinėms (T_p) ir optimistinėms (T_o) bentonito λ vertėms. Skirtumas tarp nustatytų aukščiausių temperatūros verčių tikėtiniu (T_t) ir optimistiniu (T_o) atvejais yra $\sim 2,5$ °C.

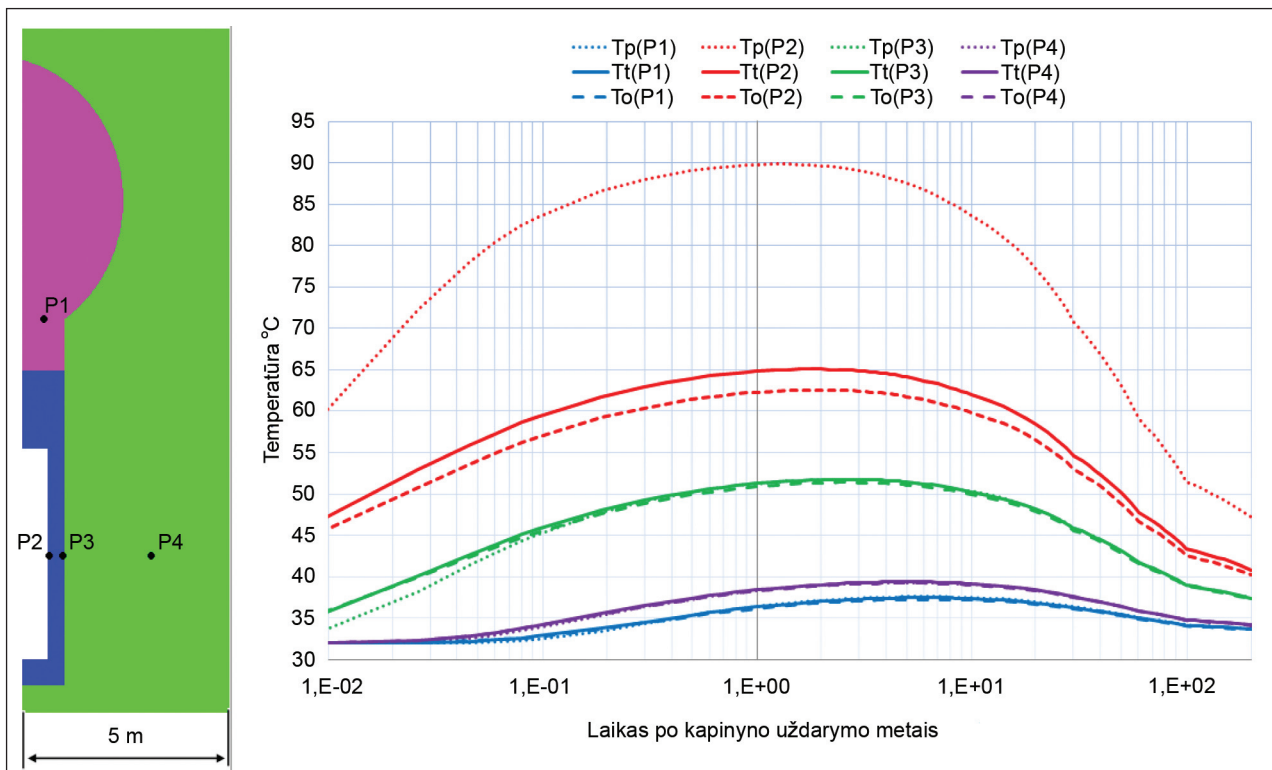
Nustatytas temperatūros kitimo pobūdis kituose analizuotuose taškuose yra labai artimas visais tirtais atvejais. Temperatūrų skirtumai tarp aukščiausių verčių pesimistiniu (T_p) ir optimistiniu (T_o) atvejais yra $\sim 0,3$ °C, $\sim 0,4$ °C ir $\sim 0,15$ °C atitinkamai P1, P3 ir P4 taškuose.

TH analizė

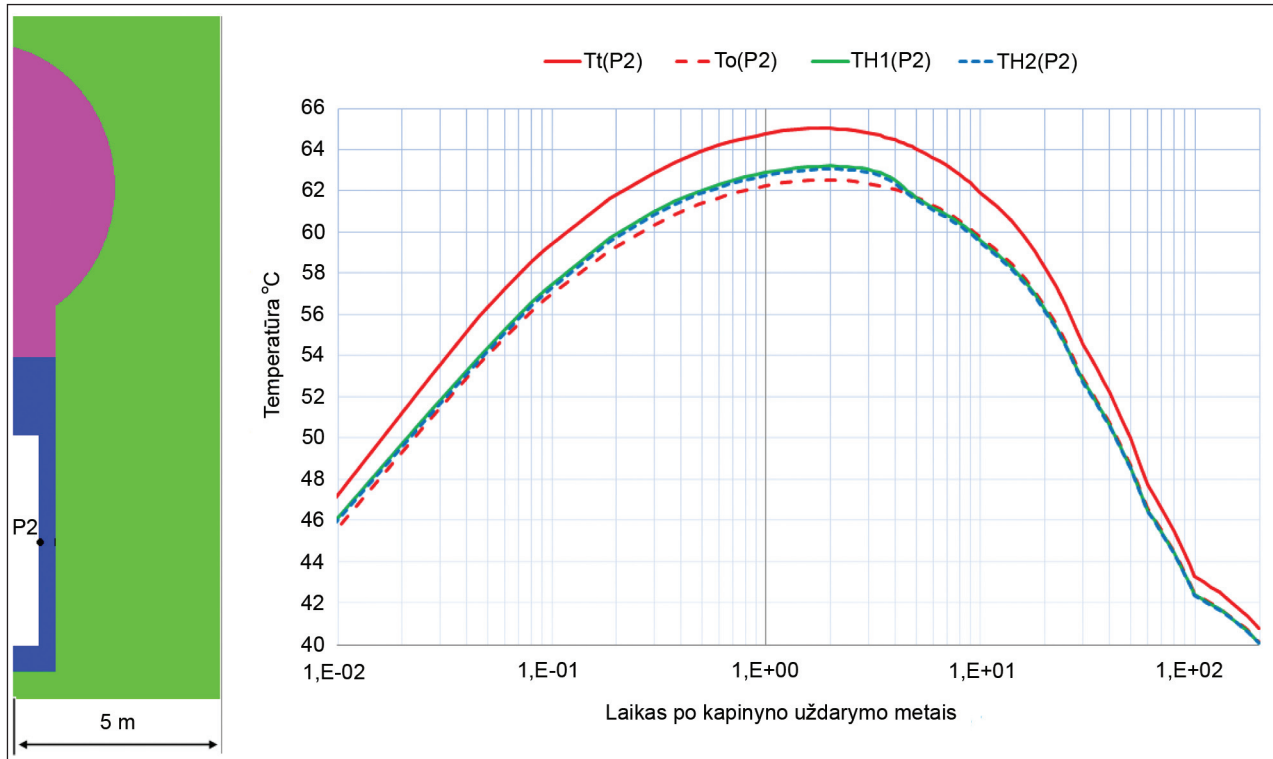
Realiomis kapinyno sąlygomis bėgant laikui kinta inžinerinių barjerų drėgnis S , todėl proporcingai keičiasi šilumos laidžio koeficientas λ . 4 pav. pavaizduotas temperatūros kitimo P2 taške pobūdis, nustatytas atlikus TH analizę. Palyginimui pateikti ir rezultatai, gauti nagrinėtais T analizės atvejais, kai priimtos tikėtinos (T_t) ir optimistinės (T_o) bentonito λ vertės.

Kompleksinio šilumos mainų ir fluidų tekėjimo vertinimo (TH_1) rezultatai parodė, kad temperatūros vertės P2 taške yra mažesnės, palyginti su T analizės tikėtiniu (T_t) atveju, bet didesnės, palyginti su T analizės optimistiniu (T_o) atveju. Aukščiausių temperatūrų skirtumai atitinkamai lygūs $\sim 2,5$ °C ir $\sim 0,7$ °C. Šie skirtumai rodo, kad temperatūros vertinimas atsižvelgiant į realiomis kapinyno sąlygomis vykstančius fluidų judėjimo procesus yra tikslesnis nei konservatyviai priimant konkrečias laike nekintančias inžinerinių barjerų drėgnio vertes.

Pagrindinis šilumos pernašos mechanizmas geologinio kapinyno sąlygomis yra šiluminis laidis, t. y. šiluma sklinda dėl temperatūros gradiento medžiagose. Be šilumos laidžio, galimas ir kitas šilumos perdavimo mechanizmas – konvekcija, kai šiluma pernešama kartu su tekančio fluido srautu. Realiomis kapinyno sąlygomis šis tekėjimas (sunkimasis) yra



3 pav. Temperatūros kaita analizuojamuose taškuose (P1–P4) T analizės atvejais



4 pav. Temperatūros kitimas P2 taške T ir TH analizės atvejais

labai lėtas procesas, nes inžinierinių medžiagų bei uolienu hidraulinis laidis yra itin mažas. Todėl dažniausiai nustatant temperatūros pasiskirstymą konvekciniis šilumos perdavimas nevertinamas. Papildomai atlikus TH analizę (TH_2 atvejis) konvekciniis šilumos perdavimas buvo įvertintas. Gauti rezultatai (4 pav.) parodė, kad prielaida teisinga, nes temperatūros kitimo priklausomybės (TH_1 ir TH_2 atvejais) artimos, o skirtumai tarp aukščiausių temperatūros verčių nedideli. Taigi konvekcinio šilumos perdavimo mechanizmo galima nevertinti modeliuojant temperatūros pasiskirstymą aplink PBK laidojimo konteinerių geologinio kapinyno sąlygomis.

THM analizė

Mechaniniai procesai neturi įtakos šilumos perdavimui laidžio būdu, tačiau dėl mechaninių įtempimų medžiagose atsiradusios deformacijos gali pakeisti fluidų tekėjimo režimą, kartu ir šilumos perdavimą konvekcijos būdu.

THM analizės rezultatai parodė, kad temperatūros kitimo analizuotuose taškuose pobūdis beveik identiškas tempera-

tūros kitimo priklausomybei, nustatyti TH_1 analizės atveju. Galima daryti išvadą, kad mechaninių procesų bei šių procesų sukeltų deformacijų įtaka šilumos mainams yra minimali. Taigi, optimizuojant modeliavimą, pakanka atlikti kompleksinę TH analizę, norint įvertinti temperatūros pasiskirstymą geologinio kapinyno aplinkoje.

Rezultatų palyginimas

Atliekant termoinžinerinę analizę temperatūra buvo įvertinta ne tik pasirinktuose taškuose, bet ir visoje nagrinėjamoje sistemoje. Nustatytos aukščiausios temperatūros vertės P1–P4 taškuose ir sistemoje pateikiamos 3 lentelėje. Didžiausia temperatūra (~94 °C) užfiksuota vienu iš T analizės atvejų (T_p , pesimistinė bentonito λ vertė) – prie išorinės PBK konteinerio sienelės. Ši vertė yra mažesnė nei 100 °C, todėl galima teigti, kad laidojimo konteineris, su jame esančiu RBMK-1500 PBK, atitiktų temperatūros reikalavimus net ir esant pesimistiniam inžinierinių barjerų degradacijos scenarijui, t. y. bentonitui visiškai išsausėjus.

3 lentelė. Nustatytos aukščiausios temperatūros vertės nagrinėtuose taškuose

Atvejis	$T_{maks}(P1)$ °C	$T_{maks}(P2)$ °C	$T_{maks}(P3)$ °C	$T_{maks}(P4)$ °C	$T_{maks}(\text{sistemoje})$ °C	Laikas, kai pasiekama T_{maks} metais
T_p	37,6	89,8	51,7	39,3	93,9	1,2
T_t	37,4	65,0	51,4	39,2	64,4	1,8
T_o	37,2	62,5	51,3	39,2	62,7	1,8
TH_1	37,5	63,1	51,5	39,3	65,0	1,4
TH_2	37,5	63,2	51,5	39,3	65,0	1,4
THM	37,5	63,0	51,5	39,2	64,8	1,4

Panašūs tyrimai Lietuvoje (laidojant RBMK-1500 PBK) tik pradėti, todėl publikuotų rezultatų palyginimui nėra daug. Naudojant kompiuterinę programą FLUENT atliktas skaitinis temperatūros modeliavimas kristalinėse uolienose (neatsižvelgiant į kompleksiskai vykstančius HM procesus) [10]. Kadangi skaičiavimuose priimamas identiškas šilumos srautas iš PBK konteinerio ir artimos pradinės sąlygos (temperatūra, bentonito drėgnumas) kaip ir [10], todėl galimas kokybinis rezultatų palyginimas T analizės atveju. Nustatytos aukščiausios temperatūros sistemoje, kai bentonitas mažai drėgnas, yra ~ 94 °C (COMPASS) ir ~ 92 °C (FLUENT), o kai bentonitas prisotintas vandeniu – atitinkamai ~ 64 °C ir ~ 72 °C. Skirtumai tarp nustatytų aukščių temperatūrų nėra dideli ir galėtų būti aiškinami kiek skirtingomis skaitinio modelio koncepcijomis ir šiek tiek besiskiriančiomis medžiagų parametru skaitinėmis vertėmis.

Medžiagų prisotinimo vandeniu modeliavimo rezultatai

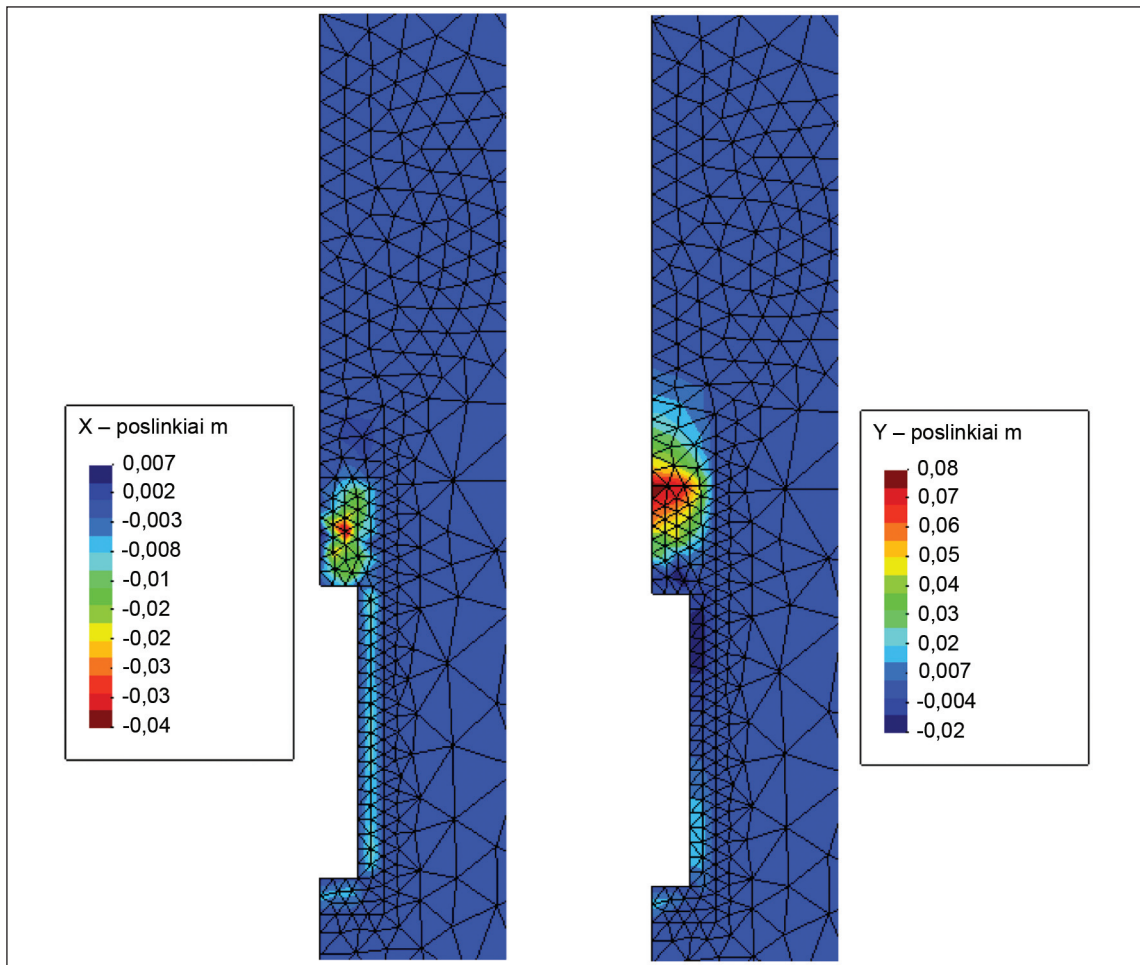
Medžiagų prisotinimo vandeniu dinamika buvo modeliuojama atskirais analizės atvejais – H, TH ir THM. H analizė reprezentuoja atvejį, kai palaidojamas tuščias PBK konteineris ir modeliuojami hidrodinaminiai procesai neišsiskiriant šilumai. TH ir THM analizės jau aptartos anksčiau.

Pradinėmis geologinio kapinyno sąlygomis inžineriniai barjerai nebus visiškai prisotinti vandeniu (1 lentelė). H analizės metu (nesant šilumos šaltinio) stebimas sparčiausias bentonito prisotinimas vandeniu³ (~ 19 metų). Kompleksinių TH ir THM procesų analizės atvejais dėl išsiskiriančios šilumos iš PBK konteinerių visiškai prisotinimas trunka dvigubai ilgiau (~ 38 metus). Tunelio užpildo medžiagos prisotinimas vandeniu visais analizuotais atvejais užtrunka ilgiau nei analizuotas laiko periodas (> 200 metų). Tai susiję su šios medžiagos hidraulinėmis charakteristikomis. Gauti rezultatai TH ir THM analizės atvejais labai panašūs, todėl galima teigti, kad mechaniniai procesai tirtoje PBK laidojimo sistemoje nesukelia deformacijų, kurios ženkliai pakeistų drėgmės judėjimo režimą.

Mechaninių poslinkių modeliavimo rezultatai

Mechaninių poslinkių u_x , u_y ašių kryptimis skaitinio vertinimo rezultatai (200 metų po PBK konteinerio patalpinimo) parodyti 5 pav. Labiausiai yra deformuojamos inžinerinės PBK kapinyno konstrukcijose esančios sandarinimo medžiagos, nes patalpinus PBK konteinerį, gręžinys ir transportavimo

³ Kai visas patalpinimo gręžinyje esantis bentonitas visiškai prisotinamas vandeniu.



5 pav. Mechaniniai poslinkiai inžineriniuose barjeruose vertikalia ir horizontalia kryptimis

tunelis bus užsandarinami nevisiškai vandeniui prisotintomis medžiagomis, kurios laikui bėgant visiškai prisisotins, kartu užimdamos didesnę tūrį. Inžinerinių medžiagų plėtimasis į išorę yra apribotas standumu pasižyminčiais PBK konteineriu bei kristalinėmis uolienomis.

Didžiausi mechaniniai įtempimai atsiranda PBK patalpinimo gręžinio ir transportavimo tunelio sankirtoje. Nustatyti maksimalūs poslinkiai vertikalia kryptimi u_y (~0,08 m) yra 3 kartus didesni nei horizontalia kryptimi u_x . Tuo tarpu aplink PBK konteinerį yra stebimi mažesni poslinkiai.

IŠVADOS

Atlikus procesų, vykstančių RBMK-1500 PBK hipotetiniame kapinyne, modeliavimą, buvo nustatyta, kad:

1. Temperatūros vertinimas atsižvelgiant į realiomis kapinyno sąlygomis vykstančius fluidų judėjimo procesus (TH analizė) yra tikslesnis, o nustatyta aukščiausia temperatūra skaitine verte (~2,5 °C) mažesnė nei priimant tikėtiną, bet laike nekintančią inžinerinių barjerų drėgnio S vertę (T analizė).

2. Nustatyta aukščiausia, ~94 °C, temperatūra prie laidavimo konteinerio paviršiaus (pesimistinė λ vertė, nevertinami HM procesai) atitinka temperatūros reikalavimus (<100 °C).

3. Pagrindinis šilumos perdavimo mechanizmas nagrinėtoje PBK laidavimo sistemoje yra šiluminis laidis ir optimizuojant modeliavimą konvekcinių šilumos perdavimo galima nevertinti.

4. Mechaninių procesų įtaka šilumos mainams bei fluidų tekėjimo režimui tirtoje PBK laidavimo sistemoje yra minimali, todėl optimizuojant modeliavimą gali būti nevertinama.

5. Didžiausi mechaniniai įtempimai nustatyti PBK konteinerio patalpinimo gręžinio ir transportavimo tunelio sankirtoje, o nustatyti maksimalūs poslinkiai vertikalia kryptimi u_y (~0,08 m) yra 3 kartus didesni nei horizontalia kryptimi u_x .

Santrumpos

RBMK – didelės galios kanalinio tipo reaktorius; PBK – panaudotas branduolinis kuras; KBS-3 – Švedijos panaudoto branduolinio kuro laidavimo koncepcija; THM – termo-hidro-mechaniniai procesai.

Gauta 2011 04 11
Priimta 2011 06 20

Literatūra

1. Alexander W. R., McKinley L. *Deep Geological Disposal of Radioactive Waste*. Vol. 9 (Radioactivity in the Environment). Switzerland: Elsevier, 2007. 273 p.
2. IAEA. Scientific and technical basis for the geological disposal of radioactive wastes. In: *Technical Report Series No. 413*. Vienna: IAEA, 2003. 80 p.
3. Tsang C. F., Stephansson O., Hudson J. A. A discussion of thermo-hydro-mechanical (THM) processes associated with nuclear waste repositories. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2000. Vol. 37. P. 397–402.
4. Hudson J. A., Stephansson O., Andersson J., Tsang C. F., Jing L. Coupled T-H-M issues relating to radioactive waste repository design and performance. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2000. Vol. 38. P. 143–161.
5. Thomas H. R., He Y. A coupled heat-moisture transfer theory for deformable unsaturated soil and its algorithmic interpretation. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1997. Vol. 40. P. 3421–3441.
6. Brazauskaitė A., Poškas P. Radionuklidų sklaida iš kristalinėse uolienose įrengto geologinio kapinyno RBMK-1500 panaudotam branduoliniui kurui laidoti. 1. Kapinyno koncepcija. *Energetika*. 2005. T. 51. Nr. 3. P. 70–78.
7. Poškas P., Brazauskaitė A., Narkūnas E., Šmaižys A., Sirvydas A. Generic repository concept for RBMK-1500 spent nuclear fuel disposal in crystalline rocks in Lithuania. *Transactions International Topical Meeting „Topseal-2006“*. Olkiluoto Information Centre, Finland, September 17–20, 2006. Olkiluoto, 2006. P. 1–5.
8. Äspö Hard Rock Laboratory. Annual Report 2008. *SKB Technical Report TR-09-10*. Stockholm: SKB, 2009. 156 p.
9. Dobkevičius M. *Hidrogeodinamika*. Vilnius: Enciklopedija, 2001. 358 p.
10. Sirvydas A., Poškas P. Panaudoto RBMK-1500 branduolinio kuro, palaidoto konceptualiniame kapinyne, temperatūros kitimo modeliavimas. 2. Temperatūros kitimas kristalinėse uolienose įrengtame kapinyne. *Energetika*. 2010. T. 56. Nr. 3–4. P. 260–266.
11. Kanopienė R., Šliaupa S. Et al. *Investigations of Possibilities to Dispose of Spent Nuclear Fuel in Lithuania: a Model Case*. Vol. 1 (Suitability of geological environment in Lithuania for disposal of spent nuclear fuel). Vilnius: Geological Survey of Lithuania, 2005. 66 p.
12. Hermann O. W., Westfall R. M. *ORIGEN-S: SCALE System Module to Calculate Fuel Depletion, Actinide Transmutation, Fission Product Build-up and Decay and Associated Radiation Source Terms*. Rev. 5. USA: Oak Ridge National Laboratory, 1997. 149 p.
13. Park J. H., Kuh J. E., Kwon S., Kang C. H. Thermal analysis of high level radioactive waste repository using a large model. *Journal of the Korean Nuclear Society*. 2000. Vol. 32. P. 244–253.
14. Design premises for canister for spent nuclear fuel. *SKB Technical Report TR-98-08*. Stockholm: SKB, 1998. 51 p.

Darius Justinavičius, Povilas Poškas

MODELLING OF THERMO-HYDRO-MECHANICAL PROCESSES IN A GEOLOGICAL REPOSITORY OF SPENT NUCLEAR FUEL

Summary

The construction of a spent nuclear fuel (SNF) repository in a geological structure will impact the stable geological environment that has settled over centuries, and the disposed off SNF containers will release a residual amount of heat. These changes in the environment of a geological repository will lead to a simultaneous and coupled heat exchange (T), fluids (moisture and air) transfer (H) and mechanical (M) processes. A comprehensive assessment of the latter processes is important for the general safety of the repository.

The numerical assessment of the processes around one canister with the RBMK-1500 SNF, disposed off in a hypothetical repository in crystalline rocks, is presented in the paper. Based on the performed analysis, temperature distribution in the system and the highest temperature have been determined, the dynamics of water saturation within the material of engineering barriers and mechanical displacements in the engineering barriers have been assessed. Results of the heat transfer modelling have revealed the importance of coupled heat and hydrodynamic processes for the maximum value of temperature in the engineering barriers, whereas the impact of mechanical processes was insignificant. Moreover, the highest temperature close to the surface of the canister does not exceed the allowable 100 °C.

Key words: geological repository, crystalline rocks, RBMK-1500 spent nuclear fuel, thermo-hydro-mechanical processes, numerical modelling

Дарюс Юстинавичус, Повилас Пошкас

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМО-ГИДРО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГЛУБИННОМ МОГИЛЬНИКЕ ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

Резюме

Установка могильника отработанного ядерного топлива (ОЯТ) в геологических структурах нарушит стабильность, сложившуюся на протяжении столетий, а захороненные контейнеры будут выделять определенное количество остаточной теплоты. Данные изменения в окружающей среде геологического могильника повлекут одновременные и взаимосвязанные процессы теплообмена (Т), переноса флюидов (влаги воздуха) (Г) и механические (М). Комплексная оценка данных процессов важна для общей безопасности могильника.

В настоящей статье представлены результаты числовой оценки комплексных процессов ТГМ вокруг одного из контейнеров с находящимся в нем ОЯТ РБМК-1500, помещенного в гипотетическом глубинном могильнике в кристаллических горных породах. Во время анализа были установлены распределение температуры в моделируемой системе, наивысшая температура, оценены динамика насыщения водой материала инженерных барьеров и возможные механические отклонения в инженерных барьерах. Результаты моделирования рассеяния тепла показали влияние тепловых и гидродинамических процессов и их взаимодействия на максимальную температуру в инженерных барьерах, в то время как механические процессы на нее не влияют. Кроме того, было установлено, что наивысшая температура у поверхности захораниваемого контейнера не превышает допустимых 100 °C.

Ключевые слова: глубинный могильник, кристаллические горные породы, отработанное ядерное топливо РБМК-1500, термо-гидро-механические процессы, числовое моделирование