

Panaudoto RBMK-1500 branduolinio kuro, palaidoto konceptualiam kapinyne, temperatūros kitimo modeliavimas

1. Temperatūros kitimas molingose uolienose įrengtame kapinyne

Arūnas Sirvydas,

Povilas Poškas

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

Šiame straipsnyje pateikti panaudoto RBMK-1500 branduolinio kuro temperatūros kitimo konceptualiam kapinyne, įrengtame molingose uolienose, modeliavimo rezultatai. Temperatūros kitimo modeliavimui tunelyje buvo sukurtas trimatis modelis. Kadangi analizuojamas objektas yra simetriškas, tai buvo modeliuojama tik ¼ jo dalis, siekiant paspartinti kompiuterinius skaičiavimus. Visą modelio tinklą sudarė maždaug 400000 aštuonmazgių elementų. Tinklelis buvo sutankintas labiausiai dominančiose vietose, t. y. plieno, bentonito ir kasimo sutrikdymo zonose. Nestacionarus skaitinis temperatūros pasiskirstymo panaudoto branduolinio kuro tunelyje modeliavimas buvo atliekamas naudojant FLUENT 6.1 kompiuterinę programą. Modeliavimas atliktas esant tiek skirtingam atstumui tarp kanistrų, tiek skirtingam bentonito drėgnumui. Temperatūros modeliavimo panaudoto branduolinio kuro patalpinimo tuneliuose rezultatai rodo atstumo tarp kanistrų ir bentonito šilumos laidumo svarbą nustatant kanistro paviršiaus, bentonito ir supančiųjų uolienų temperatūras. Atlikus modeliavimą taip pat nustatyta, kad kanistrus būtina atskirti 3 m atstumu, kad aukščiausia kanistro paviršiaus temperatūra neviršytų leistinos 100 °C temperatūros.

Raktažodžiai: panaudotas RBMK-1500 branduolinis kuras, konceptualus kapinynas molingose uolienose, temperatūros kitimas, skaitinis modeliavimas

1. ĮVADAS

Ilgalaikės studijos pasirenkant tinkamiausią geologinę formaciją, kurioje galėtų būti palaidotas panaudotas branduolinis kuras (PBK), parodė, kad kristalinės uolienos ir molingos uolienos yra tam tinkamiausios.

Šveicarijos atliekų laidojimo koncepcijų ekspertų grupės (EKRA) pasiūlyta koncepcija panaudotam branduoliniui kurui laidoti molingose aplinkoje, kanistrus kapinyne talpinant horizontaliai buvo pasirinkta ir RBMK-1500 panaudoto branduolinio kuro laidojimui molingose uolienose Lietuvoje [1]. Kapinyną sudaro tokie pagrindiniai elementai (1 pav.):

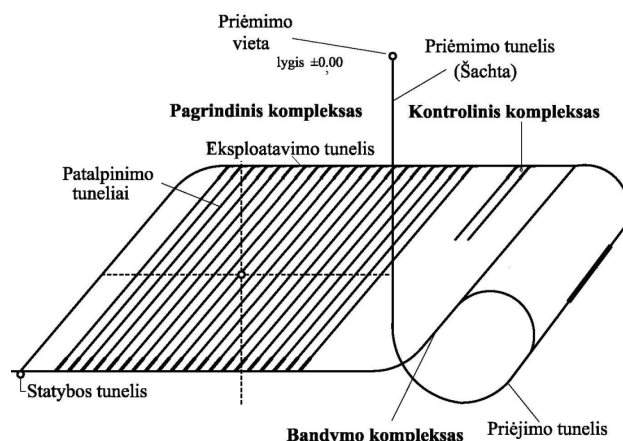
- priėmimo tunelis, statybos ir eksploataavimo tuneliai, atliekų priėmimo tunelis;
- bandymo ir kontrolinis kompleksai;
- patalpinimo tuneliai.

Atliekų patalpinimo tuneliai, eksploataavimo ir statybos tuneliai yra iškasami tam tikrame gylyje, pasirinktoje geologinėje formacijoje. Patalpinimo tuneliai yra apie kelių šimtų metrų ilgio ir išdėstyti lygiagrečiai, kas 40 m. Patalpinimo tunelių skersmuo – 2,5 m. Tuneliai yra orientuojami maksimalaus uolienos įtempimo kryptimi tam, kad padidintų jos stabilumą.

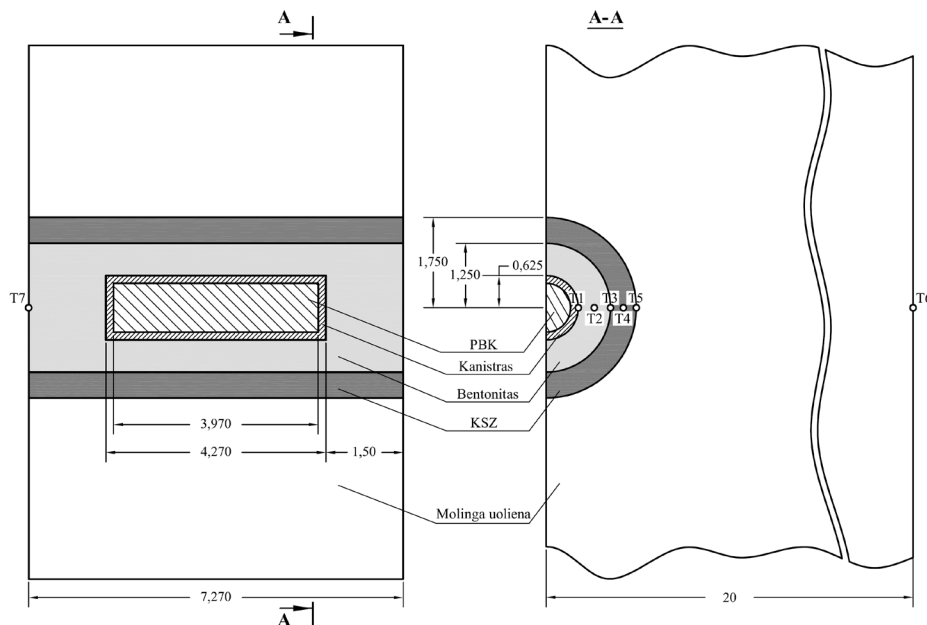
Dažniausiai tunelių kasimui naudojama tunelių rausimo mašina (TRM). Kasant tunelį TRM, apie iškastą ertmę susidaro tam tikras kasimo paveiktos uolienos sluoksnis (kurio savybės

šiek tiek skiriasi, lyginant su nepaveikta uoliena), kuris dar vadinamas kasimo sutrikdymo zona.

Šioje koncepcijoje PBK laidojimui kapinyne naudojami mažanglio plieno kanistrai. Šie kanistrai yra storasieniai, kad korozija ilgą laiką negalėtų paveikti PBK. Kanistrai su transportavimo apsauga bėgiais yra atvežami prie patalpinimo tunelių pradžios. Čia kanistrai perkeliama ant patalpinimo vagonų ir bėgiais nuvežami į galutinę patalpinimo vietą (t. y. patalpinimo tunelį) ant bentonito bloką. Pastčius kanistrą į reikiamą vietą ertmė



1 pav. Konceptualus kapinyno vaizdas



2 pav. Analizuojamos koncepcinio kapiny-
no srities dalinis vaizdas su pagrindiniais
matmenimis (m), sluoksnių pavadinimais
ir temperatūros nustatymo taškų vietomis
(T1–T7)

aplink kanistrą (ir tarp kanistrų) irgi yra užpildoma bentonitu. Bentonitas skirtas kanistrus izoliuoti nuo geologinėje aplinkoje vykstančių procesų. Jis taip pat apsaugo kanistrą nuo mechaninių pažeidimų, jei uolienos nedaug juda.

Kai kapinynas yra visai užpildytas, visi tuneliai ir šachtos uždaromos (dažniausiai tam naudojamas bentonito–smėlio mišinys) ir užsandarinamos (tam naudojamas labai supresuotas bentonitas).

Šiame straipsnyje pateikiamas temperatūros kitimo modeliavimas RBMK-1500 PBK conceptualiame kapinyne, įrengtame molingo uolienoje.

2. TYRIMŲ METODIKA

Temperatūros kitimo modeliavimui PBK kapinyne naudota kompiuterinė programa FLUENT 6.1 [2]. FLUENT – tai šiuolaikinė kompiuterinės takijų medžiagų dinamikos programa, kuri plačiai taikoma visame pasaulyje, modeliuojant takijų medžiagų judėjimą ir šilumos mainus sudėtingose dvimatėse arba trimatėse sistemose. Ši programa pagrindines lygtis sprendžia naudodama kontrolinius tūrius. Kontrolinius tūrius sukuriame tinklelio pagalba, kuris kartu aprašo ir modeliuojamos srities geometriją.

Šiame darbe buvo priimta, kad šiluma per PBK kanistrą, bentonitą ir supančiąsias uolienas perduodama tik laidumu, o perdavimas konvekcija yra neįžymus.

Modeliavimo srities geometrija pavaizduota 2 paveiksle. Panaudoto branduolinio kuro kanistrai tunelyje (atstumas tarp tunelių – 40 m) yra išdėstyti horizontaliai. Kanistro ilgis – 4,27 m, o jo spindulys – 0,625 m. Kanistro sienelės storis yra 0,15 m. Tuštuma aplink kanistrą ir tarp kanistrų yra užpildyta bentonitu.

Kasimo sutrikdymo zonos sluoksnis yra tuoj už bentonito, kaip parodyta 2 paveiksle. Tunelio skersmuo – 2,5 m. Modeliavimas buvo atliktas esant dviem skirtingiems atstumams tarp kanistrų – 2 ir 3 m.

Plieninis laidojimo kanistras turi atitikti ne tik mechaninius, cheminius ir kt., bet ir šiluminius reikalavimus. Buvo priimta,

jog maksimali kanistro paviršiaus temperatūra negali viršyti 100 °C, kad būtų išvengta virimo prie kanistro paviršiaus (virimo metu kanistro paviršius gali prisotinti druskomis, kurios gali sukelti koroziją, taip pat pakeisti bentonito savybes ir pan.).

Taškai T1–T7 žymi vietas, kuriose buvo modeliuojamos temperatūros:

- T1 – temperatūra ant išorinio kanistro paviršiaus;
- T2 – temperatūra bentonito sluoksnio centre;
- T3 – temperatūra ant išorinio bentonito paviršiaus;
- T4 – temperatūra K SZ sluoksnio centre;
- T5 – temperatūra K SZ sluoksnio išorėje;
- T6 – temperatūra molingoje uolienoje;
- T7 – temperatūra vidurio taške tarp kanistrų.

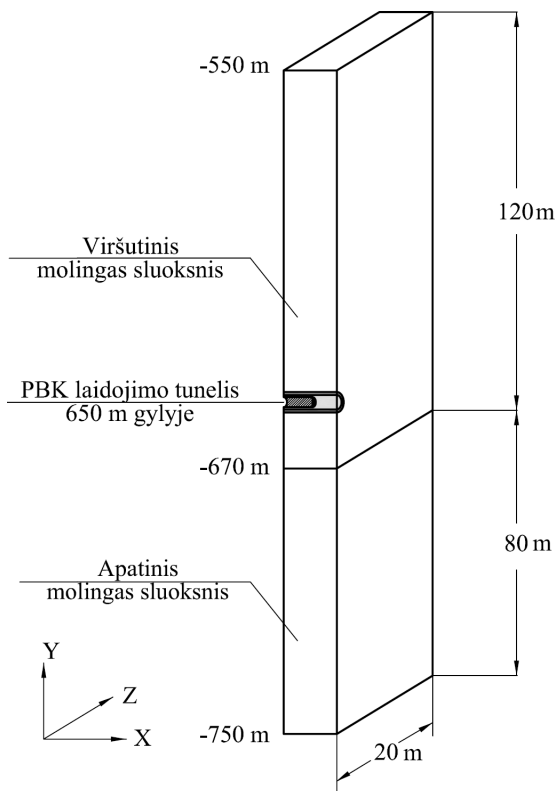
3 paveiksle pavaizduotas trimatis modelio geometrijos vaizdas su pagrindiniais matmenimis. Modeliavimo metu molingo sluoksnio storis (≈ 200 m) buvo padalytas į dvi dalis – viršutinį (kurio šilumos laidumas yra didesnis dėl didesnio ten esančio kvarco kiekio) ir apatinį (kurio šilumos laidumas yra mažesnis dėl mažesnio ten esančio kvarco kiekio). PBK laidojimo tunelis yra įrengtas viršutiniame molingame sluoksnyje – 650 m gilyje nuo žemės paviršiaus (molingo sluoksnio viduryje).

Kadangi analizuojama sritis yra simetriška, tai buvo modeliuojama tik $\frac{1}{4}$ jos dalis, tam, kad pagreitintume kompiuterinius skaičiavimus. Dalis trimačio tinklelio parodyta 4 paveiksle. Visą modelio tinklelį sudarė maždaug 400000 aštuonmazgių elementų. Tinklelis buvo sutankintas labiausiai dominančiose vietose, t. y. kanistro, bentonito ir kasimo sutrikdymo zonose.

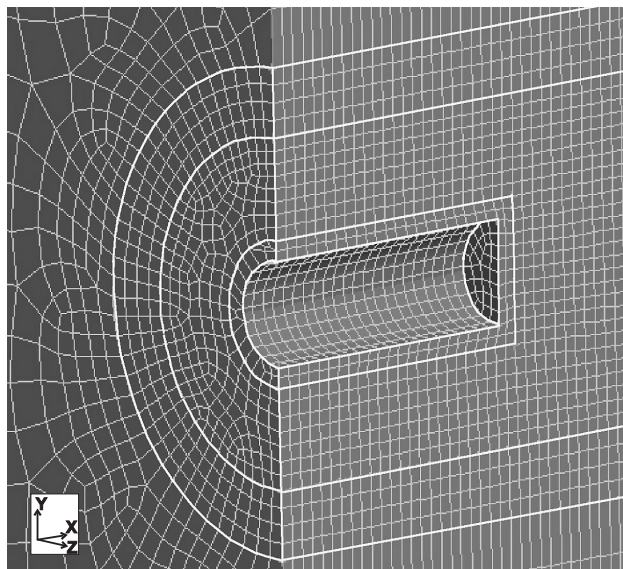
Šilumos srautai ant vertikalių modelio pusių (simetrijos plokštumų) buvo priimti lygūs nuliui.

Kanistrai yra skirti saugoti 16 (32 pluoštus) panaudoto RBMK-1500 branduolinio kuro rinklių, kurių pradinis išdrišinimas 2,8 %, o išdegimas 30 MWd/kgU. Šilumos išsiskyrimas iš PBK kanistro po 50 metų tarpinio saugojimo buvo įvertintas naudojant programą ORIGEN-S [3].

Kadangi Lietuvoje nepakanka informacijos apie geologinių formacijų geotechnines savybes, todėl modelyje naudotų medžiagų šilumos laidumai ir specifinės šilumos buvo paimtos iš



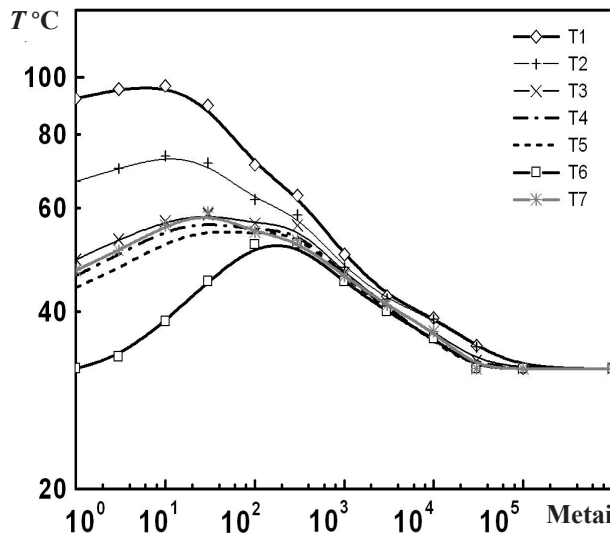
3 pav. Trimatis analizuojamo uždavinio geometrijos vaizdas



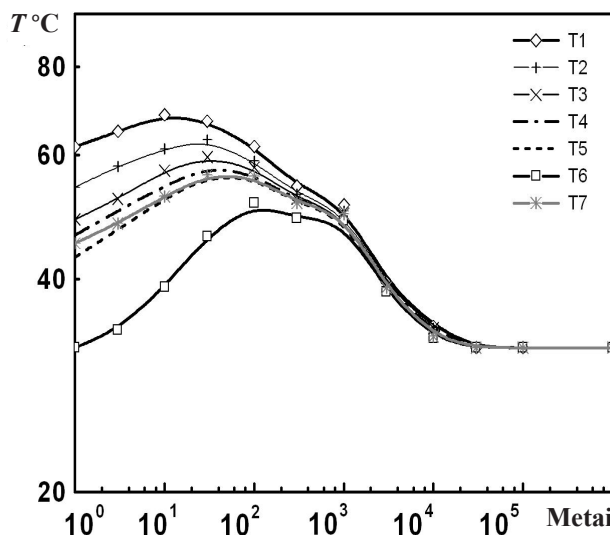
4 pav. Dalinis trimačio tinklelio vaizdas

1 lentelė. Analizuoti atvejai

Atvejis	Atstumas tarp kanistrų m	Bentonito drėgnumas
1	3	Mažai drėgnas (~2 % drėgmės)
2	3	Prisotintas vandeniu (~6 % drėgmės)
3	2	Mažai drėgnas (~2 % drėgmės)
4	2	Prisotintas vandeniu (~6 % drėgmės)



5 pav. Temperatūros kitimas laike PBK patalpinimo tunelyje, esant mažam bentonito šilumos laidumui (mažai drėgnam bentonitui)



6 pav. Temperatūros kitimas laike PBK patalpinimo tunelyje, esant prisotintam vandeniu bentonitui (didelis bentonito šilumos laidumas)

[4] šaltinio. Kai bus atlikta daugiau įvairių Lietuvos grunto uolienų geologinių tyrimų, tada pirmenybę bus galima teikti toms uolienų savybėms.

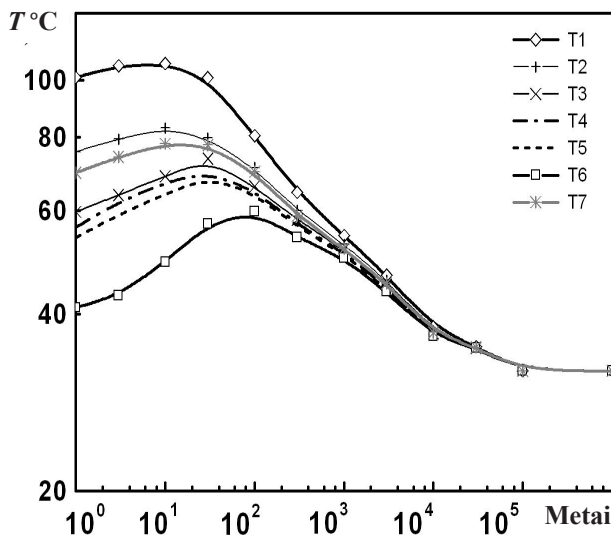
3. TEMPERATŪROS KITIMO MODELIAVIMO REZULTATAI

Modeliavimas buvo atliktas esant tiek skirtingiems atstumams tarp kanistrų, tiek skirtingam bentonito drėgnumui. Iš viso analizuoti keturi atvejai, kurie pateikti 1 lentelėje.

Mažas šilumos laidumas yra tada, kai bentonitas beveik sausas (~2 % drėgmės), ir apie 3 kartus didesnis, kai bentonitas prisotintas vandeniu [5]. Panašūs skirtumai yra ir tarp bentonito specifinių šilumų.

1 atvejis

Temperatūros kitimas laike horizontaliame PBK patalpinimo tunelyje pavaizduotas 5 paveiksle (šiam ir kituose paveiksluose



7 pav. Temperatūros kitimas laike PBK patalpavimo tunelyje, esant mažam bentonito šilumos laidumui (mažai drėgnam bentonitui) ir 2 m atstumui tarp kanistrų

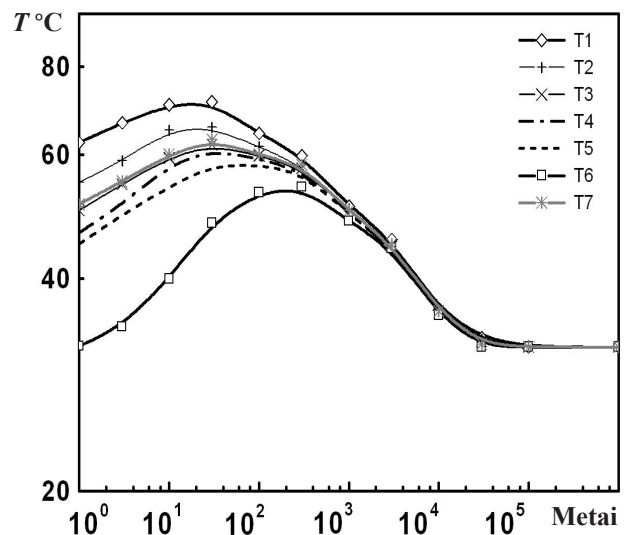
10⁰ – 1 metai, kai kanistras patalpintas tunelyje (t. y. jau praėjus 50 m po laikino kanistro saugojimo)). Rezultatai rodo, kad esant tikėtinų savybių (mažesniai drėgmės kiekiui ir mažesniai laidumui) bentonitui, aukščiausia (≈ 97 °C) plieninio kanistro išorės temperatūra (T1) pasiekama per keletą metų. Maždaug po 100 metų ši temperatūra nukrenta iki 71 °C. Temperatūra bentonito sluoksniu centre (T2) visą laiką išlieka žemesnė nei 75 °C. Molingos uolienos temperatūra (T6) pasiekia pikinę 52 °C reikšmę praėjus maždaug 150 metų nuo kanistro patalpavimo į tunelį. Modeliavimo rezultatai taip pat rodo, jog temperatūra vidurio taške tarp kanistrų (T7) niekada nepakyla aukščiau kaip 60 °C. Tai pikinė taško T7 reikšmė, kuri pasiekama po maždaug 30 metų.

2 atvejis

Temperatūros pasiskirstymas PBK laidavimo tunelyje buvo modeliuotas ir esant drėgnesniai bentonitui (t. y. didesniai šilumos laidumui). Šio modeliavimo rezultatai parodyti 6 paveiksle. Matyti, kad tokiu atveju pasiekiamos temperatūros yra daug žemesnės nei 1-uoju atveju. Aukščiausia kanistro paviršiaus temperatūra T1 ≈ 68 °C čia irgi pasiekama maždaug praėjus 10 metų po kanistro patalpavimo į tunelį (6 pav.). Po 100 metų ši temperatūra sumažėja iki 61 °C. Bentonito sluoksniu vidurio temperatūra (T2) visada išlieka žemesnė nei 65 °C. Aukščiausia uolienos temperatūra (T6) išsilaiko 52–45 °C temperatūros keletą šimtų metų. Rezultatai taip pat rodo, kad temperatūra vidurio taške tarp kanistrų (T7) niekada neviršija 56 °C.

3 atvejis

Taip pat buvo modeliuotas temperatūros pasiskirstymas tuo atveju, kai atstumas tarp kanistrų ne 3, o 2 m ir bentonito drėg-



8 pav. Temperatūros kitimas laike PBK patalpavimo tunelyje, esant prisotintam vandeniu bentonitui (dideliam bentonito šilumos laidumui) ir 2 m atstumui tarp kanistrų

numas (ir šilumos laidumas) yra mažas. Šio modeliavimo rezultatai parodyti 7 paveiksle.

Šiuo atveju (kai atstumas tarp kanistrų 2 m) rezultatai rodo, kad pasiekiamos aukštesnės temperatūros, nei tuo atveju, kai atstumas tarp kanistrų buvo 3 m (5 pav.). Aukščiausia kanistro paviršiaus temperatūra (T1 ≈ 107 °C) pasiekama per keletą metų, o po 40 metų ši temperatūra jau nukrenta iki reikšmės, mažesnės negu 100 °C. Temperatūra viduriniame bentonito sluoksniu taške (T2) keletą šimtų metų išsilaiko 10 laipsnių aukštesnė, palyginus su atveju, kai atstumas tarp kanistrų buvo 3 metrai. Aukščiausia temperatūra uolienoje (T6) išlieka 61–50 °C taip pat keletą šimtų metų. Modeliavimo rezultatai rodo, kad pikinė temperatūra tarp kanistrų (T7) yra ≈ 78 °C. Ši temperatūra yra apie 18 laipsnių aukštesnė, palyginti su apskaičiuotąja, atvejui, kai kanistrai buvo nutolę 3 m atstumu.

4 atvejis

Temperatūros kitimas laike PBK talpinimo tunelyje, kai atstumas tarp kanistrų 2 m ir esant dideliui bentonito šilumos laidumui, parodytas 8 paveiksle. Esant tokiam bentonito laidumui, temperatūros tiek kanistro paviršiuje, tiek uolienose yra gerojai žemesnės nei 75 °C. Temperatūra vidurio taške tarp kanistrų (T7) pasiekia aukščiausią ≈ 63 °C (78 °C buvo tuo atveju, kai bentonito laidumas šilumai mažas, 7 pav.) reikšmę praėjus 30 metų nuo kanistro patalpavimo tunelyje.

4. REZULTATŲ ANALIZĖ

2 lentelėje pateiktos būdingos didžiausios kanistro paviršiaus (T1), bentonito sluoksniu vidurio (T2) ir bentonito išorinio

2 lentelė. Būdingos aukščiausios temperatūros įvairiais atvejais

Atvejis	T1 °C	T2 °C	T3 °C
1 (mažai drėgnas bentonitas; atstumas tarp kanistrų 3 m)	96,7	73,5	58,6
2 (prisotintas vandeniu bentonitas; atstumas tarp kanistrų 3 m)	68,4	63	59,6
3 (mažai drėgnas bentonitas; atstumas tarp kanistrų 2 m)	106,8	83	73,5
4 (prisotintas vandeniu bentonitas; atstumas tarp kanistrų 2 m)	71,3	65,6	62

paviršiaus (T3) temperatūros, esant skirtingam bentonito drėgnumui (skirtingam bentonito šilumos laidumui) ir skirtingam atstumui tarp kanistrų.

Matyti, kad kanistro paviršiaus temperatūra 1, 2 ir 4 atvejais neviršija leistinos 100 °C temperatūros. 3 atveju temperatūra ne daug viršija 100 °C (106,8 °C) temperatūrą. Visi analizuoti atvejai rodo, kad temperatūra bentonito sluoksnyje neviršija 85 °C.

Iš 2 lentelės akivaizdu, kad žemesnės temperatūros pasiekiamos tada, kai turime prisotintą vandeniu bentonito sluoksnį ir kai atstumas tarp kanistrų 3 m, o aukštesnės – kai bentonitas yra mažai drėgnas ir kai atstumas tarp kanistrų 2 m.

Kaip minėta, modeliavimo metu naudotos tunelio aplinkos medžiagų savybės buvo imtos iš [4] šaltinio ir kai pats laidojimo tunelis yra įrengtas 650 m gylyje. Tačiau Lietuvoje PBK saugyklą planuojama įrengti 350 m gylyje (kambro molyje). Tai reiškia, kad natūrali uolienos temperatūra tokiaame gylyje bus mažesnė. Lietuvoje molingos uolienos sluoksnio storis gali būti panašus arba net mažesnis [1]. Dėl to (jei molingos uolienos sluoksnio storis bus mažesnis, tai leis geriau plisti šilumai) galime teigti, kad kanistro paviršiaus temperatūra bus mažesnė nei buvo gauta modeliavimo metu.

5. IŠVADOS

Atlikus skaitinius šilumos plitimo PBK tunelyje tyrimus galima padaryti šias išvadas:

1. Temperatūros modeliavimo PBK patalpinimo tuneliuose rezultatai rodo atstumo tarp kanistrų ir bentonito šilumos laidumo (drėgnumo) svarbą nustatant kanistro paviršiaus, bentonito ir kitų uolienų temperatūras.

2. Nustatyta, kad esant mažai drėgnam bentonitui ir 3 m atstumui tarp kanistrų, aukščiausia kanistro paviršiaus temperatūra yra artima, tačiau neviršija leistinos 100 °C temperatūros.

Gauta 2008 12 01

Priimta 2009 01 05

Literatūra

- Poškis P., Šmaižys A. et al. Generic Repository Concept for the Deep Geological Disposal of the Spent Nuclear Fuel in Lithuania. Report S/14-374.3.3-18-G-V : 02. Lithuanian Eenergy Institute, 2003.
- Fluent User's Guide. Fluent inc., 2005.
- Hermann O. W., Westfall R. M. ORIGEN-S: SCALE System Module to Calculate Fuel Depletion, Actinide Transmutation, Fission Product Build-up Decay and Associated Radiation Source Terms. Rev. 5, Oak Ridge National Laboratory, 1997.
- Project Opalinus Clay: Safety report. Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Nagra Technical Report NTB 01-04. Wetingen, 2002.
- Deep repository for spent nuclear fuel: SR97-Post-closure safety. SKB Technical Report TR-99-06. Sweden, 1999.

Arūnas Sirvydas, Povilas Poškis

MODELLING OF TEMPERATURE VARIATION IN THE REFERENCE GEOLOGICAL REPOSITORY OF THE RBMK-1500 SPENT NUCLEAR FUEL

1. TEMPERATURE VARIATION IN THE REPOSITORY CLAY FORMATIONS

Summary

The results on the modelling of temperature variation in the reference repository of the RBMK-1500 spent nuclear fuel in clay formations are presented. A 3-dimensional model of the repository was developed in order to evaluate temperature variation. Since the domain is symmetric, only ¼ of this domain was modelled in order to make the computer modelling faster. All the mesh contained about 400000 8-noded elements. The mesh was refined in the areas of interest, i.e. in the canister, bentonite and excavation-disturbed zones. For the time-dependent temperature evolution modelling, the FLUENT 6.1 code was used. The modelling was performed for different distances among the canisters and for different bentonite moisture content. The results of temperature modelling in the spent nuclear fuel emplacement tunnels illustrate the significance of bentonite thermal conductivity for temperatures at the canister surface, bentonite backfill and host rock. The modelling has shown that it is necessary to separate the canisters by a 3-m distance so that their surface temperature should not exceed the permissible level of 100 °C.

Key words: RBMK-1500 spent nuclear fuel, reference repository in clay formations, temperature variation, numerical modelling

Арунас Сирвидас, Повилас Пошкис

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В КОНЦЕПТУАЛЬНОМ МОГИЛЬНИКЕ ДЛЯ ЗАХОРОНЕНИЯ ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА РБМК-1500

1. ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В МОГИЛЬНИКЕ, ОБОРУДОВАННОМ В ГЛИНИСТЫХ МАССИВАХ

Резюме

В настоящей статье представлены результаты моделирования изменения температуры в модельном могильнике для отработанного ядерного топлива РБМК-1500, захороненного в глинистых массивах. Для оценки изменения температуры была создана трехмерная модель могильника. Поскольку объект является симметрическим, то лишь ¼ его часть была моделирована для того, чтобы ускорить компьютерные вычисления. Около 40000 элементов составляло сетку задачи. Сетка была утонченной в зонах стального контейнера, bentонита и в зоне, нарушенной при землерое. Нестационарное моделирование выполнено с помощью компьютерной программы FLUENT 6.1. Моделирование было выполнено для разного расстояния между контейнерами и для разного содержания влаги (разной теплопроводности) bentонита. Результаты моделирования температуры в могильнике захоронения отработанного ядерного топлива показывают влияние теплопроводности и теплоемкости bentонита на температуры поверхности контейнера, в засыпи bentонита и в глинистой породе. После моделирования было установлено, что расстояние между контейнерами должно быть 3 м, чтобы наивысшая температура на поверхности контейнера не превышала допустимого значения (100 °C).

Ключевые слова: отработанное ядерное топливо РБМК-1500, модельный могильник в глинистом массиве, изменение температуры, численное моделирование