VÝPOČETNÍ APLIKACE PRO STANOVENÍ VZÁJEMNÉ VZDÁLENOSTI KONTEJNERŮ ÚLOŽIŠTĚ VYHOŘELÉHO JADERNÉHO PALIVA V HORNINOVÉM MASIVU

Karolina Nedomová, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká Republika. karolina.nedomova@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Článek je zaměřen na popis softwaru pro stanovení vzájemné vzdálenosti betonových kontejnerů úložiště vyhořelého jaderného paliva v horninovém masivu. Analýza transportních procesů v betonovém kontejneru úložiště vyhořelého jaderného paliva, včetně přilehlého horninového masivu, je provedena v příčném řezu. Jako zdroj tepla je uvažováno vyhořelé jaderné palivo typu VVER440 a VVER1000. Pro numerické řešení matematického modelu byla aplikovaná metoda konečných prvků a metoda časové diskretizace. Výsledný algoritmus byl implementován do vlastního výpočetního nástroje vytvořeného v programovacím jazyce MATLAB. Software má podobu samostatně spustitelné aplikace s grafickým uživatelským prostředím, ve kterém je možné zadat různé parametry řešeného kontejneru.

KLÍČOVÁ SLOVA

výpočetní aplikace • teplotní analýza • betonový kontejner • vyhořelé jaderné palivo • vzdálenost kontejnerů v hlubinném úložišti

ABSTRACT

The paper is focused on the description of the software for determining the distance of concrete cask of spent nuclear fuel storage in a rock mass. The analysis of transport processes in the concrete cask of the spent nuclear fuel repository, including the rock mass, is solved in cross-section. The heat source considered is spent nuclear fuel of the VVER440 and VVER1000 type. For the numerical solution of the model, the finite element method and the finite difference method have been employed for the spatial and temporal discretization. The resulting algorithm has been implemented in a computational tool developed in MATLAB programming language. The software is a stand-alone application with graphical user interface, which enables to input various parameters of the analysed cask.

KEYWORDS

computational application • thermal analysis • concrete cask • spent nuclear fuel • distance of casks in rock mass

1. ÚVOD

Pro optimální návrh vzájemné vzdálenosti kontejnerů úložiště vyhořelého jaderného paliva v horninovém masivu je nutné stanovit časový vývoj teploty v kontejneru a v přilehlém horninovém masivu. V tomto článku je popsaná výpočetní aplikace, která byla vytvořena v programovacím jazyce MATLAB, a následně jsou prezentovány a porovnány výsledky pro různé vstupní hodnoty. Jako zdroj tepla je uvažováno vyhořelé jaderné palivo, které ohřívá konstrukci kontejneru a přilehlý horninový masiv hlubinného úložiště pro vodo-vodní reaktor typu VVER440 a VVER1000.

Příspěvek navazuje na předchozí práce autora [2] a [3], které částečně přebírá a doplňuje o popis výpočetní aplikace, která umožňuje přehledné získávání výsledků pro různé materiálové a geometrické varianty.

2. POPIS BETONOVÝCH KONTEJNERŮ

Analyzované kontejnery jsou zobrazeny na Obrázku 1.



Obrázek 1: Konstrukce analyzovaných kontejnerů. Vlevo kontejner pro VVER1000, vpravo pro VVER440. Legenda: (1) nerezové pouzdro s vyhořelým jaderným palivem, (2) betonová zálivka, (3) ocel, (4) beton tlumicí zóny. Zdroj: nakresleno podle návrhu Dr. Khmurovské.

Kontejnery slouží pro dlouhodobé uložení vyhořelého jaderného paliva v hlubinném úložišti. Uvažované kontejnery mají stejné uspořádání jednotlivých vrstev. Uvnitř kontejneru se nachází nere-

^{*} Školitel: Ing. Radek Štefan, Ph.D., FEng.; Ing. Michal Beneš, Ph.D.

zové pouzdro s vyhořelým jaderným palivem. Nerezové pouzdro má průměr 530 mm pro typ VVER440 a nebo průměr 590 mm pro typ VVER1000. Nejblíže k pouzdru se nachází betonová zálivka, tzv. *filler*. Zálivka vyplňuje prostor mezi ocelovým pouzdrem a pouzdrem vyhořelého jaderného paliva. Mezi vnitřním a vnějším ocelovým pouzdrem se nachází beton tlumicí zóny, tzv. *buf fer*. Buffer tvoří hlavní konstrukci kontejneru a snižuje přenos tepla od vyhořelého jaderného paliva do horninového masivu.

3. POUZDRA S VYHOŘELÝM JADERNÝM PALIVEM

Pro ukládání vyhořelého jaderného paliva jsou používána vysoce odolná, hermeticky nepropustná pouzdra s vysokou korozní odolností. Pouzdro s vyhořelým jaderným palivem typu VVER440 obsahuje celkem sedm palivových souborů a má průměr 530 mm. Pouzdro s vyhořelým jaderným palivem typu VVER1000 obsahuje tři palivové soubory a má průměr 590 mm, viz Obrázek 2. Dle [1, s. 27] obsahuje každý palivový soubor VVER440 průměrně 122 kg uranu (kgU) se středním vyhořením 50 MWd /kgU a každý palivový soubor VVER1000 obsahuje průměrně 474 kg uranu (kgU) se středním vyhořením 53 MWd/kgU.



Obrázek 2: Řezy pouzdrem s vyhořelým jaderným palivem. Vlevo typ VVER440, vpravo typ VVER1000. Legenda: (A) nerezový plech, (B) palivová kazeta. Zdroj: nakresleno podle [5, s. 28, s. 31].

4. ZDROJ TEPLA

Celkový tepelný výkon Q [W] vyhořelého jaderného paliva v jednom pouzdru (3 nebo 7 palivových souborů dle typu VVER) v závislosti na čase od vyvezení z aktivní zóny lze uvažovat jako [1, s. 29-30]

$$Q = m \sum_{i=0}^{3} A_i \exp(-B_i \tau), \qquad (1)$$

kde m [tU] je hmotnost uranu v pouzdru přepočtená pro příslušné vyhoření (pro VVER440 m = 0.864 tU a pro VVER1000 m = 1.484 tU, viz [1, s. 29]), τ [roky] je čas od vyvezení paliva z aktivní zóny a A_i a B_i jsou bezrozměrné konstanty pro výpočet měrného zbytkového tepelného výkonu, které lze nalézt v [1, Tab. 4]. Závislost popsaná vztahem (1) je znázorněná na Obrázku 3.

Ve výpočtu je uvažováno, že kontejner s pouzdrem s vyhořelým jaderným palivem bude umístěn do hlubinného úložiště po 65 letech od vyvezení jaderného paliva z aktivní zóny, tj. v čase $\tau = 65$ let. Čas od umístnění kontejneru do hlubinného úložiště je označován jako t [roky], přičemž platí $\tau = t + 65$ let, viz [1].

Pro výpočet je dále nutné stanovit měrný tepelný výkon vyhořelého jaderného paliva definovaný na 1 m³ nerezového pouzdra s vyhořelým palivem v závislosti na čase od umístnění kontejneru



Obrázek 3: Tepelný výkon pouzdra s vyhořelým jaderným palivem typu VVER440 a VVER1000. Zdroj: sestrojeno podle výše uvedených vztahů, srov. [1, s. 30, Obr. 5].

do hlubinného úložiště. Tento měrný výko
n $q \; [{\rm W}\,{\rm m}^{-3}]$ se stanoví jako

$$q = \frac{Q(t+65 \text{ let})}{V},\tag{2}$$

kde Q [W] je celkový tepelný výkon pouzdra s vyhořelým jaderným palivem (viz vztah (1)), t [roky] je čas od umístění kontejneru do hlubinného úložiště a V [m³] je objem pouzdra s vyhořelým jaderným palivem (pro VVER440 V = 0.72 m³ a pro VVER1000 V = 1.27 m³, viz Obrázek 2). Závislost popsaná vztahem (2) je znázorněná na Obrázku 4.



Obrázek 4: Měrný tepelný výkon pouzdra s vyhořelým jaderným palivem typu VVER440 a VVER1000. Zdroj: sestrojeno podle výše uvedených vztahů.

5. VÝPOČETNÍ APLIKACE

Předpokládaný scénář a jednotlivé fáze životního cyklu paliva a kontejneru jsou zobrazeny na Obrázku 5.

V čase od vyvezení paliva z aktivní zóny $\tau = 0$ až $\tau = 65$ let bude vyhořelé jaderné palivo skladováno v meziskladu. V čase



Obrázek 5: Časová osa popisující jednotlivé fáze životního cyklu vyhořelého jaderného paliva a analyzovaného betonového kontejneru.

 $\tau = 65$ let, tj. t = 0, bude nerezové pouzdro s palivovými soubory umístěno do betonového kontejneru. Prostor mezi pouzdrem a vnitřním povrchem kontejneru bude vyplněn betonovou zálivkou (*filler*) a kontejner bude uzavřen. Následně bude kontejner umístěn do hlubinného úložiště. V čase $\tau = 65-165$ let, tj. t = 0-100 let, je stanovován časový vývoj teploty na rozhraní jednotlivých částí kontejneru. Řešené období je na ose zvýrazněno červeně.

Výpočetní software ConCaskB [4] slouží pro analýzu transportních procesů v betonovém kontejneru úložiště vyhořelého jaderného paliva a v přilehlém horninovém masivu. Program byl vytvořen v programovacím jazyce MATLAB a má podobu samostatně spustitelné aplikace s grafickým uživatelským prostředím. Na Obrázku 6 je náhled úvodního okna softwaru.



Obrázek 6: Náhled úvodního okna softwaru.

Jako zdroj tepla se uvažuje vyhořelé jaderné palivo. Software umožňuje uživateli vybrat, zdali analýza nestacionárního vedení tepla bude spočtena pro reaktor typu VVER440 nebo VVER1000. Následně uživatel zadá teplotu v horninovém masivu a osové vzdálenosti umístění kontejnerů v horninovém masivu. Pro výpočet průběhu teplot v kontejneru je nutné zadat tloušť ky analyzovaných vrstev kontejneru a jejich materiálové vlastnosti. Model je řešen zjednodušeně na úrovni příčného řezu kontejnerem. Všechny vstupní informace do výpočtu se zadávají do druhého okna programu viz Obrázek 7.

ConCaskB	_				
Zadání vstupních hodnot ——————					
Typ vodo-vodního reaktoru:	VVER440	~			
HORNINOVÝ MASIV					
Průměrná teplota v horninovém masivu:	20	°C			
Osová vzdálenost kontejnerů - směr x:	82.090	m			
Osová vzdálenost kontejnerů - směr y:	82.090	m			
MOCNOST VRSTEV KONTEJNERU [t]					
Betonová zálivka:	80	mm			
Vnitřní ocelové pouzdro:	25	mm			
Beton tlumící zóny:	650	mm			
Vnější ocelové pouzdro:	25	mm			
OBJEMOVÁ TEPELNÁ KAPACITA [c]					
Betonová zálivka: Vnitřní ocelové pouzdro: Beton tlumící zóny: Vnější ocelové pouzdro:	2112000 4710000 2400000 4710000	Jm ⁻³ K ⁻¹ Jm ⁻³ K ⁻¹ Jm ⁻³ K ⁻¹ Jm ⁻³ K ⁻¹			
			Horninový masiv:	2900000	Jm ⁻³ K ⁻¹
			SOUČINITEL TEPELNÉ VODIVOSTI [λ]		
			Betonová zálivka:	1	Wm ⁻¹ K ⁻¹
Vnitřní ocelové pouzdro:	45	Wm ⁻¹ K ⁻¹			
Beton tlumící zóny:	2	Wm ⁻¹ K ⁻¹			
Vnější ocelové pouzdro:	45	Wm ⁻¹ K ⁻¹			
Horninový masiv:	1.45	Wm ⁻¹ K ⁻¹			
zpět	výpočet				

Obrázek 7: Náhled zadávacího okna softwaru.

Po stisknutí tlačítka výpočet se zobrazí okno softwaru s výsledky. V horní části okna je graf průběhu maximálních teplot v závislosti na čase t = (0, 100) let. V prostřední části je zobrazen výsledek průběhu teplot ve čtvrtině průřezu kontejneru v roce, kdy bylo dosaženo maximální teploty. Ve spodní části okna programu je zapsán údaj o maximální dosažené teplotě včetně údaje ve kterém roce bylo maximální teploty dosaženo. Okno s výsledky je zobrazeno na Obrázku 8. Po zadání nových vstupních hodnot a stisknutí tlačítka výpočet se zobrazí další okno s výsledky tak, aby uživatel měl možnost spočtené výsledky porovnat v oknech vedle sebe.



Obrázek 8: Náhled okna softwaru s výsledky.

6. VÝSLEDKY A DISKUZE

6.1. Porovnání VVER440 a VVER1000

Byla zvolena úloha porovnání uložení vyhořelého jaderného paliva pro typ VVER440 a VVER1000. Tloušť ky jednotlivých vrstev kontejneru pro oba typy byly zvoleny shodné, teplota horninového masivu je uvažovaná 20 °C a kontejnery jsou osově od sebe půdorysně vzdálené 100 m ve směru *x* i ve směru *y*. Vstupní zadání a získané výsledky jsou zobrazeny na Obrázku 9. Ze získaných výsledků vidíme, že pro stejné vstupní parametry byla maximální teplota v průřezu T = 100.7 °C pro VVER440 a T = 115.1 °C pro VVER1000. Maximálních teplot pro obě úlohy bylo dosaženo v t = 12 let od uskladnění do hlubinného úložiště. Rozdíl výsledných maximálních teplot je přibližně 14.3 %.

6.2. Vliv teploty v horninovém masivu

Další úloha byla zvolená pro různé teploty v horninovém masivu. Různé zdroje uvádí různé teploty v horninovém masivu. Vstupní hodnoty pro oba kontejnery byly zvolené shodné, byl použit typ VVER440, kontejnery jsou od sebe osově vzdálené 100 m ve směru *x* i ve směru *y*. Pro první kontejner byla zvolená teplota horninového masivu 20 °C a pro druhý 15 °C. Vstupní zadání a získané výsledky jsou zobrazeny na Obrázku 10. Ze získaných výsledků vidíme, že maximální teplota v průřezu je T = 100.7 °C pro pro $t_{1_0} = 20$ °C a T = 95.7 °C pro $t_{2_0} = 15$ °C. Maximálních teplot pro obě úlohy bylo dosaženo v t = 12 let od uskladnění do hlubinného úložiště. Rozdíl výsledných maximálních teplot je přibližně 5.2 %.

6.3. Vliv geometrie rastru

S využitím stejné plochy pro rozmístění stejného počtu kontejnerů v půdoryse byly použity dva způsoby rozmístění. První varianta je pro čtvercovou mřížku, kdy kontejnery jsou od sebe vzdálené 100 m ve směru x i ve směru y. Ve druhé variantě jsou kontejnery od sebe vzdáleny 125 m ve směru x a 80 m ve směru y. Ve třetí variantě jsou kontejnery od sebe vzdáleny 200 m ve směru x a 50 m ve směru y. Vstupní hodnoty pro oba kontejnery byly zvolené shodné, byl použit typ VVER440. Vstupní zadání a získané výsledky pro variantu 2 a 3 jsou zobrazeny na Obrázku 11. Výsledky pro varinatu 1 jsou zobrazeny na Obrázku 10. Ze získaných výsledků vidíme, že maximální teplota v průřezu je T = 100.7 °C pro rastr 100 x 100 m, T = 100.7 °C pro rastr 125 x 80 m a T = 101.0 °C pro rastr 200 x 50 m. Rozdíl výsledných maximálních teplot je zanedbatelný.

7. ZÁVĚR

V článku byla prezentována numerická analýza vývoje teploty v betonovém kontejneru úložiště vyhořelého jaderného paliva. Matematický model sdílení tepla byl implementován do vlastního výpočetního nástroje sestrojeného v programu MATLAB a má podobu samostatně spustitelné aplikace s grafickým uživatelským prostředím. Vytvořený software umožní snadno analyzovat a porovnávat kontejnery s jinými vstupními parametry (geometrie rozmístění kontejnerů a vlastnosti použitých materiálů).

PODĚKOVÁNÍ

Článek byl vypracován za podpory Studentské grantové soutěže ČVUT, projekt č. SGS24/039/OHK1/1T/11.

Reference

- D. Kobylka. Optimalizace vzájemné vzdálenosti ÚOS. Technická zpráva číslo 135/2017. SÚRAO, 2019.
- [2] K. Nedomová, R. Štefan, and M. Beneš. Numerická analýza vývoje teploty v betonovém kontejneru úložiště vyhořelého jaderného paliva typu VVER-440. In *PhD Workshop 2020*, Praha, 2020. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra betonových a zděných konstukcí.
- [3] K. Nedomová, R. Štefan, and M. Beneš. Numerická analýza vývoje teploty v betonovém kontejneru úložiště vyhořelého jaderného paliva tzpu VVER440 a VVER1000. In *PhD Workshop 2023*, Praha, 2023. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra betonových a zděných konstukcí.
- [4] K. Nedomová, R. Štefan, and M. Beneš. ConCaskB - Analysis of Transport Processes in Concrete Cask and Rock Mass for Storage of Spent Nuclear Fuel. In http://people.fsv.cvut.cz/www/stefarad/software/concaskb/concaskb.html, Praha, 2024. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra betonových a zděných konstukcí.
- [5] I. Pospíšková, A. Vokál, F. Fiedler, I. Prachař, and P. Kotnour. Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě. Průvodní zpráva. UJV Řež, a.s., 2012.



Obrázek 9: Vstupní a výstupní okna programu pro úlohu porovnání VVER440 a VVER1000.



Obrázek 10: Vstupní a výstupní okna programu pro úlohu vliv teploty horninového masivu.



Obrázek 11: Vstupní a výstupní okna programu pro úlohu vliv geometrie rastru