

VÝPOČETNÍ APLIKACE PRO NUMERICKOU ANALÝZU VÝVOJE TEPLoty V BETONOVÉM KONTEJNERU ÚLOŽIŠTĚ VYHOŘELÉHO JADERNÉHO PALIVA

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 analýzu transportních procesů v betonovém kontejneru úložiště vyhořelého jaderného paliva typu VVER-440. Je popsána konstrukce analyzovaného kontejneru, jeho geometrie a materiálové řešení. Dále je popsán matematický model sdílení tepla, ve kterém je jako zdroj tepla uvažováno vyhořelé jaderné palivo. Pro numerické řešení matematického modelu byla aplikována metoda konečných prvků a metoda časové diskretizace. Výsledný algoritmus byl implementován do vlastního výpočetního nástroje vytvořeného v programovacím jazyce Python. Software má podobu samostatné spustitelné aplikace s grafickým uživatelským prostředím, ve kterém je možné zadat různé parametry řešeného kontejneru.

KLÍČOVÁ SLOVA

výpočetní aplikace • teplotní analýza • hydratační teplo • betonový kontejner • vyhořelé jaderné palivo

ABSTRACT

The paper is focused on the description of the software for analysis of transport processes in a concrete cask for storage of VVER-440 type spent nuclear fuel. A design of the analysed cask is described as well as its geometry and material solution. Further, a heat transfer mathematical model is described, with the spent nuclear fuel as the heat source. 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, respectively. The resulting algorithm has been implemented in a computational tool developed in Python 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 • hydration heat • concrete cask • spent nuclear fuel

1. ÚVOD

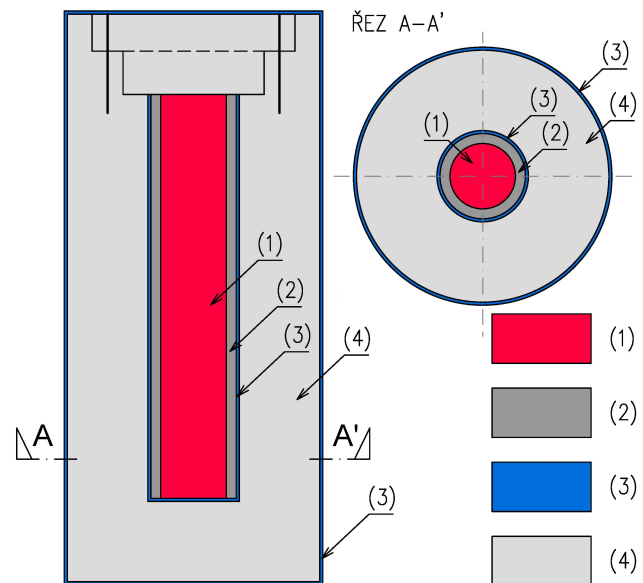
Pro optimální návrh kontejneru úložiště vyhořelého jaderného paliva je nutné stanovit časový vývoj teploty v různých částech kontejneru. V tomto článku je popsána výpočetní aplikace, která byla vytvořena v programovacím jazyce Python a následně byly prezentovány a porovnány výsledky pro různé vstupní hodnoty. Jako

zdroj tepla je uvažováno vyhořelé jaderné palivo, které ohřívá konstrukci kontejneru a přilehlý horninový masiv hlubinného úložiště.

Příspěvek navazuje na předchozí práce [3] a [4], které částečně přebírá a doplňuje o popis výpočetní aplikace, která umožňuje jednoduché a přehledné získávání výsledků.

2. POPIS ŘEŠENÉHO KONTEJNERU

Analyzovaný betonový kontejner je zobrazen na Obrázku 1. Kontejner slouží pro dlouhodobé uložení vyhořelého jaderného paliva typu VVER-440 v hlubinném úložišti.



Obrázek 1: Konstrukce analyzovaného kontejneru. Legenda: (1) nerezové pouzdro s vyhořelým jaderným palivem typu VVER-440, (2) betonová zálivka, (3) ocel, (4) beton tlumící zóny. Zdroj: nakresleno podle návrhu Dr. Khmurovské.

Pro účely teplotní analýzy je nutné definovat teplotní vlastnosti uvažovaných materiálů, tedy objemovou tepelnou kapacitu c [$\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$] (jedná se o součin objemové hmotnosti ρ [kg m^{-3}] a měrné tepelné kapacity c_p [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]) a součinitel tepelné vodivosti λ [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]. Vlastnosti materiálů analyzovaného kontejneru (Obrázek 1) a přilehlého horninového masivu hlubinného

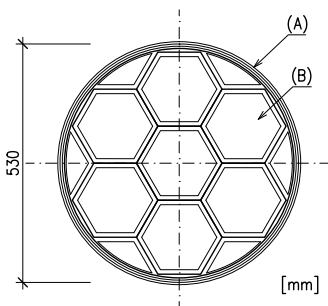
* Školitel: Ing. Radek Štefan, Ph.D., FEng.; Ing. Michal Beneš, Ph.D.

úložiště budou v rámci tohoto článku uvažovány dle Tabulky 1.

Tabulka 1: *Materiálové vlastnosti. Zdroj: [7, Tab. 2], [1].*

Materiál	c [$\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$]	λ [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]
Pouzdro s palivem	7850×500	40
Betonová zálivka	2400×880	1
Ocel	7850×600	45
Beton tlumící zóny	2.4×10^6	2
Horninový masiv	2.9×10^6	1.45

Pouzdro s vyhořelým jaderným palivem obsahuje celkem sedm palivových souborů, viz Obrázek 2. Dle [2, s. 27] obsahuje každý palivový soubor průměrně 122 kg uranu (kgU) se středním vyhořením 50 MWd/kgU.



Obrázek 2: Řez pouzdrem s vyhořelým jaderným palivem. Legenda: (A) nerezový plech tl. 5 mm, (B) palivová kazeta typu VVER-440. Zdroj: nakresleno podle [6, Obr. 5].

Celkový tepelný výkon Q [W] vyhořelého jaderného paliva v jednom pouzdru (7 palivových souborů) v závislosti na čase od vyvezení z aktivní zóny lze uvažovat jako [2, s. 29–30]

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

kde m [tU] je hmotnost uranu v pouzdru přepočtená pro příslušné vyhoření (v našem případě $m = 0.864$ tU, viz [2, s. 30]), τ [roky] je čas od vyvezení paliva z aktivní zóny a A_i a B_i jsou konstanty, které lze nalézt v [2, Tab. 4].

Závislost popsáná vztahem (1) je znázorněná na Obrázku 3.

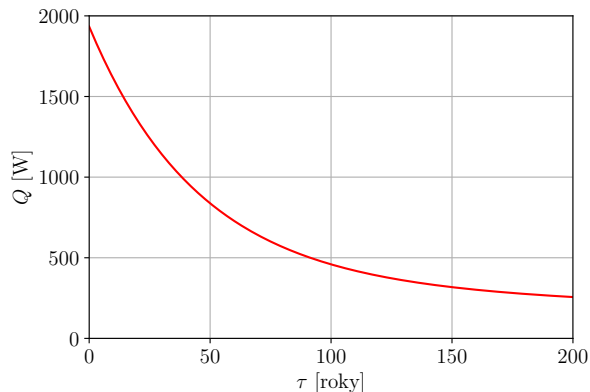
Ve výpočtu budeme uvažovat, že kontejner s pouzdrem s vyhořelým jaderným palivem bude umístěn do hlubinného úložiště po 65 letech od vyvezení jaderného paliva z aktivní zóny, tj. v čase $\tau = 65$ let. Čas od umístění kontejneru do hlubinného úložiště budeme označovat jako t [roky], přičemž platí $\tau = t + 65$ let, viz [2].

Pro výpočet je dále nutné stanovit měrný tepelný výkon vyhořelého jaderného paliva definovaný na 1 m^3 nerezového pouzdra s vyhořelým palivem v závislosti na čase od umístění kontejneru do hlubinného úložiště. Tento měrný výkon q [W m^{-3}] můžeme stanovit jako

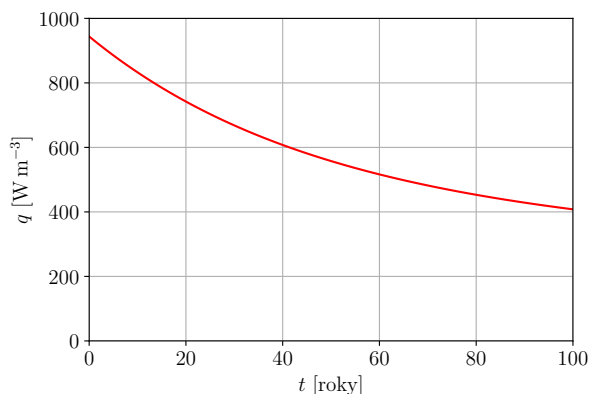
$$q = \frac{Q(t + 65 \text{ let})}{V}, \quad (2)$$

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 [m^3] je objem pouzdra s vyhořelým jaderným palivem (v našem případě $V = 0.72 \text{ m}^3$, viz Obrázek 1).

Závislost popsáná vztahem (2) je znázorněná na Obrázku 4.

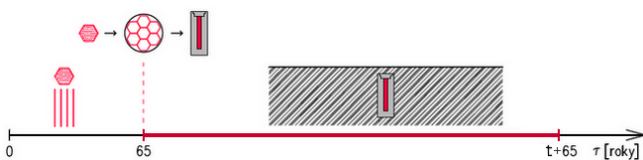


Obrázek 3: Tepelný výkon pouzdra s vyhořelým jaderným palivem typu VVER-440. Zdroj: sestrojeno podle výše uvedených vztahů, srov. [2, Obr. 5].



Obrázek 4: Měrný tepelný výkon pouzdra s vyhořelým jaderným palivem typu VVER-440. Zdroj: sestrojeno podle výše uvedených vztahů.

3. VÝPOČETNÍ APLIKACE

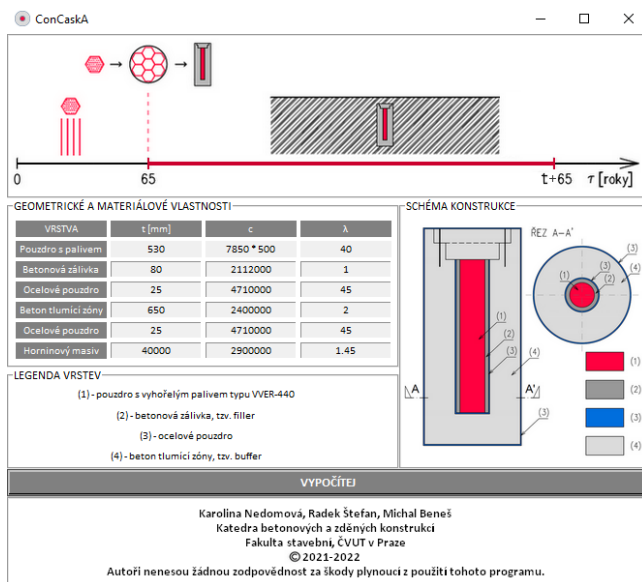


Obrázek 5: Časová osa popisující jednotlivé fáze životního cyklu paliva a analyzovaného betonového kontejneru.

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 $\tau = 65$ 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 ob-

dobí je na ose zvýrazněno červeně.

Výpočetní software ConCaskA [5] slouží pro analýzu transportních procesů v betonovém kontejneru úložiště vyhořelého jaderného paliva a v přilehlém horninovém masivu. Jako zdroj tepla se uvažuje vyhořelé jaderné palivo. Hydratační teplo v betonové zálivce kontejneru, které bylo součástí předchozí práce [4], není uvažováno, neboť je předpokládáno, že proces hydratace v betonových vrstvách kontejneru byl ukončen před uložením kontejneru do hlubinného úložiště. Software umožňuje zadat tloušťky analyzovaných vrstev kontejneru a materiálové vlastnosti uvedené v Tabulce 1. Model je řešen zjednodušeně na úrovni příčného řezu kontejnerem – úloha je uvažována jako rotačně symetrická. Podrobný popis implementovaného modelu lze nalézt v publikacích [3] a [4]. Software byl vytvořen v programovacím jazyce Python a má podobu samostatně spustitelné aplikace s grafickým uživatelským prostředím. Software je dostupný přes webové stránky autorů, Obrázek 6.



Obrázek 6: Náhled úvodního okna softwaru.

4. VÝSLEDKY A DISKUZE

Jako referenční příklad byla zvolena úloha se třemi kontejneru s různými tloušťkami betonu tlumící zóny tzv. buffer. Buffer je část konstrukce, která má zredukovat přenos tepla do okolního horninového masivu.

Tabulka 2: Rozměry jednotlivých vrstev pro tři různé varianty.

Materiál	varianta 1 t [mm]	varianta 2 t [mm]	varianta 3 t [mm]
Pouzdro s palivem	530	530	530
Betonová zálivka	80	80	80
Ocel	25	25	25
Beton tlumící zóny	450	650	850
Ocel	25	25	25
Horninový masiv	40200	40000	39800

Varianta 2 má tloušťku betonu tlumící zóny dle referenčního kontejneru, který byl uvažován v předchozích publikacích [3] a [4].

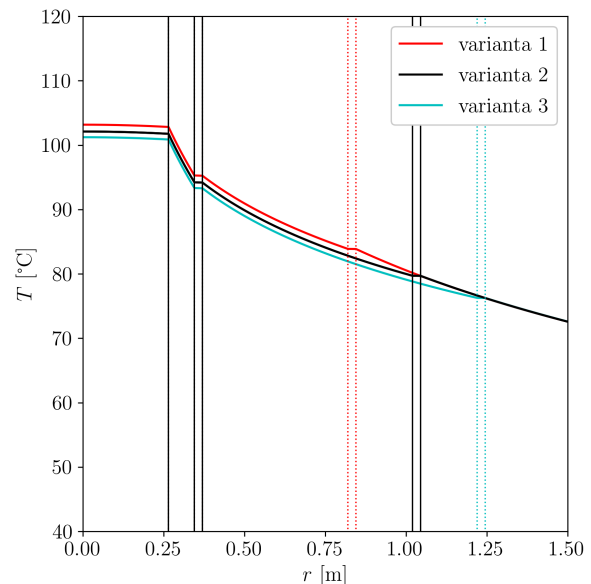
Pro variantu 1 byla zvolena tloušťka o 200 mm menší a u varianty 3 byla zvolena tloušťka o 200 mm větší než u referenčního modelu. Všechny rozměry jsou uvedeny v Tabulce 2. Součet všech analyzovaných vrstev je pro všechny tři varianty stejný.

Ze získaných výsledků vidíme, že nejvyšší teploty dosáhneme v případě první varianty, kde tloušťka betonu tlumící zóny je nejtenčí. Nejvyšší teplota pro všechny tři varianty nastane ve dvanáctém roce po uložení kontejneru do hlubinného úložiště. Výsledky jsou zapsány v Tabulce 3.

Tabulka 3: Maximální teploty pro tři různé varianty.

	varianta 1	varianta 2	varianta 3
Čas t [rok]	12	12	12
Teplota T [°C]	102,9	101,9	101,1

Na Obrázcích 8 a 9 jsou znázorněny výsledné časové vývoje teploty na rozhraních jednotlivých vrstev analyzovaného kontejneru pro všechny uvažované varianty.



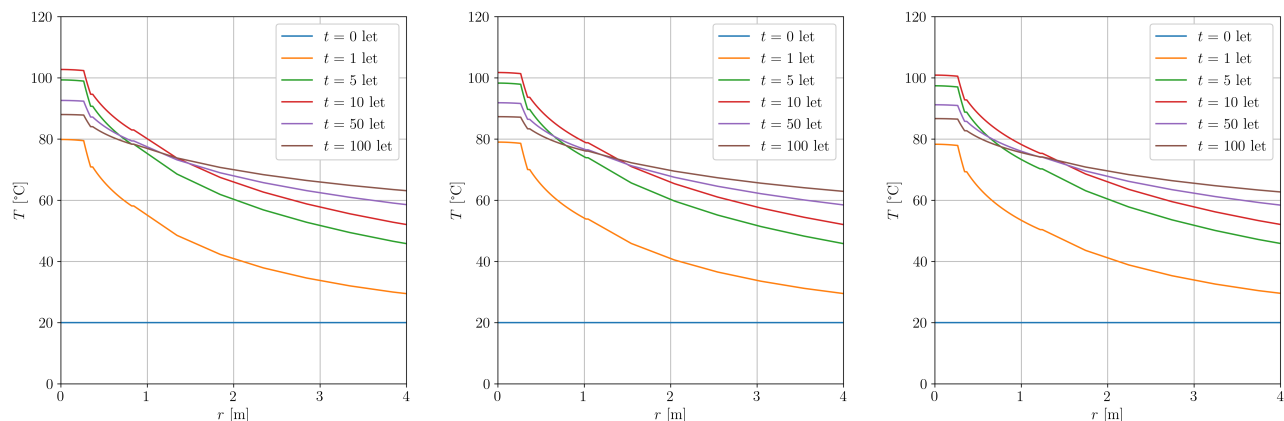
Obrázek 7: Teplotní profily v čase $t = 12$ let od uložení kontejneru do hlubinného úložiště se zobrazením rozhraní jednotlivých vrstev.

Na Obrázku 7 je znázorněn průběh teplot v čase $t = 12$ let, kdy bylo dosaženo maximální hodnoty teploty T [°C] pro všechny uvažované varianty.

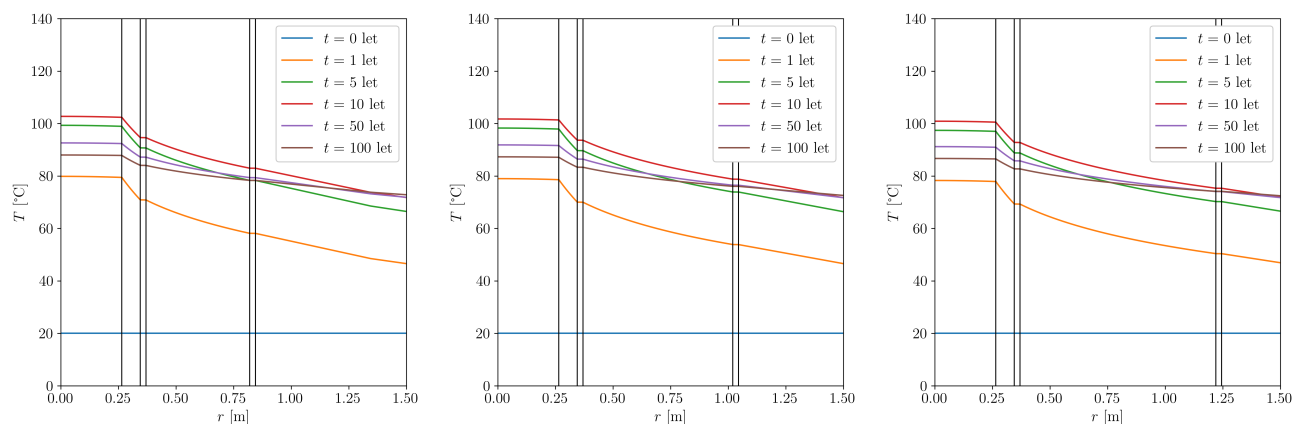
5. ZÁVĚR

V článku byla prezentována numerická analýza vývoje teploty v betonovém kontejneru úložiště vyhořelého jaderného paliva typu VVER-440.

Matematický model sdílení tepla byl implementován do vlastního výpočetního nástroje sestaveného v programu Python a má podobu samostatně spustitelné aplikace s grafickým uživatelským prostředím. Vytvořený software umožní snadno analyzovat a porovnávat kontejneru s jinými vstupními parametry (geometrie kontejneru a vlastnosti použitých materiálů).



Obrázek 8: Časový vývoj teploty na rozhraních jednotlivých vrstev analyzovaného kontejneru. Zleva: varianta 1, varianta 2, varianta 3.



Obrázek 9: Teplotní profily v analyzovaném řezu pro různé časy od umístění kontejneru do hlubinného úložiště se zobrazením rozhraní jednotlivých vrstev. Zleva: varianta 1, varianta 2, varianta 3.

V rámci řešeného grantového projektu budou dosažené výsledky dále využity pro optimalizaci návrhu konstrukce kontejneru.

PODĚKOVÁNÍ

Článek byl vypracován za podpory Technologické agentury České republiky, projekt č. TJ04000186, a Studentské grantové soutěže ČVUT, projekt č. SGS21/001/OHK1/1T/11, č. SGS21/040/OHK1-1T/11 a č. SGS22/033/OHK1/1T/11.

Reference

- [1] EN 1994-1-2. *Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design*. CEN, 2005.
- [2] D. Kobylka. *Optimalizace vzájemné vzdálenosti ÚOS. Technická zpráva číslo 135/2017*. SÚRAO, 2019.
- [3] 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 konstrukcí.
- [4] K. Nedomová, R. Štefan, and M. Beneš. Numerická analýza vývoje teploty v betonovém kontejneru úložiště vyhořelého jaderného paliva s vlivem hydratačního tepla. In *PhD Workshop 2021*, Praha, 2021. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra betonových a zděných konstrukcí.
- [5] K. Nedomová, R. Štefan, and M. Beneš. Con-CaskA - Analysis of Transport Processes in Concrete Cask for Storage of Spent Nuclear Fuel. In <http://people.fsv.cvut.cz/www/stefarad/software/concaska/concaska.html>, Praha, 2021-2022. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra betonových a zděných konstrukcí.
- [6] 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.
- [7] E. Weetjens. *Update of the near field temperature evolution calculations for disposal of UNE-55, MOX-50 and vitrified HLW in a supercontainer-based geological repository. External Report SCK CEN-ER-86, 09/EWe/P-20*. SCK CEN, 2009.