

NUMERICKÁ ANALÝZA VÝVOJE TEPLoty V BETONOVÉM KONTEJNERU ÚLOŽIŠTĚ VYHOŘELÉHO JADERNÉHO PALIVA TYPU VVER-440

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 numerickou analýzu vývoje teploty v betonovém kontejneru úložiště vyhořelého jaderného paliva typu VVER-440. Je popsána konstrukce kontejneru, jeho geometrie a materiálové řešení. Je uveden matematický model neustálého sdílení tepla formulovaný v polárních souřadnicích a jeho numerická aproximace pomocí metody konečných prvků. Model je implementován do výpočetního nástroje v programu Python. Výsledky numerické simulace jsou graficky prezentovány formou teplotních profilů v kontejneru v různých časech od uložení do hlubinného úložiště a formou grafů znázorňujících vývoj teploty v čase v různých oblastech kontejneru. Výsledky budou využity pro optimalizaci návrhu konstrukce kontejneru a pro simulování jeho dlouhodobého chování.

KLÍČOVÁ SLOVA

teplotní analýza • betonový kontejner • vyhořelé jaderné palivo

ABSTRACT

The paper is focused on a numerical analysis of a temperature evolution in a concrete cask for storage of VVER-440 type spent nuclear fuel. A design of the cask is described as well as its geometry and material solution. A mathematical model of transient heat transfer is formulated in polar coordinates and its finite element approximation is described. The model is implemented in a computational tool developed in Python programming language. The results of the numerical simulation are presented in the form of temperature profiles of the cask for different times from its deposition in the geological repository. Moreover, the evolution of the temperature at different positions within the cask are shown. The results will be utilized for optimization of the cask design and for the simulation of its long-term behaviour.

KEYWORDS

thermal analysis • concrete cask • spent nuclear fuel

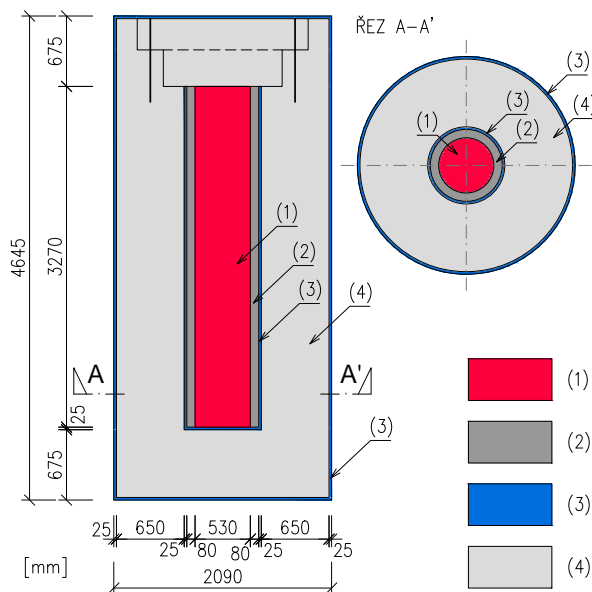
1. ÚVOD

Pro optimální návrh kontejneru úložiště vyhořelého jaderného paliva je nutné stanovit časový vývoj teploty v různých částech kontejneru. Jako zdroj tepla působí vyhořelé jaderné palivo, které ohřívá jak vlastní kontejner, tak přilehlý horninový masiv hlubinného úložiště. V tomto článku je analyzován jeden konkrétní typ betonového kontejneru navržený v rámci projektu TAČR *Vývoj spojovacích detailů pro betonové kontejnery úložišť vysokoaktivních odpadů a vyhořelého jaderného paliva a modelování jejich dlouhodobého chování* (projekt TJ04000186).

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

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.



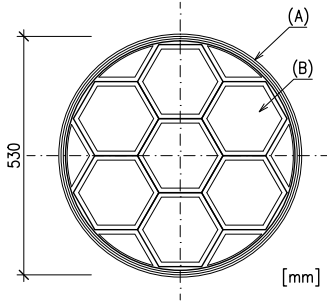
Obrázek 1: Konstrukce analyzovaného kontejneru. Legenda: (1) nerezové pouzdro s vyhořelým jaderným palivem typu VVER-440, (2) betonová zálivka, (3) ocel, (4) beton tlumící zóny. Zdroj: nakresleno podle návrhu Dr. Khmurovské.

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 úložiště budou v rámci tohoto článku uvažovány dle Tabulky 1. V průběhu řešení předmětného projektu budou tyto vlastnosti dále upravovány.

Pouzdro s vyhořelým jaderným palivem obsahuje celkem sedm palivových souborů, viz Obrázek 2. Dle (Kobyłka 2019, s. 27) obsahuje každý palivový soubor průměrně 122 kg uranu (kgU) se středním vyhořením 50 MWd/kgU.

Tabulka 1: Materiálové vlastnosti. Zdroj: (Weetjens 2009, Tab. 2), (EN 1994-1-2 2005).

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



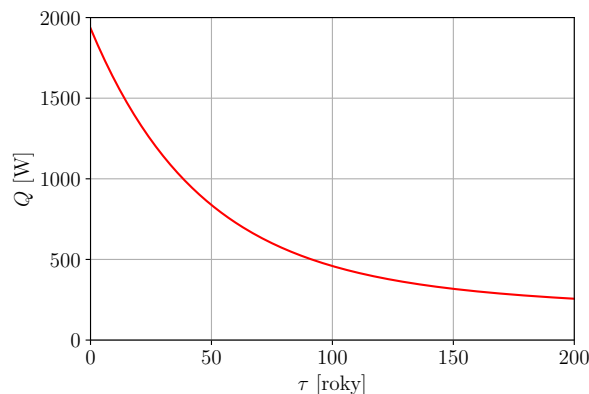
Obrázek 2: Řez pouzdrem s vyhořelým jaderným palivem. Legenda: (A) nerezový plech tl. 5 mm, (B) palivová kazeta typu VVER-440. Zdroj: nakresleno podle (Pospíšková et al. 2012, Obr. 5).

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 (Kobylka 2019, 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 (Kobylka 2019, s. 30)), τ [roky] je čas od vyvezení paliva z aktivní zóny a A_i a B_i jsou konstanty, které lze nalézt v (Kobylka 2019, Tab. 4).

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



Obrázek 3: Tepelný výkon pouzdra s vyhořelým jaderným palivem typu VVER-440. Zdroj: sestrojeno podle výše uvedených vztahů, srov. (Kobylka 2019, Obr. 5).

Ve výpočtu budeme uvažovat, že kontejner s pouzdrem s vyhořelým jaderným palivem bude umístěn do hlubinného úložiště

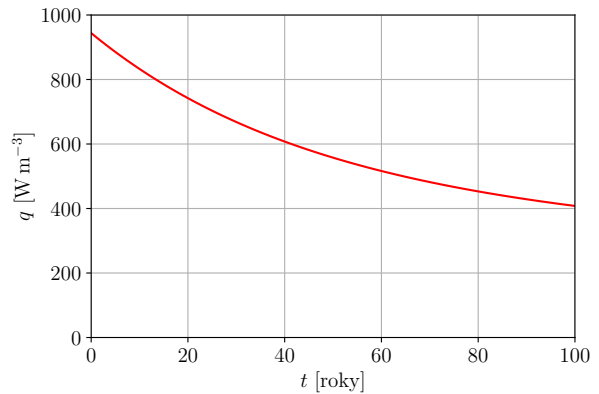
po 65 letech od vyvezení jaderného paliva z aktivní zóny, tj. v čase $\tau = 65$ let. Čas od umístění kontejneru do hlubinného úložiště budeme označovat jako t [roky], přičemž platí $\tau = t + 65$ let, viz (Kobylka 2019).

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

3. NUMERICKÁ ANALÝZA

Teplotní analýzu betonového kontejneru (Obrázek 1) a přilehlého horninového masivu provedeme zjednodušeně na úrovni vodorovného řezu kontejnerem. Úlohu uvažujeme jako rotačně symetrickou (včetně okrajových podmínek) a budeme ji tedy řešit jako jednorozměrný problém s neznámou teplotou T , viz Obrázek 5.

Matematický model úlohy je popsán rovnicí vedení tepla

$$rc(r) \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial r} \left(r\lambda(r) \frac{\partial T}{\partial r} \right) = rf(r, t) \quad (3)$$

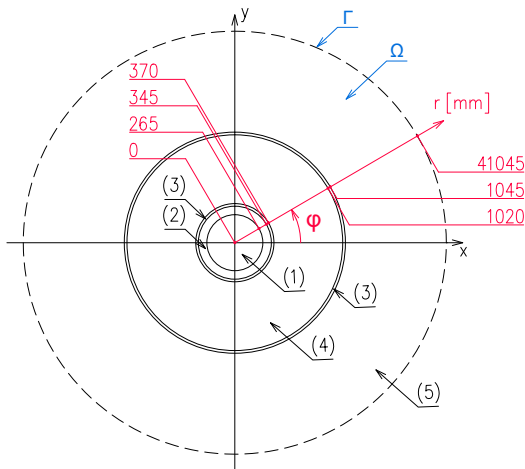
pro $t \in (0, t_f)$ a $r \in (0, R)$, doplněnou okrajovou podmínkou

$$\frac{\partial T}{\partial r}(0, t) = \frac{\partial T}{\partial r}(R, t) = 0 \quad \text{pro } t \in (0, t_f) \quad (4)$$

a počáteční podmínkou

$$T(r, 0) = T_0 \quad \text{pro } r \in (0, R). \quad (5)$$

V rovnicích (3)–(5) je r polohová souřadnice, t je čas, R je poloměr řešené oblasti, t_f je celkový čas, T je neznámá teplota jakožto funkce r a t , T_0 je počáteční teplota, c je objemová tepelná kapacita materiálu, λ je součinitel tepelné vodivosti materiálu a f je zdroj tepla.



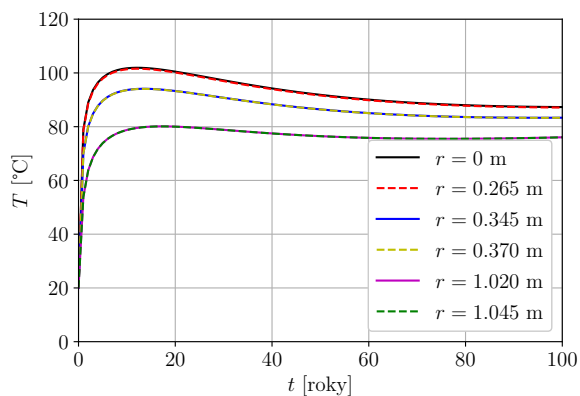
Obrázek 5: Geometrie řešené úlohy. Legenda: Ω – řešená oblast, Γ – hranice řešené oblasti, (1) pouzdro s palivem, (2) betonová zálivka, (3) ocel, (4) beton tlumící zóny, (5) horninový masív.

Pro numerické řešení matematického modelu popsaného rovnicemi (3)–(5) aplikujeme metodu konečných prvků. Výsledný algoritmus implementujeme do vlastního výpočetního nástroje vytvořeného v programovacím jazyce Python.

Geometrie řešené úlohy je patrná z Obrázku 5. Celkový poloměr řešené oblasti uvažujeme $R = 41.045$ m, což odpovídá součtu poloměru analyzovaného kontejneru (1.045 m) a uvažované tloušťky horninového masívu (40 m). Velikost konečných prvků uvažujeme v oblasti betonového kontejneru $\Delta r = 5$ mm, v oblasti horninového masívu $\Delta r = 500$ mm. Časový krok uvažujeme $\Delta t = 1$ rok, celkový čas $t_f = 100$ let. Počáteční teplota je nastavena jako $T_0 = 20$ °C. Materiálové vlastnosti v jednotlivých vrstvách řešené oblasti uvažujeme dle Tabulky 1. Tepelný zdroj v oblasti nerezového pouzdra s vyhořelým jaderným palivem je definován jako $f(t) = q(t)$, kde $q(t)$ uvažujeme dle Obrázku 4; v ostatních vrstvách řešené oblasti je $f = 0$.

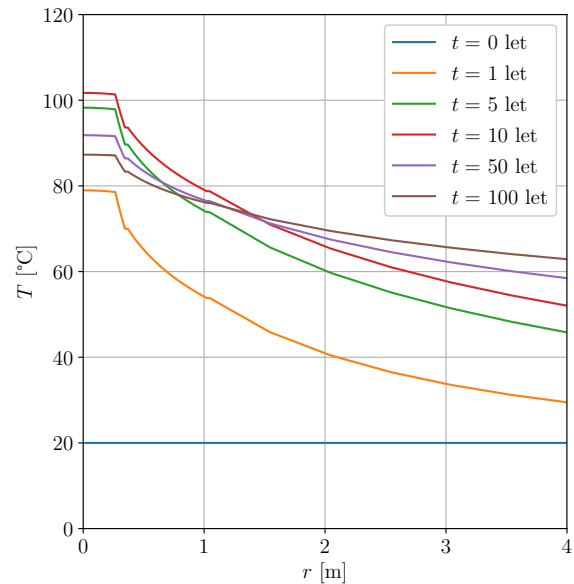
4. VÝSLEDKY A DISKUZE

Na Obrázku 6 jsou znázorněny výsledné časové vývoje teploty na rozhraních jednotlivých vrstev analyzovaného kontejneru.

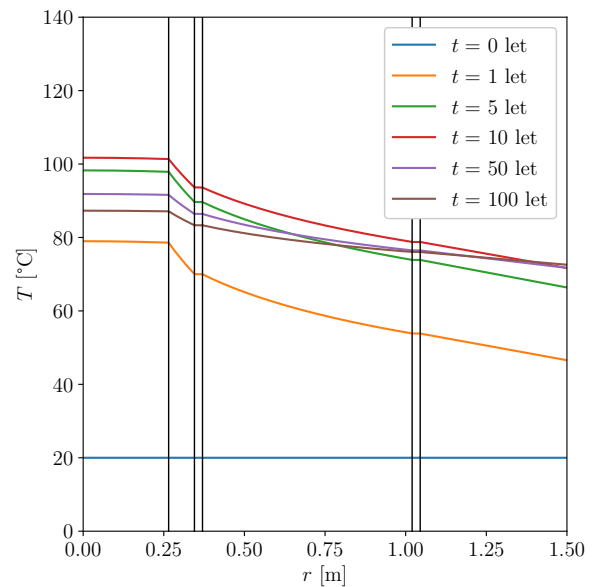


Obrázek 6: Časový vývoj teploty na rozhraních jednotlivých vrstev analyzovaného kontejneru.

Teplotní profily (závislosti teploty na polohové souřadnici r) v analyzovaném řezu jsou vykresleny na Obrázcích 7 a 8.



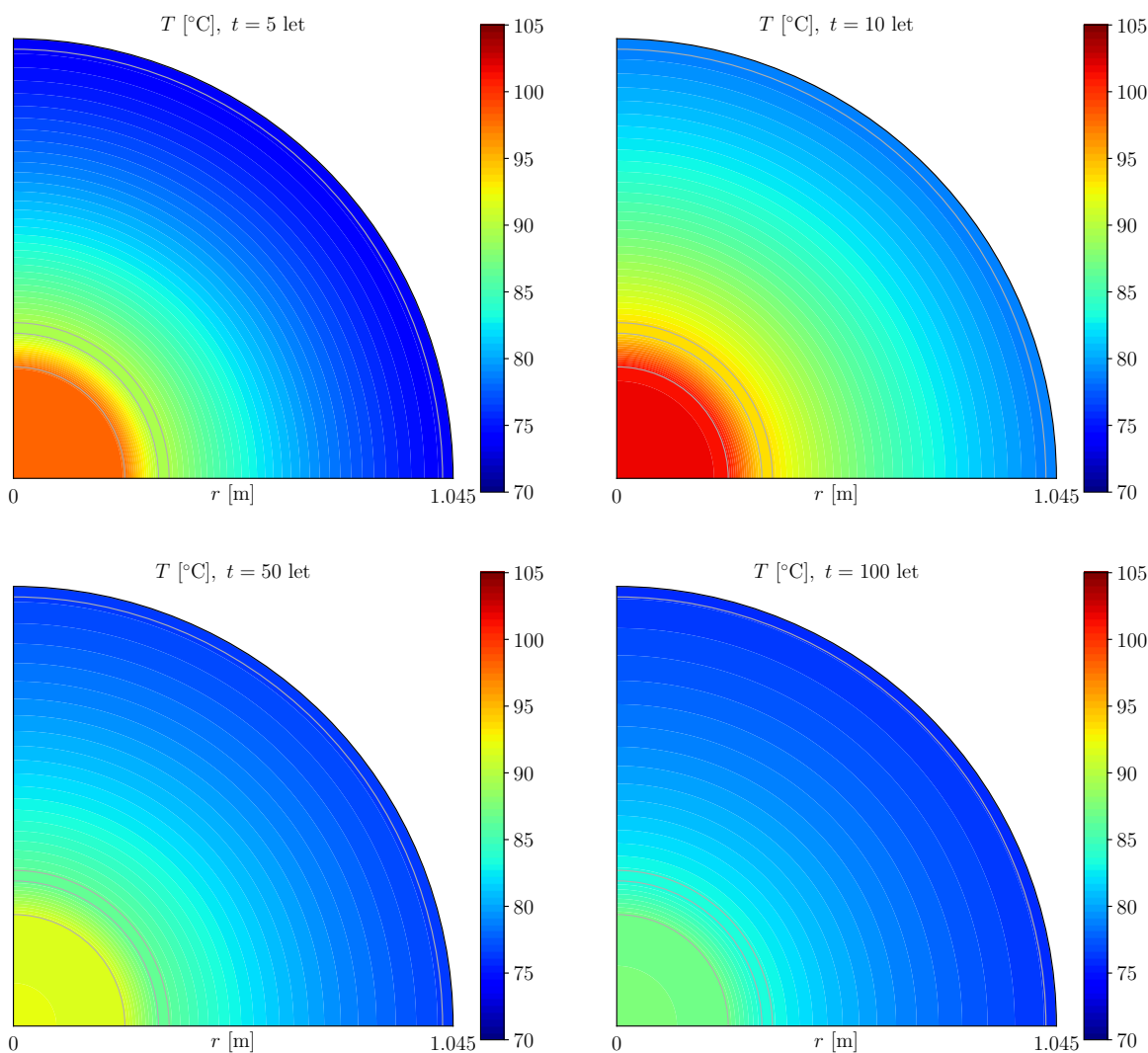
Obrázek 7: Teplotní profily v analyzovaném řezu pro různé časy od umístění kontejneru do hlubinného úložiště.



Obrázek 8: Teplotní profily v analyzovaném řezu pro různé časy od umístění kontejneru do hlubinného úložiště se zobrazením rozhraní jednotlivých vrstev.

Na Obrázku 9 jsou výsledné teploty zobrazeny pomocí barevné škály formou teplotních polí (izoplach) ve čtvrtině příčného řezu analyzovaného kontejneru pro různé časy od umístění kontejneru do hlubinného úložiště.

Z prezentovaných výsledků vyplývá, že maximální teplota, které bylo v analyzovaném kontejneru dosaženo, má hodnotu $T = 101.9$ °C. Této teploty bylo dosaženo v čase $t = 12$ let od umístění kontejneru do hlubinného úložiště.



Obrázek 9: Rozložení teploty v analyzovaném řezu betonového kontejneru pro různé časy od umístění kontejneru do hlubinného úložiště.

5. ZÁVĚR

V článku byla prezentována numerická analýza vývoje teploty v betonovém kontejneru úložiště vyhořelého jaderného paliva typu VV-ER-440. Matematický model sdílení tepla byl implementován do vlastního výpočetního nástroje sestaveného v programu Python. Vytvořený nástroj umožní snadno analyzovat obdobné případy s jinými vstupními parametry (typ paliva, geometrie kontejneru, použité materiály). V rámci řešeného grantového projektu budou dosažené výsledky dále využity pro optimalizaci návrhu konstrukce kontejneru a pro simulování jeho dlouhodobého chování.

PODĚKOVÁNÍ

Článek byl vypracován za podpory Technologické agentury České republiky, projekt č. TJ04000186, a Studentské grantové soutěže ČVUT, projekt č. SGS20/041/OHK1/1T/11.

Reference

- EN 1994-1-2 (2005), *Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design*, CEN.
- Kobylka, D. (2019), *Optimalizace vzájemné vzdálenosti ÚOS. Technická zpráva číslo 135/2017*, SÚRAO.
- Pospíšková, I., Vokál, A., Fiedler, F., Prachař, I. & Kotnour, P. (2012), *Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě. Průvodní zpráva*, UJV Řež, a.s.
- Weetjens, E. (2009), *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.