

NUMERICKÁ ANALÝZA VÝVOJE TEPLoty V BETONOVÉM KONTEJNERU ÚLOŽIŠTĚ VYHOŘELÉHO JADERNÉHO PALIVA TYPU VVER440 A VVER1000

Karolina Nedomová, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,
České vysoké učení technické v Praze, Tháškova 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 VVER440 a VVER1000. Je popsána konstrukce kontejneru, jeho geometrie a materiálové řešení. Je uveden matematický model neustáleného 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 kontejnerech v různých časech od uložení do hlubinného úložiště a formou grafů znázorňujících vývoj teploty v čase v různých oblastech kontejneru.

KLÍČOVÁ SLOVA

teplotní analýza • betonový kontejner • vyhořelé jaderné palivo • VVER440 • VVER1000

ABSTRACT

The paper is focused on a numerical analysis of a temperature evolution in a concrete cask for storage of VVER440 and VVER1000 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.

KEYWORDS

thermal analysis • concrete cask • spent nuclear fuel • VVER440 • VVER1000

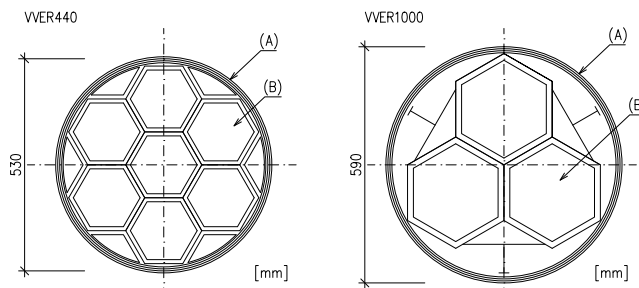
1. ÚVOD

Pro 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 jsou porovnány dva konkrétní betonové kontejnery pro vyhořelé jaderné palivo typu VVER440 a VVER1000. Příspěvek navazuje na předchozí práce [3],[4] a [5], které částečně přebírá a doplňuje vývoj teploty v kontejneru pro VVER1000.

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

2. 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 1. Dle [2, 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.



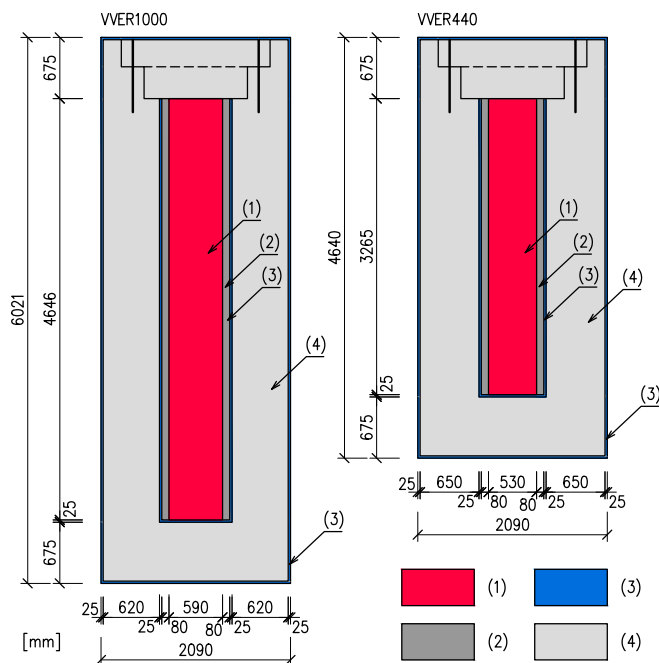
Obrázek 1: Řezy pouzdrem s vyhořelým jaderným palivem. Vlevo typ VVER440, vpravo typ VVER1000. Legenda: (A) nerezový plech, (B) palivová kazeta. Zdroj: nakresleno podle [6, s. 28, s. 31].

3. POPIS BETONOVÝCH KONTEJNERŮ

Kontejner slouží pro dlouhodobé uložení vyhořelého jaderného paliva v hlubinném úložišti. Uvažované kontejnery mají stejné uspořádání jednotlivých vrstev. Uvnitř kontejneru se nachází nerezové pouzdro s vyhořelým jaderným palivem, průměr je 530 mm nebo 590 mm. Nejbližší k pouzdru se nachází betonová zálivka tl. 80 mm, která vyplňuje prostor mezi ocelovým pouzdrem a pouzdrem vyhořelého jaderného paliva. Mezi vnitřním a vnějším ocelovým pouzdrem tl. 25 mm se nachází tzv. beton tlumící zóny, který zmiňuje přenos tepla do horninového masivu a je uvažován tl. 620 mm nebo 650 mm. Vnější průměr, pro oba řešené kontejnery v této úloze, je 2090 mm. Kontejnery mají stejný průměr z důvodu univerzálnosti uspořádání kontejnerů v hlubinném úložišti. Analyzované betonové kontejnery jsou zobrazeny na Obrázku 2.

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 2) a přilehlého horninového masivu hlubinného úložiště budou v rámci tohoto článku uvažovány dle Tabulky 1.



Obrázek 2: 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 tlumící zóny. Zdroj: kontejner pro VVER440 nakreslen podle návrhu Dr. Khmurovské.

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

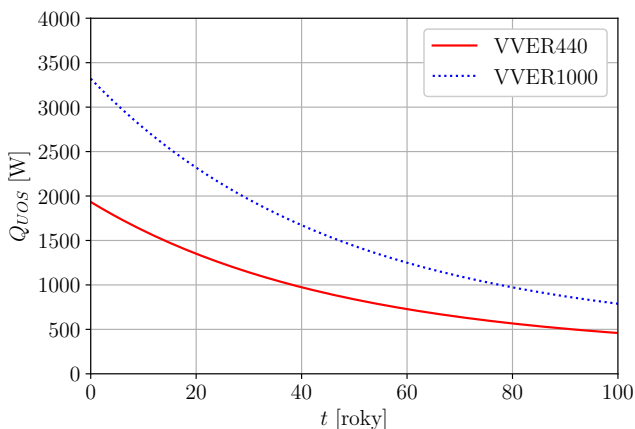
Materiál	c [$\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$]	λ [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]
Pouzdro s palivem	7850×500	40
Betonová zálivka	2400×880	1
Ocel	7850×600	45
Beton tlumící zóny	2.4×10^6	2
Horninový masiv	2.9×10^6	1.45

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 [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 (pro VVER440 $m = 0.864$ tU a pro VVER1000 $m = 1.484$ 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 popsaná vztahem (1) je znázorněná na Obrázku 3.

Ve výpočtu je uvažováno, že kontejner s pouzdem s vyhořelým jaderným palivem bude umístěn do hlubinného úložiště po 65 letech od vyvezení jaderného paliva z aktivní zóny, tj. v čase



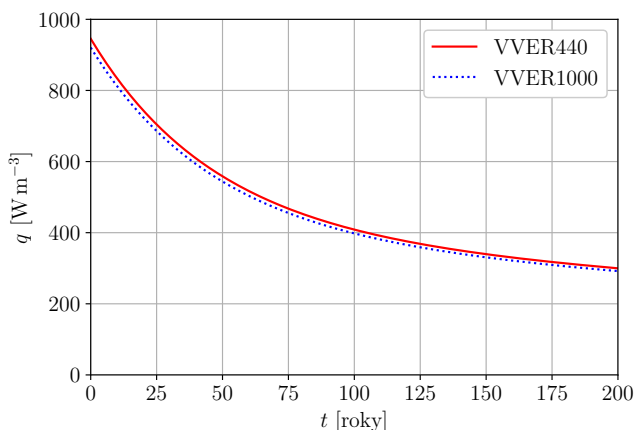
Obrázek 3: Tepelný výkon pouzdra s vyhořelým jaderným palivem typu VVER440 a VVER1000. Zdroj: sestrojeno podle výše uvedených vztahů, srov. [2, s. 30, Obr. 5].

$\tau = 65$ let. Čas od umístění kontejneru do hlubinného úložiště je označován 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}] se stanoví jako

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

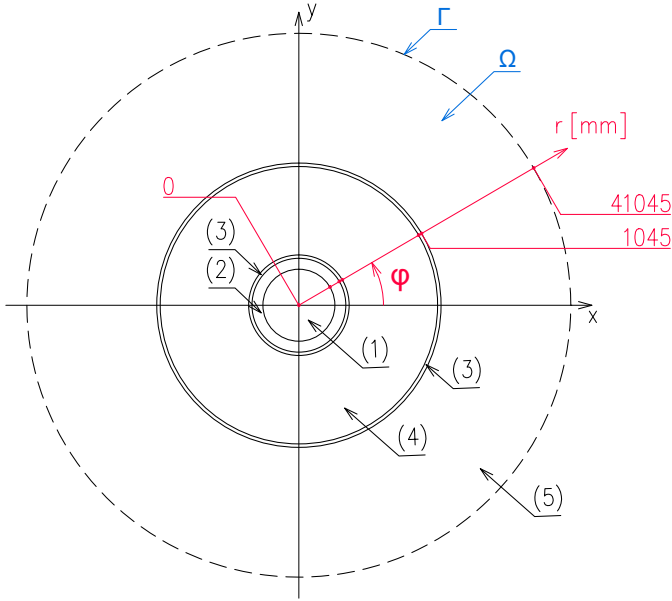
kde Q [W] je celkový tepelný výkon pouzdra s vyhořelým jaderným palivem (viz vztah (1)), t [roky] je čas od umístění kontejneru do hlubinného úložiště a V [m^3] je objem pouzdra s vyhořelým jaderným palivem (pro VVER440 $V = 0.72 \text{ m}^3$ a pro VVER1000 $V = 1.27 \text{ m}^3$, viz Obrázek 2). Závislost 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.

4. NUMERICKÁ ANALÝZA

Teplotní analýza betonových kontejnerů (Obrázek 2) a přilehlého horninového masivu byla provedena zjednodušeně na úrovni příčného řezu kontejnerem. Úloha je uvažovaná jako rotačně symetrická (včetně okrajových podmínek) a je řešena jako jednorozměrný problém s neznámou teplotou T , viz Obrázek 5.



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 masiv.

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.

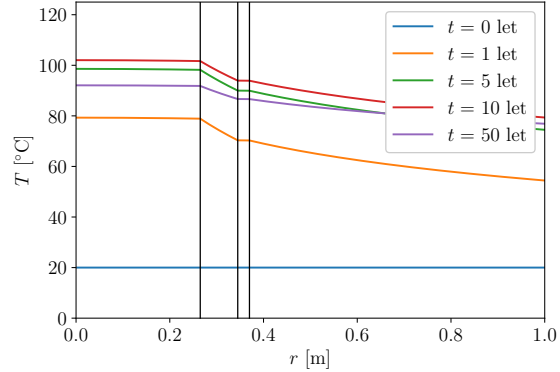
Pro numerické řešení matematického modelu popsaného rovnicemi (3)–(5) je aplikovaná metoda konečných prvků. Výsledný algoritmus je implementován do vlastního výpočetního nástroje vytvořeného v programovacím jazyce Python.

Geometrie řešené úlohy je patrná z Obrázku 5. Celkový poloměr řešené oblasti je $R = 41.045$ m, což odpovídá součtu poloměru analyzovaného kontejneru (1.045 m) a uvažované tloušťky horninového masivu (40 m) pro oba řešené kontejnery. Velikost konečných prvků je uvažovaná v oblasti betonového kontejneru $\Delta r = 5$ mm, v oblasti horninového masivu $\Delta r = 100$ mm. Časový krok je $\Delta t = 1$ rok, celkový čas $t_f = 100$ let. Počáteční teplota

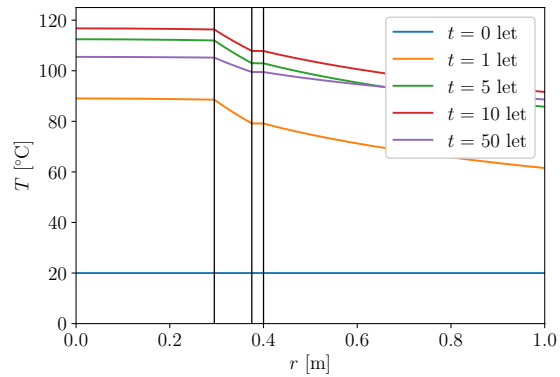
je nastavena jako $T_0 = 20$ °C. Materiálové vlastnosti v jednotlivých vrstvách řešené oblasti jsou uvažované dle Tabulky 1. Tepelný zdroj v oblasti nerezového pouzdra s vyhořelým jaderným palivem je definován jako $f(t) = q(t)$, kde $q(t)$ je uvažován dle Obrázku 4; v ostatních vrstvách řešené oblasti je $f = 0$.

5. VÝSLEDKY A DISKUZE

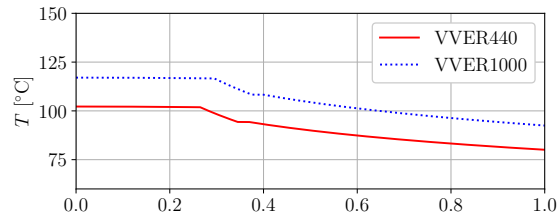
Na Obrázku 6 a 7 jsou v analyzovaném řezu znázorněny výsledné teplotní profily (závislosti teploty na polohové souřadnici r).



Obrázek 6: VVER440: Teplotní profily v analyzovaném řezu pro různé časy od umístění kontejneru do hlubinného úložiště.



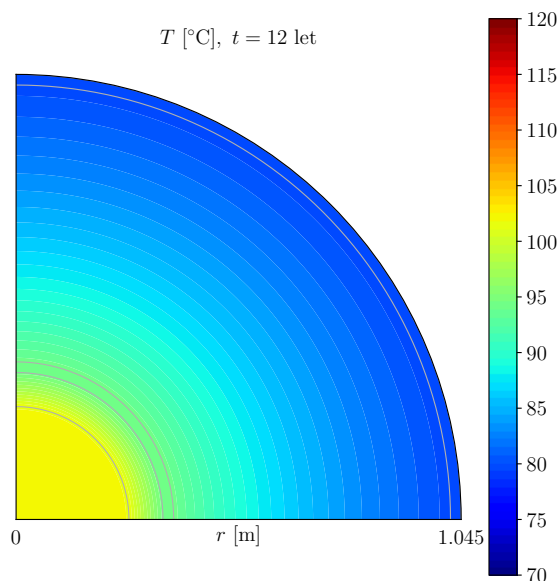
Obrázek 7: VVER1000: Teplotní profily v analyzovaném řezu pro různé časy od umístění kontejneru do hlubinného úložiště.



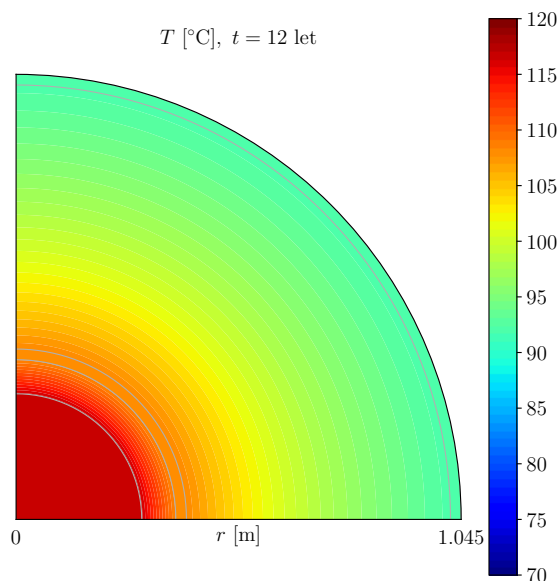
Obrázek 8: Teplotní profily v analyzovaných řezech pro čas $t = 12$ let od umístění kontejneru do hlubinného úložiště.

Z prezentovaných výsledků vyplývá, že maximálních teplot, kterých bylo v analyzovaných kontejnerech dosaženo, je $T = 102\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro VVER440 a $T = 117\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro VVER1000. Těto teploty bylo v obou případech dosaženo v čase $t = 12$ let od umístění kontejneru do hlubinného úložiště.

Na Obrázku 9 a 10 jsou výsledné teploty zobrazeny pomocí barevné škály formou teplotních polí (izoploch) ve čtvrtině příčného řezu analyzovaného kontejneru pro čas $t = 12$ let od umístění kontejneru do hlubinného úložiště.



Obrázek 9: Rozložení teploty v analyzovaném řezu betonového kontejneru typu VVER440 pro čas $t = 12$ let od umístění kontejneru do hlubinného úložiště.



Obrázek 10: Rozložení teploty v analyzovaném řezu betonového kontejneru typu VVER1000 pro čas $t = 12$ let od umístění kontejneru do hlubinného úložiště.

6. ZÁVĚR

V článku byla prezentována numerická analýza vývoje teploty v betonovém kontejneru úložiště vyhořelého jaderného paliva typu VVER-440 a VVER1000. Matematický model sdílení tepla byl implementován do vlastního výpočetního nástroje sestaveného v programu Python. Vytvořený nástroj umožňuje snadno analyzovat obdobné případy s jinými vstupními parametry (typ paliva, geometrie kontejneru, použité materiály).

PODĚKOVÁNÍ

Článek byl vypracován za podpory Studentské grantové soutěže ČVUT, projekt č. SGS23/033/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. Kobyłka. *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. Výpočetní aplikace pro numerickou analýzu vývoje teploty v betonovém kontejneru úložiště vyhořelého jaderného paliva. In *PhD Workshop 2022*, Praha, 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.