

NUMERICKÁ ANALÝZA VÝVOJE TEPLoty V BETONOVÉM KONTEJNERU ÚLOŽIŠTĚ VYHOŘELÉHO JADERNÉHO PALIVA S VLIVEM HYDRATAČNÍHO TEPLA

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

V práci je popsána numerická analýza vývoje teploty v betonovém kontejneru úložiště vyhořelého jaderného paliva typu VVER-440. Jako zdroj tepla, způsobující ohřívání jak vlastního kontejneru, tak přilehlého horninového masivu hlubinného úložiště, je uvažováno jednak vyhořelé jaderné palivo, jednak (což se projeví zejména v raných fázích po naplnění a uzavření kontejneru) hydratační teplo v betonové zálivce. V příspěvku je podrobně popsán matematický model neustáleného sdílení tepla formulovaný v polárních souřadnicích a jeho numerické řešení. Výsledný algoritmus je naprogramován v jazyce Python. Vytvořený výpočetní nástroj je použit pro numerické simulace analyzovaného problému. Dosažené výsledky jsou graficky prezentovány a budou využity pro podrobný návrh konstrukce kontejneru a pro analýzu jeho dlouhodobého chování.

KLÍČOVÁ SLOVA

teplotní analýza • hydratační teplo • 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. The source of heat causing heating of both the container itself and the adjacent rock mass of the deep repository is considered to be both spent nuclear fuel and (which manifests itself especially in the early stages after filling and closing the container) hydration heat in the concrete filler. The paper describes in detail the mathematical model of transient heat transfer formulated in polar coordinates and its numerical solution. The resulting algorithm is implemented in Python environment. The developed computational tool is used for numerical simulations of the analyzed problem. The obtained results are graphically presented and will be used for a detailed design of the container structure and for the analysis of its long-term behavior.

KEYWORDS

thermal analysis • hydration heat • concrete cask • spent nuclear fuel

1. ÚVOD

Při návrhu kontejneru úložiště vyhořelého jaderného paliva je jedním z důležitých kritérií, které je nutné posoudit, vývoj teploty v jednotlivých částech kontejneru.

Jako zdroj tepla, který ohřívá jak vlastní kontejner, tak přilehlý horninový masiv hlubinného úložiště, působí jednak vyhořelé jaderné palivo, jednak (zejména v raných fázích po naplnění a uzavření kontejneru) hydratační teplo v betonové zálivce. V tomto příspěvku je analyzován betonový kontejner sloužící pro dlouhodobé uložení vyhořelého jaderného paliva typu VVER-440 v hlubinném úložišti.

Příspěvek navazuje na předchozí práci [6], kterou částečně přebírá a doplňuje o vliv vývoje hydratačního tepla v betonové zálivce. Výsledky tohoto článku byly prezentovány na 13. ročníku studentské Rektorysovy soutěže.

Předpokládaný scénář a jednotlivé fáze životního cyklu paliva a kontejneru jsou zobrazeny na Obrázku 1. 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 pouzdem a vnitřním povrchem kontejneru bude vyplněn betonovou zálivkou (*filler*) a kontejner bude uzavřen. Předpokládáme, že takto bude kontejner umístěn volně po dobu 30 dní. Následně bude kontejner umístěn do hlubinného úložiště.

2. POPIS ŘEŠENÉHO KONTEJNERU

2.1. Geometrie

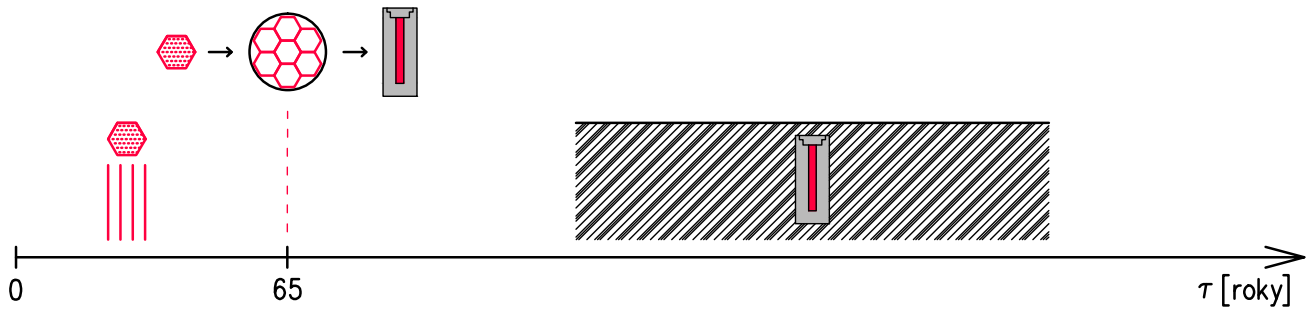
Pouzdro s vyhořelým jaderným palivem obsahuje celkem sedm palivových souborů, viz Obrázek 2. Dle [5, s. 27] obsahuje každý palivový soubor průměrně 122 kg uranu (kgU) se středním vyhořením 50 MWd/kgU.

Analyzovaný betonový kontejner je zobrazen na Obrázku 3. Kontejner slouží pro dlouhodobé uložení vyhořelého jaderného paliva typu VVER-440 v hlubinném úložišti.

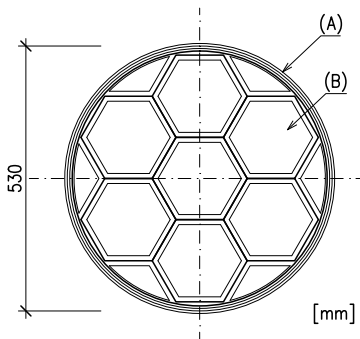
2.2. Materiálové vlastnosti

Pro účely teplotní analýzy je nutné definovat teplotní vlastnosti uvažovaných materiálů, objemovou tepelnou kapacitu c [$\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$] (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 3) a přilehlého horninového masivu hlubinného úložiště budou v rámci tohoto článku uvažovány dle Tabulky 1. V průběhu řešení předmetného projektu budou tyto vlastnosti dále upravovány.

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



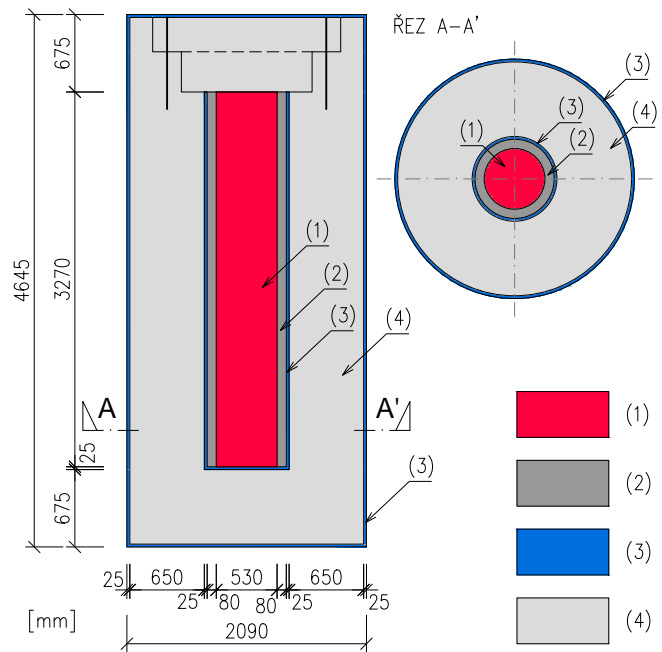
Obrázek 1: Časová osa popisující jednotlivé fáze životního cyklu vyhořelého jaderného paliva a analyzovaného betonového kontejneru.



Obrázek 2: Řez pouzdrem s vyhořelým jaderným palivem. Legenda: (A) nerezový plech tl. 5 mm, (B) palivová kazeta typu VVER-440. Zdroj: nakresleno podle [7, Obr. 5].

Tabulka 1: Materiálové vlastnosti. Zdroj: [9, Tab. 2], [3].

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



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

2.3. Zdroje tepla

a) Vyhořelé jaderné palivo

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 [5, 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 [5, s. 30]), τ [roky] je čas od vyvezení paliva z aktivní zóny a A_i a B_i jsou konstanty uvedené v Tabulce 2.

Tabulka 2: Konstanty A_i a B_i . Zdroj: [5, Tab. 4].

i	0	1	2	3
A_i	1813	231.1	140.5	23.43
B_i	2.24×10^{-2}	3.81×10^{-3}	9.95×10^{-4}	2.7×10^{-5}

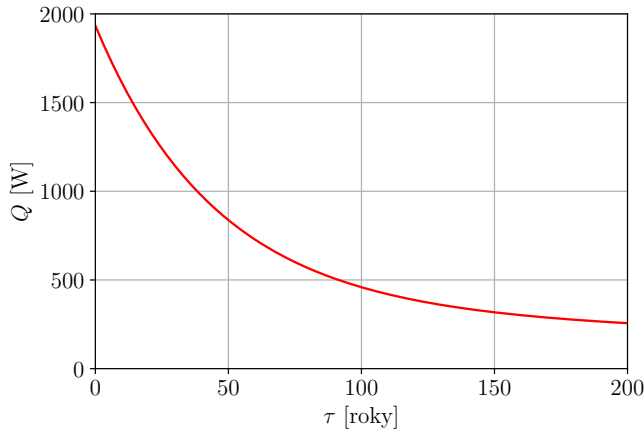
Závislost popsaná vztahem (1) je znázorněná na Obrázku 4.

Ve výpočtu budeme uvažovat, že kontejner s pouzdrem s vyhořelým jaderným palivem bude naplněn, uzavřen a umístěn do hlubinného úložiště po 65 letech od vyvezení jaderného paliva z aktivní zóny, tj. v čase $\tau = 65$ let [5]. Čas od naplnění a uzavření kontejneru a jeho umístění do hlubinného úložiště budeme označovat jako t [roky], přičemž platí $\tau = t + 65$ let [5].

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

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

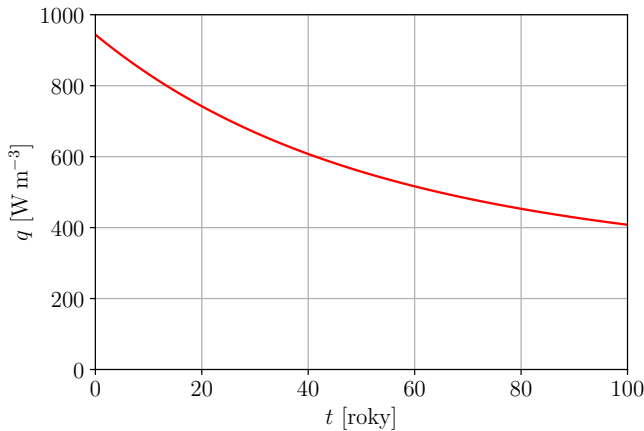
kde Q [W] je celkový tepelný výkon pouzdra s vyhořelým jaderným palivem (viz vztah (1)), t [roky] je čas od naplnění a uzavření kontejneru a jeho umístění do hlubinného úložiště a V [m^3] je



Obrázek 4: Tepelný výkon pouzdra s vyhořelým jaderným palivem typu VVER-440. Zdroj: sestrojeno podle výše uvedených vztahů, srov. [5, Obr. 5].

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

Závislost popsaná vztahem (2) je znázorněná na Obrázku 5.



Obrázek 5: Měrný tepelný výkon pouzdra s vyhořelým jaderným palivem typu VVER-440. Zdroj: sestrojeno podle výše uvedených vztahů.

b) Hydratační teplo

Ve výpočtu bude zohledněn jako zdroj tepla také tepelný výkon od hydratace v betonové zálivce (*filler*). Pro beton tlumící zóny (*buffer*) nebude vývoj hydratačního tepla uvažován (předpokládáme, že v čase $t = 0$ již bude hydratace v betonu tlumící zóny téměř dokončena).

Měrný tepelný výkon (na 1 m^3 betonu) od hydratace h [W m^{-3}] se zjednodušeně určí (při zanedbání vlivu vlhkosti, viz např. [1, příklad 13.1]) ze vztahu [4, 1]

$$h = Q_{h,pot} m_c \frac{\partial \xi}{\partial t}, \quad (3)$$

kde

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = A(\xi) \beta_T(T), \quad (4)$$

$$A = B_1 \left(\frac{B_2}{\xi_\infty} + \xi \right) (\xi_\infty - \xi) \exp \left(-\frac{\eta \xi}{\xi_\infty} \right), \quad (5)$$

$$\beta_T = \exp \left(\frac{Q_e}{\mathcal{R} T_r} - \frac{Q_e}{\mathcal{R} T} \right). \quad (6)$$

Ve výše uvedených vztazích je $Q_{h,pot}$ [J kg^{-1}] potenciální hydratační teplo na jednotkovou hmotnost cementu, m_c [kg m^{-3}] je hmotnost cementu v 1 m^3 betonu, T [K] je teplota a ξ je stupeň hydratace. Vysvětlení ostatních symbolů lze nalézt v citovaných zdrojích [4, 1].

Ve výpočtu budeme uvažovat pro betonovou zálivku následující hodnoty parametrů výše popsaného modelu hydratace (převzato z [4, 1], viz také naše předchozí práce [2] a v ní uvedené zdroje): $Q_{h,pot} = 510 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1}$, $m_c = 400 \text{ kg m}^{-3}$, $B_1 = 23.4 / (24 \times 3600) \text{ s}^{-1}$, $B_2 = 7 \times 10^{-4}$, $\xi_\infty = 0.8$, $\eta = 6.7$, $Q_e / \mathcal{R} = 4600 \text{ K}$, $T_r = 293.15 \text{ K}$.

3. TEPLOTNÍ ANALÝZA

3.1. Matematický model

Teplotní analýzu betonového kontejneru 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 a stupněm hydratace ξ .

Matematický model úlohy je popsán rovnicí vedení tepla pro $t \in (t_0, t_f)$ a $r \in (0, R)$

$$rc(r) \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda(r) \frac{\partial T}{\partial r} \right) = rq(r, t) + rh(r, t, T, \xi), \quad (7)$$

doplněnou integrální podmínkou

$$\xi(r, t) = \xi_0(r) + \frac{1}{Q_{h,pot} m_c} \int_{t_0}^t h(r, s, T(r, s), \xi(r, s)) ds, \quad (8)$$

okrajovými podmínkami pro $t \in (t_0, t_f)$

$$\frac{\partial T}{\partial r}(0, t) = 0, \quad (9)$$

$$-\lambda(R) \frac{\partial T}{\partial r}(R, t) = \alpha_c(t) (T(R, t) - T_\infty), \quad (10)$$

a počátečními podmínkami pro $r \in (0, R)$

$$T(r, t_0) = T_0(r), \quad (11)$$

$$\xi(r, t_0) = \xi_0(r). \quad (12)$$

V rovnicích (7)–(12) je r polohová souřadnice, t je čas, R je poloměr řešené oblasti, t_0 je počáteční čas, t_f je celkový čas, T je neznámá teplota jakožto funkce r a t , ξ je neznámý stupeň hydratace jakožto funkce r a t , T_0 je počáteční teplota, ξ_0 je počáteční stupeň hydratace, c je objemová tepelná kapacita materiálu, λ je součinitel tepelné vodivosti materiálu, α_c je součinitel přestupu tepla, q je zdroj tepla od vyhořelého jaderného paliva a h je zdroj tepla od hydratace a $Q_{h,pot}$ a m_c jsou parametry modelu hydratace, viz kapitola 2.3.

3.2. Numerické řešení

Pro numerické řešení matematického modelu popsaného rovnicemi (7)–(11) aplikujeme metodu konečných prvků a metodu časové diskretizace. Řešenou prostorovou oblast $[0, R]$ rozdělíme dělicími body $0 = r_0 < r_1 < \dots < r_M = R$. Rozdělením intervalu

$[0, R]$ na jednotlivé podintervaly definujeme (konečně rozměrný) prostor \mathcal{V} spojitých a po částech lineárních funkcí φ . Grafem takové funkce φ na libovolném podintervalu $[r_i, r_{i+1}]$, $i = 0, 1, \dots, M-1$, je úsečka, která je určena hodnotami předepsanými v krajních bodech uvažovaného podintervalu. Rozdělme dále časový interval $[t_0, t_f]$ na N podintervalů téže délky Δt tak, že $t_0 = t^0 < t^1 < \dots < t^{N+1} = t_f$. Přibližné řešení v n -tém časovém kroku budeme značit T^n a ξ^n . Necht' $T^0(r) = T_0(r)$ a $\xi^0(r) = \xi_0(r)$ pro $r \in [0, R]$. Pro známé přibližné řešení T^{n-1} a ξ^{n-1} v předchozí časové vrstvě hledáme postupně pro $n = 1, 2, \dots, N+1$ přibližné řešení $T^n \in \mathcal{V}$, které splňuje následující rovnici

$$\int_0^R rc(r) \frac{T^n - T^{n-1}}{\Delta t} \varphi dr + \int_0^R r\lambda(r) \frac{\partial T^n}{\partial r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} dr + R\alpha_c(t^n) T^n(R) \varphi(R) = R\alpha_c(t^n) T_\infty \varphi(R) + \int_0^R (rq(r, t^n) + rh(r, t^{n-1}, T^{n-1}, \xi^{n-1})) \varphi dr \quad (13)$$

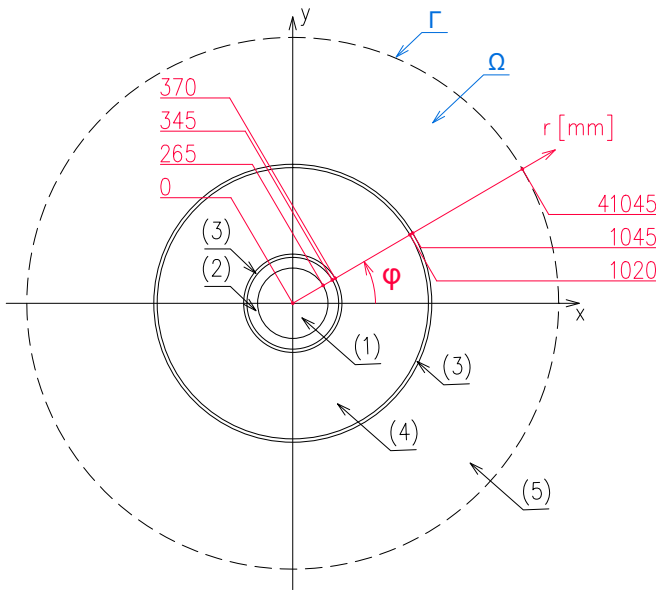
pro všechny funkce $\varphi \in \mathcal{V}$ a

$$\xi^n = \xi_0 + \frac{\Delta t}{Q_{h,pot} m_c} \sum_{i=0}^{n-1} h(r, t^i, T^i, \xi^i). \quad (14)$$

Problematika konvergence Rotheho metody, existence a jednoznačnosti řešení rovnice vedení tepla s integrální podmínkou modelující hydratační procesy v raném betonu je podrobně studována v publikaci [8, kapitola 18].

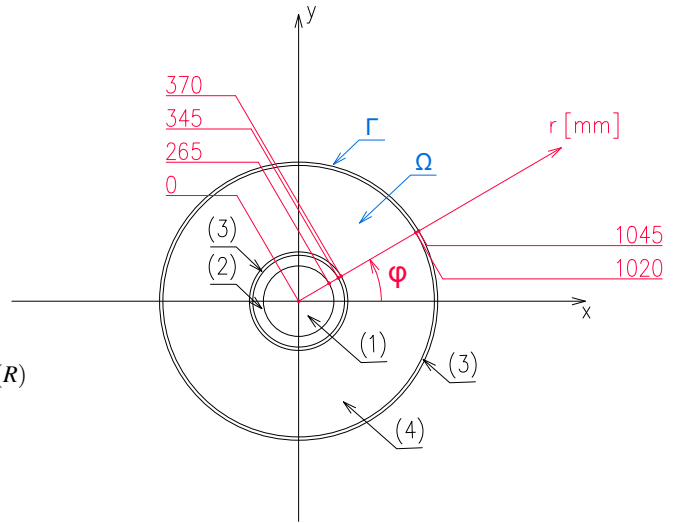
3.3. Popis řešených úloh

Výsledný algoritmus je implementován do vlastního výpočetního nástroje vytvořeného v programovacím jazyce Python.



Obrázek 6: 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. Krátkodobá simulace pro $t \in (0, 30 \text{ dní})$.

Geometrie řešené úlohy je patrná z Obrázku 6 a 7. Materiálové vlastnosti v jednotlivých vrstvách řešené oblasti uvažujeme dle Tabulky 1. Tepelný zdroj od vyhořelého jaderného paliva $q(t)$



Obrázek 7: 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. Dlouhodobá simulace pro $t \in (30 \text{ dní}, 100 \text{ let})$.

se v oblasti nerezového pouzdra s vyhořelým jaderným palivem uvažuje dle vztahu (2), resp. dle Obrázek 5; v ostatních vrstvách řešené oblasti se uvažuje $q = 0$. Tepelný zdroj od hydratace $h(t)$ se v oblasti betonové zálivky uvažuje dle vztahu (3); v ostatních vrstvách řešené oblasti se uvažuje $h = 0$. Úloha je řešena ve dvou krocích.

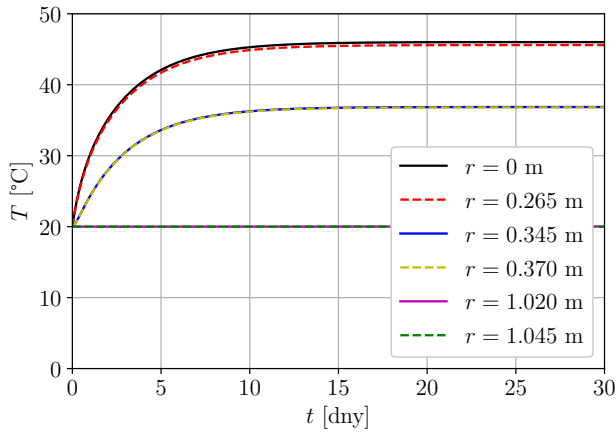
V prvním kroku je simulováno krátkodobé chování kontejneru v čase $t \in (0, 30 \text{ dní})$. V této krátkodobé simulaci je modelován samotný kontejner, viz Obrázek 6 vlevo. Celkový poloměr řešené oblasti je tedy $R = 1.045 \text{ m}$. Počáteční hodnoty jsou uvažovány jako $T_0 = 20 \text{ °C}$, $\xi_0 = 0$. Velikost konečných prvků je nastavena na $\Delta r = 5 \text{ mm}$. Časový krok uvažujeme $\Delta t = 1 \text{ den}$, celkový čas $t_f = 30 \text{ dní}$. Na vnější hranici kontejneru je uvažován přestup tepla (okrajová podmínka (10)) s parametry $T_\infty = 20 \text{ °C}$, $\alpha_c = 9 \text{ W m}^{-2} \text{ K}$.

Následně je simulováno dlouhodobé chování kontejneru v čase $t \in (30 \text{ dní}, 100 \text{ let})$. V této dlouhodobé simulaci je modelován kontejner i přilehlý horninový masiv hlubinného úložiště, viz Obrázek 6 vpravo. Celkový poloměr řešené oblasti je tedy $R = 41.045 \text{ m}$. Počáteční teplota $T_0(r)$ a počáteční stupeň hydratace $\xi_0(r)$ v oblasti kontejneru se uvažuje dle výsledků krátkodobé simulace. V oblasti horninového masivu jsou počáteční hodnoty $T_0 = 20 \text{ °C}$, $\xi_0 = 0$. Velikost konečných prvků uvažujeme v oblasti betonového kontejneru $\Delta r = 5 \text{ mm}$, v oblasti horninového masivu $\Delta r = 500 \text{ mm}$. Časový krok uvažujeme $\Delta t = 1 \text{ den}$, celkový čas $t_f = 100 \text{ let}$. Na hranici řešené oblasti je uvažován nulový tepelný tok (okrajová podmínka (10)) s parametrem $\alpha_c = 0$.

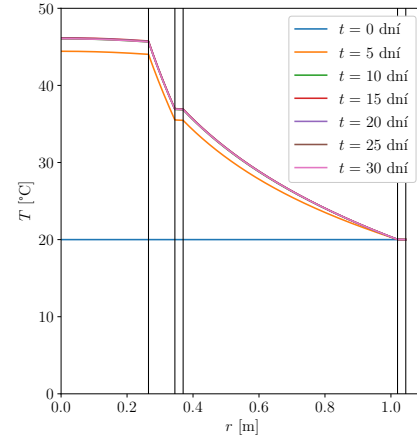
4. VÝSLEDKY

4.1. Krátkodobá simulace

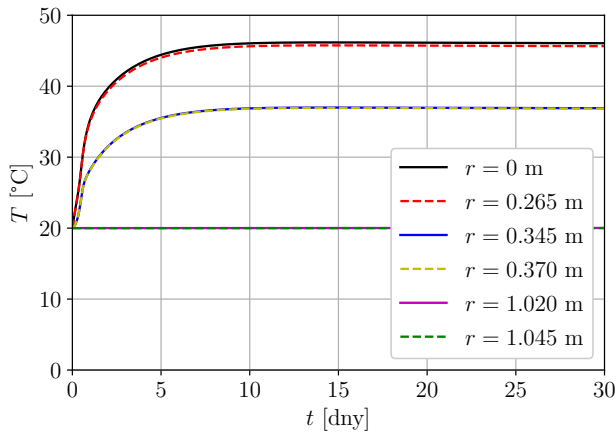
Na Obrázcích 8 až 11 jsou znázorněny výsledné časové vývoje teploty na rozhraních jednotlivých vrstev analyzovaného kontejneru pro krátkodobou simulaci. Z grafů je patrné, že vliv hydratace je největší v rané fázi a to v intervalu nula až pět dní, naopak z výsledků je zřejmé, že po třiceti dnech je vliv hydratace zanedbatelný.



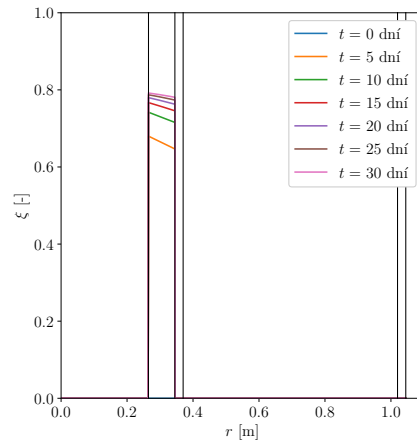
Obrázek 8: Časový vývoj teploty na rozhraních jednotlivých vrstev analyzovaného kontejneru bez hydratace.



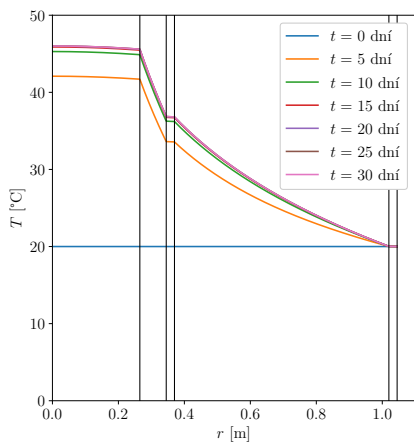
Obrázek 11: Teplotní profily v analyzovaném řezu pro různé časy se zobrazením rozhraní jednotlivých vrstev s uvažováním zdroje od hydratace.



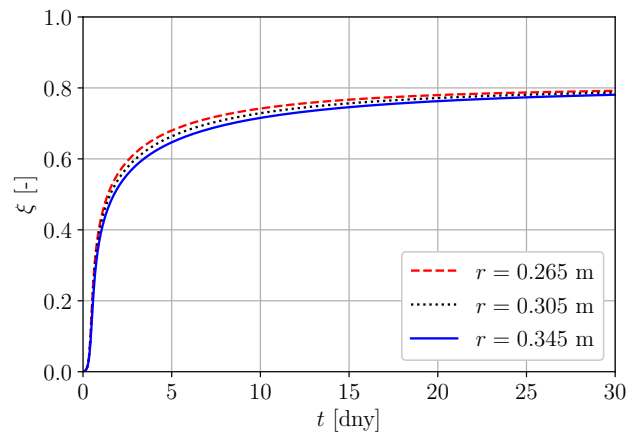
Obrázek 9: Časový vývoj teploty na rozhraních jednotlivých vrstev analyzovaného kontejneru s uvažováním zdroje od hydratace.



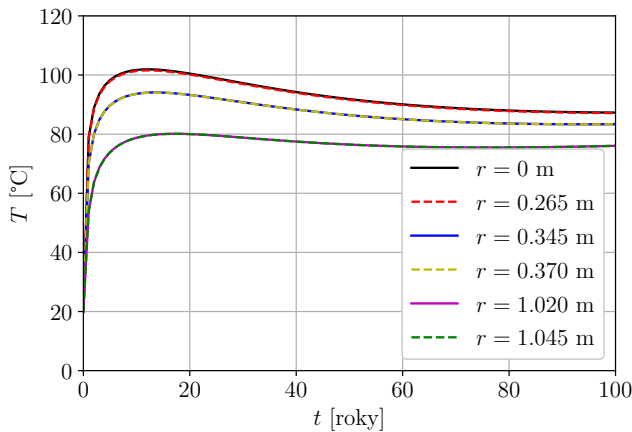
Obrázek 12: Průběh stupně hydratace v analyzovaném řezu pro různé časy od provedení zálivky (filleru).



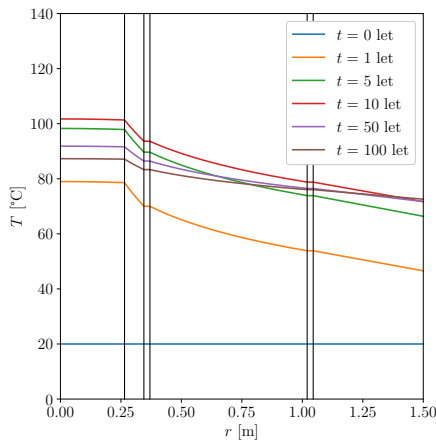
Obrázek 10: Teplotní profily v analyzovaném řezu pro různé časy se zobrazením rozhraní jednotlivých vrstev bez hydratace.



Obrázek 13: Časový vývoj stupně hydratace v různých částech filleru.



Obrázek 14: Časový vývoj teploty na rozhraních jednotlivých vrstev analyzovaného kontejneru.



Obrázek 15: Teplotní profily v analyzovaném řezu pro různé časy od umístění kontejneru do hlubinného úložiště se zobrazením rozhraní jednotlivých vrstev.

Na Obrázku 12 a 13 je znázorněn průběh stupně hydratace v betonovém kontejneru. Z výsledků viditelných z grafů je zřejmé, že hydratace probíhá pouze v betonové zálivce a v ostatních částech kontejneru hydratace neprobíhá. Výsledky jsou vykresleny pro různé časy od provedení betonové zálivky.

4.2. Dlouhodobá simulace

Na Obrázku 14 jsou znázorněny výsledné časové vývoje teploty na rozhraních jednotlivých vrstev analyzovaného kontejneru pro dlouhodobou simulaci.

Teplotní profily (závislosti teploty na polohové souřadnici r) v analyzovaném řezu jsou vykresleny na Obrázku 15.

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

5. ZÁVĚR

V příspěvku byla prezentována numerická analýza vývoje teploty v betonovém kontejneru úložiště vyhořelého jaderného paliva typu VVER-440 včetně vlivu hydratace. Analýza byla provedena pro krátkodobou a dlouhodobou simulaci. 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). Dosažené výsledky budou dále využity pro optimalizaci návrhu konstrukce kontejneru a pro simulování jeho dlouhodobého chování.

Poděkování

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

Reference

- [1] Z. P. Bažant and M. Jirásek. *Creep and Hygrothermal Effects in Concrete Structures*. Springer, 2018.
- [2] M. Beneš and R. Štefan. Homogenization of transport processes and hydration phenomena in fresh concrete. *Acta Polytechnica*, 60(1):12–24, 2020.
- [3] EN 1994-1-2. *Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design*. CEN, 2005.
- [4] L. Jendele, V. Šmilauer, and J. Červenka. Multiscale hydrothermo-mechanical model for early-age and mature concrete structures. *Adv. Eng. Softw.*, 72:134–146, 2014.
- [5] D. Kobylka. *Optimalizace vzájemné vzdálenosti ÚOS. Technická zpráva číslo 135/2017*. SÚRAO, 2019.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] K. Rektorys. *The Method of Discretization in Time and Partial Differential Equations*. D. Reidel, 1982.
- [9] 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.