

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ  
KATEDRA KYBERNETIKY

*MODELOVÁNÍ A SIMULACE*

# MODEL PRŮBĚŽNÉ OHŘÍVACÍ PECE

---

*SEMESTRÁLNÍ PRÁCE*

Vypracoval: **Pavel Skopec**

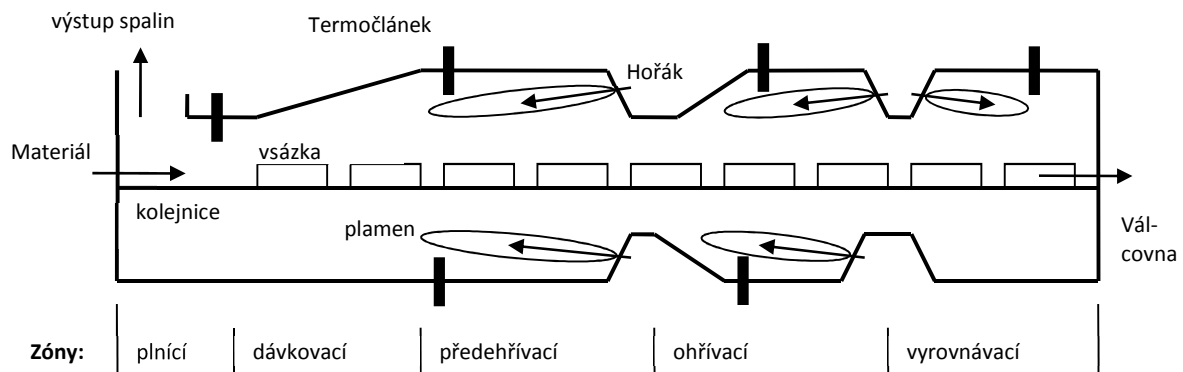
2011

# I. ZADÁNÍ

Sestavte model průběžné ohřívací spalovací pece k ohřevu oceli pomocí jazyku Modelica.

## 1. POPIS SYSTÉMU

Průběžná ohřívací spalovací pec k ohřevu oceli je velice zajímavý dynamický systém. Taková pec je izolovaná komora podlouhlého tvaru, jejímž smyslem je ohřev materiálu pomocí uvolněného tepla při spalování směsi plynu se vzduchem, viz Obrázek 1.

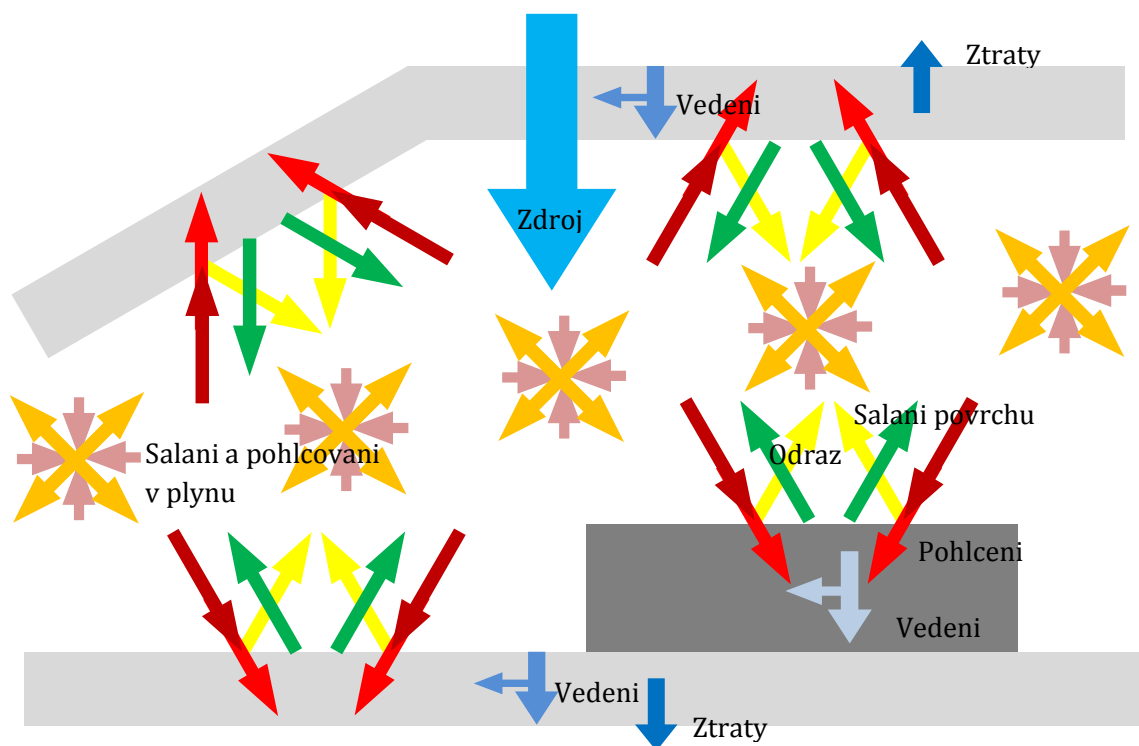


Obrázek 1 Schéma pece

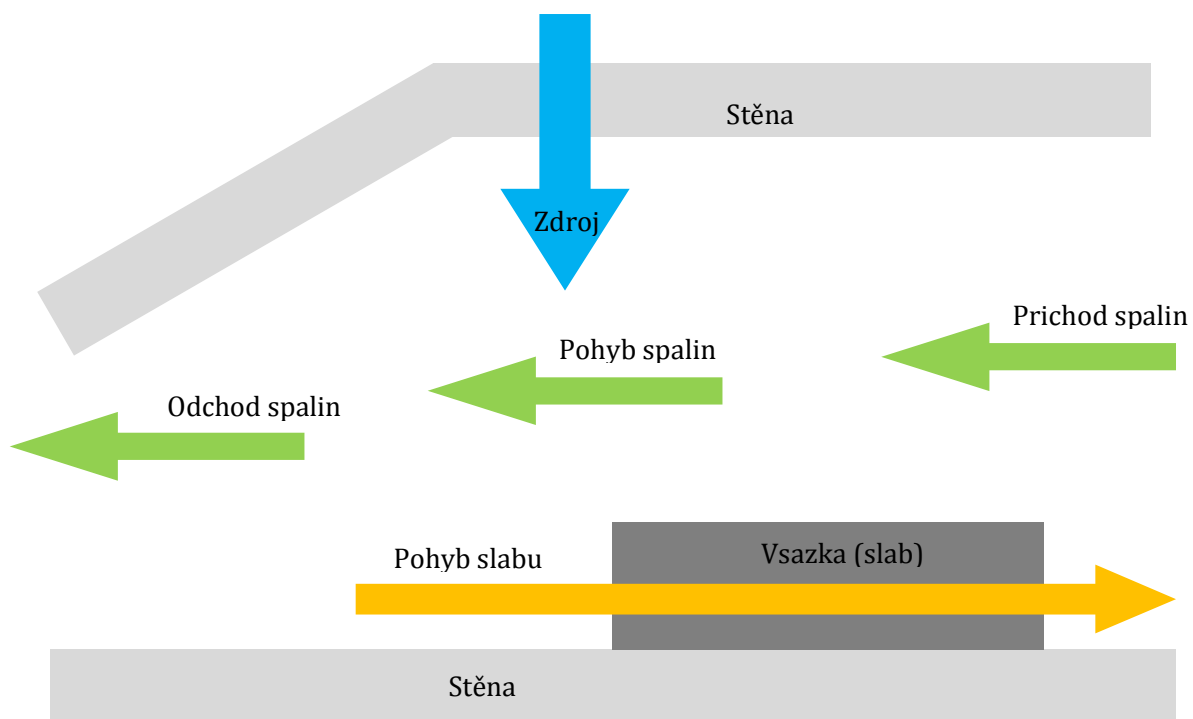
Průběžné pece bývají rozděleny do několika zón, kde jsou hořáky a měřící senzory. Směr proudu spalin jde proti směru pohybu ohříváných kusů materiálu. Ocelové bramy (slaby) se ohřívají ze vstupní teploty 20°C až na požadovanou teplotu kolem 1150°C, přičemž se žádá homogenní teplota v celém průřezu. Velikost a rychlost slabů se může v čase měnit. Z ekonomického a ekologického hlediska se žádá minimální spotřeba paliva.

## 2. FYZIKÁLNÍ POPIS

Díky závislosti na čtvrté mocnině teploty je sálání (tepelná radiace) dominantní tepelný přenos [1], [2]. Teplo uvolněné při spalování směsi se vyzařuje a při částečném pohlcování transparentním médiem se šíří prostorem ve všech směrech. Při dopadu na povrch stěny nebo slabu se částečně odráží a částečně pohlcuje [3]. Teplé povrchy sálají. Uvnitř materiálu dochází k přenosu tepla vedením. Malou část přenosu tepla ze spalin na materiál a stěny je konvekce. Pohyb spalin je pro zjednodušení předpokládán jednorozměrný (pístový).



Obrázek 2 Tepelná bilance



Obrázek 3 Hmotnostní bilance:

Kondukcce je způsob přenosu tepla probíhající uvnitř vsázky a uvnitř stěn pece. Přechodové vedení ve dvou rozměrech je popsáno parciální diferenciální rovnicí:

$$\rho C(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (1.1)$$

kde  $T$  je teplota,  $t$  je čas,  $\rho$  je hustota,  $C(T)$  je tepelná kapacita,  $\lambda(T)$  je součinitel vedení materiálu,  $x, y$  jsou prostorové souřadnice.

Okrajové podmínky pro rovnici vedení mohou být uvažovány jako tepelný radiační tok do povrchu stěny (vsázky nebo zdi)  $q^{Rad}$ , viz rovnice [4], [3]:

$$q^{Rad} = \int_{\Omega=4\pi} I(\vec{r}_w, \vec{s}) (\vec{s} \cdot \vec{n}_w) d\Omega, \quad (1.2)$$

kde  $I(\vec{r}_w, \vec{s})$  je intenzita radiace v místě  $\vec{r}_w$  (w-wall) a  $\vec{s}$  je směr šíření radiace,  $\vec{n}_w$  je normálový vektor plochy,  $\Omega$  je prostorový úhel.

Integro-diferenciální rovnice popisující šíření radiace (RTE) v prostoru vypadá následovně [4], [3]:

$$\frac{1}{\beta_0} \frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} = -I(\vec{r}, \vec{s}) + (1 - \omega_0) I_b(\vec{r}) + \frac{\omega_0}{4\pi} \int_{\Omega=4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s}' \rightarrow \vec{s}) d\Omega', \quad (1.3)$$

kde  $I(\vec{r}, \vec{s})$  intenzita šíření radiace v místě  $\vec{r}$  a směru  $\vec{s}$ ,  $\beta_0$  je součinitel pohlcení radiace,  $\omega_0$  je rozptylový součinitel odrazu,  $I_{bb}(\vec{r})$  intenzita záření černého tělesa v místě  $\vec{r}$ ,  $\Phi(\vec{s}' \rightarrow \vec{s})$  je rozptylová fázová funkce ze přicházejícího směru do odcházejícího směru.  $\Omega$  je prostorový úhel.

Intenzita záření černého tělesa v místě  $\vec{r}$ :

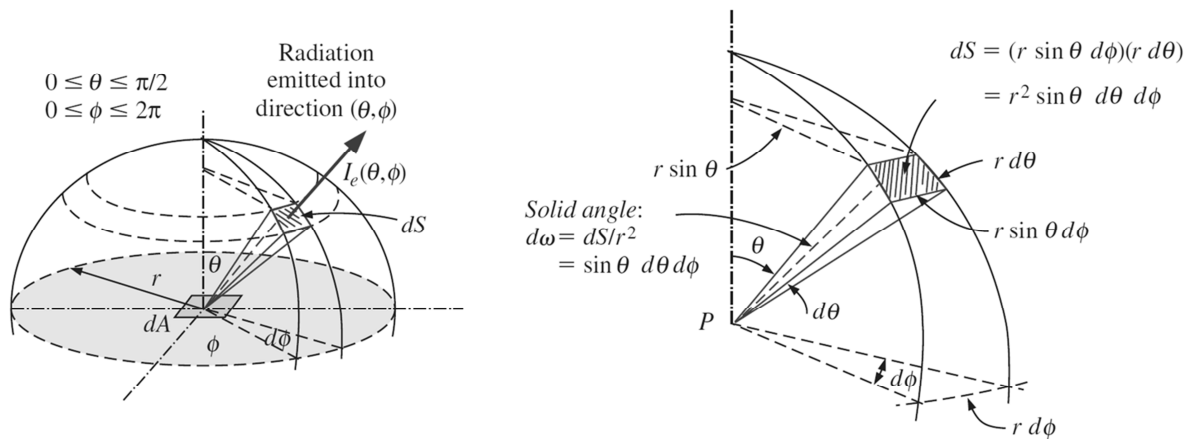
$$I_b(\vec{r}) = \sigma T_{(\vec{r})}^4 / \pi, \quad (1.4)$$

kde  $\sigma$  je Stephan-Boltzmannova konstanta. Totální radiace černého tělesa je pouze funkcí teploty.

Okrajové podmínky rovnice šíření sálání jsou tvořeny vyzářením a odrazem, mají následující tvar:

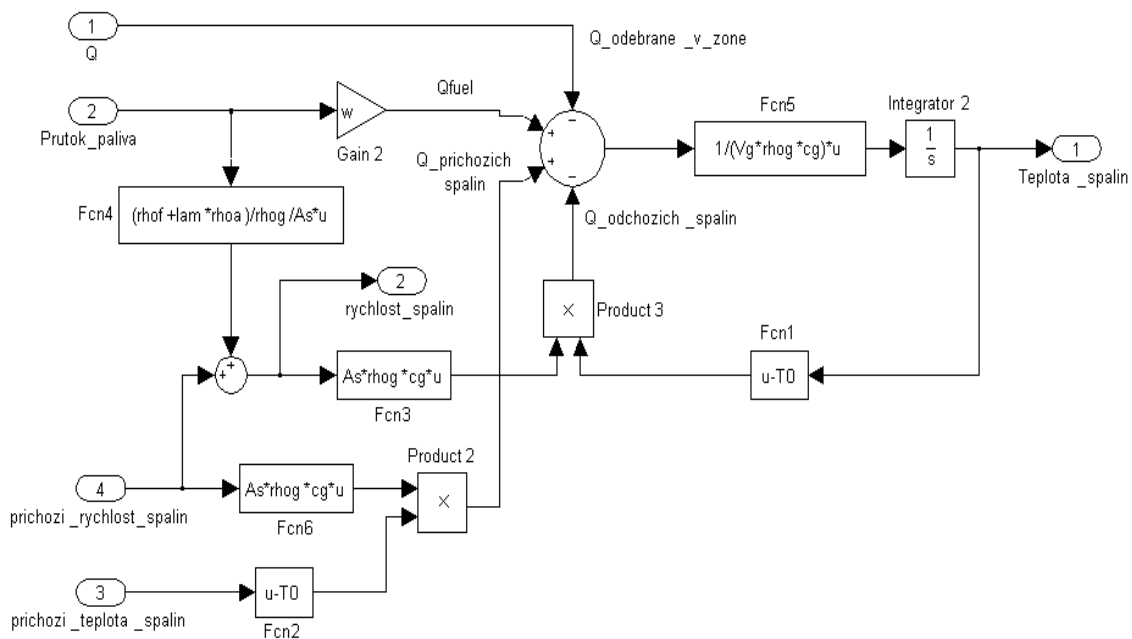
$$I(\vec{r}_w, \vec{s}) = \varepsilon_w I_{bbw}(\vec{r}_w) + \frac{1 - \varepsilon_w}{\pi} \int_{\vec{s}' \cdot \vec{n}_w < 0} I(\vec{r}_w, \vec{s}') |\vec{s}' \cdot \vec{n}_w| d\Omega', \quad (1.5)$$

kde  $I(\vec{r}_w, \vec{s})$  je intenzita radiace v místě  $\vec{r}_w$  (w-wall) a  $\vec{s}$  je směr šíření radiace,  $I_{bbw}(\vec{r}_w) = \sigma T_{\vec{r}_w}^4 / \pi$  je intenzita záření černého tělesa v místě  $\vec{r}_w$  s teplotou v místě  $T_w$ ,  $\varepsilon_w$  je emisivita stěny,  $\vec{n}_w$  je normálový vektor plochy stěny,  $\Omega$  je prostorový úhel:



Obrázek 4 Prostorový úhel. Obrázek přejat z [5]

Model spalování v blokovém schématu [6], [2]



Obrázek 5 Model spalování v blokovém schématu

Divegence tepelného toku odebíraného plynu sáláním [7]

$$\nabla \cdot q(\vec{r}) = \kappa \left[ 4\pi I_b(\vec{r}) - \int_{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}) d\Omega \right], \quad (1.6)$$

Popis bude upřesněn a doplněn o další předpoklady.

### 3. POPIS METOD ŘEŠENÍ

Pomocí metody konečných objemů [4], [3], [7], [8], vytvořit blok transparentního sálajícího plynu s pohybem spalin a jednoduchým spalováním [2], [9], blok pro vedení tepla ve stěnách a blok pro vedení tepla v pohyblivých slabech. Vytvořit rozhraní pro spojení bloků. Bloky spojit dle uspořádání pece. Simulace.

Dále možno zkoušet maximální počet bloků, nelineární parametry vedení tepla v oceli, nepravidelný pohyb vsazky, návrh řízení pece.

## II. ZPRACOVANI

## III. ZAVER

## IV. PRILOHY

## V. REFERENCE

- [1] C. E. J. Baukal, HEAT TRANSFER IN INDUSTRIAL COMBUSTION, CRC Press, 2000.
- [2] P. Mullinger a B. Jenkins, Industrial and Process Furnaces - Principles, Design and Operation, Elsevier, 2008.
- [3] M. F. Modest, Radiative Heat Transfer, 2nd Ed., Academic Press, 2003.
- [4] M. Y. Kim, „A heat transfer model for the analysis of transient heating of the slab in a direct-fired walking beam type reheating furnace,“ *International Journal of Heat and Mass Transfer* 50, p. 3740–3748, 2007.
- [5] Y. A. Çengel, Heat and Mass Transfer: A Practical Approach, 3/e, University of Nevada-Reno, 2007.
- [6] P. V. BARR, „The development, verification, and application of a steady-state thermal model for the pusher-type reheat furnace,“ *Metallurgical and materials transactions. B, Process metallurgy and materials processing science*, pp. 851-869, 1995.
- [7] W. J. Minkowicz, E. M. Sparrow a J. Y. Murthy, Handbook of Numerical Heat Transfer, 2nd ed., NY: Wiley, 2006.
- [8] G. D. Raithby, „DISCUSSION OF THE FINITE-VOLUME METHOD FOR RADIATION, AND ITS APPLICATION USING 3D UNSTRUCTURED MESHES,“ *Numerical Heat Transfer Part B: Fundamentals, Volume 35, Number 4*, pp. 389-405, 1999.
- [9] M. H. Mawhinney a W. Trinks, INDUSTRIAL FURNACES, 6 editor, JOHN WILEY, 2008.