

Etapa 5a

Počítačové a experimentální řešení modelů celoelektrických
sklářských tavicích pecí

S.Kasa, A.Lisý, F.Novotný

Výzkumné práce v rámci etapy 5a rozděleny na tři směry

1. **definice nových okrajových podmínek a postupů pro**
 - **výpočty elektrických parametrů celoelektrických pecí**
 - **simulaci tavení kmene ve sklářských pecích**metodou matematického modelování
2. **studium dějů probíhajících v tavicím bazénu v oblasti topných elektrod a v prostoru pod vsázkou metodou fyzikálního modelování**
3. **studium reakčních mechanismů v počátečních stádiích tavení sklářského kmene**

Nové okrajové podmínky a postupy pro výpočty elektrických parametrů celoelektrických pecí (CEP)

Jouleovo teplo ---> výkonová hustota

$$p = g \cdot E^2 = \frac{1}{r_{el}} \cdot E^2 \quad [W/m^3] \quad \text{--- zdrojový člen v rovnici energie (FK rovnice)}$$

CEP - napájeny střídavým proudem s harmonickým průběhem
rozložení potenciálu ve sklovině

$$\text{div} (g \text{grad} j) = 0 \quad \text{---> řešení - metoda komplexního potenciálu}$$

$$\text{div} (g \text{grad} j_{Re}) = 0$$

$$\text{div} (g \text{grad} j_{Im}) = 0$$

---> řešení - rozložení φ_{Re} a φ_{Im} ve sklovině

pro výkonovou hustotu platí

řešení rovnic a vyčíslení výkonové hustoty

$$p = \frac{g}{2} [(\text{grad} j_{Re})^2 + (\text{grad} j_{Im})^2]$$

známe-li OP na elektrodách

Okrajové podmínky (OP) na elektrodách

závisí na - způsobu zapojení elektrod ke zdroji proudu

- rozložení elektrod v bazénu pece

způsoby zapojení elektrod - uzavřený trojúhelník

- otevřený trojúhelník

- Scottovo zapojení

pro potenciál každé elektrody lze napsat

$$\varphi_1 = a_{11} I_1 + a_{12} I_2 + \dots + a_{1n} I_n$$

$$\varphi_2 = a_{21} I_1 + a_{22} I_2 + \dots + a_{2n} I_n$$

·

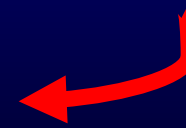
·

$$\varphi_n = a_{n1} I_1 + a_{n2} I_2 + \dots + a_{nn} I_n$$

a_{ji} a a_{ik} - Maxwellovy koeficienty vlastního
a vzájemného potenciálu

Výsledek řešení --> hodnoty φ_{Re} a φ_{Im}
na elektrodách

OP na elektrodách



Výpočty elektrických parametrů v CEP

nejčastěji ---> proudy tekoucí elektrodami

navržena a odzkoušena metoda výpočtu proudu tekoucího elektrodou jako suma proudů tekoucích elementárními vodiči

elementární vodič (EV) - výpočetní buňka ve tvaru krychle přiléhající k elektrodě



Veličiny vypočtené programem FLUENT ve výpočetních buňkách:

- identifikační číslo EV
- souřadnice EV
- teplota v EV
- φ_{Re} a φ_{Im} v EV
- objem EV
- výkonová hustota v EV

Postup výpočtu proudu v elektrodě

1. z teploty v EV ---> ρ_{el} skloviny v EV
2. z objemu EV ---> délka a průřez EV
3. z veličin ad 1) a ad 2) ---> odpor EV
4. z výkonové hustoty v EV a objemu EV ---> výkon vybavený v EV
5. z výkonu v EV a z odporu EV ---> proud tekoucí EV
6. suma proudů tekoucích EV ---> proud tekoucí elektrodou

Simulace tavení kmene metodou matematického modelování

program FLUENT – obsahuje modul SPECIES

modul SPECIES – **dovoluje simulovat tavení sklářského kmene**

Simulace tavení sklářského kmene – několik přístupů

chemická reakce je řízena stupněm přeměny

Chemická reakce řízená stupněm přeměny

reakce $\text{KMEN}_{(\text{solid})} \rightarrow \text{SKLOVINA}_{(\text{liquid})}$

stupeň přeměny (α) – je závislý pouze na teplotě v daném objemu, tj. v objemu výpočetní buňky

pro reakční rychlost platí

$$R = \rho Y \frac{d\alpha}{dT} (v. \text{ grad } T)$$

ρ ... hustota, Y ... hmotnostní zlomek kmene,
 v ... rychlost, $\text{grad } T$... gradient teploty ve vrstvě kmene

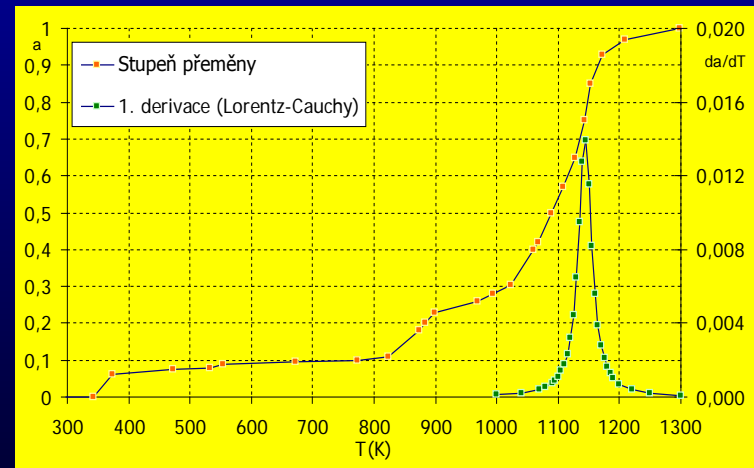
k vyjádření $\frac{d\alpha}{dT}$ se používá Lorentz-Cauchy symetrická funkce a platí pro ni

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{1 + 4 \frac{(T - T_m)^2}{dT_{1/2}^2}}$$

A ... maximální hodnota derivace,

T_m ... teplota maximální hodnoty derivace,

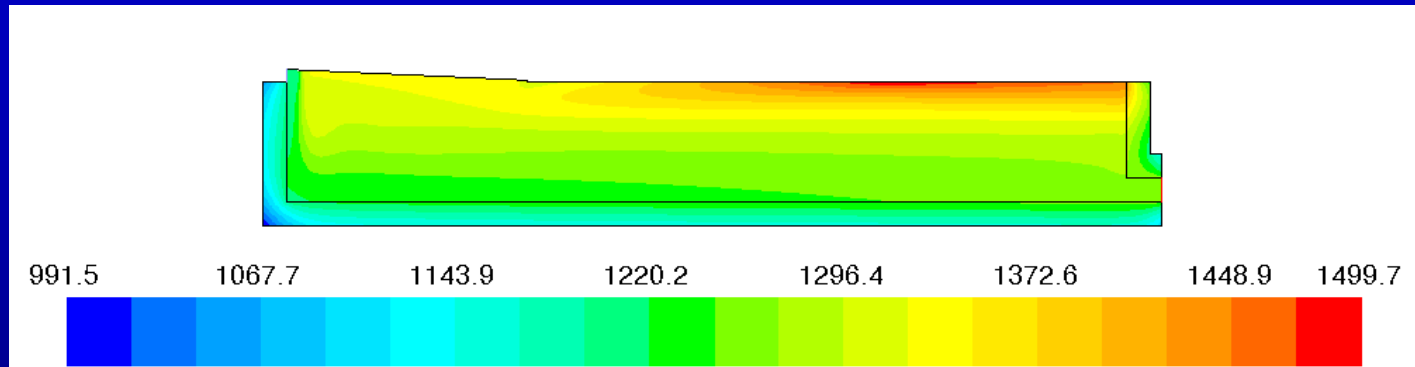
$dT_{1/2}$... šířka píku křivky derivace v poloviční výšce



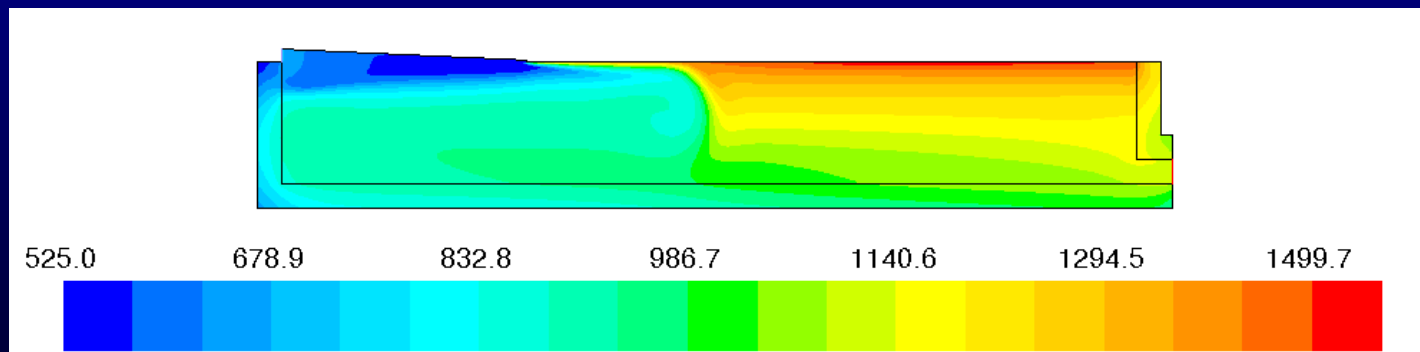
Výsledky

a) 2D-model tavicí pece

Rozložení teplot v peci bez simulace kmene

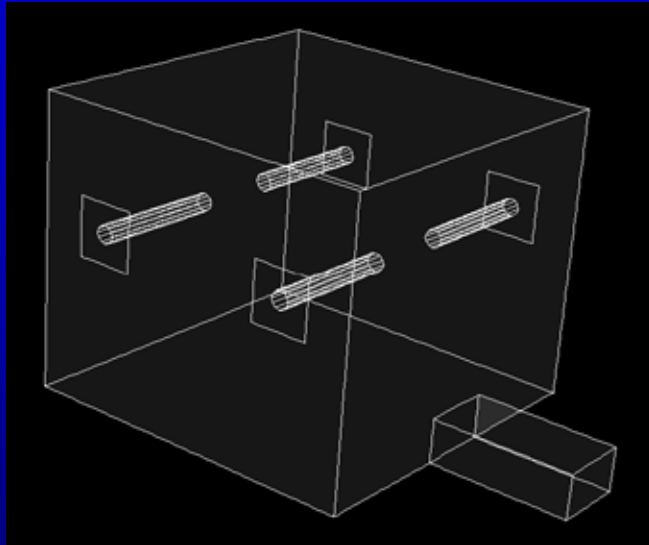


Rozložení teplot v peci se simulací kmene



Výsledky

b) 3D-model celoelektrické tavicí pece



Parametry pece

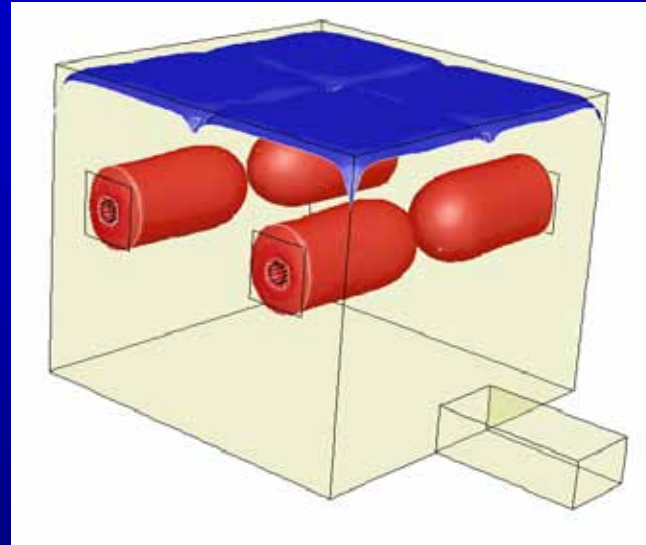
tavicí výkon: 2 t/den

rozměry: 1,2 × 1,2 × 1,0 m

průměr elektrod: 0,06 m

délka elektrod: 0,45 m

zapojení elektrod: Scott



Zobrazené hodnoty

červená: výkonová hustota ($2 \cdot 10^5 \text{ W/m}^3$)

modrá: hmotnostní zlomek kmene (0,5)

Náměty výzkumných prací v oblasti matematického modelování v příštích letech

Matematický model --- program FLUENT

- probíhá neustále jeho vývoj (nové verze)
- **otevřený výpočetní systém**
- implementace nových uživatelských funkcí (UDF)

Dosud vyřešené UDF v modelové laboratoři ÚSK VŠCHT Praha

- 1) UDF pro Jouleovo teplo ---> celoelektrické tavení a EP
- 2) UDF pro bubbling ---> intenzifikace tavicího procesu bubblingem
- 3) UDF pro míchání ---> homogenizace skloviny míchadly
- 4) UDF pro tavení kmene ---> **rozšíření modelu o procesy tavení kmene**

Program FLUENT --- obsahuje modul pro studium vícefázového toku

Discrete Phase Model (DPM)

system - primární spojitá fáze - sklovina (l)
- sekundární nespojitá fáze - kamínky (s)
- šlíry (l)
- bubliny (g)

rozšíření uživatelského prostředí v programu FLUENT

chování bublin ve sklovině - velice závažný problém sklářských provozů

studium pomocí programu FLUENT - je možné

první kroky udělány - viz publikace v Glass International

Kasa S. et al: Chemical composition of bubbles during glass melting,
Glass International 33 (2010), No.5, pp.26-31 (ISSN 0143-7838)

Děkuji za pozornost