

NÁVRHY NÍZKOTEPLIČNÍCH MODELŮ ELEKTRICKÝCH TAVIČÍCH SKLÁŘSKÝCH PECÍ

VLADIMÍR BERNARD

*Společná laboratoř pro chemii a technologii silikátů ČSAV a VŠCHT
Suchbátarova 5, 166 28 Praha 6*

Došlo 12. 12. 1985

Modely byly podle předpokládaného stupně věrnosti rozděleny na úplné, přibližné buď se zanedbáním Reynoldsova čísla (Re aproximace) nebo teplotních závislostí dynamické viskozity a měrné elektrické vodivosti, a hrubé, kdy byla použita obě tato zanedbání. Z praktického hlediska jsou hrubé modely použitelné všeobecně, ostatní pouze ve výjimečných situacích. Výjimkou mezi sklovinami je bezalkalická boritokřemičitá E -sklovina, jež má žádoucí velmi prudký nárůst měrné elektrické vodivosti s teplotou a tak má látkové vlastnosti podobné modelovým kapalinám, takže může být modelována na všech uvedených úrovních. Limitujícím faktorem při aplikacích je velikost geometrického měřítka modelu. Z výpočtů základních parametrů modelu pro celoelektrickou sklářskou pec tavicí tuto sklovinu a porovnáním s dosud užívanými způsoby návrhu modelů bylo zjištěno, že svým provozním režimem se sobě blíží přibližný model s Re aproximací a model navržený tzv. termodynamickým způsobem.

ÚVOD

Významností jednotlivých kritérií podobnosti a jejich aplikací se zabýval Banzal [1], Hrma [2, 3], Novotný [4], Guarga [5] a další. V tomto článku bude navázáno na teoretické výsledky podobnostní analýzy výchozích rovnic popisujících proudění, sdílení tepla a rozložení elektrického proudového pole v neizotermní elektricky vodivé kapalině [6]. Cílem je porovnání jednotlivých postupů, jichž lze použít při návrhu fyzikálních modelů pro celoelektrickou tavicí pec bezalkalickou boritokřemičitou E -sklovinu, která má na rozdíl od jiných sklovin velmi strmou charakteristiku měrné elektrické vodivosti na teplotě, takže lze splnit podobnost této látkové funkce zároveň s teplotním průběhem dynamické viskozity pro tuto sklovinu a dosud známé modelové kapaliny.

VÝBĚR MODELOVÉ KAPALINY A NÁVRH MODELU

Indikátory podobnosti a transformační rovnice mezi základními proměnnými modelu a díla [6] byly rozčleněny podle předpokládané úrovně modelování do následujících skupin:

I. Úplná podobnost

Je třeba dodržet podobnost teplotních charakteristik dynamické viskozity $\eta(T)$ a měrné elektrické vodivosti $\kappa(T)$ skloviny a modelové kapaliny, z nichž dostaneme jednotnou teplotní transformační rovnici, dále Reynoldsovo Re , Grashofovo Gr , výkonové Po a Prandtlovo Pr číslo.

II. Přibližná podobnost

- Jsou zanedbány síly setrvačné oproti třecím, takže lze zanedbat i Re , nebo
- jsou zanedbány teplotní průběhy $\eta(T)$ a $\kappa(T)$ skloviny a modelové kapaliny.

III. Hrubá podobnost

Jsou zanedbány teplotní průběhy $\eta(T)$ a $\kappa(T)$ i Re .

IV. Hydrodynamický způsob [7]

Je vyžadována identita Galileova Ga , Froudova Fr a Gay-Lussacova Gy čísla a teplotní závislosti $\nu(T)$.

V. Termodynamický způsob [3]

Návrh modelu je založen na podobnosti $\kappa(T)$ a kinematické viskozity $\nu(T)$, rovnosti modifikovaného Rayleighova Ra' , Po' a Nusseltova Nu čísla, rychlostního zlomku a čísla vyjadřujícího poměr tepla potřebného k ohřátí skloviny z teploty T_0 na T_M k celkovému teplu přeměny vsázky ve sklovinu o teplotě T_M .

Kromě několika jiných vlastností (průhlednost, stálost, korozivnost atd.) se při výběru modelových kapalin řídíme jejich látkovými vlastnostmi.

Dynamická viskozita $\eta(T)$ je nejvýznamnější látkovou vlastností, jež se mění s teplotou a složením až o několik řádů. Je důležitá jak její absolutní hodnota při referenční teplotě, tak i její pokles s teplotou (chceme-li exaktně dodržet její teplotní podobnost).

Hustotu $\rho(T)$ počítáme mezi doplňkové vlastnosti, neboť její změna s teplotou ani složením není velká. Rovněž variabilita teplotního součinitele objemové roztažnosti β , úzce souvisejícího s volnou konvekcí, je malá (s rostoucím obsahem modifikátoru v modelové kapalině β mírně klesá).

Měrná tepelná kapacita c_p je doplňková vlastnost, s rostoucím obsahem modifikátoru klesá.

Měrná tepelná vodivost λ je též doplňková vlastnost, s rostoucím obsahem modifikátoru obvykle klesá.

Měrná elektrická vodivost $\kappa(T)$ je proměnná s teplotou i složením podobně jako dynamická viskozita a ovlivňuje nejen napětí a elektrický proud tekoucí mezi elektrodami, ale svým teplotním průběhem i teplotní pole kolem elektrod, a tím i konvekční proudění. Z její teplotní závislosti je možno společně s $\eta(T)$ modelové kapaliny a skloviny sestavit teplotní transformační rovnici.

Výběr modelové kapaliny je značně usnadněn, je-li k dispozici jejich přehled, v němž je uvedeno složení a podmínky přípravy s matematicky vyhodnocenými látkovými funkcemi v závislosti na teplotě [$\eta(T)$, $\nu(T)$, $\rho(T)$, $\kappa(T)$] či jejich středními hodnotami (c_p , λ).

Data pro výpočet

Dílo (D)

$T_{rD} = 1\,853\text{ K}$	$\dot{m}_D = 0,579\text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$
$\eta_{rD} = 1,889\text{ Pa} \cdot \text{s}$	$S_D = 14,0\text{ m}^2 (4,5 \times 3,1)$
$\beta_D = 6,703 \cdot 10^{-5}\text{ K}^{-1}$	$h_D = 1,2\text{ m}$
$\kappa_{rD} = 10,72\text{ } \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$	$V_D = 16,8\text{ m}^3$
$c_{pD} = 1\,700\text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	$\eta_D = 3,366 \cdot 610^{10} \exp(4,074\,4 \cdot 10^6 \ln^{-6} T_D)$
$\rho_{rD} = 2\,475\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\kappa_D = 2,079\,7 \cdot 10^3 \exp(-1,808\,6 \cdot 10^7 T_D^{-2})$
$\nu_{rD} = 7,632 \cdot 10^{-4}\text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$\rho_D = 2\,802,8 \exp(-6,703 \cdot 10^{-5} T_D)$
$\lambda_D = 200\text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	

Model (M)

Postupy I, IIb

Modelová kapalina o přibližném složení ethylenglykol (70 %) — voda (odhad z tabulek)

$$T_{rM} = 343 \text{ K}$$

$$\eta_{rM} = 1,732 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\beta_M = 5,9 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$$

$$c_{pM} = 3178 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\kappa_{rM} = 0,285 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$\rho_{rM} = 1060 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\nu_{rM} = 1,634 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\lambda_M = 0,343 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

Index r označuje referenční veličinu.

Postupy IIa, III, IV, V

Modelová kapalina o složení 88,34 % glycerinu, 8,82 MgCl₂, 0,34 % LiCl 1,50 % H₂O

$$\eta_M = 1,380 \cdot 10^{-3} \exp(3,4145 \cdot 10^9 T^{-3,5})$$

$$\kappa_M = 12,6183 \exp(-3,1497 \cdot 10^9 T_M^{-3,5})$$

$$\rho_M = 1504,4 \exp(-4,707 \cdot 10^{-4} T_M)$$

$$c_{pM} = 2626 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\lambda_M = 0,263 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\beta_M = 4,707 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$$

I. Úplná podobnost

1. Z Prandtlova čísla vypočítáme potřebnou dynamickou viskozitu, k níž přiřadíme určitou modelovou kapalinu při dané teplotě. Výpočet je třeba několikrát opakovat postupným zpřesňováním c_{pM} a λ_M .

$$\eta_{rM} = \eta_{rD} c_{pD} \lambda_M / c_{pM} \lambda_D \quad \eta_{rM} = 1,732 \cdot 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Této viskozitě odpovídá zhruba soustava ethylenglykol (70 %) — voda při 70 °C.

2. Ze závislosti $\eta(T)$ a $\kappa(T)$ skloviny a modelové kapaliny vypočítáme dílčí teplotní transformační rovnice a pokud se od sebe značně liší, je třeba nalézt jinou modelovou kapalinu s příznivějšími průběhy $\eta(T)$ a $\kappa(T)$ a výpočet opakovat. Na základě experimentálních výsledků s modelovými kapalinami na bázi ethylenglykolu bylo zjištěno, že mají výhodnější průběhy $\eta(T)$ a $\kappa(T)$ nežli kapaliny na bázi glycerinu a konkrétně pro E-sklovinu mají teplotní transformační rovnice větší směrnici. Pro kapalinu o výše uvedené viskozitě odhadneme $\Delta T_M / \Delta T_D \approx 0,25$.

3. Z Grashofova čísla se vypočte geometrické měřítko modelu

$$k_r = [\beta_D \nu_{rM}^2 / \beta_M (\Delta T_M / \Delta T_D) \nu_{rD}^2]^{1/3} \quad k_r = 1,277 \cdot 10^{-2} (1 : 78,3)$$

4. Z Reynoldsova čísla se vypočte měřítko rychlostí

$$v_M / v_D = \nu_{rM} / \nu_{rD} / k_r \quad v_M / v_D = 0,168 (1 : 5,96)$$

5. Z výkonového čísla se vypočte měřítko elektrických potenciálů

$$\Phi_M / \Phi_D = [\lambda_M \kappa_{rD} (\Delta T_M / \Delta T_D) / \lambda_D \kappa_{rM}]^{1/2} \quad \Phi_M / \Phi_D = 0,127$$

Za κ_{rM} jsme dosadili stejnou hodnotu jako u modelové kapaliny na bázi glycerinu, tj. $0,285 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.

6. Výpočet hmotnostního odběru modelu

$$\dot{m}_M = \eta_{rM} k_r \dot{m}_D / \eta_{rD} \quad \dot{m}_M = 6,779 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

7. Výpočet měřítka elektrických příkonů

$$P_{el, M}/P_{el, D} = \kappa_{rM} k_r (\Phi_M/\Phi_D)^2 / \kappa_{rD} \quad P_{el, M}/P_{el, D} = 5,476 \cdot 10^{-6}.$$

8. Výpočet měřítka elektrických proudů

$$I_M/I_D = \kappa_{rM} (\Phi_M/\Phi_D) k_r / \kappa_{rD} \quad I_M/I_D = 4,312 \cdot 10^{-5}.$$

9. Výpočet měřítka elektrických odporů

$$R_M/R_D = \kappa_{rD} / k_r \kappa_{rM} \quad R_M/R_D = 3\,728.$$

Model navržený na základě výsledků tohoto postupu by měl několik neobvyklých rysů. Je to velmi nízká viskozita modelové kapaliny a malé geometrické měřítko modelu (velikost zhruba jako krabička od zápalek). Z těchto důvodů se užití těchto modelů jeví jako prakticky nereálné.

II. Přibližná podobnost

a) *Re* aproximace

1. Z látkových funkcí $\eta(T)$ a $\kappa(T)$ modelové kapaliny a E-skloviny, jimž přisuzujeme stejnou důležitost, se vypočte teplotní transformační rovnice

$$T_M = 0,167\,4 T_D + 43,4 \quad [\text{K}],$$

$$t_M = 0,167\,4 t_D - 184,0 \quad [^\circ\text{C}].$$

Referenční teplotě $T_{rD} = 1\,853\text{ K}$ tedy odpovídá $T_{rM} = 353,6\text{ K}$, při níž jsou látkové vlastnosti modelové kapaliny na bázi glycerinu

$$\eta_{rM} = 8,389 \cdot 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\rho_{rM} = 1\,273,7 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$\nu_{rM} = 6,586 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\kappa_{rM} = 0,285 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$$

2. Z Rayleighova čísla se vypočítá geometrické měřítko

$$k_r = [\rho_{rD} c_{pD} \lambda_M \nu_{rM} \beta_D / \rho_{rM} c_{pM} \lambda_D \nu_{rD} \beta_M (\Delta T_M / \Delta T_D)]^{1/3} \quad k_r = 0,049\,5 \quad (1 : 20,2).$$

Rozměry modelu jsou $(22,3 \times 15,3)$ cm, výška hladiny modelové kapaliny $h_M = 5,9$ cm. Pro danou sklovinu lze tedy geometrické měřítko ovlivnit nejvíce viskozitou modelové kapaliny (vlivy snižující se měrné tepelné vodivosti a měrné tepelné kapacity se přibližně ruší).

3. Z modifikovaného Grashofova čísla se vypočte měřítko rychlostí

$$v_M/v_D = \beta_M (\Delta T_M / \Delta T_D) k_r^2 \nu_{rD} / \beta_D \nu_{rM} \quad v_M/v_D = 3,34 \cdot 10^{-2} \quad (1 : 30,0).$$

4. Výpočet hmotnostního odběru modelu

$$\dot{m}_M = \rho_{rM} \beta_M \nu_{rD} k_r^4 (\Delta T_M / \Delta T_D) \dot{m}_D / \rho_{rD} \beta_D \nu_{rM} \quad \dot{m}_M = 2,437 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Další výpočty jsou jako v I.

$$5. \Phi_M/\Phi_D = 9,10 \cdot 10^{-2} \quad (1 : 10,99).$$

$$6. P_{el, M}/P_{el, D} = 1,089\,8 \cdot 10^{-5}.$$

$$7. I_M/I_D = 1,198 \cdot 10^{-4}.$$

$$8. R_M/R_D = 759,9.$$

b) Je zanedbána podobnost teplotních závislostí $\eta(T)$ a $\kappa(T)$.

Výpočet je prakticky stejný jako při úplné podobnosti (I) s tím rozdílem, že teplotní transformační rovnice se stává nezávisle proměnnou, a tudíž ji můžeme volit sami.

1. $\eta_{rM} = 1,732 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$.
2. Volíme $(\Delta T_M/\Delta T_D) = 0,015$, referenční teplota je stejná jako v I.
3. $k_r = 3,26 \cdot 10^{-2}$ (1 : 30,65);
Rozměry modelu jsou $(14,7 \times 10,1)$ cm, hladina 3,9 cm.
4. $v_M/v_D = 6,57 \cdot 10^{-2}$ (1 : 15,2).
5. $\dot{m}_M = 1,731 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$.
6. $\Phi_M/\Phi_D = 3,110 \cdot 10^{-2}$ (1 : 32,2).
7. $P_{el, M}/P_{el, D} = 8,383 \cdot 10^{-7}$.
8. $I_M/I_D = 2,695 \cdot 10^{-5}$.
9. $R_M/R_D = 1\ 154$.

III. Hrubá podobnost

Jsou zanedbány teplotní průběhy $\eta(T)$ a $\kappa(T)$ a je použita *Re* aproximace. Nezávislostí volby teplotní transformační rovnice na látkových funkcích nastává významné zjednodušení oproti IIa, což má příznivý vliv na konstrukci a provozní režim modelu.

1. Volba teplotní transformační rovnice

Ponecháme $T_{rM} = 353,6 \text{ K}$, avšak měřítko teplotních diferencí snížíme na 0,1, takže výsledný tvar bude

$$T_M = 0,1T_D + 168,3 \quad [\text{K}].$$

Další výpočet je stejný jako ve IIa.

2. $k_r = 5,98 \cdot 10^{-2}$ (1 : 17,0);
Rozměry modelu jsou $(26,5 \times 18,2)$ cm, výška hladiny 7,2 cm.
3. $v_M/v_D = 2,81 \cdot 10^{-2}$ (1 : 35,5).
4. $\dot{m}_M = 2,898 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$.
5. $\Phi_M/\Phi_D = 7,03 \cdot 10^{-2}$ (1 : 14,2).
6. $P_{el, M}/P_{el, D} = 7,732 \cdot 10^{-6}$.
7. $I_M/I_D = 1,10 \cdot 10^{-4}$.
8. $R_M/R_D = 639,7$.

IV. Hydrodynamický způsob

1. Výpočet teplotní transformační rovnice z Galileova čísla

$$v_M(T_M) = v_D(T_D)k_r^{3/2}$$

Kinematické viskozity vyjádříme arrheniovskou rovnicí

$$\begin{aligned} v_M &= A'_M \exp(B'_M/T_M) & v_D &= A'_D \exp(B'_D/T_D) \\ A'_M &= 1,629 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} & A'_D &= 1,188 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \\ B'_M &= 6\ 187,2 \text{ K} & B'_D &= 32\ 689,2 \text{ K} \end{aligned}$$

Pro teploty modelu pak platí

$$T_M = B'_M/[\ln(A'_D/A'_M) + B'_D/T'_D + 3/2 \ln k_r]$$

Aby na modelu vyšly přijatelně nízké teploty, zvolíme $k_r = 0,15$ a dostaneme tak tabulku korespondujících teplot

T_D [K]	1 873	1 823	1 773	1 723	1 673	1 623	1 573	1 523	1 473
T_M [K]	362,7	352,8	342,9	333,1	323,2	313,3	303,5	293,7	283,9

Lineární regresí těchto hodnot dostaneme

$$T_M = 0,1970T_D - 6,4 \quad [\text{K}].$$

Rozměry modelu jsou $(67,5 \times 46,5)$ cm, výška hladiny 18,0 cm. Referenční teplota modelu $T_{rM} = 358,6$ K.

2. Z Froudova čísla se vypočítá měřítko rychlosti

$$v_M/v_D = k_r^{1/2} \quad v_M/v_D = 0,321 \quad (1 : 3,12).$$

3. Výpočet hmotnostního odběru modelu

$$\dot{m}_M = \rho_M k_r^{5/2} \dot{m}_D / \rho_D \quad \dot{m}_M = 2,602 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}.$$

4. Míra podobnosti volné konvekce se odhadne z Gay-Lussacova čísla

$$\beta_M \Delta T_M = \beta_D \Delta T_D \quad [1]_M = [0,678]_D.$$

Podíl volné konvekce na celkovém proudění na modelu bude tedy větší než na díle.

5. Podobnost teplotních charakteristik měrné elektrické vodivosti skloviny a modelové kapaliny

$$[\kappa_{T \max} / \kappa_{T \min}]_M = [\kappa_{T \max} / \kappa_{T \min}]_D.$$

Pro teplotní interval na díle $\Delta T_D = 100$ K, jemuž odpovídá na modelu $\Delta T_M = 19,7$ K, a maximálních teplotách díla $T_{D \max} = 1 873$ K ($1 600$ °C) a modelu $T_{M \max} = 362,6$ K ($89,4$ °C) vychází

$$[2,11]_M = [1,82]_D.$$

6. $R_M/R_D = 208,7$.

V. Termodynamický způsob

Použijeme stejné geometrické měřítko jako v postupu IIa

$k_r = 4,95 \cdot 10^{-2}$. Další potřebné údaje jsou:

$H_D = 3,67 \cdot 10^{-6} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ (tavné teplo E-skloviny)

$L_D = 2,25$ m (charakteristická délka)

$N_D = 4,136 \cdot 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ (měrný tavicí výkon)

$L_M = 0,111$ m

$S_M = 3,412 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$.

Při stejných referenčních teplotách jako ve IIa platí mezi nimi pouhá přímá úměrnost (jde o případ konstantové podobnosti)

$$T_M/T_D = \Delta T_M/\Delta T_D = 0,1908.$$

1. Charakteristické konstanty arrheniovských závislostí $\nu(T)$ a $\kappa(T)$ modelové kapaliny

$$B'_M = 6\,237,3 \text{ K} \quad D_M = 4\,416,0 \text{ K.}$$

2. Teplo ekvivalentní tavnému teplu skloviny, jež je třeba odebrat hladině modelové kapaliny

$$H_M = c_{pM}(\Delta T_M/\Delta T_D) H_D/c_{pD} \quad H_M = 1,082 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

3. Hmotnostní odběr

$$\dot{m}_M = c_{pD} \nu_{rD} \eta_{rM} \beta_M k_r^2 S_M \dot{N}_D H_M / c_{pM} \nu_{rM} \eta_{rD} \beta_D H_D \quad \dot{m}_M = 2,746 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Hladině modelu je třeba odebírat tepelný výkon $H_M \dot{m}_M = 29,7 \text{ W}$.

4. Výpočet měřítka rychlosti

$$\nu_M/\nu_D = (c_{pD} \eta_{rD} \beta_M \dot{m}_M H_M / c_{pM} \eta_{rM} \beta_D \dot{m}_D H_D)^{1/2} \quad \nu_M/\nu_D = 3,78 \cdot 10^{-2} \quad (1 : 26,4).$$

5. Výpočet měřítka elektrických příkonů

$$P_{el, M}/P_{el, D} = H_M \dot{m}_M / H_D \dot{m}_D \quad P_{el, M}/P_{el, D} = 1,398 \cdot 10^{-5}.$$

6. Výpočet měřítka elektrických potenciálů

$$\Phi_M/\Phi_D = (P_{el, M} \kappa_{rD} / P_{el, D} \kappa_{rM} k_r)^{1/2} \quad \Phi_M/\Phi_D = 0,102 \quad (1 : 9,80).$$

ZÁVĚRY

Na základě výsledků, které jsou přehledně shrnuty v tab. I, lze konstatovat, že modely téže pece se mohou podle použitého postupu lišit ve všech význačných parametrech včetně geometrického měřítka. Modely navržené na základě úplné podobnosti (I) zřejmě nenalezou praktické uplatnění vzhledem k velmi nízkému geometrickému měřítku. Jestliže se teplotní transformační rovnice sestavené z průběhů $\eta(T)$ a $\kappa(T)$ příliš neliší a lze je sestavit v rovnici jednu (oběma látkovým funkcím přitom přikládáme stejnou váhu), což je poměrně dobře splněno pouze u E-skloviny s výraznější teplotní závislostí $\kappa(T)$ než mají jiné skloviny, potom lze aplikovat postup s *Re* aproximací (IIa). Zanedbáme-li vliv závislosti $\eta(T)$ a $\kappa(T)$ na teplotní transformační rovnici a naopak *Re* respektujeme (IIb), potom i přes velmi nízké měřítko teplotních diferencí dostáváme stále příliš malé geometrické měřítko, takže reálné modely lze sestavit v rozumné velikosti pouze pro veliké sklářské pece. Vazba na *Re* způsobuje opět velmi nízkou viskozitu modelové kapaliny. Pro téměř všechny skloviny je zřejmě nejpříjemnější postup III, kde jsou zanedbány teplotní závislosti $\eta(T)$ a $\kappa(T)$ i *Re*. Svým provozním režimem se nejvíce blíží dosud běžně provozovaným modelům, a to jednak možností použít dostatečně viskózních kapalin na bázi glycerinu při obvyklém geometrickém měřítku $k_r = (1/10 \div 1/15)$, tak i mírností v nastavení okrajových podmínek, kdy odpadají vysoké gradienty teplot u stěn a víka modelu. K elektrickému ohřevu je potřeba nízký elektrický příkon a namísto drastického zchlazování víka je možno použít temperované vody (intenzita chlazení ovšem závisí na volbě měřítka teplotních diferencí). Tím se zjednoduší i celé experimentální zařízení a snadněji se docílí ustáleného stavu modelu. Elektrický příkon se pohybuje řádově v desítkách W a sníží se i koroze elektrod, takže modelová kapalina zůstane delší dobu průhledná. Při daném hmotnostním odběru modelu jsou pak tepelné toky a proudění nejvíce ovlivněny nastavením okrajových podmínek, které na díle nejsou bohužel obvykle známy, a pak jsme nuceni je odhadovat (teploty na vnitřních površích stěn, dna a vsázky). Hydrodynamických modelů (IV) se již dlouhá léta používá při modelování na katedře silikátů

Tabulka I

Přepočet základních parametrů modelu a díla různými způsoby

Druh podobnosti	Metoda podobnostní transformace			Jiné postupy		
	I. Úplná podobnost	II. Přibližná podobnost		III. Hrubá podobnost	IV. Hydrodynamický způsob	V. Termodynamický způsob
		a) <i>Re</i> aproximace	b) Zanedbání průběhů $\eta(T)$ a $\kappa(T)$			
geometrická teplotní	$1,28 \cdot 10^{-2}$ $\Delta T_M / \Delta T_D \approx 0,25$	$4,95 \cdot 10^{-2}$ $T_M = 0,167 T_D + 43,4$	$3,26 \cdot 10^{-2}$ $\Delta T_M / \Delta T_D = 0,015$	$5,98 \cdot 10^{-2}$ $T_M = 0,1 T_D + 168,3$	$1,50 \cdot 10^{-1}$ $T_M = 0,197 T_D - 6,4$	$4,95 \cdot 10^{-2}$ $T_M = 0,191 T_D$
rychlosti hmotnostních odběrů	$1,68 \cdot 10^{-1}$ $1,17 \cdot 10^{-5}$	$3,34 \cdot 10^{-2}$ $4,21 \cdot 10^{-5}$	$6,57 \cdot 10^{-2}$ $2,99 \cdot 10^{-5}$	$2,81 \cdot 10^{-2}$ $5,01 \cdot 10^{-5}$	$3,21 \cdot 10^{-1}$ $4,49 \cdot 10^{-3}$	$3,78 \cdot 10^{-2}$ $4,74 \cdot 10^{-5}$
elektrických potenciálů	$1,27 \cdot 10^{-1}$	$9,10 \cdot 10^{-2}$	$3,11 \cdot 10^{-2}$	$7,03 \cdot 10^{-2}$	—	$1,02 \cdot 10^{-1}$
elektrických proudů	$4,31 \cdot 10^{-5}$	$1,20 \cdot 10^{-4}$	$2,70 \cdot 10^{-5}$	$1,10 \cdot 10^{-4}$	—	—
elektrických příkonů	$5,48 \cdot 10^{-6}$	$1,09 \cdot 10^{-5}$	$8,38 \cdot 10^{-7}$	$7,73 \cdot 10^{-6}$	—	$1,40 \cdot 10^{-5}$
elektrických odporů	3 728	760	1 154	640	209	—

V. Bernard:

VŠCHT v Praze a výsledků bylo použito při návrzích či technologických úpravách sklářských agregátů, ať celoelektrických či s elektrickým přívěvem. Termodynamický způsob modelování (V) je kombinací odhadu rychlosti volné konvekce v prostoru nad elektrodami a střední efektivní měrné tepelné vodivosti skloviny s podobností tepelných procesů na základě celkové tepelné bilance celoelektrické sklářské tavicí pece a jejího modelu. Výsledky získané tímto způsobem se číselně značně přibližují postupu s Re aproximací (IIa), avšak geometrické měřítko modelu není závisle proměnnou. Je to způsobeno tím, že jeden stupeň volnosti získaný odhadem λ_D skloviny je využit právě na volbu k_r při známé modelové kapalině. Malé rozdíly jsou způsobeny jinou teplotní transformační rovnicí s nulovou absolutní konstantou.

Seznam symbolů

a	měrná teplotní vodivost [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
A', B'	konstanty arrheniovsky vyjádřené závislosti $\nu(T)$ [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$], [K]
c_p	měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
D	konstanta v exponentu arrheniovsky vyjádřené závislosti $\kappa(T)$
g	gravitační zrychlení [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]
h	výška hladiny [m]
H	tepelný obsah kapaliny při maximální teplotě [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$]
I	elektrický proud [A]
k_r	geometrické měřítko
L	referenční délka [m]
\dot{m}	hmotnostní odběr [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]
P_{e1}	elektrický příkon [W]
R	elektrický odpor [Ω]
S	plocha dna [m^2]
t	teplota [$^{\circ}\text{C}$]
T	teplota [K]
T_0	teplota vzniku skloviny ze vsázky [K]
T_{\max}	maximální teplota skloviny [K]
v	rychlost [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
α	součinitel přestupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]
β	teplotní součinitel objemové roztažnosti [K^{-1}]
Δ	diference
η	dynamická viskozita [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]
Φ	elektrický potenciál [V]
κ	měrná elektrická vodivost [$\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$]
λ	měrná tepelná vodivost [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
ν	kinematická viskozita [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
ρ	hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
$Fr = gL/v^2$	Froudovo číslo
$Ga = gL^3/\nu^2$	Galileovo číslo
$Gr = \beta g \Delta T L^3/\nu^2$	Grashofovo číslo
$Gr' = \beta g \Delta T L^2/\nu v$	modifikované Grashofovo číslo
$Gy = \beta \Delta T$	Gay-Lussacovo číslo
$Nu = \alpha L/\lambda$	Nusseltovo číslo
$Po = \lambda \Delta T/\kappa \Phi^2$	výkonové číslo

$Pr' = P_{e1}/H\dot{m}$	modifikované výkonové číslo
$Pr = \nu/a$	Prandtlovo číslo
$Ra = \beta g \Delta T L^3 / \nu a$	Rayleighovo číslo
$Ra' = \beta g \Delta^2 T L^2 \rho c_p / \nu H \dot{N}$	modifikované Rayleighovo číslo
$Re = \nu L / \nu$	Reynoldsovo číslo
r	referenční veličina
M	pro model
D	pro dílo
T_{\max}	při maximální teplotě
T_{\min}	při minimální teplotě

Literatura

- [1] Banzal B.: *Physical Modeling of All-Electric Furnace*, Corning Glass Works, New York.
- [2] Hrma P.: *Silikáty* 24, 265 (1980).
- [3] Hrma P.: *J. Am. Ceram. Soc.* 66, 519 (1983).
- [4] Novotný F.: *Sklář a keramik* 31, 547 (1981).
- [5] Guarga R. A.: *J. Am. Ceram. Soc.* 61, 388 (1978).
- [6] Bernard V.: *Silikáty* 29, 315 (1985).
- [7] Staněk J.: *Elektrické tavění skla*, str. 150, SNTL, Praha 1976.

ПРОЕКТЫ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ МОДЕЛЕЙ
СТЕКЛОВАРЕННЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ

Владимир Бернад

*Общая лаборатория химии и технологии силикатов ЧСАН и ХТИ
166 28 Прага*

Подобность физической модели и цельноэлектрической стекловаренной печи в зависимости от количества проведенных пренебрежений подразделяли на полную, приближительную и общую. Ни в одном из приводимых уровней не рассматривали подобность удельной теплопроводности в зависимости от температуры стекломассы и модельной жидкости, охарактеризованной только реферирующей величиной. Полные модели требуют действие чисел Рейнольдса, Грасгофа, числа мощности и числа Прандтля и необходимо соблюдать подобность температурных характеристик динамической вязкости и удельной электропроводности стекломассы и модельной жидкости. У приближительных моделей пренебрегали или температурными ходами динамической вязкости и удельной электропроводности или числом Рейнольдса (Re аппроксимация), у общих моделей пренебрегали обоими. Для приводимых уровней подобности предлагались соответствующие модели и результаты сопоставляли с обыкновенно применяемыми способами (гидродинамическим и термодинамическим). Установили, что модели той же печи могут друг от друга значительно отличаться в зависимости от применяемого способа. Для практических целей наибольшее значение имеет общее моделирование, причем можно использовать обыкновенные модельные жидкости на основе глицерина для всех промышленных стекломасс. Требованиям полной и приближительной с Re аппроксимацией подобности ближе всех безщелочная боросиликатная Е-стекломасса, имеющая необыкновенно резкий температурный ход удельной электропроводности. В случае приводимой стекломассы проводились все расчеты.

DESIGN OF LOW-TEMPERATURE MODELS OF ELECTRIC GLASS
FURNACES

Vladimír Bernard

*Joint Laboratory for the Chemistry and Technology of Silicates
Czechoslovak Academy of Sciences and Institute of Chemical Technology, 166 28 Prague 6*

According to the number of factors neglected, the similarity of a physical model and an all-electric glass furnace was divided into complete, approximate and rough. The similarity of temperature dependent thermal conductivity of glass melt and model liquid here characterized by a single reference value, was not considered at any of these levels. Complete models require matching Reynolds, Grashof, Power and Prandtl numbers and similarity of the temperature characteristics of dynamic viscosity and electrical conductivity for the glass melt and the model liquid should be maintained.

In the case of approximate models, either the temperature courses of dynamic viscosity and electric conductivity or Reynolds number (Re approximation) are neglected, in that of rough models both factors are neglected. The corresponding models were suggested for the similarity levels mentioned above, and the results were compared with the more popular procedures (hydrodynamic and thermodynamic modelling). It was found that models of one and the same furnace may differ considerably according to the procedure employed. Rough modelling, which makes use of current glycerol-based model liquids for all commercial glass melts, is best suited for practical purposes. The requirement of complete and approximate similarity is most closely approached by the non-alkaline borosilicate E-glass melt which shows an extraordinarily steep temperature course of electrical conductivity and for which all the calculations were carried out.

R. H. DOREMUS: RATES OF PHASE TRANSFORMATIONS (Rychlost fázových přeměn)

176 str. vč. obrázků, cena 29 dol.
Academic Press Inc. Publishers Orlando, Florida USA

Kniha je svým rozsahem, výběrem látky i způsobem podání vynikající učebnicí kinetiky fázových přeměn zejména pro ty kdo studují obor materiálového inženýrství a seznámili se již se základy fyziky pevných látek, s termodynamikou fázových a chemických rovnováh a také s podstatou transportních jevů.

Po velice stručném úvodu o významu přenosu tepla a difúze při nukleaci a růstu krystalů pojednává autor o termodynamice fázových rozhraní ve vztahu ke tvaru krystalů, chování zakřivených rozhraní i adsorpčním jevům, výstižně zpracovává kapitoly o nukleaci krystalů z páry i ve fázích pevných, o separaci fází kapalných a také o spinodálním rozkladu. Následují kapitoly o teoriích kinetiky růstu krystalů z páry, o krystalizaci tavenin (krystalizaci skel), růstu krystalů z roztoků — (problémy pěstování monokrystalů) a růstu zrn v polykrystalických materiálech (zejména o precipitačních procesech v metalurgii).

Každá kapitola je doplněna řadou úloh a seznamem vhodně volené literatury doporučené k dalšímu studiu.

Cílem autora bylo shrnout současný stav vědění o kinetice rozmanitých fázových přeměn, s nimiž se setkává v praxi fyzik, chemik či inženýr, zabývající se pěstováním monokrystalů a přípravou kovových či nekovových materiálů. Pochopení mechanismu fázových přeměn je předpokladem k řízení jejich průběhu, a tím i k dosažení požadovaných vlastností vyráběných materiálů, což je jedním z nejdůležitějších úkolů inženýra.

Kniha poskytuje čtenáři dostatečně široký obecný základ, který může snadno použít pro řešení problému, s nímž se setkává v praxi. *Satava*

MATERIÁLOVÝ VÝSKUM NA PENNSYLVÁNSKEJ ŠTÁTNEJ UNIVERZITE. Za 25 rokov činnosti výskumu pevných látok Pensylvánska štátna univerzita sa vypracovala na významné svetové pracovisko i v tejto oblasti. Hlavný smer aktivity bol a je v syntéze a charakteristike nekovových anorganických materiálov — keramiky. Na tejto univerzite pracovali a pôsobia mnohí známi vedci — Osborn E. F., Muan A., Roy R. a D. Hummel F., Pepinsky R., Cochran W., Davey W., Richardson W. ai.