

# OVĚŘENÍ SPRÁVNOSTI HODNOT ÚDAJŮ FYZIKÁLNÍHO MODELU ELEKTRICKÉ SKLÁŘSKÉ TAVICÍ PECE NA ZÁKLADĚ POROVNÁNÍ S PROVOZNÍMI ÚDAJI

STANISLAV KASA, JAROSLAV STANĚK

*Katedra technologie silikátů*

*Vysoká škola chemicko-technologická, Suchbátarova 5, 166 28 Praha 6*

Došlo 17. 1. 1986

*Při modelování elektrických sklářských tavicích pecí je nutná shoda elektrických vlastností modelové kapaliny a skloviny. To znamená dodržení podobnosti průběhů teplotní závislosti měrného elektrického odporu modelové kapaliny a skloviny. V příspěvku je ukázáno, na základě porovnání laboratorních modelových dat s daty provozními, do jaké míry nemusí být podobnost průběhů teplotní závislosti měrného elektrického odporu modelové kapaliny a skloviny splněna, aby bylo dosaženo dostatečné přesnosti při přepočtu elektrických veličin z modelu na dílo a naopak. Porovnání bylo provedeno u dvou pecí na výrobu obalového skla a jejich modelů. Porovnávanými veličinami byly odpory mezi elektrodami.*

## ÚVOD

Modelování sklářských tavicích pecí v současné době předchází většině projekčních prací při rekonstrukcích stávajících pecí nebo při návrzích pecí zcela nových. Sklářskou tavicí pec můžeme modelovat několika způsoby. Jsou to modely matematické, matematicko-fyzikální a fyzikální [1, 2].

Matematické modely jsou představovány soustavami matematických vztahů, rovnic, funkcí, algoritmů a spadají sem i výpočetní programy.

Původní základní rovnice, většinou složité soustavy parciálních diferenciálních rovnic, se převádějí na jednodušší soustavy obyčejných diferenciálních rovnic nebo soustavy algebraických rovnic. Shoda nebo lépe podobnost základních rovnic modelu a díla v podstatě neexistuje, žádoucí je však přiměřená shoda řešení.

Matematicko-fyzikální modely vznikají na základě toho, že rovnice stejného druhu popisují různé fyzikální procesy. Takové modely se liší svou fyzikální podstatou, charakterem zkoumání objektů a charakterem veličin na modelu. Takto je popisována analogie mezi dvěma jevy, a proto takové modely nazýváme analogy nebo analogony.

Často se vedle analogičnosti procesů zachovává i geometrická podobnost modelu a díla. Nejrozšířenější jsou jednoduché a poměrně přesné matematicko-fyzikální modely elektrické, hydraulické a mechanické.

Fyzikální modely jsou takové, ve kterých procesy v nich probíhající mají stejnou fyzikální podstatu, a jsou tedy popsány podobnými vztahy mezi stejnými proměnnými jako procesy na díle. Fyzikální modely mohou být úplné nebo neúplné čili přibližné. Úplné fyzikální modely si zachovávají podobnost všech proměnných v prostoru i čase včetně podobnosti okrajových podmínek. Neúplné fyzikální modely splňují podobnost pouze některých proměnných. Nevýhodou fyzikálních modelů jsou pouze jejich vyšší pořizovací a provozní náklady. Naopak

k přednostem fyzikálních modelů, a ty převažují nad nevýhodami, patří to, že úplněji, spolehlivěji a především názorněji než ostatní druhy modelů vyjadřují vlastnosti díla. K tomu, aby fyzikální modely co nejlépe vyjadřovaly vlastnosti díla, je nutné na modelech co nejpřesněji nastavit podmínky, které bývají odvozovány z podmínek na díle. K posouzení vhodnosti podmínek je účelné provést vždy porovnání vypovídací schopnosti modelu s hodnotami naměřenými na díle, tj. hodnotami provozními.

Podobnost elektrických veličin modelu a díla závisí podle [3] na poměrech

$$\left[ \frac{\rho_{el} T_{max}}{\rho_{el} T_{min}} \right]_E \sim \left[ \frac{\rho_{el} T_{max}}{\rho_{el} T_{min}} \right]_M \quad (1)$$

Z toho plyne, že průběh charakteristik „ $\rho_{el} - T$ “ skloviny a modelové kapaliny musí být v odpovídajících teplotních intervalech podobný, tj. pro jejich strmost má být

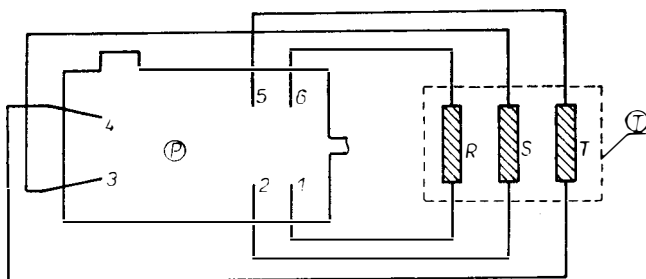
$$\left[ \frac{d\rho_{el}}{dT} \right]_E \sim \left[ \frac{d\rho_{el}}{dT} \right]_M \quad (2)$$

V příspěvku je ukázáno, na základě porovnání laboratorních modelových dat s daty provozními, do jaké míry můžeme nesplnit úměrnost (2), aby bylo ještě dosaženo takové shody mezi elektrickými veličinami (reprezentovanými odporem mezi elektrodami) na modelu a peci (díle), že elektrické veličiny naměřené na modelu je možno použít pro výpočet elektrických veličin díla s dostatečnou přesností.

## VLASTNOSTI MODELOVÉ KAPALINY A SKLOVINY

### Pec I

Zde byla modelována sklářská tavicí pec na výrobu obalového skla za účelem návrhu elektrického přihřevu, pro zvýšení tavicího výkonu pece. Uspořádání a zapojení topných elektrod navrženého přihřevu je na obr. 1. Vlastnosti skloviny tavené v peci I jsou uvedeny v tabulce I.



Obr. 1. Schéma uspořádání a zapojení topných elektrod u pece I.

Modelové pokusy byly provedeny na modelu pece postaveném v měřítku 1 : 11,72. V modelu bylo použito modelové kapaliny, jejíž vlastnosti jsou v tabulce II.

Tabulka I

Vlastnosti skloviny tavené v peci I

$T$ [K]	$\nu$ [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]	$\rho$ [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]	$\rho_{\text{el}}$ [ $\Omega \cdot \text{m}$ ]	$\lambda$ [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]	$\alpha \cdot 10^6$ [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]
1 423	0,096 1	2 330	0,055 0	12,43	3,81
1 473	0,063 9	2 323	0,046 7	13,85	4,26
1 523	0,038 2	2 315	0,040 0	15,43	4,76
1 573	0,024 0	2 308	0,035 0	17,19	5,32
1 623	0,014 8	2 300	0,031 5	19,16	5,95
1 673	0,009 8	2 293	0,029 5	21,35	6,65
1 723	0,006 6	2 286	0,026 7	23,78	7,43
1 773	0,004 7	2 278	0,023 6	26,50	8,31
1 823	0,003 3	2 271	0,021 5	29,53	9,29

$$\lambda = 0,571 \cdot \exp(2,1643 \cdot 10^{-3} \cdot T)$$

$$c_p = 1400 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\beta = 0,64 \cdot 10^{-4} \cdot \text{K}^{-1}$$

Tabulka II

Vlastnosti modelové kapaliny pro modelování pece I

$T$ [K]	$\nu \cdot 10^3$ [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]	$\rho$ [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]	$\rho_{\text{el}}$ [ $\Omega \cdot \text{m}$ ]	$\lambda$ [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]	$\alpha \cdot 10^6$ [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]
293	1,428	1 291	40,88	0,310 5	9,62
303	0,800	1 285	23,79	0,310 8	9,67
313	0,462	1 280	16,50	0,311 2	9,73
323	0,274	1 274	8,63	0,311 5	9,78
333	0,150	1 268	5,05	0,311 8	9,84
343	0,091	1 262	3,20	0,312 1	9,89
353	0,068	1 257	2,35	0,312 5	9,94
363	0,060	1 251	2,10	0,312 8	10,00

$$\lambda = 0,3115 \cdot [1 + 1 \cdot 10^{-4} (T - 323)]$$

$$c_p = 2500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

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

Teplotní závislosti některých vlastností skloviny a modelové kapaliny byly vyjádřeny analyticky a platí pro ně následující vztahy:

– sklovina

– kinematická viskozita

$$\log \nu = -7,7937 + 9688,8 \cdot \frac{1}{T},$$

– hustota

$$\rho = 2544 - 0,15T,$$

– měrný elektrický odpor

$$\log \rho_{\text{el}} = -3,0791 + 2573,2 \cdot \frac{1}{T},$$

– tepelná vodivost

$$\lambda = 0,571 \cdot \exp(2,1643 \cdot 10^{-3}T),$$

- modelová kapalina
- kinematická viskozita

$$\log \nu = -10,4739 + 2\,235,2 \cdot \frac{1}{T},$$

- hustota

$$\rho = 1\,459,5 - 0,575T,$$

- měrný elektrický odpor

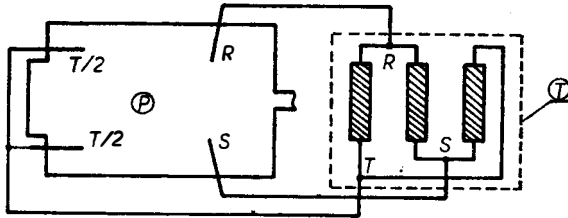
$$\log \rho_{el} = -5,5137 + 2\,087,6 \cdot \frac{1}{T},$$

- tepelná vodivost

$$\lambda = 0,3115 \cdot [1 + 1 \cdot 10^{-4}(T - 323)].$$

## Pec II

Zde byla modelována tavicí pec také na výrobu obalového skla, za stejným účelem, tj. navrzení elektrického příhřevu pro zvýšení tavicího výkonu pece. Uspořádání a zapojení topných elektrod navrženého příhřevu je na obr. 2. Vlastnosti skloviny tavené v peci II jsou uvedeny v tabulce III.



Obr. 2. Schéma uspořádání a zapojení topných elektrod u pece II.

Tabulka III

Vlastnosti skloviny tavené v peci II

$T$ [K]	$\nu$ [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]	$\rho$ [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]	$\rho_{el}$ [ $\Omega \cdot \text{m}$ ]	$\lambda$ [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]	$\alpha \cdot 10^6$ [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]
1 423	0,052 8	2 329	0,054 5	13,68	4,20
1 473	0,029 8	2 323	0,045 7	15,54	4,78
1 523	0,017 6	2 316	0,038 3	17,65	5,44
1 573	0,010 6	2 309	0,034 3	20,04	6,20
1 623	0,007 0	2 303	0,030 2	22,77	7,06
1 673	0,004 7	2 297	0,026 8	25,86	8,04
1 723	0,003 2	2 290	0,024 0	29,37	9,16
1 773	0,002 3	2 284	0,021 6	33,36	10,43

$$\lambda = 0,365 \cdot \exp(2,5466 \cdot 10^{-3}T)$$

$$c_p = 1\,400 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\beta = 5,6 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

Model pece byl postaven v měřítku 1 : 12 a k modelování byla použita modelová kapalina, jejíž vlastnosti jsou v tabulce IV.

Tabulka IV

Vlastnosti modelové kapaliny pro modelování pece II

$T$ [K]	$\nu \cdot 10^3$ [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]	$\rho$ [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]	$\rho_{el}$ [ $\Omega \cdot \text{m}$ ]	$\lambda$ [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]	$\alpha \cdot 10^8$ [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]
293	3,000	1 291	65,33	0,310 5	9,62
303	1,230	1 286	33,09	0,310 8	9,67
313	0,550	1 282	17,68	0,311 2	9,71
323	0,270	1 277	9,82	0,311 5	9,76
333	0,140	1 273	5,65	0,311 8	9,80
343	0,086	1 268	3,36	0,312 1	9,85
353	0,048	1 264	2,06	0,312 5	9,89

$$\lambda = 0,3115 \cdot [1 + 1 \cdot 10^{-4}(T - 323)]$$

$$c_p = 2\,500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$\beta = 3,5 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$$

Také pro tuto sklovinu a modelovou kapalinu byly teplotní závislosti některých vlastností vyjádřeny analyticky a platí pro ně vztahy:

— sklovina

— kinematická viskozita

$$\log \nu = -8,1965 + 9\,822,4 \cdot \frac{1}{T},$$

— hustota

$$\rho = 2\,513 - 0,13T,$$

— měrný elektrický odpor

$$\log \rho_{el} = -3,2797 + 2\,857,0 \cdot \frac{1}{T},$$

— tepelná vodivost

$$\lambda = 0,365 \exp(2,5466 \cdot 10^{-3}T),$$

— modelová kapalina

— kinetická viskozita

$$\log \nu = -12,7151 + 2\,963,4 \cdot \frac{1}{T},$$

— hustota

$$\rho = 1\,422,4 - 0,45T$$

— měrný elektrický odpor

$$\log \rho_{el} = -7,004 + 2\,584,0 \cdot \frac{1}{T},$$

— tepelná vodivost

$$\lambda = 0,3115 \cdot [1 + 1 \cdot 10^{-4}(T - 323)].$$

#### VÝPOČET TEPLOTNÍHO MĚŘÍTKA MODELU A DÍLA

Teplotní měřítko modelu a díla, resp. odpovídající si teploty na modelu a díle byly určeny z rovnosti Rayleighových kritérií pro model a pec (3)

$$Ra_E = Ra_M, \quad (3)$$

Při určování teplotního měřítka se postupuje následujícím způsobem. Rozepíše-li se rovnice (3), potom platí

$$\frac{g_E L_E^3 \beta_E T_E}{a_E \nu_E} = \frac{g_M L_M^3 \beta_M T_M}{a_M \nu_M}. \quad (4)$$

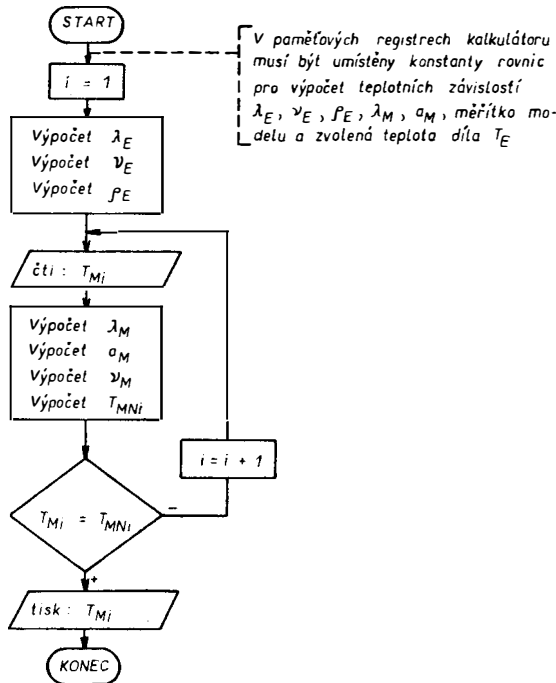
Protože

$$g_E = g_M, \quad (5)$$

je

$$\frac{a_M \nu_M}{T_M} = \frac{\beta_M}{\beta_E} \cdot \left[ \frac{L_M}{L_E} \right]^3 \cdot \frac{\nu_E \lambda_E}{T_E c_{pE} \rho_E}, \quad (6)$$

Je-li dáno měřítka modelu, potom lze pro zvolenou teplotu díla  $T_E$  vypočítat iteračním postupem odpovídající teplotu modelu  $T_M$ . Iterační postup byl naprogramován na kalkulátoru TI-59 a stručný vývojový diagram programu je na obr. 3.



Obr. 3. Vývojový diagram výpočtu  $T_M$  odpovídající zvolené  $T_E$ .

### Pec I

Pro pec I byly výpočtem stanoveny odpovídající si teploty na modelu a díle. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce V a jsou rovněž zpracovány analyticky.

Pro funkční závislosti  $T_E = f(T_M)$  a  $T_M = f(T_E)$  platí vztahy

$$T_E = -1112,3 + 9,0T_M, \quad (7)$$

$$T_M = 123,9 + 0,11T_E. \quad (8)$$

Tabulka V

Teploty na modelu a díle pro pec I

$T_E$ [K]	1 508	1 583	1 658	1 733	1 808	1 883
$T_M$ [K]	290,1	299,4	308,3	316,6	324,4	331,6

### Pec II

Odpovídající si teploty na modelu a díle při modelování pece II jsou uvedeny v tabulce VI.

Tabulka VI

Teploty na modelu a díle pro pec II

$T_E$ [K]	1 428	1 498	1 568	1 638	1 708	1 778
$T_M$ [K]	298,7	306,6	313,9	316,6	326,9	332,7

Funkční vztahy  $T_E = f(T_M)$  a  $T_M = f(T_E)$  jsou

$$T_E = 1\,651,1 + 10,28T_M, \quad (9)$$

$$T_M = 161,1 + 0,097T_E. \quad (10)$$

### URČENÍ PODOBNOSTI ELEKTRICKÝCH VELIČIN MODELU A DÍLA

Podle (1) byla určena podobnost elektrických veličin modelu a díla pro pec I a II v teplotním intervalu  $T_{E \min} = 1\,473$  K,  $T_{E \max} = 1\,773$  K. Potom pro pec I platí, že  $l \doteq 2,9$  a pro pec II, že  $l \doteq 2,6$ . Z toho plyne, že při modelování pece I byla strmost charakteristiky „ $\rho_{e1} - T$ “ modelové kapaliny 2,9krát větší než u skloviny a při modelování pece II 2,6krát větší.

### POROVNÁNÍ MODELOVÝCH A PROVOZNÍCH HODNOT ODPORŮ MEZI ELEKTRODAMI

Pro návrh elektrického přihřevu sklářské tavicí pece, tj. rozmístění elektrod v bazénu, délky elektrod, napětí a rozsah regulačního napětí zdroje, je nutné znát odpor mezi elektrodami. Na základě porovnání hodnot odporů mezi elektrodami naměřených na modelu a díle je možno posoudit nejen vhodnost použité modelové kapaliny, ale také ověřit správnost modelu ve vztahu k peci (dílu).

### Pec I

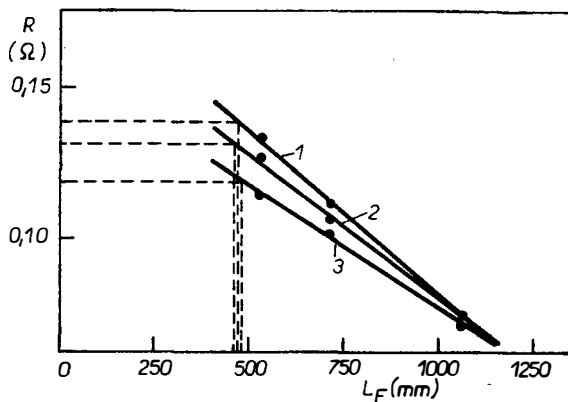
Na modelu pece I byly proměřeny tři varianty, kde všechny měly stejné rozmístění a zapojení elektrod a lišily se od sebe pouze změnou délek elektrod. Vypočtené hodnoty odporů mezi elektrodami z hodnot proudů a napětí naměřených na modelu jsou v tabulce VII. Hodnoty odporů mezi elektrodami

z tabulky VII byly vyneseny do grafu proti délce elektrod a jsou na obr. 4. Protože na peci byly zabudovány elektrody, jejichž délky udává tabulka VIII, byly z obr. 4 pro tyto délky elektrod odečteny hodnoty odporů  $R_{1,6}$ ,  $R_{2,3}$  a  $R_{4,5}$

$$R_{1,6} = 0,1190 \Omega,$$

$$R_{2,3} = 0,1310 \Omega$$

$$R_{4,5} = 0,1390 \Omega.$$



Obr. 4. Závislost odporů mezi elektrodami (přečtené z modelu na dílo) na provozní délce elektrod (pec I).

Tabulka VII

Hodnoty odporů mezi elektrodami pece,  
vypočtené z hodnot naměřených na modelu

pro pec II

Varianta	Elektroda č.	$L_E$ [mm]	$R$ [ $\Omega$ ]
A	1 a 6	1 058	0,071 2
	2 a 3	1 058	0,074 4
	4 a 5	1 058	0,074 2
B	1 a 6	706	0,101 2
	2 a 3	706	0,111 2
	4 a 5	706	0,106 0
C	1 a 6	529	0,118 2
	2 a 3	529	0,133 9
	4 a 5	529	0,127 0

Tabulka VIII

Délky elektrod na peci I

elektroda č.	1	2	3	4	5	6
délka [mm]	480	480	440	450	480	480



Z provozních hodnot proudů a napětí byly vypočítány hodnoty odporů, které jsou v tabulce IX.

Z porovnání hodnot odporů z tabulky IX a hodnot odporů odečtených z obr. 4 je vidět velmi dobrá shoda. Proto je možné říci, že modelová kapalina velmi dobře napodobuje elektrické vlastnosti skloviny a že model pece velmi dobře souhlasí s dílem.

Tabulka IX  
Odpory mezi elektrodami

Elektroda č.	$U$ [V]	$I$ [A]	$R$ [ $\Omega$ ]
1 a 6	111	883	0,125 7
2 a 3	83	611	0,135 5
4 a 5	82	568	0,144 3

### Pece II

Na modelu pece II, kde bylo navrženo rozmístění a zapojení elektrod podle obr. 2, byly studovány tři varianty (A, B a C) s tím, že zapojení elektrod a jejich rozmístění bylo u všech variant stejné, pouze byla měněna jejich délka.

#### Varianta A

fáze  $R$  —  $L_M = 95$  mm,  $L_E = 1\,140$  mm

fáze  $S$  —  $L_M = 95$  mm,  $L_E = 1\,140$  mm

fáze  $T$  —  $L_M = 50$  mm,  $L_E = 600$  mm

#### Varianta B

fáze  $R$  —  $L_M = 63,3$  mm,  $L_E = 760$  mm

fáze  $S$  —  $L_M = 63,3$  mm,  $L_E = 760$  mm

fáze  $T$  —  $L_M = 33,3$  mm,  $L_E = 400$  mm

#### Varianta C

fáze  $R$  —  $L_M = 47,5$  mm,  $L_E = 570$  mm

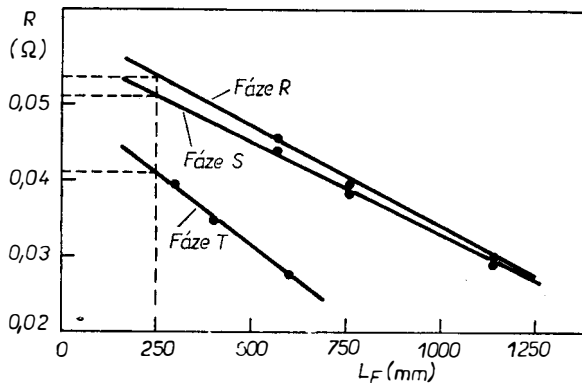
fáze  $S$  —  $L_M = 47,5$  mm,  $L_E = 570$  mm

fáze  $T$  —  $L_M = 25,0$  mm,  $L_E = 300$  mm.

Na modelu byly pro všechny varianty A, B a C změřeny jak napětí mezi elektrodami, tak i proudy jimi tekoucí. Z nich potom byly vypočteny odpory mezi elektrodami na modelu a podle vztahu (11)

$$R_E = R_M \cdot \frac{\varrho_{elE}}{\varrho_{elM}} \cdot s, \quad (11)$$

jím odpovídající odpory mezi elektrodami na peci (díle). Hodnoty odporů mezi elektrodami na peci pro všechny měřené varianty jsou v tabulce X. Hodnoty odporů byly také vyneseny do grafu proti délkám elektrod a jsou na obr. 5.



Obr. 5. Závislost odporů mezi elektrodami (přepočtené z modelu na dílo) na provozní délce elektrod (pec II).

Tabulka X  
Hodnoty odporu mezi elektrodami na peci II

Varianta	R [Ω]		
	fáze R	fáze S	fáze T
A	0,030 1	0,029 5	0,027 7
B	0,039 3	0,037 8	0,034 7
C	0,045 5	0,043 9	0,039 8

Protože na peci byly zabudovány elektrody o délce 250 mm, byly z obr. 5 odečteny odpory pro tuto délku elektrod. Odečtené hodnoty odporů jsou:

$$R_R = 0,053 5 \Omega,$$

$$R_S = 0,051 0 \Omega,$$

$$R_T = 0,041 0 \Omega.$$

Z provozních údajů, tj. napětí a proudů na elektrodách v peci, byly vypočítány hodnoty odporů mezi elektrodami. Vypočtené hodnoty odporů jsou:

$$R_{RP} = 0,052 \Omega,$$

$$R_{SP} = 0,050 \Omega,$$

$$R_{TP} = 0,041 \Omega.$$

Z porovnání odečtených hodnot odporů a odporů vypočítaných z provozních údajů je vidět velmi dobrá shoda. Z toho je možno usuzovat, že fyzikální model v měřítku  $s = 1/12$  velmi dobře napodobuje skutečnou pec.

#### DISKUSE A ZÁVĚR

Při modelování sklářských tavicích pecí na fyzikálních modelech musí být podle [4, 5] splněna shoda kritérií  $Pr$ ,  $Ra$  a  $Po$ . V případech plíživého proudění pouze kritérií  $Ra$  a  $Po$ . Při shodě těchto kritérií je pracovní proud vznikající odběrem skloviny napodobován odběrem modelové kapaliny na modelu, je napo-

dobeno konvekční tepelné proudění a je napodobeno nastavení elektrických potenciálů na topných elektrodách. V případě, že je modelována tavicí pec, kde sklovina je tavena elektrickým proudem, vyplývá ze splnění kritéria  $Po$  také, že modelová kapalina musí mít i vhodné elektrické vlastnosti ve vztahu ke sklovině. Protože sklovina se chová jako elektrolyt a s rostoucí teplotou její odpor klesá, je nutné, aby modelová kapalina měla podobnou charakteristiku „ $\rho_{el} - T$ “, to znamená, že by i strmost těchto charakteristik měla být v odpovídajícím intervalu teplot podobná. Bude-li modelová kapalina tyto výše uvedené požadavky splňovat, je možné na modelu stanovit odpory mezi elektrodami a z nich potom s dostatečnou přesností vypočítat odpory mezi elektrodami pece, což ukázaly experimenty.

Vhodnost použití modelových kapalin na bázi glycerin-LiCl k modelování elektrických tavicích pecí, výpočet a nastavení odpovídajících si teplot na modelu a díle byla posouzena na základě porovnání modelových hodnot (přepočtených na pec) a provozních hodnot odporů mezi elektrodami. Byla nalezena velmi dobrá shoda odporů změřených mezi elektrodami na skutečné peci s odpory určenými na modelu při projektování elektrického příhrěvu pece, neboť odpory se od sebe liší v průměru o 3%. Podle kapitoly 4 byly však strmosti charakteristiky „ $\rho_{el} - T$ “ v odpovídajících si teplotních intervalech u modelových kapalin 2,9krát resp. 2,6krát větší než strmosti charakteristiky „ $\rho_{el} - T$ “ sklovin. Z toho plyne, že i při odlišné strmosti charakteristiky „ $\rho_{el} - T$ “ modelové kapaliny bude námi užitá modelová kapalina dobře napodobovat elektrické vlastnosti skloviny a bude jí možno použít k modelování pecí otápěných elektrickým proudem se spolehlivými výsledky.

### Seznam symbolů

$a$	teplotní vodivost [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]
$c_p$	měrné teplo [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
$g$	tíhové zrychlení [ $m \cdot s^{-2}$ ]
$I$	elektrický proud [A]
$L$	délka [m]
$s$	měřítko modelu
$R$	elektrický odpor [ $\Omega$ ]
$T$	teplota [K]
$U$	elektrické napětí [V]
$\beta$	koefficient teplotní roztažnosti [ $K^{-1}$ ]
$\lambda$	tepelná vodivost [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
$\nu$	kinematická viskozita [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]
$\rho$	hustota [ $kg \cdot m^{-3}$ ]
$\rho_{el}$	měrný elektrický odpor [ $\Omega \cdot m$ ]
$Po$	výkonové kritérium ( $Po = \rho_{el}^{-1} \Phi^2 \lambda^{-1} \Delta T^{-1}$ )
$Pr$	Prandtlovo kritérium ( $Pr = \nu a^{-1}$ )
$Ra$	Rayleighovo kritérium (viz (4))
$\Phi$	elektrický potenciál [V]

### Indexy

max	maximální hodnota
min	minimální hodnota

<b>E</b>	dílo (pec)
<b>M</b>	model
<b>P</b>	provozní hodnoty
<b>R</b>	pro fázi <i>R</i>
<b>S</b>	pro fázi <i>S</i>
<b>T</b>	pro fázi <i>T</i>

## Literatura

- [1] Kuneš J., Vavroch O., Franta V., *Základy modelování a simulace*, Sborník ZP ČSVTS Škoda, Plzeň, 1978.  
 [2] Slaviček E.: *Teoretické základy chemického inženýrství*, SNTL, Praha 1969.  
 [3] Staněk J.: *Elektrické tavění skla*, SNTL, Praha 1976.  
 [4] Hrna P.: *Silikáty* 24, 265 (1980).  
 [5] Curlet N. W. E. et al: *AIChE Journal* 30, 219 (1984).

**VERIFYING THE CORRECTNESS OF DATA  
FOR A PHYSICAL MODEL OF ELECTRIC GLASS MELTING  
FURNACE ON THE BASIS OF COMPARISON WITH OPERATION DATA**

Stanislav Kasa, Jaroslav Staněk

*Department of the Technology of Silicates,  
Institute of Chemical Technology, 166 28 Prague 6*

In the modelling of electric glass melting furnaces on liquid models, one of the conditions of correct model setting is the agreement of electrical properties exhibited by the model liquid and by the glass melt. This means that the detailed courses or gradients of the " $\varrho_{el} - T$ " characteristics of the model liquid and those of the melt should be maintained as similar as possible. On the basis of a comparison of laboratory model data with operation data, the contribution shows to what degree the similarity of the courses (gradients) of the " $\varrho_{el} - T$ " characteristics need not be conformed to while still attaining a satisfactory accuracy in the recalculation of electrical quantities from the model to the actual furnace and vice versa. The comparison was carried out on two container glass furnaces and their models. The quantities compared were resistances between the electrodes.

It was found that even in the case when the gradient of the " $\varrho_{el} - T$ " characteristic of the model liquid exceeds almost 3 times that of the glass melt, recalculations of the electrical quantities between the model and the actual furnace can be carried out with a satisfactory accuracy.

- Fig. 1. Schematic diagram of arrangement and connection of heating electrodes in furnace I; 1—6 electrodes; R, S, T — transformer phases; P — furnace; T — transformer.*  
*Fig. 2. Schematic diagram of the arrangement and connection of heating electrodes in furnace II; P — furnace; T — transformer.*  
*Fig. 3. Development diagram of the calculation of  $T_M$  corresponding to the chosen  $T_E$ .*  
*Fig. 4. The resistances between the electrodes (recalculated from a model to actual furnace) vs. the operation length of electrodes (furnace I) 1 — electrodes 2 and 3; 2 — electrodes 4 and 5, 3 — electrodes 1 and 6.*  
*Fig. 5. The resistances between the electrodes (recalculated from model to actual furnace) vs. the operation length of electrodes (furnace II).*

## ПРОВЕРКА ПРАВИЛЬНОСТИ ВЕЛИЧИН ДАННЫХ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ НА ОСНОВАНИИ СОПОСТАВЛЕНИЯ С ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ДАННЫМИ

Станислав Каса, Ярослав Станек

*кафедра технологии силикатов, Химико-технологический институт,  
166 28 Прага*

При моделировании электрических стекловаренных печей на горячих жидкостных моделях одним из условий правильной установки модели является сходство электрических свойств модельной жидкости и стекломассы. Это значит сохранение сходства ходов или крутизны характеристик „ $\rho_{e1} - T$ “ модельной жидкости и стекломассы. В предлагаемой работе на основании сопоставления лабораторных модельных данных с эксплуатационными данными показывается, до какой степени не должно быть сходство ходов (крутизны) характеристик „ $\rho_{e1} - T$ “ выполнено, чтобы было можно еще получить достаточную точность при пересчете электрических величин из модели в установку, и наоборот. Сопоставление проводили у двух печей, служащих для производства тарного стекла и их моделей. Сопоставительными величинами являлись сопротивления между электродами.

Было установлено, что даже в случае, когда крутизна характеристики „ $\rho_{e1} - T$ “ модельной жидкости почти в три раза больше крутизны характеристик „ $\rho_{e1} - T$ “ стекломассы, можно проводить пересчеты электрических величин между моделью и установкой с достаточной точностью.

*Рис. 1. Схема упорядочения и включения отопительных электродов у печи I: 1—6 — электроды, R, S, T — фазы трансформатора, P — печь, T — трансформатор.*

*Рис. 2. Схема упорядочения и включения отопительных электродов у печи II, P — печь, T — трансформатор.*

*Рис. 3. Расчетная диаграмма  $T_M$ , отвечающая подобранной  $T_E$ .*

*Рис. 4. Зависимость сопротивлений между электродами (при пересчете из модели в установку) от эксплуатационной длины электродов (печь I): 1 — электроды 2 и 3, 2 — электроды 4 и 5, 3 — электроды 1 и 6.*

*Рис. 5. Зависимость сопротивлений между электродами (при пересчете из модели в установку) от эксплуатационной длины электродов (печь II).*

---

CHARLES KITTEL: ÚVOD DO FYZIKY PEVNÝCH LÁTEK. 598 str;  
Academia, Praha 1985, cena 55 Kčs

Fyzika pevných látek nabývá stále většího významu v mnoha odvětvích vědy i techniky zejména pak v oboru výzkumu i výroby konstrukčních materiálů, do něhož patří i materiály silikátové. Pro pracovníky těchto oborů, a zejména pro posluchače vysokých škol chyběla dosud u nás moderní učebnice, jejíž pojetí by bylo přístupné všem, kdo absolvovali základní vysokoškolské předměty z matematiky a fyziky. Tyto požadavky znamenitě splňuje kniha Ch. Kittela, kterou kolegium fyziky ČSAV doporučilo k překladu.

Kniha čtenáře seznámí s nejdůležitějšími směry rozvoje pevných látek; názorný výklad je doprovázen výstižnými obrázky; způsob podání je poutavý a z celého pojetí jsou zřejmé rozsáhlé pedagogické zkušenosti autorovy. Páté vydání této známé učebnice, které vyšlo v r. 1976, svědčí rovněž o jejich kvalitách. (Prvé vyšlo již v r. 1953.)

Překlad je zdařilý stejně jako grafická úprava a přínosem je i označení citací pramenů, které vyšly v českém, slovenském a ruském překladu a jsou našemu čtenáři snáze dostupné.

Kniha bude studenta provázet nejen během jeho studia ale i při jeho další činnosti jako znamenitá příručka.

*Šatava*