

## ROZDĚLENÍ KONCENTRACÍ PÍSKU V PODÉLNÉM ŘEZU SKLÁŘSKOU PECÍ

LUBOMÍR NĚMEC, MICHAL MÜHLBAUER\*)

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

\*) *Výzkumný ústav Sklo Unionu, účelová koncernová organizace, 415 03 Teplíce*

Došlo 12. 11. 1982

*Byly vypočteny izočáry koncentrací nerozpuštěného písku v podélném osovém řezu zařízením na tavení plochého skla. Při výpočtu se vycházelo z výsledků laboratorních kelímkových měření rozpouštění písku a navržené rovnice rozpouštění kulového zrna písku nacházejícího se v polydisperzním souboru zrn písku. Výsledky ukazují, že jen malá část zařízení se využívá pro vlastní tavení a že časově-teplotní historie zrn písku v zařízení není za daných podmínek pro tavení výhodná. Zejména se ukazuje potřeba ovlivňovat nebo řídit proudění skloviny v zařízení. Odstranění nejhrubších podílů písku ukázalo výrazné zkrácení vzdálenosti, do které se dostalo v zařízení největší zrno písku.*

### ÚVOD A TEORETICKÁ ČÁST

Optimalizace procesu tavení sklovin není nadále schůdná bez snahy o matematický popis dějů uvnitř zařízení. I když dosavadní výsledky matematického modelování mají do určité míry kvalitativní charakter, poskytují přesto tendence chování modelovaného zařízení při změnách podmínek. Dosud se matematické modely sklářských zařízení soustřeďovaly na získání teplotního a proudového obrazu skloviny, aniž by uvažovaly hlavní ukazatele dokonalosti průběhu procesu — odstraňování nehomogenit.

Tato práce se soustředila na získání části koncentračního pole písku ve vaně na ploché sklo. Práce byla provedena za těchto zjednodušujících předpokladů:

1. Obraz rozložení koncentrací písku byl počítán jen ve středovém řezu.
2. Rozpouštění zrna písku ve vrstvě vsázky na hladině nebylo uvažováno.
3. Zrna písku v zařízení se pohybovala po proudnicích skloviny (tento předpoklad je dobře splněn pro běžná sodnovápenatá skla).

Proces rozpouštění kulového zrna zahrnující chemickou reakci na rozhraní zrna a taveniny a difúzi v tavenině může být nejjednodušeji popsán pomocí koeficientu přenosu hmoty (1):

$$\frac{dr}{dt} = \alpha(w_b - w_e), \quad (1)$$

$r$  — poloměr zrna,

$\alpha$  — koeficient přenosu hmoty v kapalně fázi vyjádřený úbytkem poloměru zrna,

$w_b$  — hmotový zlomek rozpouštěného  $\text{SiO}_2$  ve sklovině,

$w_e$  — rovnovážný nasycený hmotový zlomek  $\text{SiO}_2$  ve sklovině za daných podmínek.

Vyjádření  $w_b$  pomocí hmotového zlomku nerozpuštěného písku ve směsi sklovina—nerozpuštěný písek, tj. pomocí veličiny  $w_s$ , dává:

$$\frac{1 - w_s}{w_s(w_e - 1) + w_t - w_e} dr = \alpha dt, \quad (2)$$

$w_t$  — hmotový zlomek celkového  $\text{SiO}_2$  ve směsi skloviny a písku.

Předpokládáme-li, že rychlost úbytku poloměru zrna je v daném čase nezávislá na poloměru zrna (experimentální zjištění dovolují tento předpoklad přijmout s výjimkou velmi malých počátečních velikostí částic písku), můžeme v každém čase vyjádřit hmotový zlomek nerozpuštěného písku ve směsi ( $w_S$ ) pro polydisperzní písek pomocí hustoty pravděpodobnosti. Pro počáteční hmotový zlomek nerozpuštěného písku ve směsi tavenina—písek můžeme psát

$$w_{S0} = \frac{4}{3} \pi \rho_S / \rho \mathcal{N}_{S0} \int_0^{r_{\max 0}} f(r) r^3 dr, \quad (3)$$

$f(r)$  — hustota pravděpodobnosti,

$\rho_S$  — hustota písku,

$\rho$  — hustota skloviny (vychází se z předpokladu že hustota skloviny a směsi skloviny a písku se prakticky neliší),

$\mathcal{N}_{S0}$  — počáteční celkový počet částic písku v jednotce objemu směsi sklovina—nerozpuštěný písek (zjistí se ze síťového rozboru písku),

$r_{\max 0}$  — počáteční poloměr největšího zrna písku v daném souboru.

Po uplynutí doby  $\tau$  se největší zrno poloměru  $r_{\max 0}$  rozpustí na hodnotu  $r_{\max}$  a dle uvedeného zjednodušujícího předpokladu se o stejnou hodnotu zmenší i poloměr všech ostatních zrn písku. Zrna poloměru menšího než  $r_{\max 0} - r_{\max}$  se rozpustí. Po uplynutí doby  $\tau$  se tedy tvar funkce  $f(r)$  nezmění, avšak funkce  $f(r)$  se posune o hodnotu  $r_{\max 0} - r_{\max}$  doleva po ose  $r$ . Hodnota  $w_S$  pak bude dána:

$$w_S = \frac{4}{3} \pi \rho_S / \rho \mathcal{N}_{S0} \int_0^{r_{\max}} f(r + r_{\max 0} - r_{\max}) r^3 dr. \quad (4)$$

Z hlediska výpočtů jsou hmotové zlomky od počátku vztaženy na taveninu nebo směs taveniny a pískových zrn, i když v čase  $\tau = 0$  je směs složena z kmene a střepů.

Pro získání koncentrace pískových zrn v daném místě zařízení musíme řešit rovnice (2) a (4) berouce v úvahu časově-teplotní historii částic v zařízení. Hodnoty  $\mathcal{N}_{S0}$ ,  $w_S$  v závislosti na  $r_{\max}$  a hustotu pravděpodobnosti  $f(r)$  získáme ze síťového rozboru písku. Hodnota  $r_{\max}(\tau)$ , která při řešení nahradí  $r$  v rovnici (2), je poloměr největšího zrna, které se pohybovalo zařízením přes vrstvu vsázky a po proudnici do daného bodu. Jak je již uvedeno ve zjednodušujících předpokladech, vynecháme v dalším výpočtu pohyb vrstvou vsázky na hladině. Pro zjištění  $r_{\max}$  v daném místě zařízení potřebujeme znát výchozí, tzv. startovací bod částice v zařízení. Tento nejjednodušeji zjistíme zpětným pohybem zrna po proudnici, počínaje bodem, ve kterém chceme zjistit koncentraci pískových zrn a konče na hladině nebo rozhraní vsázky a skloviny. Pro tento krok výpočtu potřebujeme znát rychlostní pole skloviny uvnitř zařízení. Zpětný pohyb pak probíhá podle vztahů:

$$\frac{dX}{d\tau} = -v_x; \quad \frac{dY}{d\tau} = -v_y; \quad (5)$$

$v_x, v_y$  — složky rychlostí,

$X, Y$  — souřadnice částice.

Doba získaná zpětným pohybem po proudnici odpovídá době setrvání částice v zařízení. Pro další výpočet hodnoty  $r_{\max}$  na dráze zařízením využijeme historie zrna zjištěné dle rovnice (5) a rovnice (2) ( $r = r_{\max}$ ), kde  $\alpha$  je nahrazeno poloempirickým vztahem definujícím jeho závislost na čase (1):

$$\int_0^t \alpha(T, \tau) d\tau = \int_0^t \frac{\alpha_0 \alpha_f}{\alpha_0 + (\alpha_f - \alpha_0) \exp(-\kappa\tau)} d\tau, \quad (6)$$

$\alpha_0$  — konstanta vyjadřující rychlost chemické reakce na povrchu zrna písku,  
 $\kappa$  — konstanta vyjadřující rychlost nástupu stacionárního období,  
 $\alpha_f$  — konstanta vyjadřující rychlost rozpouštění zrna v pozdějším stacionárním rozpouštění.

Hodnoty  $\alpha_f$ ,  $\alpha_0$  a  $\kappa$  lze zjistit v přibližné formě z laboratorních izotermních měření rychlosti rozpouštění daného polydisperzního písku ve sklovině při několika zvolených teplotách s využitím rovnice (2) a výsledků síťové analýzy písku. Zde potřebnou experimentální závislost  $r_{\max}$  na čase pro příslušné měření lze zjistit z experimentálně dostupné závislosti počtu nerozpuštěných zrn písku na čase  $\mathcal{N}_S(\tau)$  za dané teploty. Po uplynutí času  $\tau$  se největší částice  $r_{\max 0}$  při daných experimentálních podmínkách zmenší na hodnotu  $r_{\max}$ :

$$r_{\max}(\tau) = r_{\max 0} - r_{\text{diss}}(\tau), \quad (7)$$

kde  $r_{\text{diss}} = r_{\max 0} - r_{\max}$  dle uvedeného zjednodušujícího předpokladu o nezávislosti rychlosti úbytku poloměru zrna v daném čase na poloměru zrna je současně hodnotou největší rozpuštěné částice v souboru po čase  $\tau$ . Tuto hodnotu zjistíme z grafu kumulativního rozdělení částic nebo z rovnice:

$$\mathcal{N}_{\text{diss}}(\tau) = \mathcal{N}_{S0} - \mathcal{N}_S(\tau) = \mathcal{N}_{S0} \int_0^{r_{\text{diss}}} f(r) dr, \quad (8)$$

$\mathcal{N}_{\text{diss}}$  — počet rozpuštěných částic písku na jednotku objemu směsi skloviny a nerozpuštěného písku v čase  $\tau$ .

## VÝSLEDKY MĚŘENÍ A VÝPOČTŮ

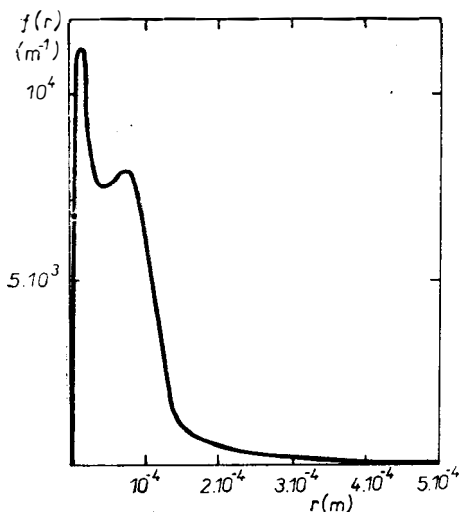
Pro výpočet byla použita průmyslová vsázka plochého skla s 37 % střepů a hodnoty teplot a rychlostí ve středovém podélném řezu získané matematickým modelováním vany na ploché sklo provedeném ve SVÚS v Hradci Králové [2]. Dále byl využit upravený program „Vana“ vypracovaný na našem pracovišti, umožňující sledovat dráhu a velikost částice v zadaném rychlostním a teplotním poli [3].

Průmyslový písek byl podroben síťovému rozboru. Hodnoty hustoty pravděpodobnosti  $f(r)$  v rovnici (3) získané z rozboru jsou na obr. 1. Veličina  $\mathcal{N}_{S0}$  zahrnuje pouze tu část  $\text{SiO}_2$ , která byla do kmene dodána ve formě písku, nikoliv tedy  $\text{SiO}_2$  ze střepů. Pro náš případ 37 % střepů ve vsázce činí hodnota  $w_{S0}$  0,426. Počáteční počet částic písku ve směsi skloviny a písku odpovídající této hodnotě  $w_{S0}$  činí 52 050 částic/g směsi. Hodnota byla získána sečtením počtu částic v jednotlivých třídách velikosti částic. Při zjišťování počtu částic v jednotlivých třídách velikostí byl hmotový podíl písku připadající na příslušnou třídu velikostí a zjištěný síťovým rozbořem dělen hmotou částice mající poloměr rovný střednímu poloměru částic dané třídy. Hodnoty  $w_S$  v závislosti na  $r_{\max}$  byly získány numerickým výpočtem integrálu v rovnici (4) počínaje bodem  $r_{\max} = r_{\max 0}$  ( $\tau = 0$ ). Graficky jsou znázorněny na obr. 2. Hodnota  $w_t$  je rovna 0,726 (je to rovněž konečný hmotový zlomek  $\text{SiO}_2$  ve sklovině). Hodnoty  $w_e$  lze získat z fázového

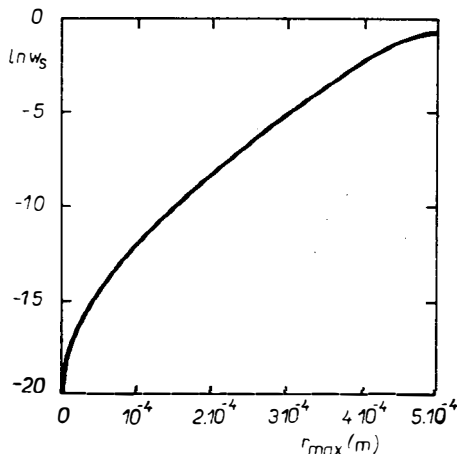
diagramu příslušné skloviny. V daném teplotním rozmezí 1100–1500 °C hodnoty  $w_e$  dobře vyhovovaly přímkové závislosti:

$$w_e = 2,275 \cdot 10^{-4} \cdot T + 0,424, \quad (9)$$

$T$  – teplota v K.



Obr. 1. Tvar funkce  $f(r)$  vyjadřující hustotu pravděpodobnosti výskytu zrn určité velikosti v písku pro výrobu plochého skla.



Obr. 2. Závislost přirozeného logaritmu hmotového zlomku nerozpuštěného písku na polo-měru největšího zrna  $r_{\max}$  v písku pro výrobu plochého skla.

Dále byly provedeny kelímkové tavby průmyslové vsázky při teplotách 1100, 1200, 1300, 1400 a 1500 °C. Ze vzorků skloviny hmoty 1–2 g byly po jejich vytvarování na destičku tloušťky asi 2 mm, po vychlazení a ofotografování zjištěny počítáním počty nerozpuštěných zrn písku. Hodnoty byly přepočteny na jednotku objemu skloviny. S využitím rovnic (7) a (8) bylo provedeno převedení závislosti počtu nerozpuštěných zrn na čase na závislost  $r_{\max}$  na čase. Experimentálně získané závislosti  $r_{\max}(\tau)$  pro teploty 1100 a 1200 °C ukazuje obr. 3, pro teploty 1300, 1400 a 1500 °C obr. 4. Experimentální data charakterizující rozpouštění písku v počátečních stadiích tavení nebyla zatím vyhodnocena, neboť nebyla k dispozici vhodná experimentální metoda stanovení nerozpuštěného podílu písku v této oblasti. Proto zakřivení křivek na obrázcích odpovídá pouze přibližně skutečnosti (je ovšem znám výchozí bod  $r_{\max 0}$  a z literatury hodnota  $\alpha_0$ , která je určující pro hodnotu směrnice závislosti  $r_{\max}$  versus  $\tau$  v čase  $\tau = 0$ ). Z přímkové části závislosti v obr. 3 a 4 byly odečteny směrnice odpovídající hodnotám  $\alpha_f$  v rovnici (6). Teplotní závislost  $\alpha_f$  vyhovovala empirickému vztahu

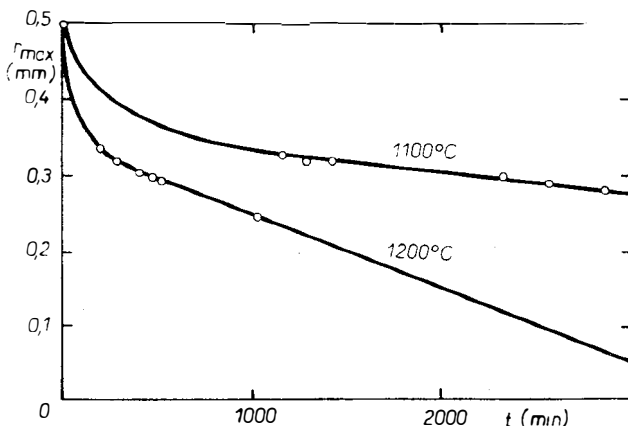
$$\alpha_f = 9,613 \cdot 10^{-14} \cdot \exp \left[ \frac{81,1}{\ln(1900 - T)} \right] \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]. \quad (10)$$

Hodnota konstanty  $\alpha_0$  byla převzata z literatury a její teplotní závislost dle práce (4) vyhovovala vztahu

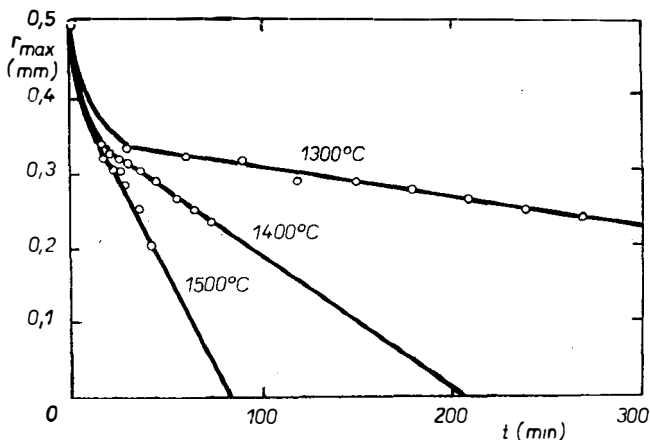
$$\alpha_0 = 3,023 \cdot 10^{13} \cdot \exp \left[ -\frac{60\,976}{T} \right] \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]. \quad (11)$$

Konstanta  $\kappa$  byla vypočtena z rovnic (6) a (2) a její teplotní závislost lze vyjádřit empirickým vztahem:

$$\kappa = \exp [1,038 \cdot 10^{-12} \cdot T^4 - 13,933] \quad [\text{s}^{-1}]. \quad (12)$$



Obr. 3. Závislost poloměru největšího zrna  $r_{\max}$  na čase při 1100 a 1200 °C získaná z laboratorních kelímkových taveb.



Obr. 4. Závislost poloměru největšího zrna  $r_{\max}$  na čase při 1300, 1400 a 1500 °C získaná z lab. kelímkových taveb.

Při vyčíslení rovnic jde o rekurentní výpočet horní meze  $r_{j+1}$  integrálu na levé straně rovnice

$$\int_{r_j}^{r_{j+1}} \frac{1 - w_S(r)}{w_S(r) (w_e - 1) + w_t - w_e} = \int_{\tau_j}^{\tau_{j+1}} \alpha(T, \tau) d\tau, \quad (13)$$

kde

$j$  — časový index,  
 $w_S(r)$  je dáno rovnicí (4).

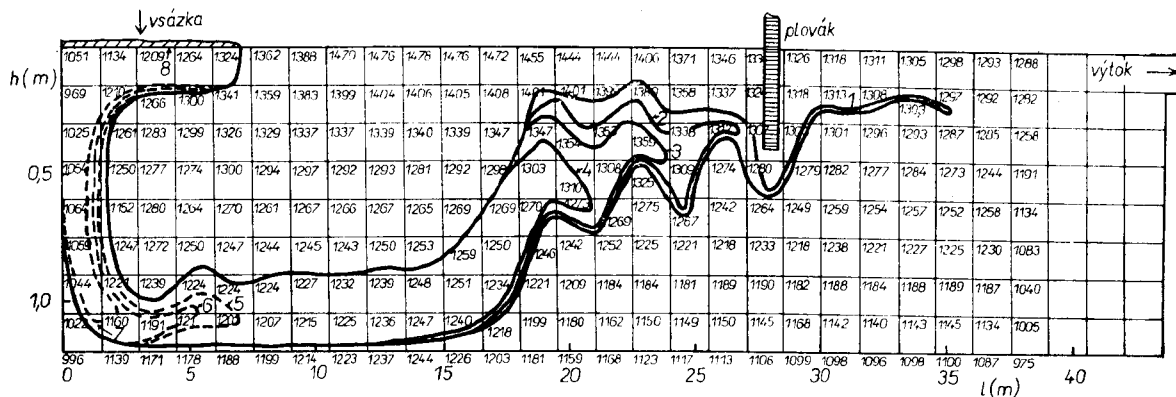
Základem výpočtu bylo sledování závislosti  $r_{\max}$  na čase podél dráhy zrna ze startovacího bodu do zvoleného bodu v zařízení, v němž chceme zjistit koncentraci písku, nebo v němž je koncentrace písku právě nulová. K výpočtu byl použit program „Vana“, který využívá hodnot složek rychlosti proudění skloviny, hodnot proudové funkce a teplot skloviny podél dráhy částice. Pro zvolený časový krok  $\Delta t$  je nejprve zjištěna průměrná hodnota teploty  $T$  na příslušné části dráhy a dosazením hodnot  $\alpha_f(T)$ ,  $\alpha_0(T)$  a  $\kappa(T)$  je zjištěna hodnota integrálu na pravé straně rovnice (13). Hodnota horní meze integrálu na levé straně rovnice (13) je pak počítána numericky s využitím rovnice (4) (obr. 2) nebo pomocí tabulkově vyjádřené závislosti  $w_S$  na  $r_{\max}$ . Po vypočtení hodnoty  $r_{f+1}$  a příslušné hodnoty  $w_{S,f+1}$  se postupuje dále po dráze zrna v zařízení až do hledaného bodu.

V obr. 5 je zakreslen výsledek zmapování středového řezu zařízením vzhledem ke koncentraci písku. Pro názornost jsou v obrázku zakresleny koncentrační izočáry nerozpuštěného písku. Základní izočára 1 ohraničuje uvnitř přibližně oblast rozpouštění písku, zatímco vně této izočáry, tj. ve většině plochy řezu, není teoreticky písek přítomen. I když prozatím jde o zjednodušený přístup k problému, je zřejmé, že za daných podmínek se pro vlastní tavení, tj. pro rozpouštění pevných částic, využívá menší část zařízení. Výpočtem bylo rovněž zjištěno, že jednotlivé dráhy částic zařízením odpovídající rovnoměrnému rozmístění startovacích bodů na hranici mezi kmenem a sklovinou se velmi liší co do kvality vzhledem k rozpouštění písku. Výsledkem těchto rozdílů je fakt, že největší souřadnice z odpovídající nulové koncentraci písku při stejné hodnotě velikosti největšího zrna se pro různé startovací body velmi liší. Na obr. 5 je dobře zřejmý „chobot“ nulové koncentrační izočáry v oblasti délky zařízení 25–35 m a méně ostré profily ostatních koncentračních izočár odpovídající těmto rozdílům v kvalitě jednotlivých drah. Tyto skutečnosti způsobují, že výkon tavicího zařízení je limitován nejnevýhodnější dráhou a v zařízení vznikají zbytečné rezervy.

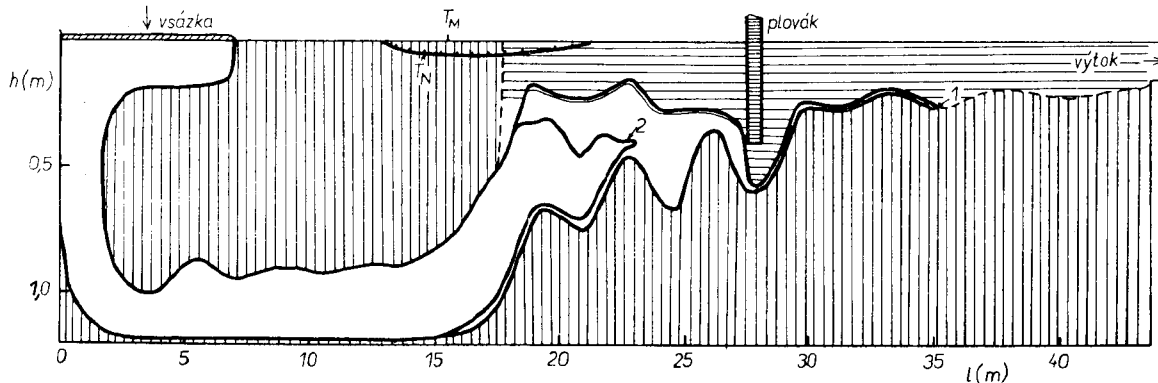
Na obr. 6 jsou svislým šrafováním vyznačeny zhruba oblasti zpětných a točivých proudů spolu s oblastí rozpouštění písku vyznačenou nulovou koncentrační izočárou. Síťový rozbor písku prokázal, že podíly hrubých zrn v rozmezí poloměru 0,3–0,5 mm jsou velmi malé (cca 1,3 %) a jejich odsítování je tudíž průmyslově realizovatelné. Křivka 2 ukazuje znatelný posun nulové koncentrační izočáry po odsítování frakcí 0,3–0,5 mm směrem k nakládece spojený se zploštěním profilu izočáry. Odsítování podílů 0,3–0,5 mm by tedy mohlo umožnit zvýšení výkonu zařízení.

Na obr. 6 je rovněž zakreslena tzv. nukleační izoterma vymezující spolu s částí hladiny oblast vysokých teplot nad 1450 °C, v níž by docházelo k nukleaci bublin na nerozpuštěných zrnech písku (5). Dle výsledků tohoto modelu této oblasti již nepříjdou nerozpuštěná zrna písku, a proto zde nebude docházet k heterogenní nukleaci bublin. V obr. 6 je vodorovným šrafováním vyznačena přibližně rovněž oblast dopředného proudění skloviny neobsahující již nerozpuštěný písek. V této oblasti může probíhat pouze čerení skloviny. Pro čerení tohoto typu skloviny jsou ovšem výhodné vysoké teploty kolem 1450 °C. Z obrázku 6 vyznačujícího oblast vysokých teplot nukleační izotermou je vidět, že jen velmi malá část dopředného proudění se nachází v této oblasti a čerení v ostatních částech zařízení tudíž probíhá za nižších teplot značně nevýhodnějších pro průběh procesu.

Oba obrázky indikují, že klasická vana využívá jen malou část svého objemu aktivně. Proudění, které se ve vaně ustaví díky pracovnímu proudu a přirozené konvekci, způsobuje, že značná část aktivní tavicí zóny je u dna (vliv teplotního maxima), tj. za nízkých teplot, kde rozpouštění písku i čerení probíhá velmi poma-



Obr. 5. Schéma středového řezu vanou na tavění plochého skla s izočarami hmotových zlomků nerozpuštěného písku: 1 —  $w_s = 0$ , 2 —  $w_s = 10^{-5}$ , 3 —  $w_s = 10^{-4}$ , 4 —  $w_s = 10^{-3}$ , 5 —  $w_s = 5 \cdot 10^{-2}$ , 6 —  $w_s = 10^{-1}$ , 7 —  $w_s = 2 \cdot 10^{-1}$ , 8 —  $w_s = 0,426$ .



Obr. 6. Schéma středového řezu vanou na tavění plochého skla.  $T_M$  — teplotní maximum,  $T_N$  — nukleační izoterma (1723 K); svislé šrafování: oblast točivých a vratných proudů, vodorovné šrafování: oblast dopředného proudu bez písku, nešrafovaná oblast: oblast dopředného proudění s pískem, křivka 1: čára nulové koncentrace písku v původní podobě, křivka 2: čára nulové koncentrace písku po odtětování frakci poloměru 0,3—0,5 mm.

Rozdělení koncentrací písku v podélném řezu sklářskou pecí

lu, zatímco u hladiny za vyšších teplot se pouze promíchává již utavená sklovina. Ostrý profil koncentračních izočár ukazuje na přítomnost výrazných „kritických“ drah a je rovněž nevýhodný. Konečně pracuje za těchto podmínek vana i při poměrně nízkých teplotách, které jsou nevýhodné pro čerení. Provozování zařízení daných parametrů není tedy optimální, a to především díky ustavenému proudění. Ukazuje se tedy potřebným uvažovat v budoucnosti o ovlivňování nebo řízení proudění v zařízení.

#### ZÁVĚR

Popsaný model dává užitečné informace o některých dějích probíhajících uvnitř zařízení, a tedy i o efektivnosti zařízení. Je však třeba mít na mysli, že uvedené výsledky vycházejí z řady zjednodušení nebo málo přesných dat, takže mají spíše kvalitativní charakter. Přesto mohou být již v tomto stadiu použity pro zamyšlení nad funkcí klasického tavicího zařízení. Pravděpodobně nejzajímavější je zjištění, že ustavené proudění není výhodné pro rychlé dokončení hlavních dějů, zejména pro rozpouštění písku. Bude tedy zřejmě důležitým úkolem pokusit se ovlivňovat a postupně řídit proudění tak, aby se v zařízení využilo výhodných tavicích režimů získaných na základě laboratorních měření a výpočtů. Cesta ke zpřesňování modelu pak vede od zdokonalování laboratorních měření a metod (použití neizotermních měření, nové metody zjišťování koncentrací heterogenit) k uplatnění dalších dějů (reakce kmene na hladině) a k přechodu na prostorový model. Nutnost spojení výsledků modelování zařízení a laboratorního sledování průběhu dějů je zde zřejmá.

#### Literatura

- [1] Hřma P.: Silikáty 24, 7 (1980).
- [2] Štefan J.: Osobní sdělení.
- [3] Špinková B.: Diplomová práce, VŠCHT, Praha (1977).
- [4] Šašek L., Daniček J.: Sborník VŠCHT, Praha, L 3, 225 (1973).
- [5] Němec L.: Jour. Am. Ceram. Soc. 60, 436 (1977).

#### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ ПЕСКА В ПРОДОЛЬНОМ СЕЧЕНИИ СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧЬЮ

Лубомир Немец, Михал Мюлбауэр\*

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

*\*Научно-исследовательский институт Sklo Union,  
415 03 Тенлице*

Авторами предлагается уравнение, дающее возможность при помощи функции вероятности появления частицы определенного размера в полидисперсной совокупности и при помощи коэффициента массопередачи описать растворение максимального зерна шаровидной формы в стекломассе. Был разработан способ расчета концентрации песка в данной точке плавающей установки с помощью данных относительно максимального зерна. На основании лабораторных тигельных измерений установили конкретный вид временной зависимости общего коэффициента массопередачи. На основании программы для вычислительной машины рассчитали траектории максимальных зерен песка установкой для плавления листового стекла. С использованием предлагаемого способа в установку обозначили концентрационные изолинии нерастворенного песка. Было найдено пригодное смещение нулевой концентрационной изолинии при просеивании двух наиболее крупных фракций песка. Расчеты показали, что меньшая часть профиля



установке активно служит для плавления, что концентрационные изолинии плавления имеют непригодный, в направлении в рабочую часть продольно вытянутый и резкий профиль, который является свидетельством присутствия резко „критических“ траекторий, и что установка используется недостаточно даже с точки зрения освещения. Из результатов, хотя и они имеют только приближенный характер, следует, что приходится управлять установившимся движением, которое при данных условиях для собственного плавления непригодно.

Рис. 1. Вид функции  $f(r)$ , выражающей плотность вероятности появления зерен определенного размера в песке для производства листового стекла.

Рис. 2. Зависимость натурального логарифма весовой доли нерастворенного песка от параметра наибольшего зерна  $r_{\max}$  в песке для производства листового стекла.

Рис. 4. Зависимость параметра наибольшего зерна  $r_{\max}$  от времени при температуре 1300, 1400 и 1500 °C, полученная на основании лабораторного тигельного плавления.

Рис. 5. Схема сечения центром ванны для плавления листового стекла с изолиниями весовых долей нерастворенного песка: 1 —  $w_s = 0$ , 2 —  $w_s = 10^{-5}$ , 3 —  $w_s = 10^{-4}$ , 4 —  $w_s = 10^{-3}$ , 5 —  $w_s = 5 \cdot 10^{-2}$ , 6 —  $w_s = 10^{-1}$ , 7 —  $w_s = 2 \cdot 10^{-1}$ , 8 —  $w_s = 0,426$ .

Рис. 6. Схема сечения центром ванны для плавления листового стекла;  $T_M$  — температурный максимум,  $T_N$  — изотерма нуклеации (1723 K), вертикальная штриховка: область циркуляционных и обратных потоков, горизонтальная штриховка: область потока в прямом направлении без песка, область без штриховки: область потока в прямом направлении с песком, кривая 1 — линия нулевой концентрации песка в исходном виде, кривая 2 — кривая нулевой концентрации песка после просеивания фракций параметром 0,3—0,5 мм.

## SAND CONCENTRATION DISTRIBUTION OVER THE LONGITUDINAL CROSS SECTION THROUGH A GLASS TANK FURNACE

Lubomír Němec, Michal Mühlbauer\*)

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

\*)Research Institute of Glass Union, 415 03 Teplíce

An equation was suggested for describing the dissolution of a maximum sand grain of spherical shape in the glass melt by means of a probability function for the occurrence of a particle of certain size in a polydispersion system and by means of the mass transfer coefficient; a procedure was worked out for calculating the concentration of sand at a certain point of the tank furnace by means of data on the maximum grain. The concrete form of the time dependence of the total mass transfer coefficient was determined on the basis of laboratory crucible measurements. Using a computer program, there were computed the paths of maximum sand grains through a flat glass tank, and concentration isolines of non-dissolved sand were determined by the procedure suggested. A favourable shift in the zero concentration isoline was found when the two coarsest sand fractions had been removed by screening. The computations have shown that only a minor part of the tank cross section is actively utilized for melting, and that from the standpoint of melting, the concentration isolines have a disadvantageous shape extended longitudinally and sharply into the working section and implying the presence of distinct „critical” paths; the tank operation is as well not very satisfactory from the point of view of refining. In spite of the approximate character of the results they indicate that the existing flow in a glass tank is not fully satisfactory from the standpoint of the melting process, and that some sort of flow control should be introduced.

Fig. 1. The shape of function  $f(r)$  expressing the occurrence probability density for grains of certain size in sand for the manufacture of flat glass.

Fig. 2. Natural logarithm of the weight fraction of non-dissolved sand vs. the largest grain radius  $r_{\max}$  in sand for flat glass manufacture.

Fig. 3. Time dependence of the largest grain radius  $r_{\max}$  at 1100 and 1200 °C obtained from laboratory crucible melting.

**Fig. 4.** The time dependence of the largest grain radius  $r_{\max}$  at 1300, 1400 and 1500 °C obtained from laboratory crucible melting.

**Fig. 5.** Schematic central sectional view of a flat glass tank with isolines of mass fractions of undissolved sand: 1 —  $w_S = 0$ , 2 —  $w_S = 10^{-5}$ , 3 —  $w_S = 10^{-4}$ , 4 —  $w_S = 10^{-3}$ , 5 —  $w_S = 5 \times 10^{-2}$ , 6 —  $w_S = 10^{-1}$ , 7 —  $w_S = 2 \times 10^{-1}$ , 8 —  $w_S = 0.426$ .

**Fig. 6.** Schematic central sectional view of a flat sheet tank.

$T_M$  — temperature maximum,  $T_N$  — nucleation isotherm (1723 K), vertical hatching: region of revolving and return currents, horizontal hatching: region of sand-free forward currents, non-hatched region: region of forward current with sand, curve 1: line of zero sand concentration in original form, curve 2: line of zero sand concentration after removal of dia. 0.3—0.5 mm sand fractions.