

HLAVNÍ TECHNOLOGICKÉ CHARAKTERISTIKY SKLÁŘSKÝCH TAVICÍCH PROSTORŮ Z HLEDISKA PRŮBĚHU TAVICÍHO PROCESU

Část II. Hlavní charakteristiky do okamžiku rozpuštění písku

LUBOMÍR NĚMEC, SIMONA LAURENTOVÁ*

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

*Katedra technologie silikátů VŠCHT, 166 28 Praha 6, Suchbátarova 5

Došlo 15. 10. 1987

S využitím teoretických podkladů z části I byl zjišťován vliv teploty tavení, zrnitosti písku, typu a koncentrace čeriva, velikosti mrtvého prostoru a míchání taveniny probubláváním na měrnou spotřebu energie a výkon jednoduchého modelového tavicího prostoru při tavení sodno-vápenaté skloviny. Výsledky výpočtů ukázaly výrazně příznivý vliv vysoké tavicí teploty; k nepatrnému zvýšení měrné spotřeby energie dochází až při teplotách nad 1 500—1 550 °C. Rovněž vysoké využití tavicího prostoru je významným příznivým faktorem, především v oblasti středních a nižších teplot. Příznivé ovlivnění tavicích charakteristik ostatními faktory projevujícími se rovněž především v oblasti středních a nižších teplot je podmíněno: snížením rozměru maximálního zrna písku, posunem granulometrie písku směrem k monodisperzi, nízkou koncentrací čeriva (za podmínky vyčeření) a mícháním skloviny.

ÚVOD

V první části této práce [1] byl teoreticky nastíněn postup, jak hledat cesty k nízkým hodnotám energetických spotřeb a vysokým výkonům tavicích zařízení, vycházíme-li ze znalostí o průběhu tavicího procesu a z laboratorních experimentálních dat charakterizujících tavicí děje. Jako hlavní tavicí děje byly brány v úvahu rozpuštění písku a čerění. Protože oba hlavní děje lze od sebe časově a v konkrétním tavicím prostoru i prostorově oddělit, tj. uskutečnit zvláště za podmínek výhodných především pro daný děj, byly první výpočty technologických charakteristik provedeny pouze pro rozpuštění písku. Jak je dobře známo, právě tento děj je v běžných tavicích prostorech energeticky nejnáročnější. Pro výpočty byl použit modelový tavicí prostor popsáný v části I.

EXPERIMENTÁLNÍ DATA

Data o sklovinách

Pro výpočty byly použity doby rozpouštění písku zjištěné z experimentálních měření a výpočtů v předchozích pracích [2, 3]. U modelové skloviny (74 hmot. % SiO_2 , 16 hmot. % Na_2O , 10 hmot. % CaO) bylo použito závislosti doby rozpouštění písku (písek Hohentbock, $\tau_{0\text{max}} = 0,2$ mm) na teplotě a koncentraci čeriv Na_2SO_4 , $\text{As}_2\text{O}_3 + \text{NaNO}_3$ a NaCl . Experimentální hodnoty dob rozpouštění písku τ_D byly změřeny při teplotách 1 200, 1 300, případně 1 400, 1 470 a 1 530 °C pro tyto koncentrační intervaly čeriv: 0—3 % As_2O_3 (vztaženo na hmotu skla), 0—1 %

Na_2O j. Na_2SO_4 , 0–4 % Na_2O j. NaCl . Dále byly uvažovány dvě rozdílné možnosti tavicích režimů, běžný případ kelímkového tavení a případ, kdy je sklovina probublávána probublávaním plynem. Z naměřených experimentálních hodnot byly interpolací a v několika případech extrapolací získány doby rozpouštění písku τ_D pro příslušné koncentrace čeriv a v teplotním intervalu 1 150–1 550 °C v krocích po 50 °C. Hodnoty τ_D pro $r_{0\text{max}} = 0,25$ mm byly zjištěny z experimentálních závislostí velikosti poloměru zrna na čase, při čemž bylo využito teoretické a experimentálně ověřené znalosti, že závislost hodnot r_{max} na čase je v pozdějších stadiích rozpouštění lineární.

U zkoumané skloviny typu plochého skla byla použita závislost τ_D na teplotě a hodnotě $r_{0\text{max}}$ [2]. Vycházelo se z experimentální závislosti τ_D na teplotě pro $r_{0\text{max}} = 0,5$ mm a stejného předpokladu o lineární závislosti mezi r_{max} a časem v pozdějších stadiích rozpouštění písku, jak již bylo uvedeno. Závislost hodnot τ_D na typu granulometrické křivky pro tuto sklovinu byla převzata z práce [4]. Sif hodnot τ_D je příliš rozsáhlá pro publikování v této práci, odkazujeme proto na tabulky I–XIV v přílohách k výzkumné zprávě [5]. Teplotní závislosti měrných hmotností obou sklovin byly převzaty z prací [2] a [6].

Data o modelovém zařízení

Modelové zařízení je znázorněno na obr. 2 v části I. Má čtvercový půdorys tavicí části o ploše 1 m², vrstva skloviny je vysoká 1 m, sklovina se taví z kmene. Rychlost ztrát vrstvou vsázky, která zcela zakrývá hladinu, byla převzata z literatury [7]

Tabulka I

Teploty na vnější straně žárovzdorného materiálu t_2 pro dané hodnoty teplot vnitřní stěny tavicího prostoru t_1

t_1 [°C]	t_2 [°C]	t_1 [°C]	t_2 [°C]
1 100	262	1 350	356
1 150	281	1 400	374
1 200	300	1 450	393
1 250	319	1 500	412
1 300	337	1 550	431

Tabulka II

Teplotní závislost toku tepla stěnami a vrstvou vsázky vztažená na 1 kg skloviny

t [°C]	Měrný tok tepla [J/kg · s]	t [°C]	Měrný tok tepla [J/kg · s]
1 100	9,90	1 350	16,03
1 150	10,41	1 400	17,63
1 200	11,71	1 450	19,29
1 250	13,08	1 500	21,04
1 300	14,52	1 550	22,86

a prakticky neovlivňuje celkové ztráty. Stěny zařízení jsou jednoduché a mají všude tloušťku 0,3 m. Materiál stěn je korundo-baddeleyitový (32–36 hmot. % ZrO_2), pro který má závislost součinitele tepelné vodivosti na teplotě v oblasti 1 100–1 600 °C tvar [8]: $\lambda = -1,412 (1 - 3,453 \cdot 10^{-3} \cdot t)$ [$J \cdot s^{-1} \cdot m^{-1} \cdot deg^{-1}$]. Tavicí část je oddělena žárovzdornou přepážkou ze stejného materiálu od pracovní části.

Teplota vnitřní stěny tavicího prostoru t_1 je shodná s tavicí teplotou uvnitř tavicího prostoru. Výpočtem dle [8] a po úpravě lze získat teplotu vnější stěny t_2 pro zadané t_1 . Pro náš případ teploty vzduchu 20 °C a předpoklad, že $t_2 > 200$ °C, jsou příslušné dvojice t_1 a t_2 uvedeny v tabulce I. Pro výpočet ztrát pak platí rovnice (2) v části I. Po dosazení konkrétních hodnot dostáváme měrné toky tepla stěnami zařízení uvedené v tabulce II. Tyto hodnoty zhruba odpovídají hodnotám dosahovaným u běžných tavicích zařízení.

VÝPOČET TEORETICKÉ MĚRNÉ SPOTŘEBY ENERGIE

Vychází se z rovnice (1) v části I. Pro Q_R je uvažována doporučená střední hodnota 500 kJ/kg. Pro výpočet hodnot Q_{BG} a Q_M je použito hodnot středních specifických tepelných kapacit jednotlivých složek skloviny a uvolňujících se plynů [9]. Pro výpočet $Q_M + Q_{BG}$ pak platí:

$$Q_M + Q_{BG} = \sum_{i=6}^n \bar{C}_{pi} m_i \Delta t_i + m_{H_2O} \cdot \Delta H_{vypH_2O}. \quad (1)$$

Závislost teoretické měrné spotřeby energie na teplotě pro oba zkoumané typy sklovin je pak udána v tab. III. Při výpočtu měrné energetické spotřeby i výkonu modelového tavicího prostoru se předpokládalo, že τ v rovnici (2) (část I) je rovno době rozpouštění písku τ_D (výpočet bez tavicí rezervy, uvažuje se pouze rozpouštění písku, předpokládá se pístový tok v oblasti neuzavřených proudnic).

Tabulka III

Teplotní závislost teoretické měrné spotřeby energie na utavení skloviny

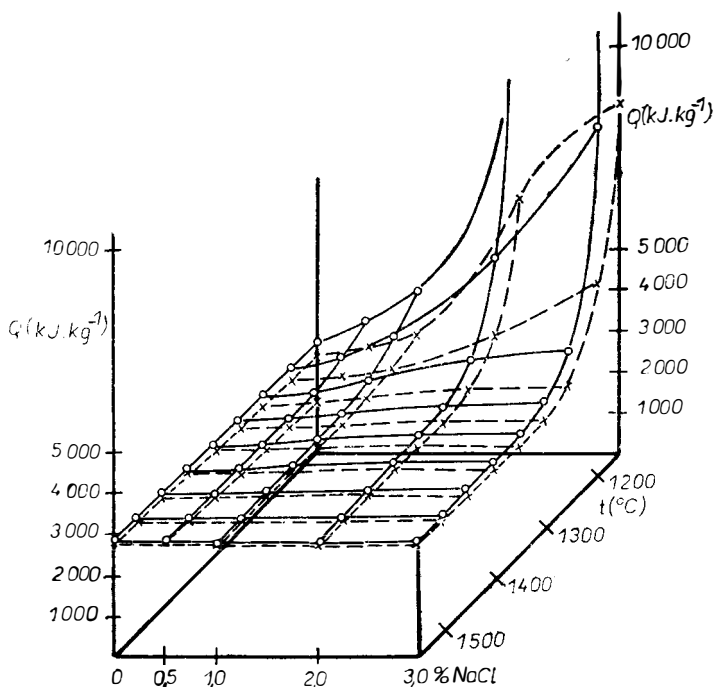
t [°C]	Ploché sklo [kJ/kg]	Sklo N–C–S [kJ/kg]
1 100	2 146	2 101
1 150	2 221	2 175
1 200	2 296	2 250
1 250	2 371	2 324
1 300	2 446	2 398
1 350	2 521	2 472
1 400	2 597	2 546
1 450	2 672	2 620
1 500	2 747	2 694
1 550	2 822	2 769

VÝSLEDKY VÝPOČTŮ A JEJICH DISKUSE

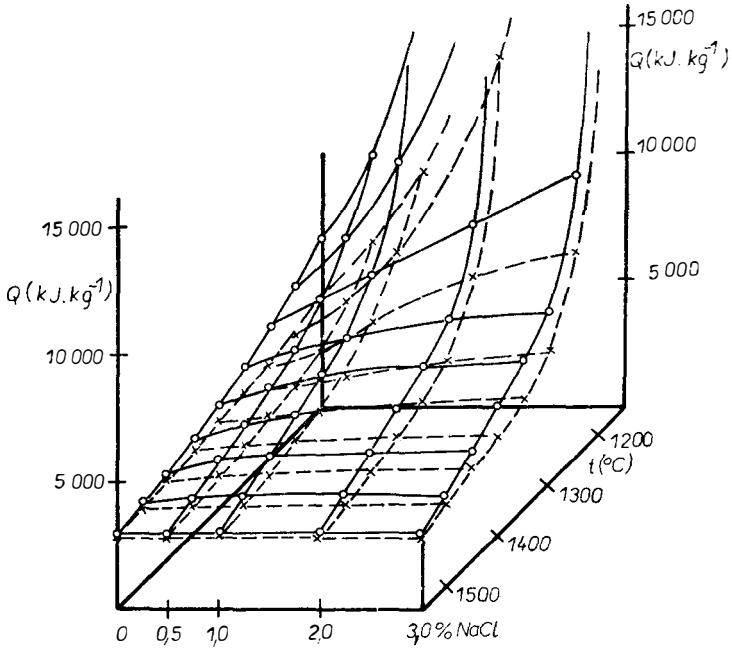
Protože hledáme obecné tendence ve vývoji obou technologických charakteristik, je třeba provést značné množství výpočtů, kde jsou sledovány závislosti na uvažovaných faktorech (teplota, typ a koncentrace čeriva, velikost největšího zrna písku, typ granulometrické křivky písku, míchání skloviny probubláváním a velikost mrtvého prostoru). Podrobné tabulky jsou sice uvedeny pod čísly XV—CXLII v příloze k [5], avšak v této práci budou z důvodu názornosti uvedeny typické závislosti v grafické formě.

Vliv teploty

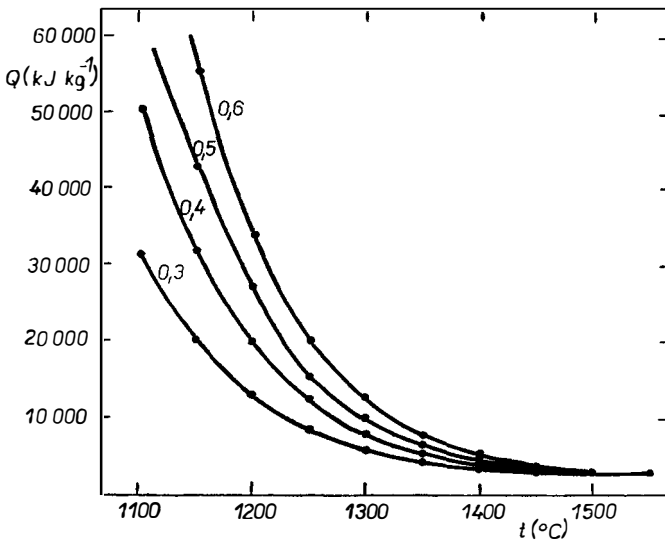
Teplota je jedním z dominantních faktorů, ovlivňuje hodnoty $Q_M + Q_{BG}$ a především ztráty Q_L . Zatímco teoretická měrná spotřeba $Q_R + Q_{BG} + Q_M$ s teplotou vzrůstá, ztráty energie Q_L klesají zhruba úměrně poklesu dob rozpouštění písku, tj. s teplotou. Jako výsledek tohoto dvojího působení pak dostáváme strmý pokles Q se stoupající teplotou (pro sodnovápenatou sklovinu trvá pokles až do teplot 1 500—1 550 °C), později při vyšších teplotách se objeví pomalý vzrůst Q k důsledku převládajícího vlivu rostoucí teoretické měrné spotřeby i vzrůstajícího tepelného toku stěnami zařízení. Tato skutečnost je zřejmá z obr. 1—4 a vyplývá z ní závěr, že vysoké tavicí teploty jsou z hlediska celkové měrné spotřeby energie výhodné. Při vysokých teplotách se vliv ostatních faktorů ovlivňujících ztráty



Obr. 1. Závislost měrné spotřeby energie na koncentraci čeriva a teplotě. Sklovina 74 hmot. % SiO_2 , 16 hmot. % Na_2O , 10 hmot. % CaO (N—C—S), $r_{0\text{max}} = 0,20 \text{ mm}$, bez míchání probubláváním; $o - m = 0,6$, $x - m = 0$.

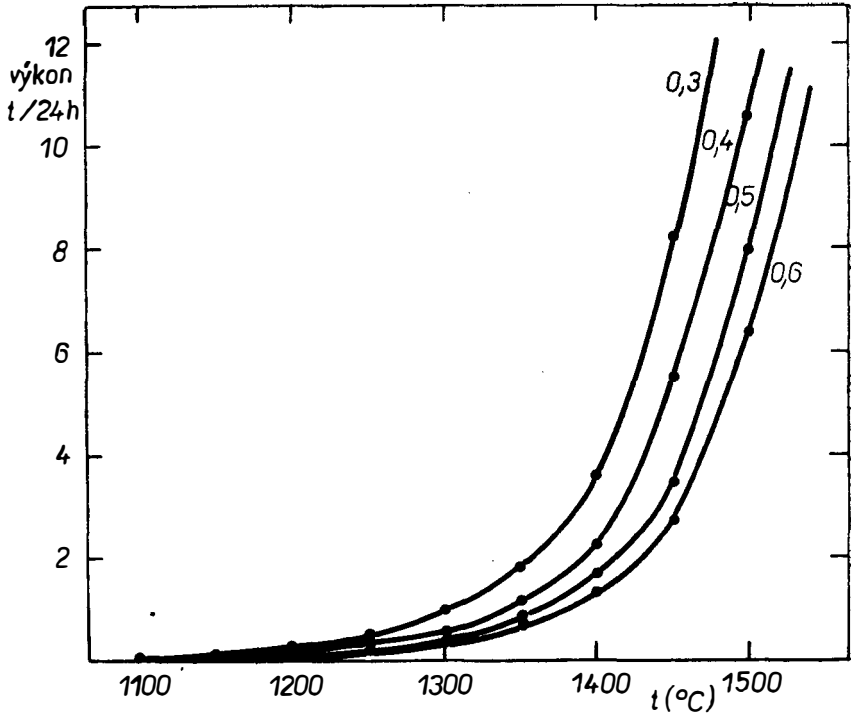


Obr. 2. Závislost měrné spotřeby energie na koncentraci čerňiva a teplotě. Sklovina N-C-S, $m = 0,9$, bez míchání probubláváním; o - $r_{0\max} = 0,25$ mm, x - $r_{0\max} = 0,20$ mm.



Obr. 3a

Obr. 3. Závislost měrné spotřeby energie a výkonu na teplotě. Plochá sklovina, hodnoty na křivkách jsou velikosti $r_{0\max}$ v mm.



Obr. 3b

projevuje jen nepatrně, neboť ztráty samotné mají již malou hodnotu ve srovnání s teoretickou spotřebou energie. K uplatnění jiných příznivých faktorů proto může dojít v oblasti nižších a středních teplot, jak se ukáže dále. Uvedené výsledky potvrzují trend posledních desetiletí ke zvyšování průměrných tavicích teplot až k určité hranici (minimum na křivce měrná spotřeba energie versus teplota).

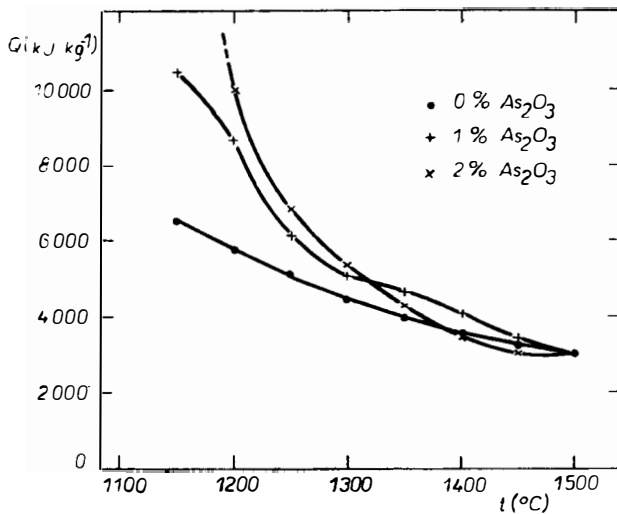
Výkon tavicího prostoru s rostoucí teplotou rychle stoupá (viz obr. 3b, 4b a 5), neboť klesají hodnoty středních dob zdržení v rovnici 6 (část I). Tvar energetické křivky se strmým poklesem k oblasti nízkých teplot a s nevýrazným minimumem je typický pro všechny skloviny.

Vliv poloměru největšího zrna písku

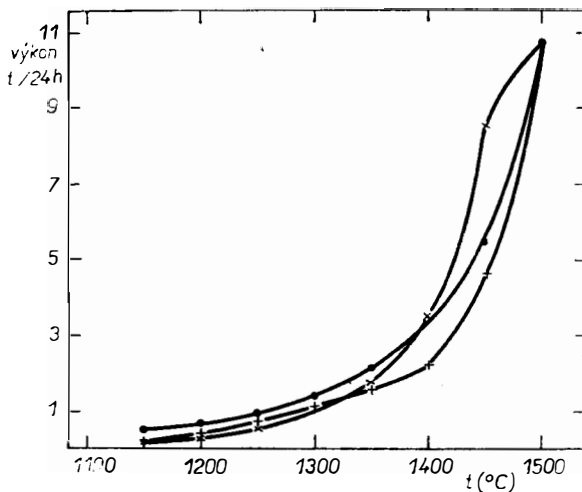
Z obr. 2 a 3 je zřejmé, že zejména za nízkých a středních tavicích teplot je snížení $r_{0\max}$ významným intenzifikačním faktorem. To platí především pro vyšší hodnoty mrtvého prostoru m , kdy je podíl ztrát v celkové spotřebě energie vysoký. Rovněž výkon rychle stoupá s klesající hodnotou $r_{0\max}$ (obr. 3b).

Vliv tvaru granulometrické křivky písku

Z výpočtů bylo zřejmé, že jde o méně významný vliv, který se projeví spíše za nižších teplot a při vyšších hodnotách mrtvého prostoru m . Při dané hodnotě $r_{0\max}$ je nejvýhodnější písek s nejmenším podílem jemných frakcí (monodisperze),



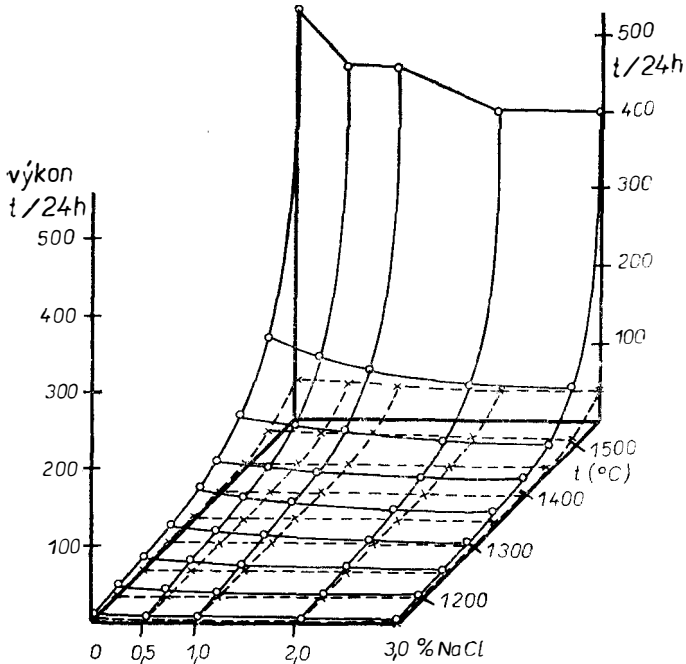
Obr. 4a



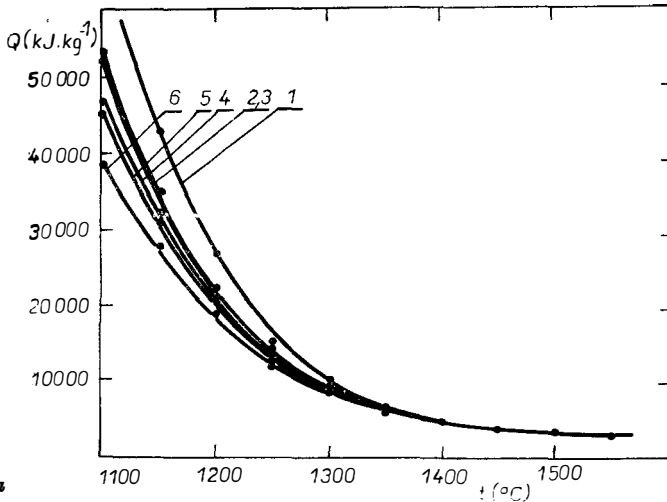
Obr. 4b

Obr. 4. Závislost měrné spotřeby energie a výkonu na teplotě, sklovina N-C-S, $r_{0max} = 0,25$ mm, $m = 0,9$, bez míchání probubláváním.

kde jemný podíl není). Závislost měrné spotřeby energie a výkonu modelového zařízení na typu granulometrické křivky písku pro případ plochého skla a při vysokých podílech mrtvého prostoru ukazuje obr. 6a, b.

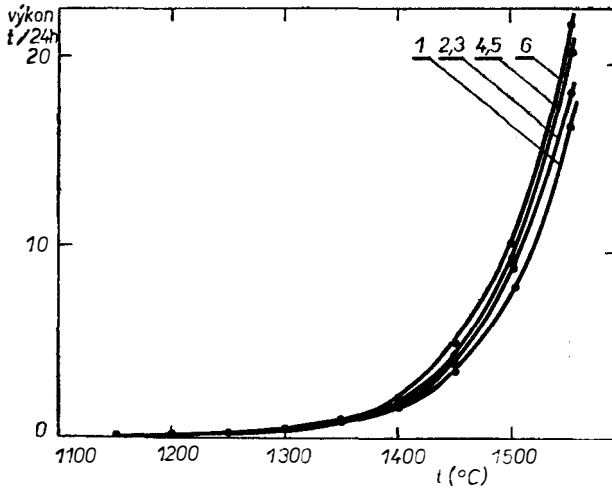


Obr. 5. Závislost výkonu na koncentraci čerřiva a teplotě, sklovina N-C-S, $r_{0max} = 0,20$ mm, bez míchání probubláváním; $x - m = 0,9$, $o - m = 0$.



Obr. 6a

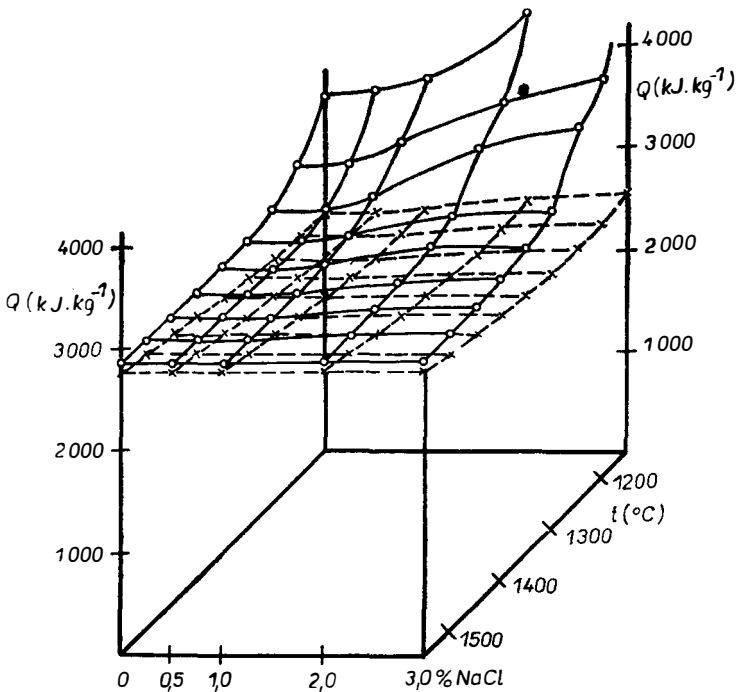
Obr. 6. Závislost měrné spotřeby energie a výkonu na teplotě (plochá sklovina) pro různé typy závislosti četnosti zrn písku na jejich velikosti, $r_{0max} = 0,5$ mm; tvary závislosti: 1 - prům. písek TS40, 2 - \square , 3 - \triangle , 4 - \square , 5 - \triangle , 6 - monodisperze $r_{0max} = 0,5$ mm.



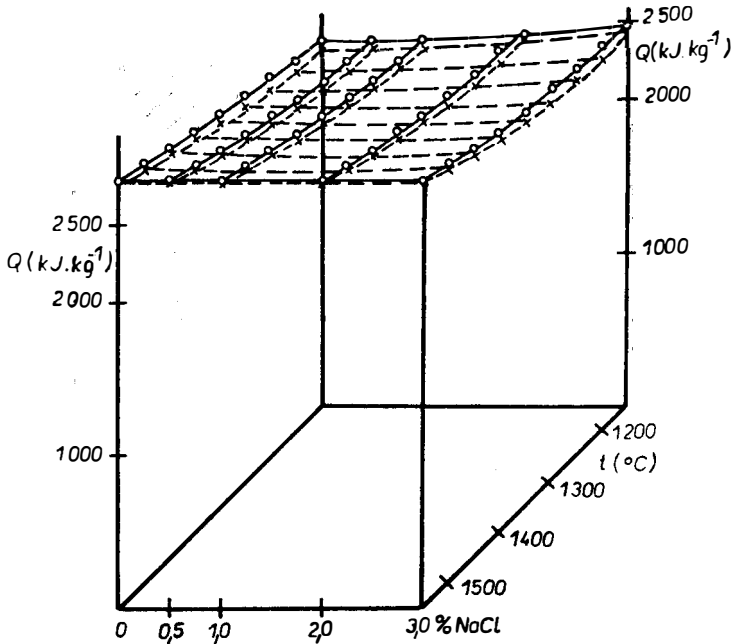
Obr. 6b

Vliv promíchávání taveniny probubláváním

Vliv promíchávání skloviny probubláváním kyslíkem je názorně vidět na příkladech v obr. 7 a 8. Jeho výsledkem je snížení hodnot τ_D , tedy i hodnot ztrát Q_L . Ke snížení celkové měrné spotřeby energie dochází především při vyšších hodnotách



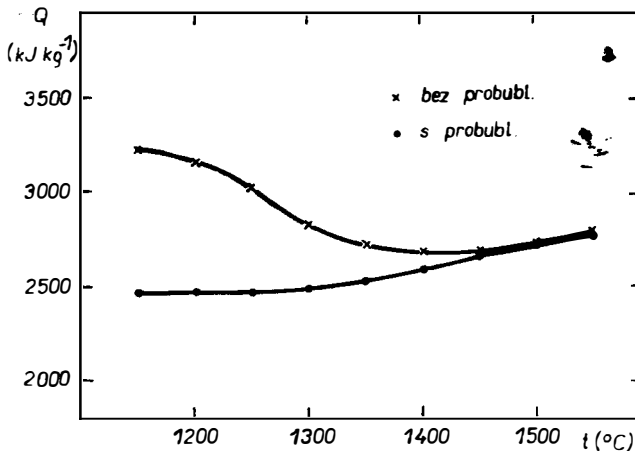
Obr. 7. Závislost měrné spotřeby energie na koncentraci čeriva a teplotě. Sklovina N-C-S, $r_{0max} = 0,20$ mm, míchání probubláváním; o - m = 0,9, x - m = 0,3.



Obr. 8. Závislost měrné spotřeby energie na koncentraci čeriva a teplotě. Sklovina N-C-S, $m = 0$, míchání probubláváním; o - $r_{\max} = 0,25$ mm, x - $r_{\max} = 0,20$ mm.

mrtvého prostoru m . Vliv promíchávání skloviny je poměrně výrazný za nižších teplot a vyšších hodnot r_{\max} , kdy je opět podíl ztrát na celkové měrné spotřebě energie vysoký (obr. 9). Dochází přitom k přesunu optimální tavicí teploty do nižších teplot.

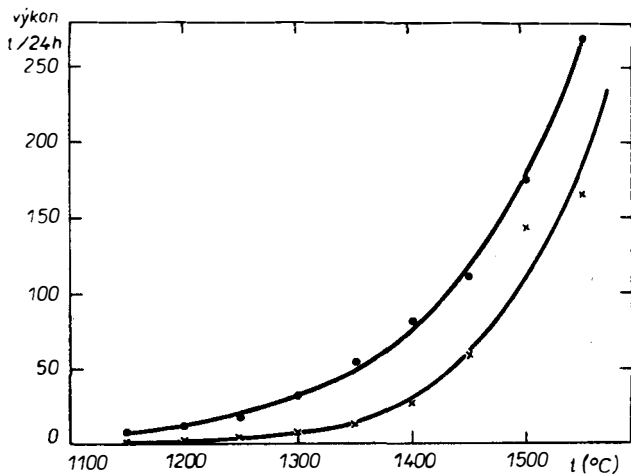
Výkon opět roste s poklesem τ_D , tj. při uplatnění probublávání (obr. 9b)



Obr. 9. Závislost měrné spotřeby energie a výkonu na teplotě, sklovina N-C-S, 0,7 % Na_2O j. Na_2SO_4 , $r_{\max} = 0,25$ mm, $m = 0$.

Vliv koncentrace čeřiva

Čeřiva ovlivňují poměrně komplikovaně rychlost rozpouštění písku, avšak za vysokých tavicích teplot je ovlivnění měrné energetické spotřeby čeřivy malé, neboť ztráty jsou rovněž malé. Za nízkých teplot převládá nepříznivý vliv čeřiv,



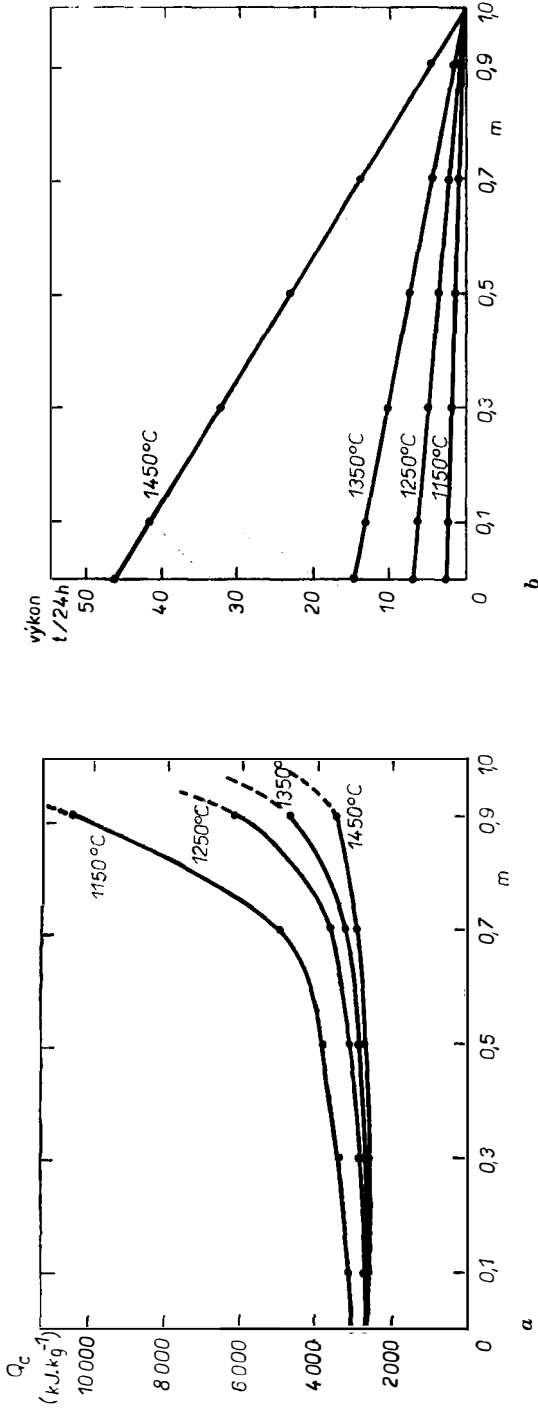
Obr. 9b.

tj. hodnota měrné energetické spotřeby se stoupající koncentrací čeřiva roste (obr. 1, 2, 4, 7). Protože čeřiva jsou nezbytná pro odstranění bublin, je třeba při nižších průměrných tavicích teplotách dbát na to, aby koncentrace čeřiva nebyla zbytečně vysoká.

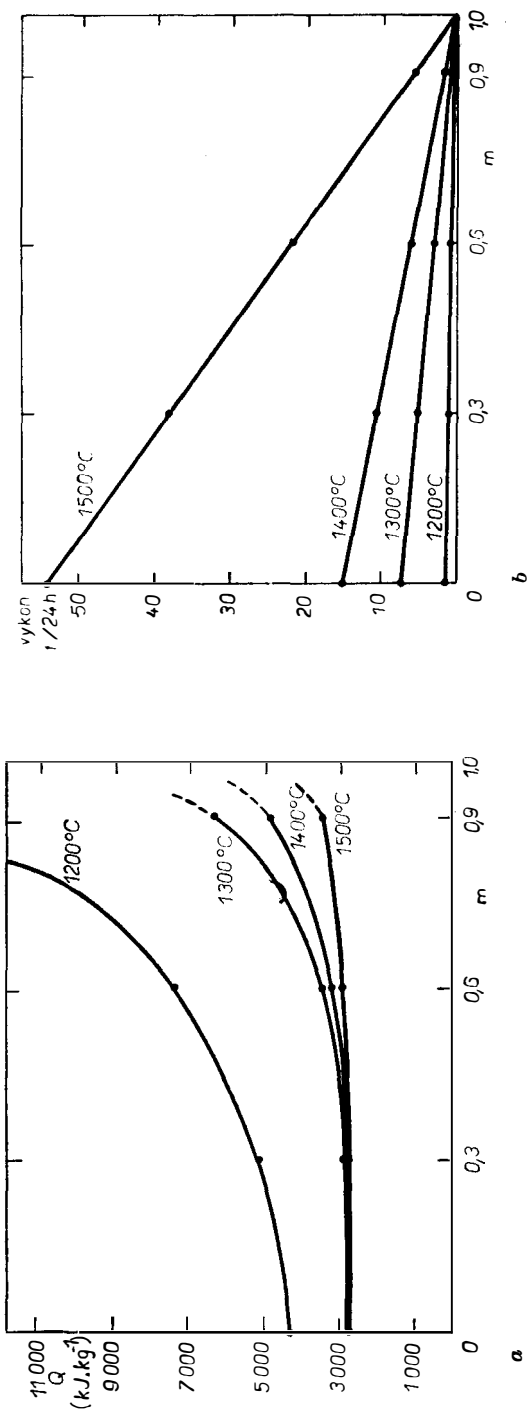
Vliv velikosti mrtvého prostoru

Mrtvý prostor m nabývá hodnot v intervalu $\langle 0, 1 \rangle$ a podává nám pouze sumární informaci o proudění v tavicím prostoru. Jak ukazuje obr. 1, 10a a 11a, pro jemnější písek je nízká nebo nulová hodnota m zárukou velmi nízkých hodnot měrné spotřeby energie prakticky v celém teplotním intervalu. Se stoupající hodnotou m stoupá i měrná spotřeba energie, a to tak, že při nízkých teplotách stoupá již od počátku strmě, při vyšších teplotách začíná být vzestup strmější až pro $m = 0,8$ až $0,9$ (obr. 10a, 11a, 12a). Ukazuje se, že zejména pro jemnější písky by bylo uspořádání proudění s malou hodnotou m výborným úsporným opatřením tam, kde při tavení nemohou být dosaženy vysoké průměrné tavicí teploty.

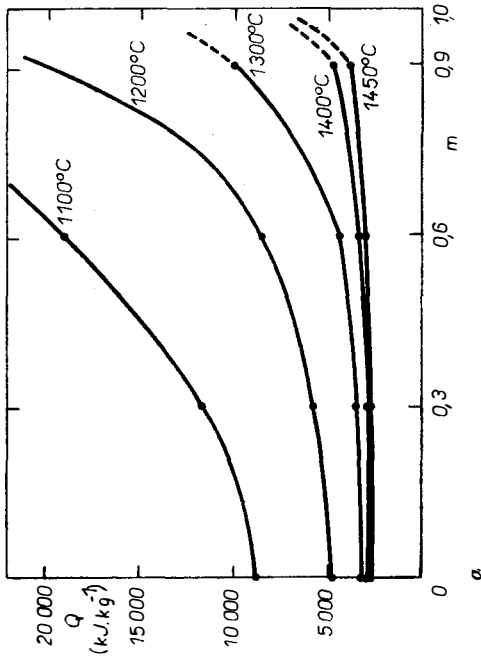
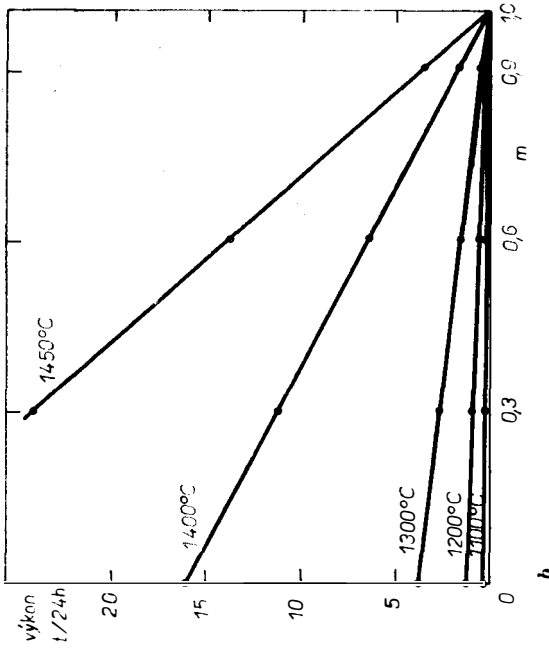
Dosažení nízkých hodnot mrtvého prostoru m však závisí na uspořádání proudění v zařízení, což je prakticky velmi obtížný úkol závislý jak na tvaru zařízení, tak na rozložení teplot v zařízení. Jednou z možností řešení tohoto problému by mohlo být probublávání skloviny plynem, kdy se ke snížení velikosti mrtvého prostoru připojí i příznivý vliv míchání skloviny na rychlost rozpouštění písku. Obr. 13 ukazuje, že měrná spotřeba energie za nízkých teplot a s probubláváním skloviny by se příliš nelišila od měrné spotřeby za velmi vysokých tavicích teplot, avšak bez probublávání.



Obr. 10. Závislost měrné spotřeby energie a výkonu na velikosti mrtvého prostoru. Sklovina N-C-S, šetřeno 1% As_2O_3 + NaNO_3 , $\tau_{0\text{max}} = 0,25$ mm, bez míchání probubláváním.

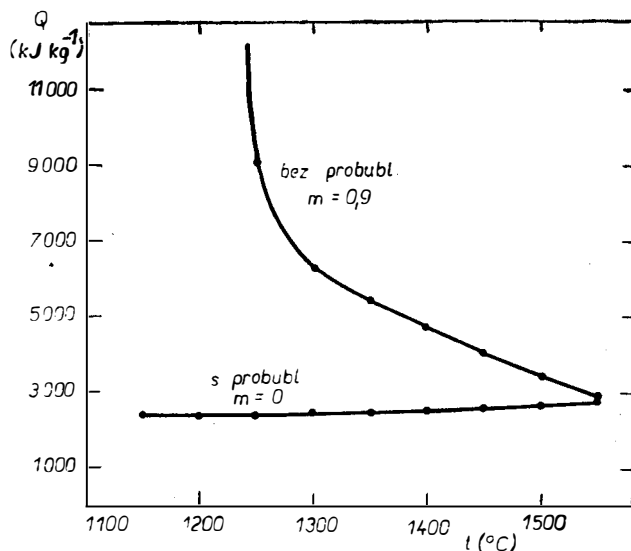


Obr. 11. Závislost měrné spotřeby energie a výkonu na velikosti mrtvého prostoru. Sklolina N-C-S, čereno 2% Na_2O j. NaCl , $\tau_{0 \text{ max}} = 0,25 \text{ mm}$, bez míchání probublávaním.



Obr. 12. Závislost měrné spotřeby energie a výkonu na velikosti mrtvého prostoru. Plochá sklovina, $r_{\max} = 0,5 \text{ mm}$.

Výkon klesá přímo úměrně s klesající hodnotou mrtvého prostoru, což plyne z rovnice (6) k části I a je zřejmé z obr. 10b, 11b a 12b. Nízká hodnota mrtvého prostoru se dle výsledků jeví jako druhý velmi příznivý faktor (vedle teploty) ovlivňující především hodnoty měrné spotřeby energie.



Obr. 13. Závislost měrné spotřeby energie na teplotě. Sklovina N-C-S, čefeno 2 % Na₂O j. NaCl, $r_{0\max} = 0,25$ mm.

Z Á V Ě R

Uvedené výsledky se týkají zjednodušeného tavicího procesu zahrnujícího pouze rozpouštění písku. Takové pojetí odpovídá případu, kdy je rozpouštění písku provozováno odděleně od čefení nebo případu, kdy při paralelním průběhu obou dějů je rozpouštění písku dějem pomalejším. Protože rozpouštění písku ve skelné tavenině je dějem časově nejnáročnějším, ukazují výsledky mnohé platné poznatky i o celém tavicím procesu. Zjednodušené tavicí podmínky (konstantní teplota, tzv. standardní nastavení — viz část I, předpoklad pístového toku) nám dovolují přesněji definovat daný případ, čímž je umožněno srovnávání. Toto srovnávání má pro nás největší význam, neboť umožňuje to, co je na průmyslovém zařízení nezjistitelné — nalezení tendencí změn hlavních tavicích charakteristik při změnách faktorů v širokých mezích. Svůj význam má rovněž to, že jde o faktory vnitřní — teplotu, granulometrii písku, míchání, koncentraci čefiva, využití tavicího prostoru — jejichž vliv na průmyslovém zařízení se často přímo neprojeví. Za tyto výhody sice platíme menší přesností výsledků, avšak tendence jsou již zjistitelné přesněji a umožňují nalézt bez komplikovaných měření a výpočtů oblasti výhodných podmínek. Tyto oblasti pak mohou být zpracovávány dále přesněji. Dosavadní výsledky ukazují jednoznačně příznivý vliv vysokých průměrných tavicích teplot nebo vysokého využití tavicího prostoru (malé m). Aby bylo možno definovat cesty k dosažení výhodných tavicích charakteristik, je však třeba do

tavicího procesu zahrnout i čerění, což může naše výsledky alespoň v některých oblastech podmínek korigovat. Toto zahrnutí a jeho vliv na hlavní tavicí charakteristiky budou zkoumány v další části.

Literatura

- [1] Němec L.: Silikáty (I. část).
- [2] Němec L., Mühlbauer M.: *Glastechn. Ber.* 56K, 82 (1983).
- [3] Němec L.: *Sklář a keram.* 29, 103 (1979).
- [4] Mühlbauer M., Němec L.: *Cer. Bull.* 64, 1 471 (1985).
- [5] Němec L., Laurentová S., Freivolt Š.: Hlavní tavicí děje z hlediska spotřeby energie, Závěrečná zpráva DÚ IV-4-3/04, Praha (1985).
- [6] Truhlářová M., Vepřek O.: *Sborník VŠCHT*, Praha, L4, 281 (1973).
- [7] Schill P.: Zpráva pro průběžnou oponenturu hlav. úkolu SPZV, IV-4-3, Praha, VŠCHT (1983), str. 32.
- [8] Staněk J.: *Elektrické tavení skla*, SNTL, Praha 1976, str. 367.
- [9] Meissnerová H.: Teoretické výrobní teplo, Výzkumná zpráva v rámci VHČ mezi koncernem Sklo Union KTS VŠCHT, Praha (1982).

Seznam symbolů

c_{pi}	— střední specifická tepelná kapacita i -té složky [kJ/kg . deg]
m	— podíl mrtvého prostoru
m_i	— hmotnost složky obsažené nebo uvolněné při utavení 1 kg skloviny [kg]
r_{\max}	— poloměr maximálního zrna písku v daném souboru [m]
Δt_i	— teplotní rozdíl [°C]
t_1, t_2	— teploty vnitřního a vnějšího povrchu stěn žár. mat. [°C]
$\Delta H_{\text{výpH}_2\text{O}}$	— výparné teplo vody (2 258 kJ/kg)
Q	— měrná energetická spotřeba na tavení [kJ/kg]
Q_{BG}	— měrné teplo odváděné plynnými produkty rozkladu kmene [kJ/kg]
Q_{M}	— měrné teplo potřebné na ohřátí skloviny na technologickou teplotu [kJ/kg]
Q_{R}	— měrné reakční teplo [kJ/kg]
λ	— součinitel tepelné vodivosti materiálu [J/m . s . deg]
τ_{D}	— čas potřebný k rozpouštění pevných částic (písku) [s]
τ	— střední doba zdržení skloviny v zařízení [s]

ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЛАВИЛЬНЫХ ПРОСТРАНСТВ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ХОДА ПЛАВИЛЬНОГО ПРОЦЕССА

Часть II. Основные характеристики до момента растворения песка

Лубомир Немец, Симона Лаурентова*

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

*кафедра технологии силикатов Химико-технологического института

Исследование влияния основных факторов — температуры, размера зерна песка, типа и концентрации осветлителя, размера мертвого пространства и механическое перемешивания расплава на характеристики плавления, т. е. на удельное потребления энергии и мощность модельной плавильной зоны предоставляет возможность откры-

вать тенденции, ведущие к оптимальным величинам обеих характеристик. Используя теоретические основания, приводимые в части I, и до сих пор полученные экспериментальные величины относительно растворения песка, проводили расчеты характеристик до момента растворения песка для известковонатриевой стекломассы и листовой стекломассы. Расчеты показали пригодность высокой средней температуры плавления для понижения потребления энергии, причем существует минимум в этой зависимости при температуре, отвечающей максимальным температурам в некоторых новейших плавильных зонах. Также было доказано благоприятное влияние высокой температуры на мощность плавильной зоны. Вторым весьма благоприятным фактором считается высокое использование плавильной зоны, действующее прежде всего при средних и более низких температурах плавления. Остальные исследуемые факторы действуют также прежде всего при более низких и средних температурах плавления. Благоприятное действие на характеристику обусловлено: понижением размера максимального зерна песка, смещением гранулометрии песка к монодисперсии, низкой концентрацией осветлителя (обеспечивающего освещение), использованием перемешивания стекломассы.

- Рис. 1. Зависимость удельного потребления энергии от концентрации осветлителя и температуры. Стекломасса 74 % по весу SiO_2 , 16 % по весу Na_2O , 10 % по весу CaO ($N-C-S$), $r_{0 \text{ макс}} = 0,20$ мм, без перемешивания барботированием; $o - t = 0,6$, $x - t = 0$.
- Рис. 2. Зависимость удельного потребления энергии от концентрации осветлителя, и температуры. Стекломасса $N-C-S$, $t = 0,9$, без перемешивания барботированием; $o - r_{0 \text{ макс}} = 0,25$ мм, $x - r_{0 \text{ макс}} = 0,20$ мм.
- Рис. 3. Зависимость удельного потребления энергии и мощности от температуры. Листовая стекломасса, величины на кривых имеют размер $r_{0 \text{ макс}}$ в мм.
- Рис. 4. Зависимость удельного потребления энергии и мощности от температуры, стекломасса $N-C-S$, $r_{0 \text{ макс}} = 0,25$ мм, $t = 0,9$, без перемешивания барботированием.
- Рис. 5. Зависимость мощности от концентрации осветлителя и температуры, стекломасса $N-C-S$, $r_{0 \text{ макс}} = 0,20$ мм, без перемешивания барботированием; $x - t = 0,9$, $\bullet - t = 0$.
- Рис. 6. Зависимость удельного потребления энергии и мощности от температуры (листовая стекломасса) для разных типов зависимостей распределения зерен песка от их размера, $r_{0 \text{ макс}} = 0,5$ мм, формы зависимостей; 1 — ср. песок $TS40$, 2 — Δ , 3 — \triangle , 4 — \square , 5 — \triangle , 6 — монодисперсия, $r_{0 \text{ макс}} = 0,5$ мм.
- Рис. 7. Зависимость удельного потребления энергии от концентрации осветлителя и температуры. Стекломасса $N-C-S$, $r_{0 \text{ макс}} = 0,20$ мм, перемешивание барботированием; $o - t = 0,9$, $x - t = 0,3$.
- Рис. 8. Зависимость удельного потребления энергии от концентрации осветлителя и температуры, Стекломасса $N-C-S$, $t = 0$, перемешивание барботированием; $o - r_{0 \text{ макс}} = 0,25$ мм, $x - r_{0 \text{ макс}} = 0,20$ мм.
- Рис. 9. Зависимость удельного потребления энергии и мощности от температуры, стекломасса $N-C-S$, 0,7 Na_2O в виде Na_2SO_4 , $r_{0 \text{ макс}} = 0,25$ мм, $t = 0$.
- Рис. 10. Зависимость удельного потребления энергии и мощности от размера мертвого пространства, Стекломасса $N-C-S$, осветляется 1% $\text{As}_2\text{O}_3 + \text{NaNO}_3$, $r_{0 \text{ макс}} = 0,25$ мм, без перемешивания барботированием.
- Рис. 11. Зависимость удельного потребления энергии и мощности от размера мертвого пространства, Стекломасса $N-C-S$, осветляется 2% Na_2O в виде NaCl , $r_{0 \text{ макс}} = 0,25$ мм, без перемешивания барботированием.
- Рис. 12. Зависимость удельного потребления энергии и мощности от размера мертвого пространства. Листовая стекломасса. $r_{0 \text{ макс}} = 0,5$ мм.
- Рис. 13. Зависимость удельного потребления энергии от температуры. Стекломасса $N-C-S$, осветляется 2% Na_2O в виде NaCl , $r_{0 \text{ макс}} = 0,25$ мм.

MAIN TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF GLASS TANK MELTING ZONES FROM THE STANDPOINT OF THE COURSE OF THE MELTING PROCESS

Part II. Main characteristics up to the moment of sand dissolving

Lubomír Němec, Simona Laurentová*

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

*Department of Silicate Technology, Institute of Chemical Technology, 166 28 Prague

Investigation of the effect of basic factors, i.e. temperature, sand grain size, type and concentration of the refining agent, the size of the dead zone and glass melt stirring on the melting characteristics, i.e. specific energy consumption and throughput of the model melting zone, allows the trends leading to optimum values of the two characteristics to be determined. Using the theoretical data dealt with in Part I and experimental data on sand dissolution obtained earlier, characteristics were calculated for soda-lime glass and flat glass up to the moment sand has completely dissolved. The calculations provided evidence for the advantage of a high mean melting temperature which leads to lower energy consumption; the respective temperature dependence exhibits a minimum at a temperature corresponding to maximum temperatures in some modern glass tank zones. High temperature was also proved to have a favourable effect on the throughput of the melting zone. Another favourable factor appears to be high utilization of the melting zone, particularly at medium and lower mean melting temperatures. The other factors in question are of some significance also at medium and lower melting temperatures; the characteristics can be favourably affected by reducing the size of the largest sand grains, shifting the sand granulometry towards monodispersity, by a low concentration of the refining agent (which, however, should ensure adequate refining) and application of melt stirring.

- Fig. 1. Specific energy consumption vs. refining agent concentration and temperature. Glass melt composition (wt. %): SiO_2 74, Na_2O 16, CaO 10 (N-C-S), $r_{0\text{max}} = 0.20$ mm, no stirring; $o - m = 0.6$, $x - m = 0$.
- Fig. 2. Specific energy consumption vs. refining agent concentration and temperature. N-C-S glass, $m = 0.9$, no stirring; $o - r_{0\text{max}} = 0.25$ mm, $x - r_{0\text{max}} = 0.20$ mm.
- Fig. 3. Specific energy consumption and throughput vs. temperature. Flat glass, the values at the curves are $r_{0\text{max}}$ sizes in mm
- Fig. 4. Specific energy consumption and throughput vs. temperature, N-C-S glass, $r_{0\text{max}} = 0.25$ mm, $m = 0.9$, no stirring
- Fig. 5. Throughput vs. refining agent concentration and temperature, N-C-S glass, $r_{0\text{max}} = 0.20$ mm, no stirring; $x - m = 0.9$, $\bullet - m = 0$.
- Fig. 6. Specific energy consumption and throughput vs. temperature (flat glass) for various types of sand grain size distribution curves, $r_{0\text{max}} = 0.5$ mm; distribution shapes: 1 - TS 40 sand, 2 - ∇ , 3 - Δ , 4 - \square , 5 - \triangle , 6 - monodisperse, $r_{0\text{max}} = 0.5$ mm.
- Fig. 7. Specific energy consumption vs. refining agent concentration and temperature. Glass N-C-S, $r_{0\text{max}} = 0.20$ mm, stirring by bubbling; $o - m = 0.9$, $x - m = 0.3$.
- Fig. 8. Specific energy consumption vs. refining agent concentration and temperature. N-C-S glass, $m = 0$, stirring by bubbling; $o - r_{0\text{max}} = 0.25$ mm, $x - r_{0\text{max}} = 0.20$ mm.
- Fig. 9. Specific energy consumption vs. refining agent concentration and temperature. N-C-S glass, 0.7% Na_2O as Na_2SO_4 , $r_{0\text{max}} = 0.25$ mm, $m = 0$.
- Fig. 10. Specific energy consumption and throughput vs. the size of the dead zone. Glass N-C-S, refined with 1% $\text{As}_2\text{O}_3 + \text{NaNO}_3$, $r_{0\text{max}} = 0.25$ mm, no stirring.
- Fig. 11. Specific energy consumption and throughput vs. the size of the dead zone. Glass N-C-S, refined with 2% As_2O_3 as NaCl , $r_{0\text{max}} = 0.25$ mm, no stirring.
- Fig. 12. Specific energy consumption and throughput vs. the size of the dead zone. Flat glass, $r_{0\text{max}} = 0.5$ mm.
- Fig. 13. Specific energy consumption vs. temperature. Glass N-C-S, refined with 2% Na_2O as NaCl , $r_{0\text{max}} = 0.25$ mm.