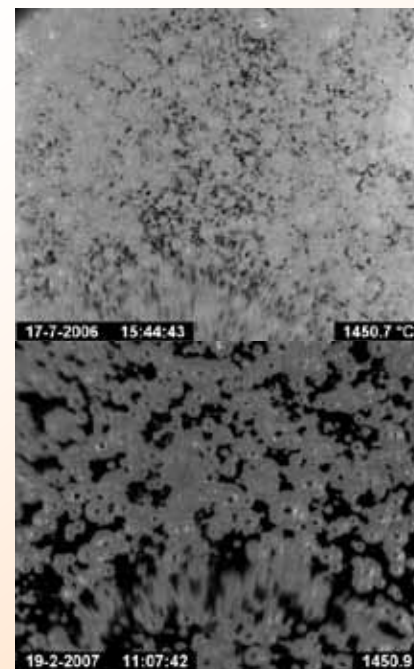
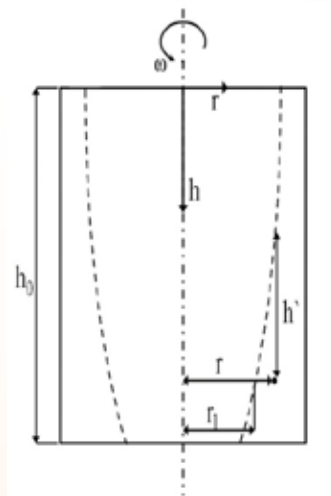


Tavení skel – energie, výkon, rozměr

Řešitelé: Lubomír Němec, Jaroslav Kloužek, Marcela Jebavá, Petra Cincibusová,
Vladislava Tonarová, Miroslav Polák, Miroslava Vernerová



Proč opět obrat k principům tavicího procesu?

- Ø **Procesy s dopadem na životní prostředí** – celosvětový silný tlak na racionalizaci. Tavení skel: **spotřebu energie snížit o 20-30 %** (především snížení emisí CO₂), **zvýšit podstatně specifický výkon a případně miniaturizovat zařízení** (snížení spotřeby ŽM).
- Ø Rozbory ukazují, že takových cílů nelze dosáhnout při zachování klasických principů procesu a klasického designu zařízení.
- Ø Je třeba začít od principů, design převážně vyplyne z modifikovaných principů.
- Ø Principem tavicího procesu je uskutečnění relativně rychlých chemických reakcí, pomalých rozpouštěcích dějů (pevné částice, chemické nehomogenity) a pomalého separačního děje (čeření) tavením za vysokých teplot.
- Ø **Reservy jsou ukryty v průbězích pomalých dějů.**

Kontinuální tavicí proces – kinetika procesu a využití prostoru

Ø Definujme významné technologické veličiny – specifickou spotřebu energie a tavicí výkon:

$$H_M^0 = H_M^T + \frac{\dot{H}^L t_G}{V r} = H_M^T + \frac{\dot{H}^L t_H}{V r} \frac{1}{u} [J / kg]; \quad \dot{V} = \frac{V}{t_G} = \frac{V}{t_H} u \quad \dot{e} m^3 / s \dot{e}$$

$$u = \frac{t_H}{t_G}$$

$t_G = V / \dot{V}$ - geometrická doba zdržení
 t_H - referenční doba homogenizačního (rozpuštěcího nebo separačního) děje zjistitelného v laboratoři nebo z kinetického modelu
 $u \hat{=} \dot{e}; 1 \dot{e}$ - vyjadřuje vliv charakteru kontinuálního prostoru a charakteru proudění uvnitř prostoru

Ø Oddělili jsme kinetiku (rychlost) procesů, zde **definovanou homogenizačním časem τ_H** , od vlivu samotného prostoru tj. jeho tvaru a charakteru proudění, zde **definovaného využitím prostoru u**

Ø změna principů je svázána s rychlou kinetikou, tj. nízkou hodnotou τ_H a s vysokým využitím prostoru $u \rightarrow 1$

Ø zkoumané možnosti vedoucí k nízké hodnotě τ_H a vysoké hodnotě u :

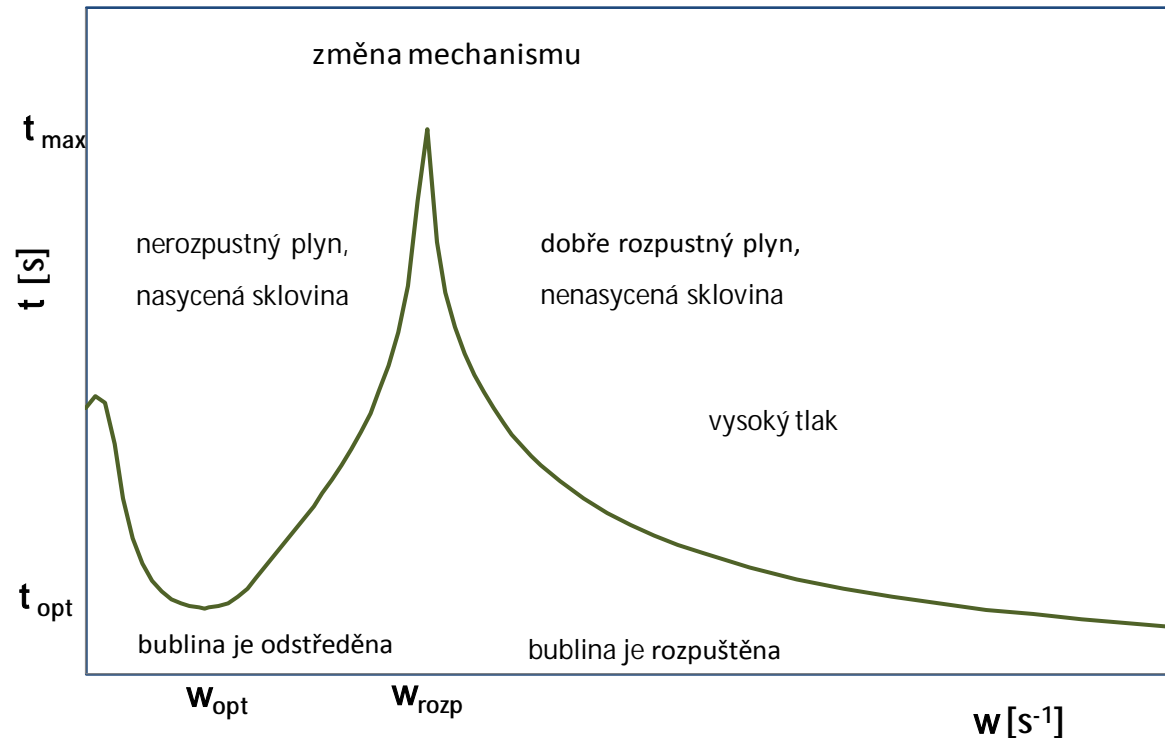
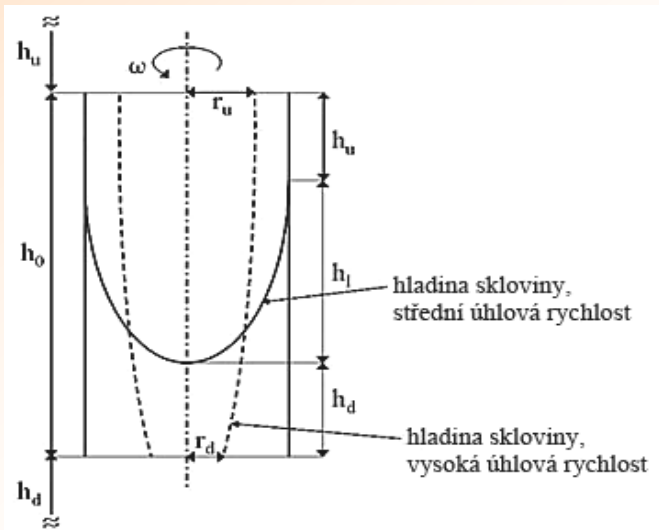
- použití vysokých teplot a sníženého tlaku (separace bublin)
- použití další vnější síly (**odstředivá síla** (jiná síla?), aplikace **chemické síly**, mech. síly)
- aplikace **výhodného typu proudění** v jednoduchém tavicím prostoru

Separace bublin při snížení tlaku, 1400°C, TV glass



Použití odstředivé síly při separaci bublin ze skelné taveniny – výsledky matematického modelování

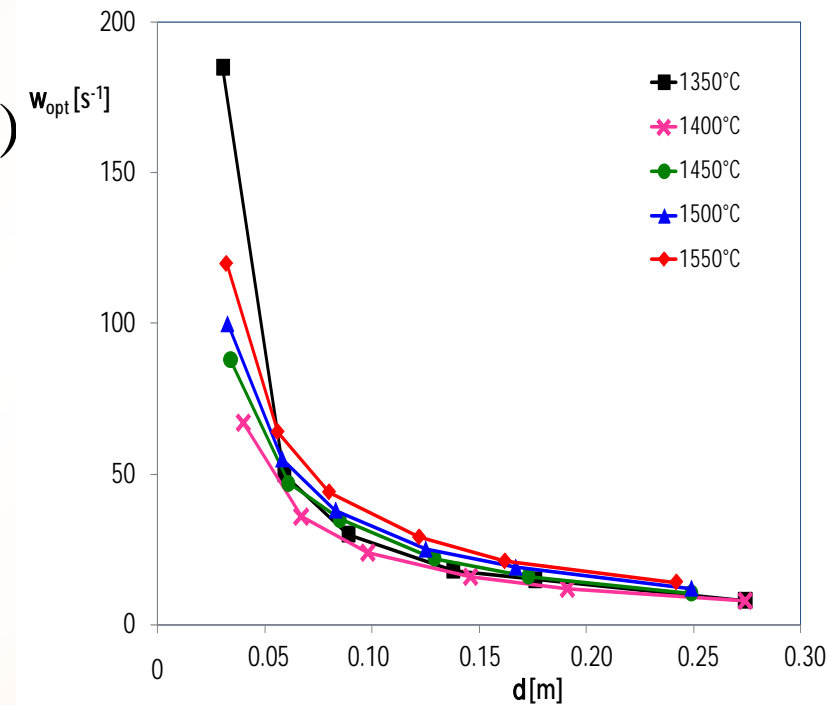
- Ø Aplikace odstředivé síly: odstředivá síla vyvolá pohyb bublin k ose válce, současně se však podporuje i rozpouštění bubliny.
- Ø Typická závislost doby odstranění bubliny na otáčkách (zde úhlové rychlosti) válce s taveninou, 1500°C , ($a_0 = 2 \times 10^{-4}\text{m}$), $R_0 = 0.5\text{m}$, $V/V_0 = 0.5$



- Ø Je třeba splnit podmínky pro kritickou bublinu. Velkou roli hraje rozpustnost plynů v tavenině a stupeň nasycení taveniny plyny, tedy reakce bublin s taveninou.

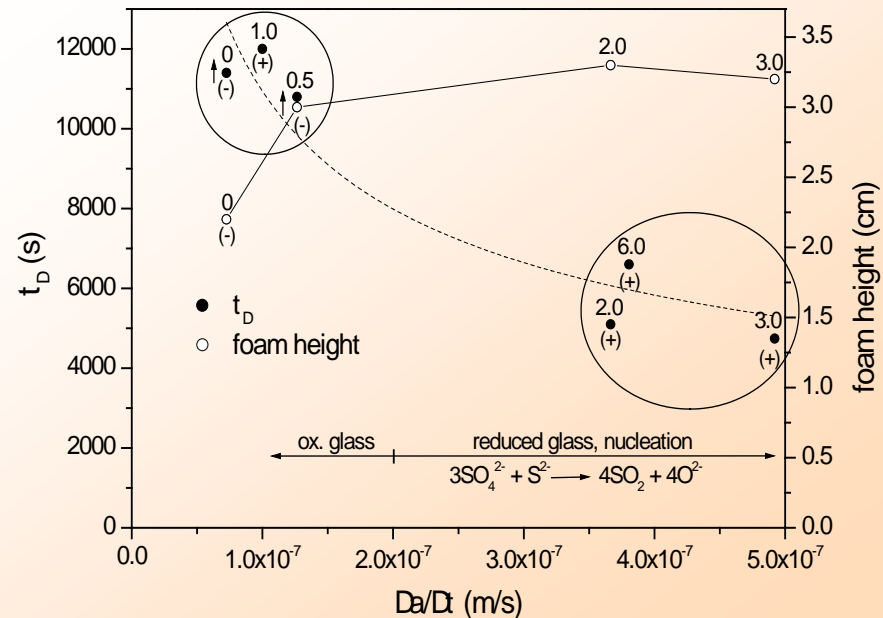
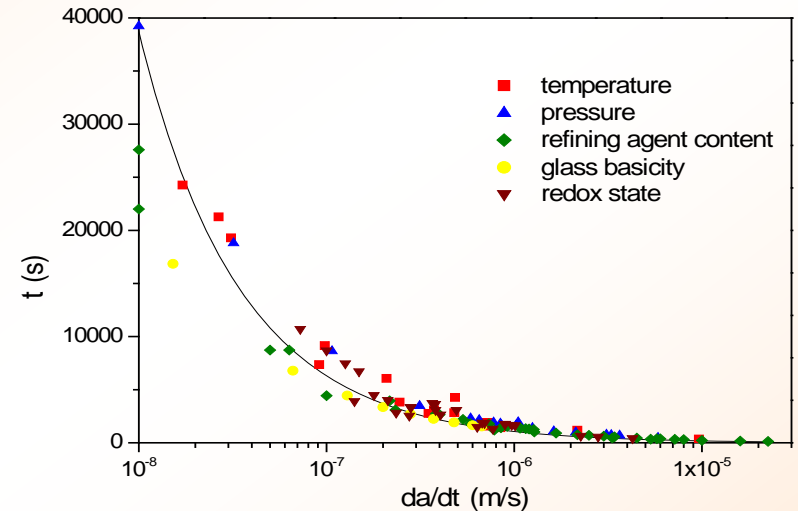
Jak nalézt optimální podmínky odstředování v daném typu skla?

- Ø Nejdůležitější hodnotou je nalezení **optimálních otáček** (úhlové rychlosti) válce, ω_{opt} . $a_0 = 5 \times 10^{-5}$ m, $V/V_0 = 0.5$:
- Ø Existuje možnost **přenosu výsledků** z modelového skla na jiné typy skel.
- Ø Na daném typu skla je třeba získat **rychlost růstu bublin** bez rotace.
- Ø Průmyslová aplikace vyžaduje kontinuální průtok válcem.
- Ø Při aplikaci optimálních podmínek je odstředování **několikrát rychlejší než klasické čření** a jeho aplikace má význam i pro jiné technologie (polymery)



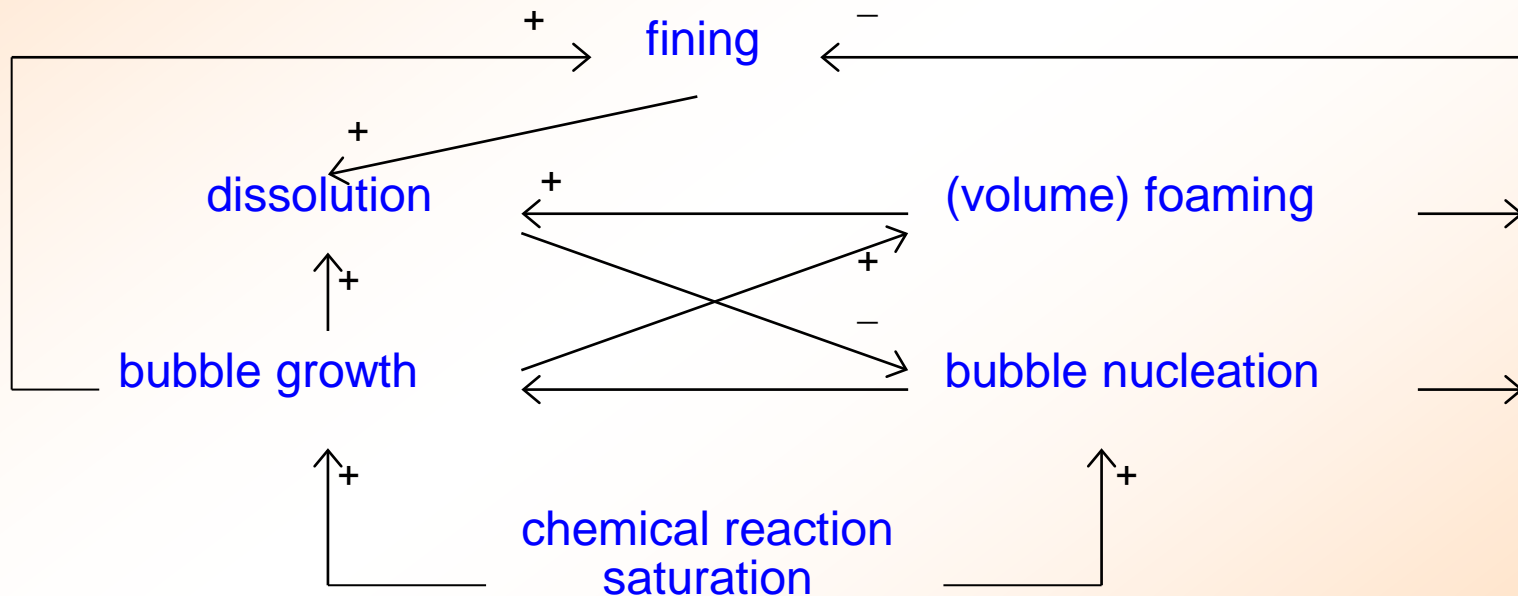
Aplikace chemické síly – použití urychlovačů (čeřiv)

- Ø Základem úspěšné aplikace je **nasycení taveniny plynem** (čeřivo).
- Ø Nasycení vyvolá **růst bublin** a zásadně urychlí jejich separaci.
- Ø Nasycení taveniny vyvolá a **ovlivní i další děje**, nukleaci a pěnění:
- Ø **Mikrokonvekce** bublinami a pěnou **zrychlí rozpouštěcí děje**
- Ø Základem úspěšné aplikace je **správné načasování procesů** – časově teplotní průběh tavicího procesu

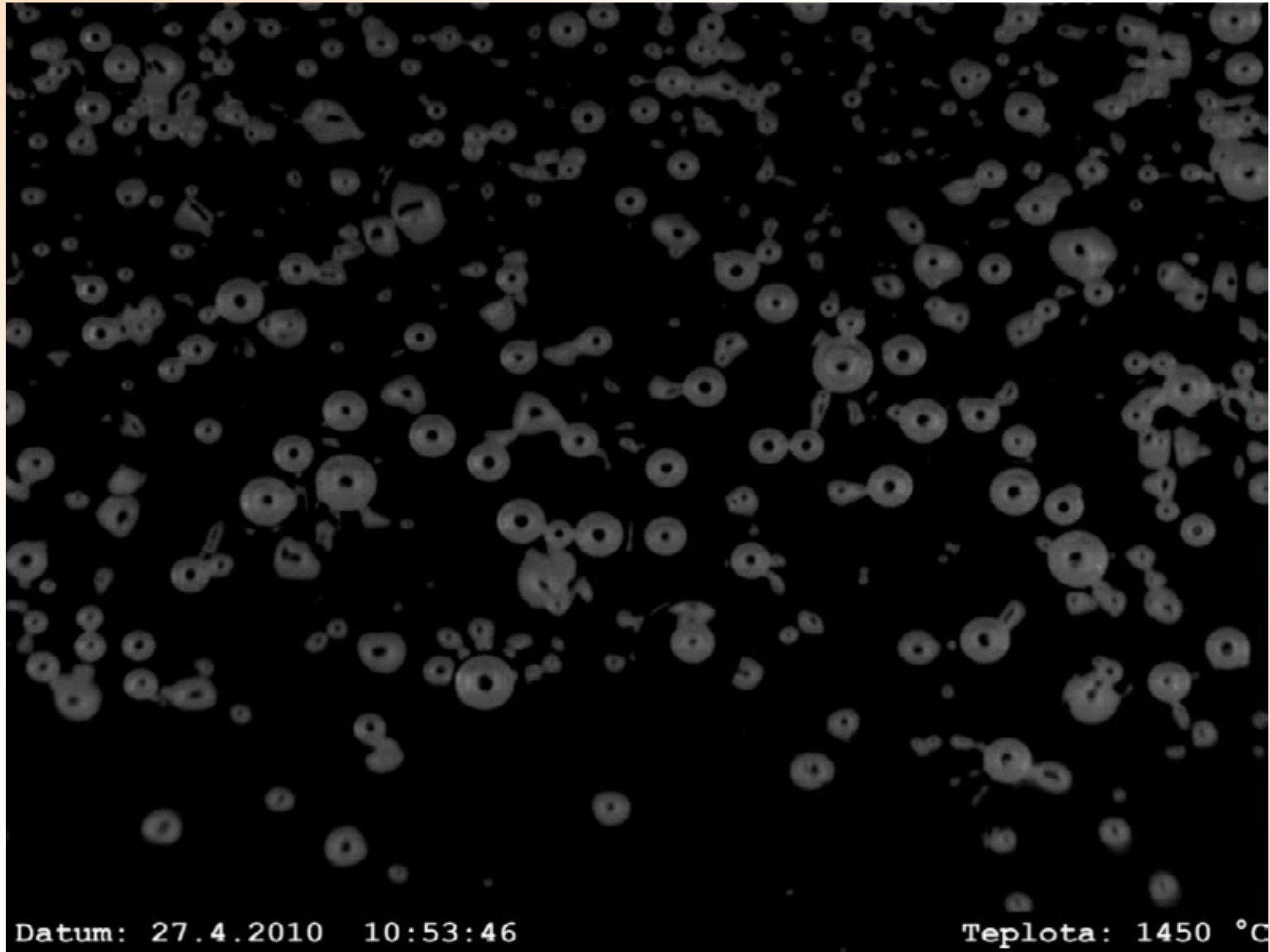


Vztahy mezi významným ději při tavení skel

Ø Procesy: chemické reakce, rozpouštění, nukleace, růst a odstraňování bublin, pění



Opakovaná nukleace bublin při čerčicím procesu (s laskavostí Dr. Ullricha)



Aplikace výhodného typu proudění v tavicím prostoru

∅ V tavicích prostorech sklářských pecí existuje vždy **přirozené cirkulační proudění** vyvolané gradienty teplot. Jeho důsledkem jsou **mrtvé prostory** a **široká distribuce dob zdržení** taveniny v prostoru. Obojí vede k vysoké specifické spotřebě energie a nízký tavicí výkon. V našich pojmech je v nich nízké u (*odhad: $u=0,1-0,3$*).

(Beerkens: $\tau_{\text{aver}}=5\tau_{\text{min}} \rightarrow u = 0,2$)

∅ Prostory bez cirkulačního proudění (izotermní) vykazují uspokojivé využití prostoru: $u_D = 0,455$, $u_F = 0,67$. Izotermní stav je však technicky obtížně dosažitelný u tavicích sklářských prostorů.

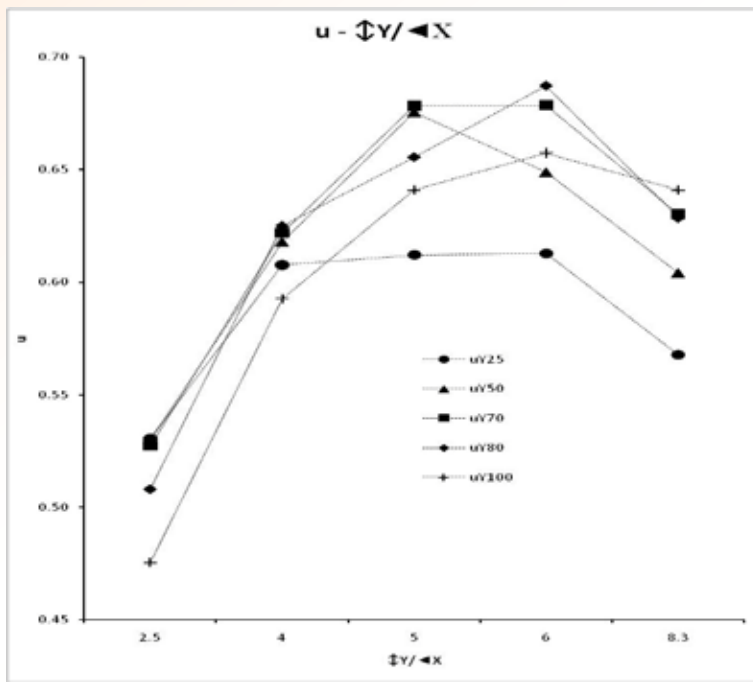
∅ Existuje dosažitelný typ cirkulačního proudění srovnatelný hodnotou u s izotermním případem a prakticky nastavitelný?

∅ Odpověď poskytl studie na horizontálním a tavicím prostoru tvaru kvádrů. Použitou metodou bylo matematické modelování **rozpouštěcího procesu** a **procesu separace bublin** při různých typech proudění nastavených pomocí gradientů teplot.

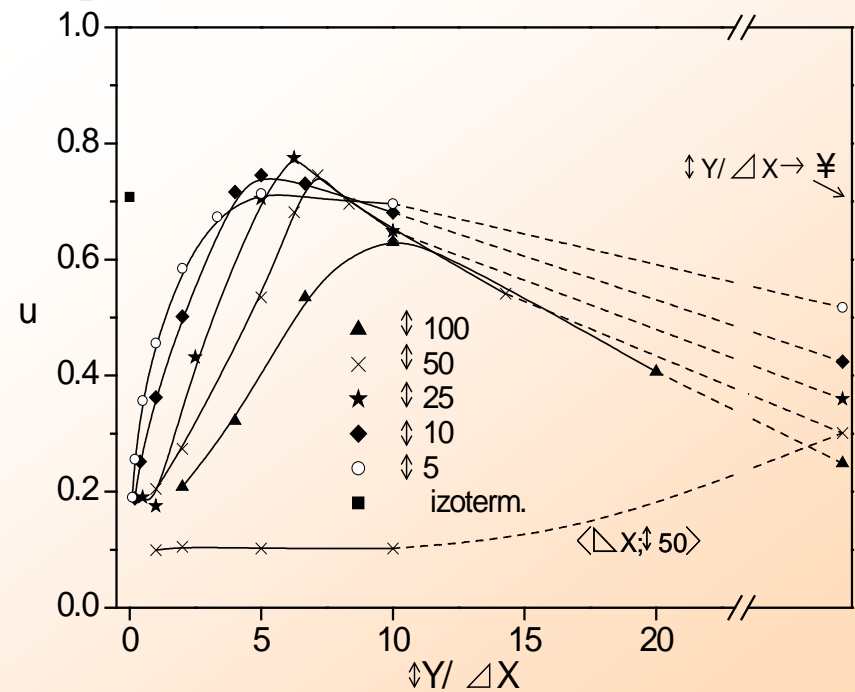
Nejlepší výsledky pro děj rozpouštění sklářského písku a separaci bublin

- Ø Kombinace **příčného teplotního gradientu** vyvolávajícího příčné proudění (anuluje mrtvé cirkulační prostory) s **malým pozitivním podélným gradientem** (brzdí rychlé podélné proudění u hladiny), kde poměr intenzity příčného k podélnému proudění je 5-10. $u_D \rightarrow 0.7$, $P_D = 34.6 \text{ t}/(24\text{hm}^2)$, $u_F \rightarrow 0.8$, $P_F = 25.3 \text{ t}/(24\text{hm}^2)$. Vždy jde o příklon k **pístovému toku**.
- Ø Optimální podmínky pro oba děje jsou podobné a dovolují provozovat oba procesy ve **stejném tavicím prostoru**. Tepelné ztráty se podstatně sníží a spec.výkon až násobně zvýší.
- Ø Další otázka k řešení: Jaký je vliv **rychlosti** (kinetiky) procesů na ustavení optima?

rozpouštění písku při 1450 °C

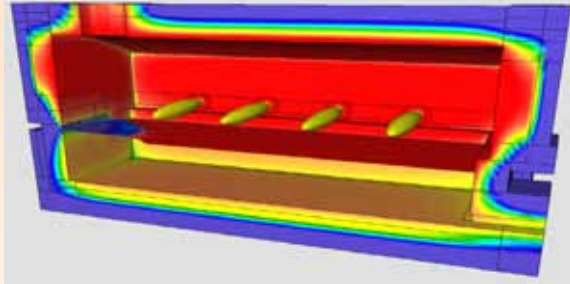


separace bublin při 1450 °C

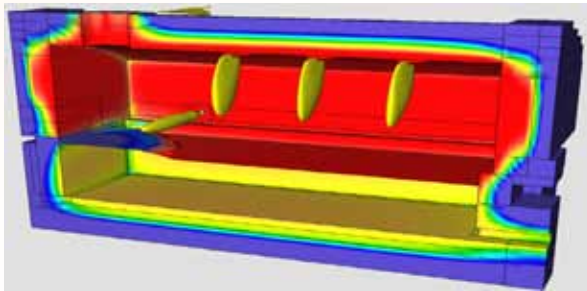


Jak nastavit takové podmínky v tavicí peci?

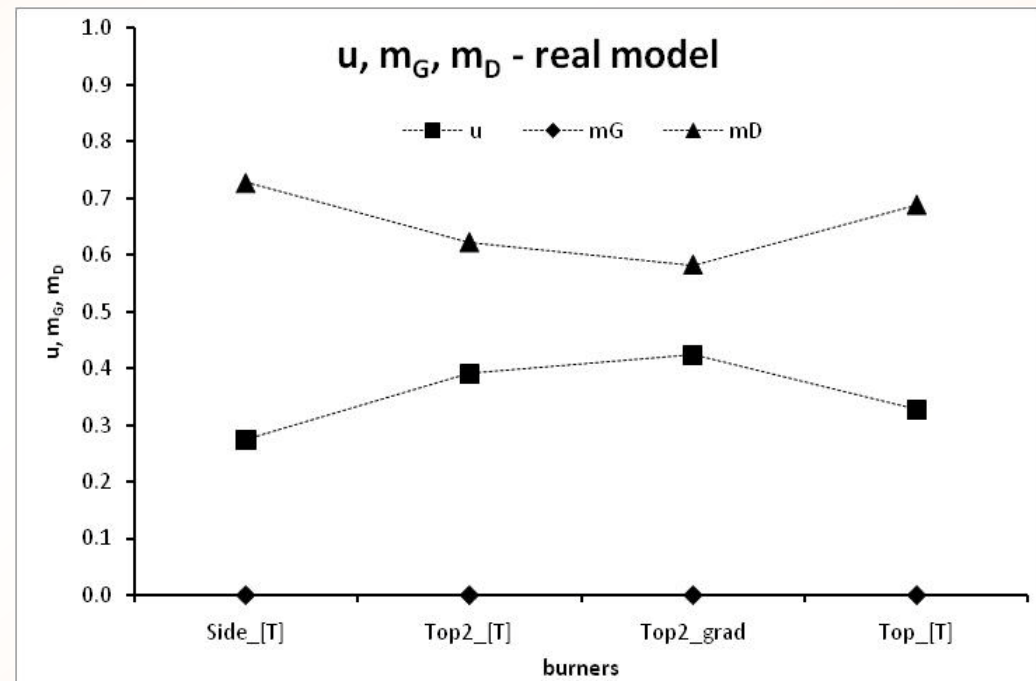
Ø Byla modelována vzorová pec s klasickým ohřevem a vypočteno u



Boční hořáky



Hořáky shora



Jak nastavit takové podmínky v tavicí peci?

- Ø V běžném tavicím zařízení existuje silný **pozitivní podélný teplotní gradient**, který brání dosažení optima. Vzniká tlak na **změnu designu**: reakce do vzniku taveniny by se měly uskutečnit ve zvláštním předsunutém prostoru (**segmentová tavicí pec**).
- Ø Ohřev musí zajistit podmínky pro nastolení přiměřeně **intenzivního příčného proudění**. Pokud nebude příčné proudění dostatečně intenzivní (v reálném případě jsou obě proudění zhruba vyrovnána), využití prostoru podstatně poklesne.
- Ø Příčné proudění lze posílit elektrickým přehřevem nebo mechanickým mísením (bubbling) v podélné ose prostoru. Příliš vysoká intenzita příčného proudění rovněž snižuje využití prostoru.
- Ø Výsledky modelování ukazují, že **děje rozpouštění i odstraňování bublin lze uskutečnit v jediném tavicím prostoru**.

Závěr

- Ø Vnitřní rezervy tavicího procesu skel jsou ukryty především v **pomalých homogenizačních dějích** probíhajících v tavenině.
- Ø Rezervy lze hledat v rychlosti probíhajících dějů, avšak **především ve způsobu využití tavicího prostoru pro tyto děje**.
- Ø Odstraňování rezerv sníží především tepelné ztráty zařízení. Podstatný nárůst výkonu je výhodnější využít ke **zmenšení tavicích prostorů** (poklesne i celkový tok tepla rozhraními).
- Ø Změny kinetiky i využití tavicího prostoru vytvářejí silný tlak na **podstatné změny designu** tavicích prostorů (snížený tlak, odstředivá síla, aplikace řízeného proudění).