PATENTOVÝ SPIS

(11) Číslo dokumentu:

307 659

(13) Druh dokumentu: **B6**

(51) Int. Cl.:

C03B 5/183 (2006.01)
C03B 5/185 (2006.01)

(19) ČESKÁ REPUBLIKA

ÚŘAD PRŮMYSLOVÉHO VLASTNICTVÍ

(21) Číslo přihlášky: **2017-523**
(22) Přihlášeno: **08.09.2017**
(40) Zveřejněno: 30.01.2019
(Věstník č. 5/2019)
(47) Uděleno: **19.12.2018**
(24) Oznámení o udělení ve věstníku: **30.01.2019**
(Věstník č. 5/2019)

(56) Relevantní dokumenty:

US 3 268 320 A3; CZ 2012-604 A3; GB 693 072 A; CZ 2012-605 A; GB 1 506 060 A.

(73) Majitel patentu:
Vysoká škola chemicko - technologická v Praze, Praha 6, CZ
Ústav struktury a mechaniky hornin AVČR, v. v. i., Praha 8, CZ
GLASS SERVICE, a.s., Vsetín, CZ

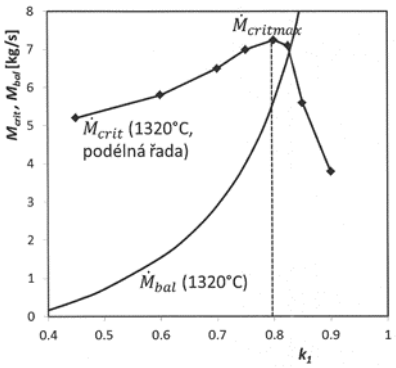
(72) Původce:
prof. Ing. Lubomír Němec, DrSc., Praha 1, CZ
Ing. Lukáš Hrbek, Praha 5, Hlubočepy, CZ
Ing. Marcela Jebavá, Ph.D., Praha 6, CZ
Ing. Jiří Brada, Vsetín, CZ

(74) Zástupce:
Ing. Marie Smrčková, patentový zástupce, Velflíkova 10, 160 00 Praha 6

(54) Název vynálezu:

Tavicí prostor kontinuální sklářské tavicí pece a způsob tavení skla v tomto prostoru

(57) Anotace:
Tavicí prostor (1) elektricky otápěný topnými elektrodami (2, 2_A, 2_B) zahrnuje vstupní zónu *A* s nátokem (7) skloviny a homogenizační zónu *B* s výtokem (9) skloviny. Vstupní zóna *A* zaujímá 1/10 až ½ s výhodou 1/5 až 2/5, z celkové délky tavicího prostoru (1) ve směru podélné osy (11) tavicího prostoru (1). Vstupní zónu *A* obsahuje uspořádání topných elektrod (2_A) s 3x až 7x vyšším elektrickým příkonem, než je příkon topných elektrod (2_B) v zóně *B* pro dosažení maximálního tavicího výkonu v tavicím prostoru (1), takže mezi topnými elektrodami (2_A, 2_B) mezi zónou *A* a *B* je vytvořeno rozhraní (10). Teplota vstupující skloviny do zóny *A* je o 50 až 300 °C nižší, než je průměrná teplota skloviny v celém tavicím prostoru (1). Poměr α_{max} elektrického příkonu přiváděného do topných elektrod (2_A) zóny *A* k elektrickému příkonu přiváděnému do topných elektrod (2_B) zóny *B*, v podstatě lineárně stoupá, od nejnižší hodnoty 3 při teplotním rozdílu 50 °C mezi teplotou natékající skloviny do zóny *A* a průměrnou teplotou skloviny v celém tavicím prostoru (1) až k hodnotě 7 při teplotním rozdílu 300 °C, a to při maximálním tavicím výkonu $\dot{M}_{critmax}$ v celém tavicím prostoru (1) a minimálních specifických tepelných ztrátách, H_M^L.



CZ 307659 B6

Tavicí prostor kontinuální sklářské tavicí pece a způsob tavení skla v tomto prostoru

Oblast techniky

Vynález se týká tavicího prostoru kontinuální sklářské tavicí pece. Tavicí prostor je prostorově vymezený dnem, protilehlými bočními stěnami, hladinou skloviny a čelní stěnou s nátokem skloviny a zadní stěnou s výtokem skloviny. Tavicí prostor je elektricky otápěný topnými elektrodami, které jsou uspořádané ve dně nebo bočních stěnách pro vytvoření podélné nebo příčné tepelné bariéry ve sklovině.

Vynález se též týká způsobu tavení skla v tomto tavicím prostoru.

Dosavadní stav techniky

Nové návrhy sklářských tavicích pecí se stále častěji představují jako více prostorová zařízení. Hlavním důvodem je vyhovět potřebě provozovat sklářský tavicí proces za celkově nejvýhodnějších podmínek. Tavicí proces skel se však skládá z dílčích dějů, které mají pro své optimální provozování podmínky částečně odlišné. Proto jsou nově navrhovaná zařízení často členěna na příslušné prostory podle jednotlivých dějů a v nich jsou optimální podmínky nastavovány právě pro daný děj. Jako hlavní sklotvorné (homogenizační) děje můžeme jmenovat konverzi sklářské vsázky na skelnou taveninu, rozpuštění nezreagovaných částic vsázky (především sklářského písku) a chemických nehomogenit (koncentračních gradientů složek skla) ve vzniklé tavenině, a odstranění bublin separací od taveniny (nejčastěji výstupem k hladině taveniny).

Rozdílnost optimálních podmínek pro jednotlivé děje je možno vyjádřit takto: Konverze vsázky probíhá jako změna skupenství a podmínkou pro vznik taveniny z pevné látky je především dobrý přenos tepla, který se podle posledních návrhů nejlépe uskutečňuje přímým stykem plynného ohřívacího média (spalin, plazmatu) s jednotlivými částicemi nebo granulemi vsázky nebo vmícháváním vsázky do zahřáté taveniny. Pokud se konverze uskutečňuje v objemu vsázky, má přednost odtavování v tenké vrstvě při velké styčné ploše s ohřívacím médiem, klasické tavení v tlusté vrstvě na hladině taveniny je pomalejší a omezuje výkon celého procesu. Společným nutným rysem nových návrhů jeví se tedy prostorové oddělení děje konverze od následných homogenizačních dějů (konečně i v klasickém jednoprostorovém tavicím zařízení se děj konverze odehrává ve vymezené části prostoru).

Další děj – již následně ve vzniklé tavenině probíhající rozpouštění částic vsázky – požaduje teploty dostatečně vysoké, aby mohly rychle probíhat difúzní procesy. Významným faktorem rozpouštění zbylých částic je pak i konvekce taveniny, která zmenšuje tloušťku difúzní vrstvy na povrchu částic a podstatně urychluje jejich rozpuštění. Proto se stává efektivním míšení taveniny, kdy je možno využít vhodně nastavené přirozené konvekce na základě existujících teplotních gradientů, ale především použít nucené konvekce vyvolané vnější silou (mechanickou nebo elektromagnetickou). Podmínky proudění taveniny jsou pak speciálně definované, a proto vyžadují zřízení zvláštního homogenizačního prostoru. V takovém prostoru probíhá velmi rychle i zmíněná chemická homogenizace, kdy se kromě zmenšování tloušťky difúzních vrstev na povrchu malých chemických nehomogenit urychlí podstatně i rozpouštění velkých nehomogenit (šlír). U velkých šlír dochází v důsledku proudění k jejich deformaci střihem, natažením a rotací a v průměru ke zmenšením jejich charakteristického rozměru. Velká šlíra se pak rozpustí rychleji.

Děj odstraňování bublin (čeření) požaduje nejvyšší tavicí teploty, aby bylo dosaženo účinku přísad zvaných čeřiva. Čeřiva se za vysokých teplot rozkládají za uvolnění plynu, který difunduje z taveniny do bublin, zvětšuje jejich rozměry a urychluje jejich separaci od taveniny výstupem k hladině. Podmínkou dobrého čeření výstupem k hladině je kromě čeřiva i vhodný tok taveniny, v

tomto případě tok blízký pístovému, nevyhovuje tedy intenzivní míšení taveniny navrhované pro rychlé rozpouštěcí děje. Odstraňování bublin by se tedy v případě záměru použít intenzivního míšení při rozpouštění mělo odehrávat v dalším odděleném prostoru. Pokud by pro čeřicí děj byl využit jiný princip (čeření za sníženého tlaku, odstředivou silou nebo použití ultrazvuku), je požadavek zvláštního čeřicího prostoru evidentní.

Z uvedených důvodů jsou navrhovaná netradiční sklářská zařízení troj– až čtyřprostorová, jedná se o tzv. segmentové pece. Kromě možnosti nastavit speciální podmínky pro jednotlivé děje vylučuje sériové řazení jednotlivých prostorů zkratové proudy a zpětné proudění taveniny, které snižuje využití prostoru pece pro tavicí děje. Typickým příkladem víceprostorového tavicího zařízení je Ramar melter [1] nebo Beerkensův návrh segmentové tavicí pece [2]. V zařízení typu Ramar melter se provádí konverze vsázky na taveninu v míchaném elektricky otápěném prostoru (macro–mix melter), ve druhém prostoru (micro–mix melter) rovněž s míchadlem se pak v tavenina zbaví nerozpuštěných částic vsázky a většiny větších bublin, konečně třetí prostor (centrifugal refiner) využívá odstředivé síly k odstranění menších bublin. Řazením prostorů za sebe se vyloučí makroskopické zpětné proudění. Zařízení má poměrně malý výkon 12 až 16 t/den.

Zařízení podle návrhu Beerkense [2] představuje typ s malou střední dobou zdržení taveniny a rovněž omezuje zkratový průchod taveniny. Vsázka je v prvním prostoru předehřátá spalinami (batch preheating) na nakloněné rovině a surová tavenina s teplotou kolem 1250 °C se shromáždí v malém bazénu. Dále postupuje do tavicího prostoru smísením probubláváním (bubbling) a ohřátím na 1500 °C spalinami i Joulovým teplem; zde se dokončí rozpuštění částic vsázky. Následující prostor (primary fining) je mělký a proběhne v něm odstranění bublin výstupem. Zde je použito Joulovo teplo nebo energie ultrazvuku. Poslední prostor (secondary fining) je určen pro odstranění zbylých převážně nukleovaných bublin v tavenině a k dokončení chemické homogenizace taveniny. Pec je čtyřprostorová.

Vyčleněním speciálních prostorů pro jednotlivé děje vzniká ovšem komplikované a drahé zařízení, v němž je pak obtížné zamezit větším tepelným ztrátám a koordinovat průběh jednotlivých dějů tak, aby jednotlivé prostory byly dobře využity. Zařízení vybudované ve větším měřítku bude tedy nákladné a náročné na konstrukci i provozování. Omezení počtu prostorů a zjednodušení provozu se jeví jako potřebné.

Tzv. tavení ve vznosu [3 až 4] využívá energie spalin nebo plazmatu k rychlé prakticky souběžné konverzi vsázky a tavicích dějů, před tímto dějem však předchází náročná úprava granulometrie vsázky v předchozím zařízení. Tavenina ve speciálním hořáku nebo v plazmovém poli vzniklá ve formě kapiček musí být soustředěna do speciálního bazénu a zbavena bublin. Technicky se jedná o náročné zařízení s přípravným a dvěma tavicími oddíly.

Ze současně navrhovaných, a v nedávné minulosti testovaných, netradičních způsobů tavení vyplývá, že tyto způsoby a zařízení dokážou respektovat specifické tavicí podmínky pro jednotlivé děje, avšak původní problém vzájemného sladění podmínek pro děje i problém efektivního uspořádání proudění při jejich společném uskutečňování obešly zřizováním separátních, za sebe řazených prostorů. Prostorové oddělení dějů se však ukazuje potřebným pouze pro konverzi vsázky, kdy jde o přeměnu skupenství. Pro děje v tavenině je třeba hledat řešení v jediném tavicím prostoru.

Jako řešení tohoto problému se v současnosti nabízí uvažování vhodného typu proudění, jeho nalezení a nastolení za účelem provozování kontinuálního homogenizačního prostoru, v němž se za výhodných podmínek uskuteční jak rozpouštěcí děje, tak děj odstraňování bublin výstupem k hladině taveniny. Místo obvykle navrhovaných dvou až tří prostorů pro tyto děje bude tedy použit jen jediný, v němž proběhnou oba typy dějů za společných, co nejlépe sladěných podmínek. Případná nižší výhodnost společných kinetických podmínek pro některý z dějů oproti optimálním bude pak převážena právě vhodně navrženým typem proudění v tomto prostoru.

Možné řešení tedy vychází z faktu, že při navrhování zařízení je třeba uvažovat nejen potřeby kinetiky, (tj. rychlosti) jednotlivých dějů, ale i potřeby "cesty" procesu, tj. charakteru proudění v kontinuálním tavicím prostoru, jako rovnocenného faktoru výkonnosti a efektivity celého tavicího procesu. Aby kromě kinetiky tavicího procesu mohla být hodnocena i role cesty procesu (charakteru proudění), je třeba zřízení příslušné veličiny, která by hodnotu charakteru proudění vyjadřovala. Pro kvantitativní hodnocení typů proudění z hlediska tavicího procesu navrhli autoři těchto publikací [5 až 6] veličinu nazvanou *"využití tavicího prostoru"*. Jde o relativní veličinu nabývající hodnot mezi nulou a jednou, která přibližně udává podíl tavicího prostoru využitý při daném typu proudění pro daný tavicí děj. Při absolutním využití tavicího prostoru je tato veličina rovna jedné (pístový tok) a je rovna nule v mezním případě, kdy typ proudění nedovoluje proces vůbec kompletně uskutečnit v daném prostoru (ideální mísič). Hodnoty veličiny využití pro běžné tavicí prostory se tedy pohybují v desetinách a odpovídají tokům, které jsou kombinacemi oblastí s převážně uniformním tokem a oblastí s intenzivnějším míšením. Pro hmotový výkon tavicího prostoru pak platí jednoduchý vztah zahrnující jak kinetiku tavicího procesu, tak charakter proudění daný *využitím tavicího* prostoru pece:

$$\dot{M} = \frac{\rho V}{\tau_{Href}} u_H \quad , \qquad (1),$$

kde *V je* objem prostoru, ρ je hustota taveniny, τ_{Href} je referenční doba uskutečnění daného homogenizačního děje *H* (buď rozpuštění částic *D* nebo odstranění bublin *F)* a u_H je využití daného prostoru pro tento homogenizační děj. Protože oba děje probíhají v tavenině paralelně, je pro výsledné využití rozhodující "pomalejší" děj, který je pro daný případ dějem řídícím. Rychlost děje v rovnici (1) je tedy dána referenční dobou trvání jeho řídicího děje τ_{Href}, zatímco kvalita proudění taveniny vzhledem k tomuto ději je vyjádřena hodnotou veličiny využití u_H. Prostředkem pro získání obou hodnot v rovnici (1) je metoda matematického modelování příslušných dějů za teplotních a rychlostních podmínek v tavenině v daném prostoru. Veličina využití u_H nyní dovoluje hodnotit tavicí proces z hlediska charakteru proudění a nacházet podmínky výhodného proudění pro daný tavicí děj, které jsou signalizované její vysokou hodnotou. Výsledkem vysokého využití je vysoký tavicí výkon dle rovnice (1) a nízké hodnoty specifických veličin, jako jsou specifické tepelné ztráty, případně specifické odpary z taveniny [7 až 8]. Protože potřebujeme vhodně uskutečnit jak rozpouštěcí, tak čeřicí děje v jednom prostoru, musí být získaný typ proudění výhodný pro oba děje. Studiem různých typů proudění na modelovém tavicím prostoru s nastavitelným teplotním polem bylo zjištěno, že vysoké hodnoty využití pro oba děje jsou dosahovány při uniformním (tj. jednosměrným) toku taveniny tavicím prostorem (u_H je kolem 0,5 [9]) a pro oba děje byly hodnoty využití ještě vyšší při nastavení vhodného spirálovitého typu proudění (u_H až kolem 0,6 až 0,8 [7 až 8]). Naproti tomu hodnoty využití v klasické regenerativní sklářské peci s elektrickým příhřevem se pohybují kolem hodnot 0,1 i nižších [10]. Hlavní potřebou je tedy získání podmínek pro nastavení nalezených optimálních typů proudění v tavicím prostoru.

Nastavení spirálovitého typu proudění pro prostor rozpouštění sklářského písku v případě, kdy je teplota natékající taveniny prakticky shodná s průměrnou teplotou taveniny v prostoru, bylo předmětem patentů autorské skupiny [11 až 12]. Celkově se modelovalo rozložení energie v tavenině, a hledaly se nejvýhodnější typy nastavení. Cílem bylo nastavení spirálovitého toku taveniny pomocí takového rozložení energie v tavenině, které zajistí pomocí různě nastavených gradientů teploty převahu příčného cirkulačního proudění nad cirkulačním prouděním podélným a dovolí hledání nejvýhodnějších typů nastavení. Využilo se pak nastavení příčných gradientů teploty v tavicím prostoru pomocí podélných řad zdrojů energie (elektrod, hořáků) přímo v tavenině nebo nad ní. Takové nastavení vedlo ke spirálovitému typu výsledného proudění a vysokému využití prostoru kolem 0,5. Tento typ proudění zdolával nebo využíval i menší podélné teplotní gradienty v případech, které by bez aplikace spirálovitého proudění vykázaly nízké hodnoty využití pro tavicí proces. Nastavením vhodného poměru příčných ku podélným teplotním gradientům a vyhodnocením průběhu tavicích dějů se přístup autorů lišil od jiných

řešení, která použila různé typy nastavení topných zdrojů (elektrod), ale stupeň jejich účinku na taviči proces již nevyhodnocovala, jak je uvedeno v reprezentujícím patentu Penberthyho [13]. Podobně patent [14] navrhuje zařízení pro mechanické míšení taveniny především ve vertikálním směru za účelem lepší tepelné a chemické homogenity skla a patent [15] využívá několika příčných energetických bariér v elektrické peci k tomu, aby se zabránilo chladné nezhomogenizované sklovině opustit příliš brzy taviči prostor. Oba patenty však ovlivňují proudění za účelem zlepšit kinetiku tavicích dějů a nezřídka mají za následek zhoršení využití tavicího prostoru. Od zde navrhovaného řešení se liší záměrem i uspořádáním.

V reálných podmínkách však podmínka stejné nebo blízké nátokové a průměrné teploty taveniny jak v klasické tavicí peci, tak v odděleném homogenizačním prostoru segmentové pece uvedená v odkazech není většinou splnitelná. U navrhovaného homogenizačního prostoru (segmentu) je nutno počítat s tím, že teplota natékající taveniny bude nižší, až mnohem nižší, než je průměrná teplota taveniny v samotném homogenizačním prostoru. Kromě toho se přidá vliv ztrát na charakter proudění. V důsledku uplatnění vlivu ztrát a nátoku chladnější taveniny do homogenizačního prostoru budou vznikat podélné gradienty teplot taveniny mezi vstupní a další částí prostoru a vyvine se výrazné podélné cirkulační proudění taveniny, které značně snižuje využití tavicího prostoru. Tím se situace přibližuje chování taveniny v klasické sklářské peci s vrstvou vsázky na hladině taveniny. Proto bude třeba potlačovat tyto podélné teplotní gradienty – a tím i podélné cirkulační proudění – a podpořit uniformní podélné proudění. Pokud jsou v tavenině současně nastavovány příčné teplotní gradienty, potlačením podélného cirkulačního proudění se alespoň v části prostoru podpoří intenzita spirálovitého toku [16].

Podstata vynálezu

Uvedené nevýhody se odstraní nebo podstatně omezí v tavicím prostoru kontinuální sklářské tavicí pece podle tohoto vynálezu, kde tavicí prostor elektricky otápěný topnými elektrodami je vymezený dnem, protilehlými bočními stěnami, hladinou skloviny, čelní stěnou s nátokem skloviny a zadní stěnou s výtokem skloviny. Podstata tohoto vynálezu spočívá v tom, že tavicí prostor zahrnuje vstupní zónu *A* s nátokem skloviny a homogenizační zónu *B* s výtokem skloviny, přitom vstupní *zóna A* zaujímá 1/10 až 1/2 z celkové délky tavicího prostoru ve směru podélné osy tohoto prostoru. Vstupní zóna *A* obsahuje uspořádání topných elektrod s 3x až 7x vyšším elektrickým příkonem než příkon topných elektrod v zóně *B* pro dosažení maximálního tavicího výkonu v tavicím prostoru. V tavicím prostoru je vytvořeno mezi topnými elektrodami rozhraní mezi vstupní zónou *A a* homogenizační zónou *B.*

Hlavní výhodou předloženého vynálezu je dosažení maximálního tavicího výkonu a minimálních specifických tepelných ztrát pro běžný typ elektrické pece s běžně dosažitelným uspořádáním elektrod, aniž by byl do topných elektrod dodáván celkově vyšší příkon, a to optimální distribucí příkonu energie na topné elektrody. Hodnoty maximálního kritického tavicího výkonu a rovněž minimálních specifických tepelných ztrát v podstatě platí obecně, zejména pro jakékoliv běžné tavicí teploty pro skloviny, a v podstatě pro běžné typy tavicích prostorů a pro většinu komerčních typů skel. Maximálním kritickým tavicím výkonem se v tomto vynálezu ve všech případech rozumí kritický tavicí výkon maximálně možný. Velkou předností tohoto vynálezu je zjištění, že nejlepších výsledků tavicích výkonů při minimálních tepelných ztrátách se dosahuje u podélných tepelných bariér v tavicím prostoru, tedy např. s vertikálními topnými elektrodami ve dně v podélné ose tavicího prostoru.

Potlačení nebo vyloučení nežádoucího podélného cirkulačního proudění se dosáhne odůvodněným rozmístěním topných elektrod jakožto zdrojů energie a příkonů na tyto zdroje v tavicím prostoru, přičemž nejvýhodnější typ proudění se obecně dosáhne tehdy, jestliže zdroje energie ve vstupní části prostoru budou dostávat značně vyšší příkon než zdroje v druhé části prostoru, kde se v podstatě pouze udržuje konstantní teplota taveniny. V optimálním případě bude pak třeba do vstupního prostoru dodat příkon, kterého je třeba k ohřátí chladnější

přicházející taveniny na průměrnou teplotu taveniny v homogenizačním prostoru, zvětšený o část tepelných ztrát odpovídající objemu vstupní části prostoru. Takové optimální rozmístění energie je nazváno vyrovnaným podélným rozmístěním energie (vybalancované rozmístění energie). Daný homogenizační prostor bude takto rozdělen na *vstupní zónu* a další *homogenizační zónu,* kde velikost vstupní zóny bude dána potřebným a přípustným počtem zdrojů a jejich příkonem. Při malém rozdílu mezi vstupní a průměrnou teplotou bude tedy vstupní prostor menší a poroste s rostoucím teplotním rozdílem, neměl by však přesáhnout polovinu celého homogenizačního prostoru.

Je definována optimální odzkoušená délka vstupní zóny *A.* Pokud je tato délka mimo nárokovaných hodnot, tedy pod 1/10, budou zdroje energie ve vstupní zóně A příliš zatíženy příkonem, což může vést k nižší životnosti elektrod a žáruvzdorného materiálu ve vstupní zóně. Pokud bude délka vstupní zóny *A* větší než ½ z celkové délky tavicího prostoru ve směru jeho podélné osy, potom se omezí celkový tavicí výkon celého tavicího prostoru, protože homogenizační zóna *B* bude příliš krátká.

Je definováno optimální odzkoušené rozmezí elektrického příkonu přiváděného do topných elektrod v zóně *A.* Nižší nebo vyšší příkon nepovede k dosažení maximálního tavicího výkonu v tavicí části.

V optimálním odzkoušeném uspořádání zaujímá vstupní zónu *A 1*/5 až 2/5 celkové délky tavicího prostoru ve směru jeho podélné osy ve směru toku skloviny.

Vynález se též týká způsobu tavení skloviny v tavicím prostoru kontinuální sklářské tavicí pece podle tohoto vynálezu, jehož podstata spočívá v tom, že do vstupní zóny *A* se přivádí na topné elektrody elektrický příkon 3x až 7x vyšší, než je elektrický příkon, který se přivádí do topných elektrod homogenizační zóny *B,* při maximálním kritickém tavicím výkonu $\dot{M}_{critmax}$ a při minimálních specifických tepelných ztrátách $H^L{}_M$ celém tavicím prostoru, přičemž teplota vstupující skloviny do zóny *A* je o 50 až 300 °C nižší, než je průměrná teplota skloviny v celém tavicím prostoru.

Hlavní výhodou způsobu tavení skloviny v tavicím prostoru kontinuální sklářské pece tohoto vynálezu je dosažení optimální podélné distribuce energie do tavicího prostoru tak, aby splňovala energetické potřeby v zónách tavicího prostoru. V obou zónách *A a B* dochází k částečnému ohřátí a homogenizaci skloviny obsahující nerozpuštěná zrna sklářského písku a bubliny. V obou zónách *A a B* je nastaven poměr příkonů elektrické energie do vstupní zóny *A* 3x až 7x vyšší než do homogenizační zóny B tak, aby bylo v tavicím prostoru nastaveno příznivé proudění taveniny, jehož charakter se přibližuje proudění uniformnímu, tj. jednosměrnému, nebo spirálovitému, a bylo díky tomuto charakteru proudění dosaženo maximálního tavicího výkonu a minimálních specifických ztrát. Tím se dosáhne cíle tohoto vynálezu, a to podstatně vyšší tavicí výkon a nižší specifické ztráty, aniž by se měnil celkový příkon energie do tavicího prostoru v porovnání se standardním řešením tavicích prostorů bez uvedeného rozložení elektrických příkonů. Toto řešení podle vynálezu je vhodné pro horizontální tavicí prostory standardního tvaru kvádru a pro tvary kvádru podobné.

Nejvýhodnější řešení tavicího prostoru pro dosažení maximálního tavicího výkonu $\dot{M}_{critmax}$ v celém tavicím prostoru a minimálních specifických tepelných ztrátách $H^L{}_M$ v tavicím prostoru je výhodné, když poměr α_{max} elektrického příkonu přiváděného do topných elektrod vstupní zóny *A* k elektrickému příkonu přiváděnému do topných elektrod homogenizační zóny ***B,*** v podstatě lineárně stoupá, od nejnižší hodnoty 3 při teplotním rozdílu 50 °C mezi teplotou natékající skloviny do zóny *A* a průměrnou teplotou skloviny v celém tavicím prostoru až k hodnotě 7 při teplotním rozdílu 300 °C.

Další závislé patentové nároky specifikují konkrétní hodnoty maximálního kritického tavicího výkonu v tavicím prostoru s odpovídajícími minimálními specifickými tepelnými ztrátami při daném uspořádání elektrod a při dané průměrné teplotě skloviny.

V konkrétním provedení dle příkladu 2 tohoto vynálezu je uveden výhodný způsob tavení skloviny, jestliže při teplotě vstupující skloviny do zóny *A* o 100 °C nižší, než je průměrná teplota skloviny 1420 °C v celém tavicím prostoru, osazeném řadou vertikálních elektrod umístěných v podélné ose tavicího prostoru, a tedy při vstupní teplotě 1320 °C skloviny, se přivádí do vstupní zóny *A* na topné elektrody elektrický příkon odpovídající hodnotě 4 x vyšší, než je elektrický příkon přiváděný do topných elektrod homogenizační zóny ***B***. Tím se docílí maximální kritický tavicí výkon $\dot{M}_{critmax}$ odpovídající hodnotě 626,4 t/den (7,25 kg/s) při minimálních specifických tepelných ztrátách H^L_M odpovídajících hodnotě 45,9 kJ/kg v celém tavicím prostoru.

V konkrétním provedení dle příkladu 3 tohoto vynálezu je uveden způsob tavení skloviny. Tavicí prostor je osazen řadou vertikálních elektrod, umístěných ve třech paralelních příčných řadách tavicího prostoru v odstupu od vnitřní čelní stěny 1 m, 3,135 m a 5,2 m. Teplota vstupující skloviny do zóny *A* je o 100 °C nižší, než je průměrná teplota skloviny 1420 °C v celém tavicím prostoru. Způsob tavení skloviny podle tohoto vynálezu za těchto podmínek spočívá v tom, že při vstupní teplotě skloviny 1320 °C se do vstupní zóny *A* přivádí na topné elektrody elektrický příkon odpovídající hodnotě 5,67 x vyšší, než je elektrický příkon přiváděný do topných elektrod homogenizační zóny *B*. Tím se docílí maximální kritický tavicí výkonu $\dot{M}_{critmax}$ odpovídající hodnotě 561,6 t/den (6,5 kg/s) při minimálních specifických tepelných ztrátách odpovídajících hodnotě 50,3 kJ/kg v celém tavicím prostoru.

V konkrétním provedení dle příkladu 4 tohoto vynálezu je uveden způsob tavení skloviny, přitom teplota vstupující skloviny do zóny *A* je o 200 °C nižší, než je průměrná teplota skloviny 1420 °C v celém tavicím prostoru. Tavicí prostor je osazen řadou vertikálních elektrod umístěných v podélné ose tavicího prostoru. Způsob tavení skloviny za těchto podmínek spočívá v tom, že při vstupní teplotě skloviny 1220 °C se do vstupní zóny *A* přivádí na topné elektrody elektrický příkon odpovídající hodnotě 5,67 x vyšší,než je elektrický příkon, který se přivádí do topných elektrod homogenizační zóny *B*. Tím se docílí maximální kritický tavicí výkon $\dot{M}_{critmax}$, odpovídající hodnotě 457,9 t/den (5,3 kg/s) při minimálních specifických tepelných ztrátách odpovídajících hodnotě 61,1 kJ/kg v celém tavicím prostoru.

Experimentálně byl vynálezci navržen a ověřen výsledný semiempirický vztah pro maximální kritický taviči výkon v tavicím prostoru, rovněž vztah pro hmotový průtok skloviny při vyrovnané horizontální distribuci energie a též vztah pro specifické tepelné ztráty ve vztahu ke shora uvedenému maximálnímu kritickému tavicímu výkonu.

V nejvýhodnějším rozložení energie v tavicím prostoru podle tohoto vynálezu se dosahuje maximální kritický tavicí výkon $\dot{M}_{critmax}$ *[kg/s]* skloviny, vyjádřený semiempirickým experimentálně odzkoušeným vztahem

$$\dot{M}_{critmax} = 1{,}25\,\frac{\dot{H}^L\left(\frac{\alpha_{max}}{1+\alpha_{max}} - \xi\right)}{c_p \Delta t\left(1 - \frac{\alpha_{max}}{1+\alpha_{max}}\right)},$$

kde představuje:

$\dot{H}^L$ [J/s] celkový tok tepelných ztrát všemi krajními rozhraními homogenizačního prostoru, přičemž krajní rozhraní skloviny představují hladina skloviny a styk skloviny se dnem, s bočními stěnami, s čelní a zadní stěnou;

c_p [J/(kg°C)j průměrné měrné teplo skloviny;

Δt [°C] teplotní rozdíl mezi průměrnou teplotou skloviny v celém tavicím prostoru a teplotou vstupující skloviny je 50 až 300 °C;

ξ podíl tepelných ztrát vykazovaných vstupní zónou *A;*

α_{max} poměr mezi elektrickým příkonem topných elektrod vstupní zóny *A* a příkonem topných elektrod homogenizační zóny *B* při maximálním výkonu $\dot{M}_{critmax}$; přičemž platí pro hodnotu

$\alpha_{max}=k_{l\,max}/(1-k_{l\,max}) = 2{,}25 + 0{,}0125\Delta t$, kde představuje $k_{l\,max}$ podíl příkonu elektrické energie z celkového příkonu do topných elektrod ve vstupní zóně *A* tavicího prostoru při maximálním kritickém výkonu $\dot{M}_{critmax}$.

Při vyrovnaném a vybalancovaném rozmístění energie v tavicím prostoru se dosahuje hmotového průtoku $\dot{M}_{bal}$ [kg/s] skloviny vyjádřeného vztahem

$$\dot{M}_{bal} = \frac{\dot{H}^L(k_1-\xi)}{H_M^T(1-k_1)} ,$$

kde představuje:

$\dot{H}^L$ [J/s] celkový tok tepelných ztrát všemi krajními rozhraními skloviny v tavicím prostoru, přičemž krajní rozhraní skloviny představuje sklovina na dně, bočních stěnách, čelní a zadní stěně a hladině skloviny;

ξ podíl tepelných ztrát vykazovaných vstupní zónou *A;*

$H^T{}_M$ [J/kg] specifické teplo pro ohřátí skloviny v tavicím prostoru na průměrnou teplotu skloviny; a

k_l podíl elektrického příkonu do topných elektrod vstupní zóny *A*.

Dále, v nejvýhodnějším rozložení tepelné energie v tavicím prostoru se dosahují minimální specifické tepelné ztráty $H^L{}_M$ [J/kg] ve sklovině, vyjádřené vztahem $H^L{}_M = \frac{\dot{H}^L}{\dot{M}_{crit}}$, kde představuje $\dot{H}^L\,[J/s]$ celkový tok tepelných ztrát všemi krajními rozhraními skloviny v tavicím prostoru, přičemž krajní rozhraní skloviny představují hladina skloviny a sklovina ve styku se dnem, s bočními stěnami čelní a se zadní stěnou, a $\dot{M}_{crit}$ *[kg/s]* představuje kritický tavicí výkon.

Objasnění výkresů

Vynález je podrobně popsán dále na neomezujících příkladných provedeních, objasněných schematicky na připojených obrázcích, z nichž představuje

obrázek 1 závislost hmotového průtoku skloviny na podílu příkonu energie ve vstupní zóně *A* při teplotě 1320 °C; zejména popsaná v příkladu 1;

obrázek 2 axonometrický pohled na taviči prostor s podélnou řadou elektrod ve dně tavicího prostoru; zejména dle příkladu 2;

obrázek 3 svislý řez podélnou osou tavicího prostoru z obr. 2; zejména dle příkladu 2;

obrázek 4 závislost kritického tavicího výkonu při teplotě 1320 °C na podílu příkonu energie v zóně *A* s podélnou řadou elektrod ve dně; zejména dle příkladu 2;

obrázek 5 podélný svislý řez paralelní s podélnou osou tavicího prostoru vedený v ¼ nebo ve ¾ šířky tavicího prostoru z obr. 2; dle příkladu 2;

obrázek 6 axonometrický pohled na tavicí prostor se třemi příčnými řadami elektrod ve dně tavicího prostoru; dle příkladu 3;

obrázek 7 pohled shora na horizontální řez tavicím prostorem se třemi příčnými řadami elektrod umístěných ve dně, a to neznázorněný řez vedený v polovině výšky elektrod z obr. 6; dle příkladu 3;

obrázek 8 závislost kritického tavicího výkonu na podílu příkonu energie v zóně *A* se třemi příčnými řadami elektrod, při teplotě 1320 °C; dle příkladu 3;

obrázek 9 axonometrický pohled na tavicí prostor s podélnou řadou elektrod ve dně tavicího prostoru; dle příkladu 4;

obrázek 10 závislost kritického tavicího výkonu na podílu příkonu energie v zóně *A* s podélnou řadou elektrod ve dně, při teplotě 1220 °C a i informačně při teplotě 1120 °C; dle příkladu 4.

Příklady uskutečnění vynálezu

Příklad 1

Obrázek 1, 2, 3, 5, 6, 7, 9 pro podélné i příčné řady elektrod 2 v tavicím prostoru 1

Předmět vynálezu je aplikován pro nejběžnější tvar kontinuální sklářské tavicí pece s běžným tavicím prostorem 1 v pravoúhlém tvaru, znázorněný schematicky na **obrázku 2.** Tavicí prostor 1 je elektricky otápěný topnými elektrodami 2, prostorově vymezený dnem 3, protilehlými bočními stěnami 4, hladinou 5 skloviny a čelní stěnou 6 a nátokem 7 skloviny a zadní stěnou 8 výtokem **9** skloviny. Elektrody 2 jsou uspořádané ve dně 3 pro vytvoření podélné tepelné bariéry ve sklovině, jak je znázorněno na **obrázku 2,** 3, **4,** 9. Elektrody 2 mohou být uspořádané v několika řadách ve dně 3 pro vytvoření příčných tepelných bariér ve sklovině, jak je znázorněno na **obrázku 6 a** 7.

Tavicí část 1 je rozdělena na vstupní zónu *A* osazenou elektrodami 2_A a homogenizační zónu *B* osazenou elektrodami 2_B, takže se mezi nimi nastaví přirozené rozhraní 10.

Vstupní *zóna A* je přivrácena části sklářské pece s nakládkou a konverzí sklářského kmene na taveninu. Nátok 7 skloviny může být uspořádán jako horní nátok 7 na hladinu skloviny, nebo horní nátok 7 v horní části čelní stěny 6 nebo dolní nátok 7 v dolní části čelní stěny 6. Šířka čelních nátoků 7 nad hladinou skloviny je s výhodou přes celou šířku tavicího prostoru 1. Výška čelních nátoků 7 je s výhodou menší, než je výška vrstvy taveniny skla v tavicím prostoru 1. Délka nátoku 7 hladinou je stejná nebo kratší, než odpovídá délce vstupní zóny *A*.

Homogenizační zónu *B* s výtokem 9 skloviny je určena pro uskutečnění rozpouštěcích dějů a odstranění bublin a navazuje na neznázorněné části sklářské pece, jako je např. feeder (žlab dávkovače), pracovní část nebo přímo sklářský stroj. Obdobně jako nátok 7 skloviny může být uspořádán výtok 9 jakožto horní nebo neznázorněný dolní výtok.

Elektrody 2 jsou uspořádány v tavicím prostoru 1 buď přímo ve dně 3 v podélné ose 11 tavicího prostoru 1, jak je znázorněno např. na **obrázcích** 2, 3, 5, 9, případně protilehle v bočních stěnách 4, nebo ve dně 3 alespoň ve dvou příčných řadách, jak je znázorněno např. na **obrázku 6 a** 7.

Možné i neznázorněné alternativy uspořádání elektrod 2 jsou uvedeny dále.

Elektrody 2_A ve vstupní zóně *A* mohou být uspořádány následovně, např. jako:

- vertikální elektrody 2_A ze dna 3 v jedné nebo dvou podélných řadách, přičemž elektrody 2_A se nacházejí v jedné podélné ose 11 tavicího prostoru 1 v jedné řadě, nebo ve dvou řadách obklopují podélnou osu 11 tavicího prostoru 1,
- horizontální elektrody 2_A z obou bočních stěn 4 pece, přičemž vrcholy elektrod 2_A se nacházejí v jedné podélné ose 11, nebo alespoň ve dvou paralelních řadách obklopují podélnou osu 11 tavicího prostoru 1,
- vertikální elektrody 2_A ze dna 3 alespoň v jedné příčné řadě nebo ve skupinách napříč vstupní zónou *A*.

Elektrody 2_B v homogenizační zóně *B* mohou být uspořádány následovně, např. jako:

- vertikální elektrody 2_B ze dna 3 v jedné nebo dvou podélných řadách, při čemž elektrody se nacházejí v podélné ose 11 tavicího prostoru l v jedné řadě, nebo ve dvou řadách obklopují podélnou osu 11 tavicího prostoru 1,
- horizontální elektrody 2_B z obou bočních stěn 4 tavicího prostoru 1, přičemž vrcholy elektrod se nacházejí v podélné ose 11, nebo ve dvou řadách obklopují podélnou osu 11 tavicího prostoru 1,
- vertikální elektrody 2_B ze dna 3 alespoň v jedné příčné řadě nebo ve skupinách napříč homogenizační zónou *B*.

Jsou samozřejmě možné i jiné kombinace navržených uspořádání elektrod 2 v zónách *A* a *B*.

Podmínky vyrovnaného vybalancovaného podélného rozmístění energie jsou významné pro definování aktuálního a pro předpověď hledaného efektivního typu proudění; pomocí jejich znalosti se odhadnou možné hranice tavicího výkonu a ušetří se mnoho výpočetní práce nebo stavby prototypů. Pro stanovení podmínek vyrovnaného rozmístění energie se požaduje znalost jen několika základních údajů. Tvar funkce tohoto vyrovnaného rozmístění platí pak obecně pro běžný typ horizontálního tavicího prostoru 1 bez ohledu na jeho rozměr. Pokud se týče typu tavicího prostoru 1, ten musí vyhovovat pouze požadavku rozdělení na vstupní zónu *A* a následující homogenizační zónu *B*. Pro vyrovnané rozmístění energie v tavicím prostoru 1 byla odvozena rovnice:

$$\dot{M}_{bal} = \frac{\dot{H}^L(k_1-\xi)}{H_M^T(1-k_1)} \qquad (2)$$

kde $\dot{M}_{bal}$ je hodnota hmotového průtoku v kg/s, který odpovídá vyrovnanému rozmístění energie v tavicím prostoru 1. Je zde třeba brát v úvahu, že při změně průtoku (tavicího výkonu) je třeba dodat příslušnou energii na ohřátí vstupující taveniny, a proto $\dot{M}_{bal}$ musí záviset na rozmístění energie. $\dot{H}^L$ je celkový tok ztrát stěnami (rozhraními) tavicího prostoru. Hodnoty hmotového průtoku skloviny $\dot{M}_{bal}$ a hodnoty celkového toku ztrát $\dot{H}^L$ jsou uvedeny v jednotkách za sekundu (označeno tečkou nad symbolem veličiny). Hodnota ξ je podíl ztrát rozhraními připadající na vstupní část prostoru, H^T_M je specifické teplo pro ohřátí vstupující taveniny na průměrnou teplotu v tavicím prostoru 1 (v klasické sklářské peci teoretické teplo) a k_1 je proměnnou, podílem příkonu energie z celkového příkonu energie do topných elektrod 2_A, který je dodáván do vstupní části *A* tavicího prostoru 1 a definuje tak jednoduchým způsobem podélné rozdělení energie. Pro odhad charakteru proudění je tedy důležitý průtok taveniny tavicím prostorem 1 jako závisle proměnná, podíl energie dodávaný do vstupní zóny *A*, k_1 jako nezávisle proměnná a křivka $\dot{M}_{bal}(k_1)$ definovaná rovnicí (2). Znalost veličin $\dot{H}^L$, H^T_M a ξ umožňuje snadno konstruovat křivku $\dot{M}_{bal}(k_1)$. V grafu hmotový průtok $\dot{M}$ versus podíl k_1 energie dodávané do vstupní zóny *A*, je pak možno nalézt typy podélného cirkulačního proudění významného pro využití tavicího prostoru 1

a tím i pro kritický tavicí výkon, maximálně možný z hlediska kvality skloviny. Typický tvar křivky ukazuje na **obrázku 1** diagram závislosti hmotového průtoku $\dot{M}_{bal}(k_1)$ skloviny na podílu k_1 příkonu energie ve vstupní zóně *A* při teplotě 1320 °C

Křivka hmotového toku $\dot{M}_{bal}(k_1)$ na **obrázku 1,** tedy diagramu různých typů podélného cirkulačního proudění, rozděluje celou plochu diagramu na dvě části. Vlevo od této křivky bude v tavicím prostoru 1 panovat podélné cirkulační proudění mířící proti směru hodinových ručiček (v klasické horizontální tavicí peci je to proudění se zpětným tokem u hladiny), na které se nabaluje průtok taveniny tavicím prostorem 1. Vpravo od křivky se pak ustaví cirkulační proudění ve směru hodinových ručiček, opět s nabaleným průtokem skloviny tavicím prostorem 1. Obě cirkulační proudění snižují využití tavicího prostoru 1, a tedy i jeho tavicí výkon. Na křivce $\dot{M}_{bal}(k_1)$ se pak ustálí uniformní dopředný tok bez podélných cirkulací, který se vyznačuje vysokým využitím tavicího prostoru 1 a vysokým tavicím výkonem. Oba tyto typy proudění jsou reprezentovány oválnými značkami se šipkami na **obrázku 1.** Takto představený obraz proudění je pouze ideální a platný za předpokladu, že podélné rozložení energie v tavicím prostoru 1 je "hladké". V reálných podmínkách vznikají nepravidelnosti v rozložení energie díky nerovnoměrnosti ohřevu reálnými zdroji, topnými elektrodami 2, a v důsledku toho se objeví odchylky od takto představeného ideálního charakteru proudění. Výsledky sledování proudění však ukazují, že reálné obrazy typů proudění dosti dobře odpovídají obrazu teoretickému. Podle teoretického obrazu nebude tedy výhodné se pohybovat ve větší vzdálenosti od křivky $\dot{M}_{bal}(k_1)$, neboť budeme dostávat tím menší využití a tavicí výkony, čím dále se od této křivky budeme nalézat a naopak na křivce $\dot{M}_{bal}(k_1)$ a v jejím okolí budou stanoveny vysoké hodnoty využití i tavicích výkonů, neboť proudění v této oblasti bude uniformní nebo uniformnímu proudění (jednosměrnému) blízké. Cílem při hledání optimálních podmínek je tedy dosahovat výsledky modelových výpočtů kritického výkonu $\dot{M}_{crit}$ blízké křivce $\dot{M}_{bal}(k_1)$, při čemž reálněji se dosahují pozice výsledků vlevo od této křivky, tj. při nižších hodnotách podílu k_1 příkonu energie ve vstupní zóně *A*. Pozice vpravo od křivky vyžadují umístění příliš velkého množství energie do vstupní zóny *A*, což může činit technický problém. Skutečné kritické výkony zařízení jsou ovšem ovlivňovány kinetikou tavicích dějů, a proto není možné se bez modelování dostatečně přiblížit ke křivce nebo na křivku $\dot{M}_{bal}(k_1)$.

Přesné stanovení podmínek vychází pak z matematického modelování daného tavicího prostoru 1 za měnícího se typu proudění a z kvantitativního vyhodnocování veličiny využití tavicího prostoru 1 pro sledované tavicí děje (zde rozpouštění sklářského písku a odstranění bublin). Každé nastavení typu proudění pomocí veličiny k_1 se uskuteční daným uspořádáním zdrojů energie, tedy topných elektrod 2_A, 2_B v obou zónách *A* i *B* tavicího prostoru 1 a rozložením příkonu energie mezi vstupní zónu *A* a homogenizační zónu *B* tavicího prostoru 1. V navrhovaném případě se jako energie uvažuje Joulovo teplo dodávané elektrodami 2 přímo do taveniny. Maximální dosažená hodnota využití tavicího prostoru 1 určí pak nejvýhodnější charakter proudění a nejvyšší tavicí výkon, případně nejnižší specifické tepelné ztráty. Počet stanovení lze velmi omezit vypočtením a využitím křivky $\dot{M}_{bal}(k_1)$. Rozložení zdrojů energie a podíl příkonu připadající na vstupní zónu *A* a homogenizační zónu *B* tavicího prostoru 1, případně i podrobnější rozložení příkonu na jednotlivé zdroje, určují pak podmínky nejvýhodnějšího nastavení celého tavicího prostoru 1.

Vstupní zóna *A* má délku představující 1/10 až 1/2 celkové délky tavicího prostoru 1 ve směru jeho podélné osy 11 a ve směru toku skloviny sklářskou pecí.

Vstupní zóna *A* je osazena topnými elektrodami 2, jejichž počet je dán potřebou dodat příslušný příkon odpovídající ohřátí skloviny na průměrnou teplotu ustavenou v celém tavicím prostoru 1 a dodání příslušného podílu ztrát, při čemž je dodržena podmínka nepřekročit maximální proudové zatížení elektrod 2_A.

Elektrický příkon topných elektrod 2_A do vstupní zóny *A* tavicího prostoru 1 je 3x až 7x vyšší než elektrický příkon topných elektrod 2_B do homogenizační zóny *B*, jestliže je teplota vstupující

skloviny o 50 až 300 °C nižší, než je průměrná teplota uvnitř celého tavicího prostoru 1, přičemž hodnota poměru příkonu do vstupní zóny *A* k hodnotě příkonu do homogenizační zóny *B* α stoupá přibližně lineárně od nejnižší hodnoty kolem 3 (tří) při teplotním rozdílu 50 °C k hodnotě 7 (sedm) při teplotním rozdílu 300 °C.

Hodnoty maximálního kritického tavicího výkonu pece odvozené z případů uvedených v příkladech provedení lze obdržet alespoň s 20% přesností ze vzorce:

$$\dot{M}_{critmax}\,[kg/s] = 1{,}25\,\frac{\dot{H}^{L}\left(\frac{\alpha_{max}}{1+\alpha_{max}}-\xi\right)}{c_p\Delta t\left(1-\frac{\alpha_{max}}{1+\alpha_{max}}\right)}, \qquad (3)$$

kde $\dot{H}^L$ v J/s je celkový tok tepelných ztrát rozhraními tavicího prostoru 1, je nalezený nebo odhadnutý poměr α_{max} mezi elektrickým příkonem do vstupní zóny *A* a příkonem do homogenizační zóny *B* při maximálním kritickém homogenizačním výkonu ($\alpha_{max} = k_{1max}/(1-k_{1max}$, kde k_{1max} je příslušný nalezený nebo odhadnutý podíl příkonu energie umístěné do vstupní zóny *A* tavicího prostoru 1 při maximálním výkonu), ξ je podíl tepelných ztrát vykazovaných vstupní zónou A, c_p je průměrné měrné teplo skloviny v [J/(kg°C)], pro sklovinu float je průměrná hodnota tepelné kapacity c_p rovna 1,269x10^3 J/(kg°C), a Δt je teplotní rozdíl ve °C mezi průměrnou teplotou taveniny v celém tavicím prostoru 1 a teplotou vstupující taveniny. Konstanta 1,25 vyjadřuje fakt, že maximální kritický tavicí výkon je asi o čtvrtinu větší, než odpovídá nejbližší hodnotě $\dot{M}_{bal}$.

Pro poměr α_{max}, maximálního elektrického příkonu, přiváděného do topných elektrod 2_A zóny *A* vzhledem k elektrickému příkonu přiváděnému do topných elektrod 2_B zóny *B* platí na základě výsledků numerického modelování rovnice:

$$\alpha_{max} = 2{,}25 + 0{,}0125\Delta t,\ \Delta t \in \langle 50; 300 \rangle \qquad (4)$$

kde představuje Δt rozdíl mezi teplotou vstupující taveniny a průměrnou teplotou v tavicím prostoru, která se pohybuje v rozmezí 50±10 °C a 300±20 °C. Pro menší rozdíly je možno uvažovat, že je případ izotermní a podélné cirkulace jsou zanedbatelné. Větší teplotní rozdíl než 300 °C není v praxi reálný.

U zjištěných a dále uvedených hodnot maximálních kritických tavicích výkonů $\dot{M}_{critmax}$, které byly dosaženy na modelovém typu zařízení pro sodnovápenatou sklovinu typu plochého skla, vystupuje otázka přenosnosti hodnot $\dot{M}_{critmax}$ z rovnic (3 až 4) na jiná komerční skla tavená ve stejných nebo podobných typech tavicích prostor 1. Při tavení jiného typu komerčního skla ve stejném typu zařízení a při dané hodnotě Δt je dodržena podmínka shodnosti nebo podobnosti hodnot $\dot{H}^L$ a ξ. Protože většina komerčně tavených skel obsahuje jako hlavní složku oxid křemičitý a některé další složky jako, např. oxid vápenatý a sodný, se ve sklech opakují, můžeme očekávat i podobné průměrné hodnoty měrných tepel c_p u různých typů skel. Stejná nebo podobná hodnota poměru α u jiných typů skel závisí na shodnosti nebo podobnosti hodnot τ_{Href}. Je známo, že tavicí proces skel se obecně doporučuje uskutečňovat za viskozit taveniny kolem 10 Pas, kdy je hodnota 10 Pas dostatečně nízká pro uskutečnění difúzních procesů při rozpouštění. Tato hodnota je důsledkem historické zkušenosti s tavením různých typů skel. Rovněž čeřicí proces je částečně závislý na viskozitě taveniny a funkce čeřiv se odehrává při zhruba stejných viskozitách u různých typů sklovin. Z tohoto vyplývá, že rychlost rozpouštěcích a čeřicích procesů za doporučené viskozity a z nich vyplývajících různých tavicích teplot se nebude příliš lišit u různých typů skel. Můžeme tedy u různých skel očekávat podobné hodnoty referenčních tavičích dob τ_{Href}. Je-li tato podobnost splněna spolu s podobností předtím zmíněných veličin $\dot{H}^L$, ξ a c_p, budou stejné nebo podobné i hodnoty optimálního poměru mezi

příkonem do vstupní zóny *A* a homogenizační zóny *B* α_{max} a hodnoty $\dot{M}_{critmax}$ budou přibližně přenosné na jiný typ komerčního skla ve stejném tavicím prostoru 1. Ze shodné nebo podobné hodnoty α_{max} současně vyplývá, že pro jiný typ skla bude platná i stejná nebo podobná i hodnota maximálního využití u_{Hmax}. Pro jiné, ale tvarově podobné tavicí prostory, pak bude platit, že zvětšení prostoru se projeví především zvýšením hodnoty toku tepelných ztrát $\dot{H}_L$ v rovnici (2). Křivka $\dot{M}_{bal}(K_1)$ v **obrázku 1** se pak narovná a její střední část se posune vlevo. Maximální kritické výkony $\dot{M}_{critmax}$ se zvětší zhruba v poměru objemů a posunou se vzhůru podél křivky $\dot{M}_{bal}(k_1)$ a doprava. Předpokládáme-li, že se oba posuny vlevo a vpravo zhruba vykompenzují, dojde k dosažení maximálního kritického výkonu v jiném, tvarově podobném prostoru, při zhruba stejné hodnotě k_1 jako u předchozího referenčního prostoru. Jedná se odhad, přesnější hodnoty je třeba získat modelováním.

Pro příklady provedení byl zvolen modelový tavicí prostor 1, který je schematicky znázorněn, např. na připojených **obrázcích 2, 3, 5, 6, 7 a 9.** Tavicí prostor 1 je znázorněn ve variantách s podélnou tepelnou bariérou znázorněnou na **obrázku 2, 3 a 5** i s příčnou tepelnou bariérou, znázorněnou na **obrázcích 6 a 7.**

Obecně platí pro výpočty ve všech Příkladech provedení vynálezu, že byla jako nezávisle proměnná zvolena veličina k_1, která označuje podíl α elektrického příkonu z celkového elektrického příkonu umístěného do vstupní zóny *A* tavicího prostoru 1, jak je graficky znázorněno na **obrázku 4, 8 a 10** a číselně v Tabulkách 1,2,3. Mezi hodnotou k_1 a α platí vztah $k_1=\alpha/(1+\alpha)$. Grafické znázornění pomocí k_1 je názornější, než pomocí α. Výsledky byly dosaženy pro průměrnou teplotu v tavicím prostoru 1 pro průměrnou teplotu skloviny 1420 °C v tavicím prostoru 1, hodnotu toku tepelných ztrát $\dot{H}^L$= 327 kW, hodnotu podílu tepelných ztrát ve vstupní zóně *A* ξ=0,36. Přičemž teplo potřebné pro ohřev vstupující skloviny mající teplotu o 100 °C nižší, než je průměrná teplota skloviny v tavicím prostoru 1, bylo rovné 126,9 kJ/kg, teplo potřebné pro ohřev vstupující skloviny mající teplotu o 200 °C nižší, než je průměrná teplota skloviny, bylo rovné 253,8 kJ/kg a teplo potřebné pro ohřev vstupující skloviny mající teplotu o 300 °C nižší, než je průměrná teplota skloviny, bylo rovné 380,7 kJ/kg. Hodnoty zmíněných tepel 253,8 kJ/kg a 380,7 kJ/kg byly použity jen při výpočtech s podélnou řadou elektrod 2 (následné Příklady 2 a 4). Hodnoty pro modelování rozpouštění sklářského písku a odstraňování bublin v modelovém plochém skle byly vzaty z citované práce [16].

Příklad 2

Obrázek 2, 3, 4, 5 pro podélnou řadu elektrod 2 v podélné ose 11 tavicího prostoru 1

Zjišťování optimálního výkonu bylo provedeno v modelovém tavicím prostoru 1, který je schematicky znázorněný na **obrázku 2** v axonometrickém pohledu, se svislými elektrodami 2 v podélné ose 11 tavicího prostoru 1, *a* to elektrodami 2A ve vstupní zóně *A a* elektrodami 2B v homogenizační zóně *B*. Svislý řez z **obrázku 2,** vedený v podélné ose 11 tavicího prostoru 1, je znázorněn na **obrázku 3.** Na **obrázku 5** je znázorněn podélný svislý řez, vedený v ¼ nebo ve ¾ šířky tavicího prostoru 1 z **obrázku 2,** tj. v polovině šířky mezi podélnou osou 11 a oběma bočními stěnami 4. Vnitřní délka tohoto tavicího prostoru 1 v tomto konkrétním příkladném provedení znázorněném na **obrázku 3 a 5** je 6,225 m, což představuje vzdálenost od vnitřní čelní stěny 6 k příčné bariéře tvořené žáruvzdorným materiálem, která zastupuje zadní stěnu 8. U této zadní stěny 8 musí být ukončeny všechny tavicí, čeřicí a homogenizační děje. Vnitřní šířka tavicího prostoru 1 mezi bočními stěnami 4 je 2 m, a výška vrstvy skloviny je 1 m. Vstupní zóna *A* je dlouhá 2,25 m a zaujímá tak 36 % délky tavicího prostoru 1. Dále uvedené výsledky se vztahují k tavicímu prostoru 1 s horním nátokem 7 taveniny na hladinu 5 skloviny, který je vedena přes celou šířku tavicího prostoru 1 na hladinu 5 v délce 0,2 m od čelní stěny 6, což je vyznačena na **obrázku 2** šrafovaně. Obdobně je pro toto příkladné provedení znázorněny slabě

šedě na **obrázku 2** na čelní stěně 6 znázorněn horní a dolní nátoky 7, a na zadní stěně 8 horní a dolní výtok 9 skloviny.

Otop tavicího prostoru 1 je zajišťován 16 vertikálními elektrodami 2 o výšce 0,3 m, které jsou umístěny v podélné ose 11 tavicího prostoru 1. Z nich prvních 6 elektrod 2_A náleží ke vstupní zóně *A a* dalších 10 elektrod 2_B k homogenizační zóně B tavicího prostoru 1. V tavicím prostoru 1 se taví sodnovápenatá sklovina plochého typu (float) při průměrné teplotě 1420 °C. Surová sklovina natékající hladinou 5 má teplotu 1320 °C a obsahuje nerozpuštěná zrna sklářského písku a bubliny. Největší nerozpuštěná zrna o průměru 0,5 mm a nejmenší bubliny o průměru 0,1 mm musí být odstraněny nejpozději při dosažení příčné bariéry ze žáruvzdorného materiálu, která zastupuje zadní stěnu 8, před výtokem 9 z tavicího prostoru 1. Modelování nejvýhodnějšího typu proudění bylo prováděno při proměnné hodnotě poměru mezi příkonem dodávaným do vstupní zóny *A* tavicího prostoru 1 a příkonem dodaným do homogenizační zóny *B* tavicího prostoru 1 až do dosažení kritického stavu. Kritický stav byl indikován tím, že pomalejší z obou sledovaných dějů (řídicí děj) byl ukončen právě nad zadní stěnou 8 v příkladném provedení odpovídající hrázi ze žáruvzdorného materiálu, zatímco rychlejší děj byl ukončen ještě uvnitř tavicího prostoru 1. Bylo sledováno využití tavicího prostoru 1 charakterizující kvalitu proudění v tomto prostoru, trvání obou dějů, kritický tavicí výkon a měrné ztráty energie jako funkce podílu k_1 elektrického příkonu k celkovému elektrickému příkonu, dodávanému do vstupní zóny *A* nebo poměru α mezi elektrickým příkonem dodávaným do vstupní zóny *A* k příkonu dodávanému do homogenizační zóny *B*. Účelem bylo dosažení co nejvýhodnějšího typu proudění charakterizovaného nejvyšším využitím tavicího prostoru 1 a také nejvyšším tavicím výkonem. Významné hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 1.

Tabulka 1

Případ č.	t (°C)	k_1	$\alpha = k_1/(1-k_1)$	u (řídící děj)	τ_{Dave}, τ_{Fref} (s)	τ_G (s)	$\dot{M}_{crit}$ (kg/s) (t/den)	H_M^L (kJ/kg)
1	1320	0,45	0,82	$u_F = 0,34$	$\tau_{Fref} = 1878$	5560	5,2 449,3	62,9
2	1320	0,60	1,5	$u_F = 0,38$	$\tau_{Fref} = 1877$	4985	5,8 501,1	56,4
3	1320	0,70	2,33	$u_F = 0,42$	$\tau_{Fref} = 1879$	4448	6,5 561,6	50,3
4	1320	0,75	3	$u_F = 0,45$	$\tau_{Fref} = 1878$	4130	7,0 604,8	46,7
5	1320	0,80	4	$u_F = 0,47$	$\tau_{Fref} = 1878$	3988	7,25 626.4	45.9
6	1320	0,825	4,71	$u_F = 0,46$	$\tau_{Fref} = 1877$	4072	7,1 613,4	46,1
7	1320	0,85	5,67	$u_D = 0,40$	$\tau_{Dave} = 2059$	5163	5,6 483,4	58,3
8	1320	0,90	10	$u_D = 0,27$	$\tau_{Dave} = 2078$	7608	3,8 328,3	85,9

Tabulka 1 dokládá využití tavicího prostoru 1, referenčních dob uskutečnění řídicího děje, kritického tavicího výkonu a specifických ztrát jako funkce podílu příkonu dodaného do vstupní zóny *A* tavicího prostoru 1, při teplotě 1320 °C taveniny vstupující nátokem 7 do vstupní zóny *A* *a* při průměrné teplotě skloviny 1420 °C v celém tavicím prostoru 1. Hodnoty se vztahují k uspořádání topných vertikálních elektrod 2 délky 0,3m, umístěných v podélné ose 11 tavicího prostoru 1.

V Tabulce 1 značí: t teplotu vstupující skloviny; u_D, u_F využití tavicího prostoru 1 pro řídicí děj rozpouštění částic sklářského písku nebo pro řídicí děj odstraňování bublin; τ_{Dave}, τ_{Fref} průměrnou dobu rozpuštění částic sklářského písku nebo referenční dobu pro odstranění bublin; τ_G geometrickou dobu zdržení taveniny v homogenizačním prostoru 1; $\dot{M}_{crit}$ kritický tavicí výkon v kg/s nebo v t/den; A H^L_M specifické ztráty energie v kJ/kg.

Hodnoty kritických tavicích výkonů $\dot{M}_{crit}$ byly získány modelováním tavicích dějů v tavicím prostoru 1 při různých podélných rozloženích energie, tj. při rostoucích hodnotách k_1. Jsou tedy vyneseny jako funkce podílu celkové energie umístěné do vstupní zóny *A* (na prvních 6 elektrod 2) **v obrázku 4,** křivka $\dot{M}_{crit}$ 1320 °C. Do **obrázku 4** byla doplněna i příslušná křivka $\dot{M}_{bal}(k_1)$ při teplotě 1320 °C, která dobře ilustruje vývoj modelových výsledků změnami charakteru proudění při růstu k_1. Při malých k_1 (menší podíl energie dodaný do vstupní části prostoru) jsou kritické výkony $\dot{M}_{crit}$ mnohem vyšší než hodnoty $\dot{M}_{bal}$ díky poměrně rychlé kinetice řídicího děje. Hodnoty $\dot{M}_{crit}$ se tedy pohybují daleko od křivky $\dot{M}_{bal}(k_1)$ a volba malých hodnoty k_1 je proto málo výhodná z hlediska využití tavicího prostoru 1. V tavicím prostoru 1 panuje intenzivní podélné cirkulační proudění s orientací proti směru hodinových ručiček. S rostoucím k_1 se však hodnoty $\dot{M}_{crit}$ přibližují křivce $\dot{M}_{bal}(k_1)$ tj. podélné cirkulace slábnou a proudění se přibližuje uniformnímu typu, tedy jednosměrnému typu proudění. S nástupem uniformního proudění při $k_1 \rightarrow 0{,}8$ roste využití tavicího prostoru 1 (viz Tabulka 1). Proto kritický tavicí výkon progresivně roste, ačkoliv nutné množství dodávané energie ani průměrná teplota v tavicím prostoru 1 se nemění.

Numericky jsou rostoucí hodnoty $\dot{M}_{crit}$ rovněž zřejmé z Tabulky 1. Nejvyšší hodnoty kritického výkonu je dosaženo při podílu příkonu energie umístěného do vstupní zóny *A* rovnému 0,8 (α =4), tj. 626,4 t/den, odpovídající 50,3 t/(m^2.den), jak ukazuje Tabulka 1. Zde je maximální hodnota $\dot{M}_{critmax}$ již velmi blízko křivky $\dot{M}_{bal}(k_1)$. Tomuto případu odpovídá charakter uniformního toku na křivce $\dot{M}_{bal}(k_1)$, jak rovněž ilustruje charakter podélného proudění, znázorněný schematicky na **obrázku 5.** Na tento tok je ještě nabaleno příčné cirkulační proudění vyvolané umístěním elektrod 2 v podélné ose 11, které podporuje výsledný spirálovitý tvar proudění. Teoreticky by se mělo nejvyšších výkonů dosáhnout právě na protnutí křivky spojující hodnoty $\dot{M}_{crit}$ s křivkou $\dot{M}_{bal}(k_1)$, avšak ve skutečnosti je maximální kritický výkon dosahován mírně vlevo od křivky $\dot{M}_{bal}$, kde ještě existuje malá hodnota složky cirkulačního proudění proti směru hodinových ručiček. Ta brzdí příliš rychlou složku dopředného průtočného proudění u hladiny 5 skloviny, kde by se pak objevila nejrychlejší kritická trajektorie omezující tavicí výkon.

Při hodnotách podílu příkonu umístěného do vstupní zóny *A* vyšších než 0,8 (α je vyšší než 4) dochází opět ke strmému poklesu využití i kritického výkonu na **obrázku** 4, neboť se v tavicím prostoru 1 znovu objeví podélné cirkulační proudění. To má směr souhlasný s pohybem hodinových ručiček, je tedy opačného směru, než se ustavilo při nízkých hodnotách podílu příkonu. Fakt je ilustrován hodnotami $\dot{M}_{crit}$ vpravo od křivky $\dot{M}_{bal}(k_1)$. Jak ukazují hodnoty v Tabulce 1, využití tavicího prostoru 1 se mění souběžně s hodnotami výkonu a potvrzují, že změna charakteru proudění má dominantní vliv na kritický tavicí výkon. Vliv kinetiky tavicích dějů na výkon je tedy podřadný, jak je pak zřejmé z prakticky konstantních hodnot referenčních dob v Tabulce 1.

Tabulka 1 rovněž ilustruje v posledním sloupci odpovídající pokles měrných ztrát H^L_M, který se mění v daných případech 1 až 8 při daném uspořádání elektrod 2 téměř 2x.

Jak je zřejmé, znalost a použití křivky $\dot{M}_{bal}$ vymezuje v předstihu oblast výhodných podmínek proudění. Dovoluje i jejich odhad v jiném typu zařízení nebo pro jiný druh skloviny.

Je však možné jiné alternativní neznázorněné uspořádání horizontálních elektrod v bočních stěnách 4 tavicího prostoru 1, např. uspořádaných ve dvojicích proti sobě. Takové alternativní uspořádání elektrod 2 by v podstatě simulovalo uspořádání uvedené v příkladech 2 a 4, co se týče vytvoření podélné tepelné bariéry v podélné ose 11 tavicího prostoru 1, takže lze předpokládat, že i dosažené výsledky si budou velmi podobné.

Příklad 3

Obrázek 6, 7, 8 pro tři příčné řady elektrod 2 tavicího prostoru 1

Tavicí proces byl po konverzi vsázky na taveninu uskutečněn ve stejném tavicím prostoru 1 sklářské tavicí pece, jako v předchozím příkladném provedení, avšak s rozdílným typem otopu, vyobrazeném schematicky na **obrázku 6:** v tavicím prostoru 1 jsou umístěny tři příčné řady topných elektrod 2 – vždy po šesti elektrodách 2 – z nichž první řada vyznačuje oblast vstupní zóny *A* a další dvě řady se nacházejí v homogenizační zóně *B*. První řada se nachází ve vzdálenosti 1,06 m od vnitřní vstupní čelní stěny 6, druhá řada 3,135 m a poslední řada ve vzdálenosti 5,2 m od vnitřní vstupní čelní stěny 6. Pohled shora na uspořádání elektrod 2 je znázorněn na **obrázku 7.** Vstupní zóna *A* má délku 1,3 m a zaujímá tak 21 % celkového tavicího prostoru 1. V tavicím prostoru 1 se taví opět sodnovápenatá sklovina typu float a pro získání kritických výkonů je použit stejný postup modelování, jaký je použit v předchozím příkladu provedení. Výsledky modelování podává Tabulka 2 a příslušné hodnoty kritických výkonů jako funkce podílu energie umístěné do vstupní zóny *A* jsou znázorněny na **obrázku 8.**

Hodnoty kritických tavicích výkonů $\dot{M}_{crit}$ pro tři příčné řady elektrod 2, jsou vyneseny jako funkce podílu příkonu energie k_1 umístěné do vstupní *zóny A* s první příčnou řadou 6 elektrod 2 na **obrázku 8,** další významné hodnoty včetně těchto výkonů jsou uvedeny v následující Tabulce 2.

Tabulka 2

Případ č.	t (°C)	k_1	$\alpha = k_1/(1-k_1)$	u (řídící děj)	τ_{Dave}, τ_{Fref} (s)	τ_G (s)	$\dot{M}_{crit}$ (kg/s) (t/den)	H^L_M (kJ/kg)
1	1320	0,45	0,82	$u_D = 0{,}10$	$\tau_{Dave} = 2253$	22239	1,3 112,3	251,0
2	1320	0,60	1,5	$u_D = 0{,}16$	$\tau_{Dave} = 2224$	13767	2,1 181,4	155,7
3	1320	0,70	2,33	$u_D = 0{,}25$	$\tau_{Dave} = 2170$	8761	3,3 285,1	99,0
4	1320	0,80	4	$u_D = 0{,}35$	$\tau_{Dave} = 2042$	5782	5,0 432,0	65.0
5	1320	0,85	5,67	$u_D = 0.44$	$\tau_{Dave} = 1969$	4448	6,5 561,6	50.3
6	1320	0.90	9	$u_D = 0{,}084$	$\tau_{Dave} = 2032$	24077	1,2 103,7	271,9
7	1320	1.0	-	$u_D = 0{,}075$	$\tau_{Dave} = 1981$	26266	1,1 95,0	296,8

Tabulka 2 ukazuje hodnoty využití tavicího prostoru 1, referenčních dob uskutečnění řídicího děje, geometrické doby zdržení, kritického tavicího výkonu a specifických ztrát jako funkce podílu příkonu energie dodané do vstupní zóny *A* tavicího prostoru 1 při teplotě natékající taveniny 1320 °C. Hodnoty se vztahují k uspořádání topných vertikálních elektrod 2 délky 0,3 m umístěných ve třech příčných řadách ve vzdálenostech 1m, 3,135 m a 5,2 m od vnitřní vstupní čelní stěny 6. V Tabulce 2 jsou uvedeny hodnoty: t – teplota vstupující skloviny, u_D, u_F – využití tavicího prostoru 1 pro řídicí děj rozpouštění částic sklářského písku nebo pro řídicí děj odstraňování bublin, τ_{Dave}, τ_{Fref} průměrná doba rozpuštění částic sklářského písku nebo referenční doba pro odstranění bublin, τ_G geometrická doba zdržení taveniny v tavicím prostoru 1, $\dot{M}_{crit}$ kritický tavicí výkon v kg/s nebo v t/den, H^L_M – specifické ztráty energie v kJ/kg.

Pro informaci pro srovnání s Příkladem 2, je na **obrázku 8** uvedena i výkonová křivka s podélnou řadou elektrod 2 při stejné teplotě natékající taveniny (křivka $\dot{M}_{crit}$, podélná řada elektrod 2). Z Tabulky 2 pro případ 1 je zřejmé, že při podílu příkonu k_1 = 0,45 (α=0,82) je využití tavicího prostoru 1 velmi nízké (u_D = 0,10) a zhruba odpovídá využití v tavicích prostorách 1 průmyslových pecí. A rovněž odpovídající tavicí výkon 1,3 (Příklad 3, Tabulka 2) je podstatně nižší, ve srovnání s tavicím výkonem 5,2 kg/s pro Příklad 2, Případ 1 z Tabulky 1 pro instalaci podélné řady elektrod 2. Se vzrůstajícím podílem příkonu dodávaného do vstupní zóny *A* roste však využívajícího tavicího prostoru 1 u případu s příčnými řadami elektrod 2 strmě a s ním i kritický taviči výkon, který dosahuje maxima při podílu příkonu do vstupní zóny *A* (tj. na první příčnou řadu elektrod 2) rovném 0,85 (α = 5,67). Zde se výkon tavicího prostoru 1 s příčnými řadami elektrod 2 již přibližuje výkonu tavicího prostoru 1 s podélnou řadou elektrod 2, jak ukazuje obrázek 9 i obě Tabulky 1 a 2. Tabulka 2 rovněž prokazuje, že zatímco kritický výkon tavicího prostoru 1 roste souběžně s jeho využitím, průměrné doby rozpuštění sklářského písku se mění jen málo (jen mírně klesají). Za zvyšování kritického výkonu je tedy stejně jako v předchozím příkladu odpovědný měnící se charakter proudění a nikoliv urychlení kinetiky tavicích dějů (využití stoupne 4,4x, zatímco průměrné doby rozpuštění sklářského písku poklesnou pouze faktorem 0,87).

Z **obrázku 8** lze dobře vyhodnotit, že při nižších hodnotách podílu příkonu umístěného do vstupní zóny *A* vykazují tři příčné řady elektrod 2 mnohem nižší hodnoty kritického tavicího výkonu ve srovnání s podélnou řadou elektrod 2. Důvod spočívá v odchylkách zdejšího proudění od ideálního typu, který se ustavuje při "hladkém" tedy rovnoměrném rozmístění energie, myšleno bez větších prostorových výkyvů rozdělení energie v tavicím prostoru 1. Zatímco podélná řada elektrod 2 dle příkladu 2 a 4 **(obrázky 2 až 5, 9 a 10)** umožňuje takové poměrně "hladké", tedy rovnoměrné podélné rozmístění energie, příčné řady elektrod 2 v dle příkladu 3 **(obrázku 6 až 8)** ve své blízkosti vyvolávají lokální podélné cirkulace, které snižují využití tavicího prostoru 1. Výhodou podélné řady elektrod 2 je rovněž fakt, že vyvolává příčné cirkulace taveniny, které podporují výhodné spirálovité proudění. Proto příčné energetické bariéry jsou z hlediska využití tavicího prostoru 1 téměř vždy nevýhodné. Jak ukazuje **obrázek 8,** teprve při vyšších hodnotách podílu příkonu do vstupní zóny *A* jsou výkony obou typů řad elektrod 2 srovnatelné, neboť v obou uspořádáních se již ustavuje proudění podobné uniformnímu, tj. jednosměrnému proudění. Ve světle těchto výsledků je, při nižších hodnotách podílu k_1, tj. podílu příkonu elektrické energie dodávané do vstupní zóny *A* z celkového příkonu do tavicího prostoru 1 (ty odpovídají praktickým případům), výhodné pracovat pouze s podélnými energetickými bariérami. Tento závěr lze uplatňovat obecně.

Příklad 4

Obrázek 9 a 10 pro podélnou řadu elektrod 2 v podélné ose 11 tavicího prostoru 1

Zjišťování optimálního tavicího výkonu bylo provedeno ve stejném modelovém tavicím prostoru 1 jako v předchozích dvou Příkladech 2 a 3. V podélné ose 11 tavicího prostoru 1 bylo stejně jako v Příkladu 2, znázorněno na **obrázku 9,** umístěno 16 vertikálních molybdenových elektrod 2, výšky 0,3 m pro přívod elektrické energie, z nichž prvních 6 elektrod 2_A je umístěno ve vstupní zóně *A* a dalších 10 elektrod 2_B v homogenizační zóně *B* tavicího prostoru 1. Vstupní zóna *A* má délku 2,25 m a zaujímá tak 36 % délky tavicího prostoru 1. Teplota vstupující skloviny s bublinami a nerozpuštěnými částicemi sklářského písku byla 1220 °C. Na **obrázku 10** jsou znázorněny závislosti kritických tavicích výkonů $\dot{M}_{crit}$ a průtoků skloviny $\dot{M}_{bal}$ pro teploty 1200 °C a informativně i hodnoty při 1120 °C. Významné hodnoty pro teplotu 1220 °C jsou uvedeny v Tabulce 3 a odpovídající grafická znázornění jsou zachycena na **obrázku 10.**

Tabulka 3 ukazuje hodnoty využití *u* tavicího prostoru 1, referenčních dob uskutečnění řídicího děje τ_{Dave}, τ_{Fref}, kritického tavicího výkonu $\dot{M}_{crit}$ a specifických ztrát H^L_M jako funkce podílu k_1 příkonu energie dodané do vstupní zóny *A* tavicího prostoru 1 při teplotě vstupující taveniny 1220 °C (1120 °C). Hodnoty se vztahují k uspořádání topných vertikálních elektrod 2, délky 0,3 m umístěných v podélné ose 11 tavicího prostoru 1.

Tabulka 3

případ č.	t (°C)	$k1$	$\alpha = k_1/(1-k_1)$	u (řídící děj)	τ_{Dave}, τ_{Fref} (s)	τ_G (s)	$\dot{M}_{crit}$ (kg/s) (t/den)		H_M^L (kJ/kg)
2	1220	0,60	1,5	$u_F = 0,25$	$\tau_{Fref} = 1877$	7603	3,8	328,3	85,2
4	1220	0,70	2,33	$u_F = 0,28$	$\tau_{Fref} = 1877$	6723	4,3	371,5	75,3
6	1220	0,80	4	$u_F = 0,34$	$\tau_{Fref} = 1889$	5560	5,2	449,3	62,2
8	1220	0,85	5,67	$u_F = 0,35$	$\tau_{Fref} = 1887$	5452	5,3	457,9	61,1
9	1220	0,90	10	$u_D = 0.27$	$\tau_{Dave} = 2141$	7814	3,7	319,7	87,5

V Tabulce 3 jsou uvedeny následující hodnoty: t – teplota vstupující skloviny, u_D, u_F – využití prostoru pro řídicí děj rozpouštění částic sklářského písku nebo pro řídicí děj odstraňování bublin, τ_{Dave}, τ_{Fref} průměrná doba rozpuštění částic sklářského písku nebo referenční doba pro odstranění bublin, τ_G geometrická doba zdržení taveniny v tavicím prostoru 1, $\dot{M}_{crit}$ kritický tavicí výkon v kg/s nebo v t/den, H^L_M – specifické ztráty energie v kJ/kg.

Hodnoty kritických tavicích výkonů $\dot{M}_{crit}$ při vstupní teplotě 1220 °C jsou vyneseny jako funkce podílu příkonu energie umístěné do vstupní zóny A na prvních 6 elektrod 2 dle **obrázku 10,** křivka $\dot{M}_{crit}$, pro podélnou řadu elektrod 2, teplota 1220 °C, a další významné hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 3. Nižší zvolená vstupní teplota je důsledkem předpokladu, že v předchozím vstupní zóně *A* pro konverzi sklářské vsázky na skelnou taveninu bylo na výtoku 9 dosaženo nižší průměrné teploty než v předchozích Příkladech provedení 2 a 3. Do navrhovaného tavicího prostoru 1 je pak třeba dodat větší příkon energie, především do jeho vstupní zóny *A*. Hodnoty $\dot{M}_{crit}$ v **obrázku 10** i v Tabulce 3 vykazují růst s podílem příkonu energie umístěné do vstupní zóny *A* až do hodnoty podílu 0,85 (α = 5,67). Maximální hodnota kritického výkonu, jak je znázorněno v Tabulce 3, Případ 8 a v **obrázku 10** je však o téměř 27 % nižší než v předchozím Příkladu provedení 2 s teplotou nátoku taveniny 1320 °C, jak je ukázáno v **obrázku 4** a Tabulce 1, Případ 5. Tato skutečnost rovněž odráží fakt odchylek proudění od ideálního typu. Při nižší nátokové teplotě taveniny vznikají zejména ve vstupní zóně *A* tavicího prostoru 1 velké podélné teplotní gradienty, které vyvolají místní podélné cirkulační proudění a i při celkově vyrovnaném podélném rozložení energie sníží využití tavicího prostoru 1.

Podobnou skutečnost odráží i maximální hodnota kritického výkonu při teplotě nátoku taveniny 1120 °C, která je rovněž vynesena v **obrázku 10** jako křivka $\dot{M}_{crit}$, pro podélnou řadu elektrod 2 pro 1120 °C. Ta vykazuje pokles o téměř 41% vzhledem k maximální hodnotě výkonu při nátokové teplotě 1320 °C. Hodnoty kritických tavicích výkonů tedy klesají s klesající nátokovou teplotou taveniny v celém intervalu podílů příkonu do vstupní zóny *A*, strmost křivek však na velikosti vstupní teploty příliš nezávisí, jak vyplývá z **obrázku 10.** Hodnoty využití i kritických výkonů jsou však stále dostatečně vysoké. V obou případech se nacházejí maximální hodnoty kritických výkonů mírně vlevo od příslušné křivky $\dot{M}_{bal}(k_1)$ při teplotách 1220 °C nebo 1120 °C, stejně jako v případě vstupní teploty taveniny 1320 °C (viz pro srovnání **obrázek 6).**

Uvedené příklady ukazují, že navržený tavicí prostor 1 a získané podmínky jeho provozování plní svoji roli uskutečnit současně oba taviči děje při vysokých kritických tavičích výkonech.

Průmyslová využitelnost

Řešení se týká tavicího prostoru 1 kontinuální sklářské tavicí pece, otápěného topnými elektrodami 2 a způsobu tavení skla v tomto tavicím prostoru 1 za účelem maximálního využití tavicího prostoru pro tavicí děje.

Citované dokumenty

1. Beerkens R.: Inventory of advanced glass melting concepts suitable for container glass production. Celsian's report (2013).
2. Beerkens R: Modular melting, Amer. Cer. Soc. Bull *73* (7), 35 (2004).
3. Bender D.J., Hnat J.G., Litka A.F., Donaldson Jr. L.W., Ridderbush G.K., Tessari D.J.. Sacks J.R.: Glass Industry (3), 10–37 (1991).
4. Sakamoto O.: Res. Report Asahi Glass Co. Ltd. 59, 55060 (2009).
5. Němec L., Cincibusová P.: Glass melting and its innovation potentials: The potential role of glass flow in the sand dissolution process. Ceramics–Silikáty 2009, **53** (3), 145–155.
6. Němec L.. Cincibusová P.: Glass melting and its innovation potentials: The role of glass flow in the bubble removal process. Ceramics-Silikáty 2008. **52** (4). 240-249.
7. Polák M., Němec L.: Mathematical modelling of sand dissolution in a glass melting channel with controlled melt flow. J. Non-Cryst. Solids 2012, **358,** 1210-1216.
8. Cincibusová P., Němec L.: Sand dissolution and bubble removal in a model glass-melting channel with melt circulation. Glass Technok: Eur. J. Glass Sci. Technol. A 2012, **53** (4). 150–157.
9. Němec L., Cincibusová P.: Sand dissolution and bubble removal in a model glass melting channel with a uniform melt flow. Glass Technok: Eur. J. Glass Sci. Technol. A 2012, **53** (6), 279–286.
10. Jebavá M., Němec L.: The role of glass melt flow in a container furnace examined by mathematical modelling. Zasláno do Jour. of Non–Cryst. Solids (2017).
11. CZ 304 703 (3.9.2014) Vysoká škola chemicko–technologická v Praze, Ústav struktury a mechaniky hornin AVČR, v.v.i, Glass Service, a.s.,: Polák M.. Němec L..Cincibusová P., Jebavá M., Brada J., Trochta M: Sklářská taviči pec pro kontinuální tavení řízenou konvekcí skloviny.
12. CZ 304 432 (1.10.2014) Vysoká škola chemicko–technologická v Praze, Ustav struktury a mechaniky hornin AVČR, v.v.i, Glass Service, a.s.: Polák ML, Němec L.,Cincibusová P., Jebavá M., Brada .1., Trochta M. Polák M., Němec L., Cincibusová P., Jebavá M., Brada J., Trochta M : Způsob kontinuálního tavení skel řízenou konvekcí skloviny.
13. US 3 268 320 A3 (Penberthy H.L., 23. 8. 1966): Glass Furnace with means to agitate the molten glass.
14. GB 693 072 A (Saint Gobain. 24. 6. 1953): Improvements in furnaces operating with a liquid bath.
15. GB 1 506 060 A (Státní výzkumný ústav sklářský. 5. 4. 1978): Electric furnace for melting glass.
16. Polák M., Němec L: Glass melting and its innovation potentials: The combination of transversal and longitudinal circulations and its influence on space utilization. J.Non–Cryst. Solids 2011, **357**, 3108–3116.

PATENTOVÉ NÁROKY

1. Tavicí prostor kontinuální sklářské tavicí pece, elektricky otápěný topnými elektrodami (2), prostorově vymezený dnem (3), protilehlými bočními stěnami (4), hladinou (5) skloviny a čelní stěnou (6) s nátokem (7) skloviny a zadní stěnou (8) s výtokem (9) skloviny, přičemž elektrody

(2) jsou uspořádané ve dně (3) nebo bočních stěnách (4) pro vytvoření podélné nebo příčné tepelné bariéry ve sklovině,

vyznačující se tím, že

zahrnuje vstupní zónu *A* s nátokem (7) skloviny a homogenizační zónu *B* s výtokem (9) skloviny, přitom vstupní *zóna A* zaujímá 1/10 až 1/2 z celkové délky tavicího prostoru (1) ve směru podélné osy (11) tavicího prostoru (1);

vstupní zóna *A* obsahuje uspořádání topných elektrod (2_A) s 3x až 7x vyšším elektrickým příkonem, než je příkon topných elektrod (2_B) v zóně *B* pro dosažení maximálního tavicího výkonu v tavicím prostoru (1);

má vytvořeno rozhraní (10) mezi topnými elektrodami (2_A, 2_B) zóny fazóny *B;* a

má poměr α_{max} elektrického příkonu přiváděného do topných elektrod (2_A) zóny *A* k elektrickému příkonu přiváděnému do topných elektrod (2_B) zóny *B,* který v podstatě lineárně stoupá od nejnižší hodnoty 3 při teplotním rozdílu 50 °C mezi teplotou natékající skloviny do zóny *A a* průměrnou teplotou skloviny v celém tavicím prostoru (1) až k hodnotě 7 při teplotním rozdílu 300 °C, a to pro dosažení maximálním tavicím výkonu $\dot{M}_{critmax}$ v celém tavicím prostoru (1) při minimálních specifických tepelných ztrátách, H^L_M.

2. Tavicí prostor kontinuální sklářské tavicí pece podle nároku 1, **vyznačující se tím,** že vstupní zóna *A* zaujímá 1/5 až. 2/5 celkové délky tavicího prostoru (1) ve směru podélné osy (11) tavicího prostoru (1).

3. Způsob tavení skloviny v tavicím prostoru kontinuální sklářské tavicí pece podle nároku 1 nebo 2, **vyznačující se tím,** že

do vstupní zóny *A* se přivádí na topné elektrody (2_A) elektrický příkon 3x až 7x vyšší, než je elektrický příkon, který se přivádí do topných elektrod (2_B) homogenizační zóny ***B,*** přičemž teplota t vstupující skloviny do zóny *A* je o 50 až 300 °C nižší, než je průměrná teplota skloviny v celém tavicím prostoru (1) pro dosažení maximálního kritického tavicího výkonu $\dot{M}_{critmax}$ při minimálních specifických tepelných ztrátách H^L_M v celém tavicím prostoru (1).

4. Způsob tavení skloviny v tavicím prostoru kontinuální sklářské tavicí pece podle nároku 3, **vyznačující se tím,** že

při vstupní teplotě 1320 °C se do vstupní zóny *A* přivádí na topné elektrody (2_A) elektrický příkon 4x vyšší, než je elektrický příkon, přiváděný do topných elektrod (2_B) homogenizační zóny ***B,*** při maximálním kritickém tavicím výkonu $\dot{M}_{critmax}$ 626,4 t/den (7,25 kg/s), tj. 50,3 t/(m^2.den) a při minimálních specifických tepelných ztrátách H^L_M 45,9 kJ/kg vyrobeného skla, přičemž teplota t vstupující skloviny do zóny *A* je o 100 °C nižší, než je průměrná teplota skloviny 1420 °C v celém tavicím prostoru (1), osazeném řadou vertikálních elektrod (2_A, 2_B) umístěných v podélné ose (11) tavicího prostoru (1).

5. Způsob tavení skloviny v tavicím prostoru kontinuální sklářské tavicí pece podle nároku 3, **vyznačující se tím,** že

při vstupní teplotě 1320 °C se do vstupní zóny *A* přivádí na topné elektrody (2_A) elektrický příkon 5,67x vyšší, než je elektrický příkon, přiváděný do topných elektrod (2_B) homogenizační zóny B, při maximálním kritickém tavicím výkonu $\dot{M}_{critmax}$ 561,6 t/den (6,5 kg/s), tj. 45,1 t/(m^2.den) a při minimálních specifických tepelných ztrátách H^L_M 50,3 kJ/kg vyrobeného skla, přičemž teplota vstupující skloviny do zóny *A* je o 100 °C nižší, než je průměrná teplota skloviny 1420 °C v celém tavicím prostoru (1), osazeném řadou vertikálních elektrod (2_A, 2_B)

umístěných ve třech paralelních příčných řadách (2_B, 2_B) tavicího prostoru (1), umístěných v odstupu od vnitřní čelní stěny 1 m, 3,135 m a 5,2 m.

6. Způsob tavení skloviny v tavicím prostoru kontinuální sklářské tavicí pece podle nároku 3, **vyznačující se tím,** že

při vstupní teplotě 1220 °C se do vstupní zóny *A* přivádí na topné elektrody (2_A) elektrický příkon 5,67x vyšší, *než* je elektrický příkon, přiváděný do topných elektrod (2_B) homogenizační zóny *B*, při maximálním kritickém tavicím výkonu $\dot{M}_{critmax}$ odpovídajícím hodnotě 457,9 t/den (5,3 kg/s), tj. 36,8 t/(m^2.den) a při minimálních specifických tepelných ztrátách H^L_M 61,1 kJ/kg vyrobeného skla, přičemž teplota vstupující skloviny do zóny *A* je o 200 °C nižší, než je průměrná teplota skloviny 1420 °C v celém tavicím prostoru (1), osazeném řadou vertikálních elektrod ((2_A, 2_B) umístěných v podélné ose (11) tavicího prostoru (1).

7. Způsob tavení skloviny v tavicím prostoru kontinuální sklářské tavicí pece podle některého z nároků 3 až 6, **vyznačující se tím,** že

v tavicím prostoru (1) se dosahuje maximální kritický tavicí výkon $\dot{M}_{critmax}$ $[kg/s]$ skloviny, vyjádřený semiempirickým experimentálně odzkoušeným vztahem

$$\dot{M}_{critmax} = 1{,}25\,\frac{\dot{H}^{L}\left(\frac{\alpha_{max}}{1+\alpha_{max}}-\xi\right)}{c_p\Delta t\left(1-\frac{\alpha_{max}}{1+\alpha_{max}}\right)}$$

kde představuje:

$\dot{H}^L$ [J/s] celkový tok tepelných ztrát všemi krajními rozhraními tavicího prostoru (1), přičemž krajní rozhraní skloviny představují hladina (5) skloviny, sklovina ve styku se dnem (3), s bočními stěnami (4), s čelní stěnou (6) a se zadní stěnou (8);

c_p [J/(kg°C)] průměrné měrné teplo skloviny;

Δt [°C] teplotní rozdíl mezi průměrnou teplotou skloviny v celém tavicím prostoru a teplotou vstupující skloviny je 50 až 300 °C;

ξ podíl tepelných ztrát vykazovaných vstupní zónou *A;*

α_{max} poměr mezi elektrickým příkonem topných elektrod (2_A) vstupní zóny *A* a příkonem topných elektrod (2_B) homogenizační zóny *B* při maximálním výkonu $\dot{M}_{critmax}$;

přičemž platí pro hodnotu

$\alpha_{max} = k_{1max} /(1–k_{1max}) = 2{,}25 + 0{,}0125\Delta t$, kde představuje

k_{1max} podíl příkonu elektrické energie z celkového příkonu do topných elektrod (2_A) ve vstupní zóně ***A*** tavicího prostoru (1) při maximálním kritickém výkonu $\dot{M}_{critmax}$.

8. Způsob tavení skloviny v tavicím prostoru kontinuální sklářské tavicí pece podle některého z nároků 3 až 6, **vyznačující se tím,** že

v tavicím prostoru (1) se při vyrovnaném rozmístění energie dosahuje hmotového průtoku $\dot{M}_{bal}$ [kg/s] skloviny vyjádřeného odvozeným vztahem

$$\dot{M}_{bal} = \frac{\dot{H}^L(k_1-\xi)}{H_M^T(1-k_1)}$$

kde představuje:

$\dot{\mathbf{H}}^{\mathbf{L}}$ **[J**/s] celkový tok tepelných ztrát všemi rozhraními skloviny v tavicím prostoru (1), přičemž krajní rozhraní skloviny představuje hladina (5) skloviny, sklovina ve styku se dnem (3), s bočními stěnami (4), s čelní stěnou (6) a se zadní stěnou (8);

ξ podíl tepelných ztrát vykazovaných vstupní zónou A;

H^T_M [J/kg] specifické teplo pro ohřátí skloviny v tavicím prostoru (1) na průměrnou teplotu skloviny; a

$\boldsymbol{k_1}$ podíl elektrického příkonu do topných elektrod (2_A) vstupní zóny ***A*.**

9. Způsob tavení skloviny v tavicím prostoru kontinuální sklářské tavicí pece podle některého z nároků 3 až 7, **vyznačující se tím,** že

v tavicím prostoru (1) se dosahují minimální specifické tepelné ztráty H^L_M **[J**/kg] ve sklovině, vyjádřené vztahem

$$H_M^L = \frac{\dot{H}^L}{\dot{M}_{crit}}$$

kde představuje:

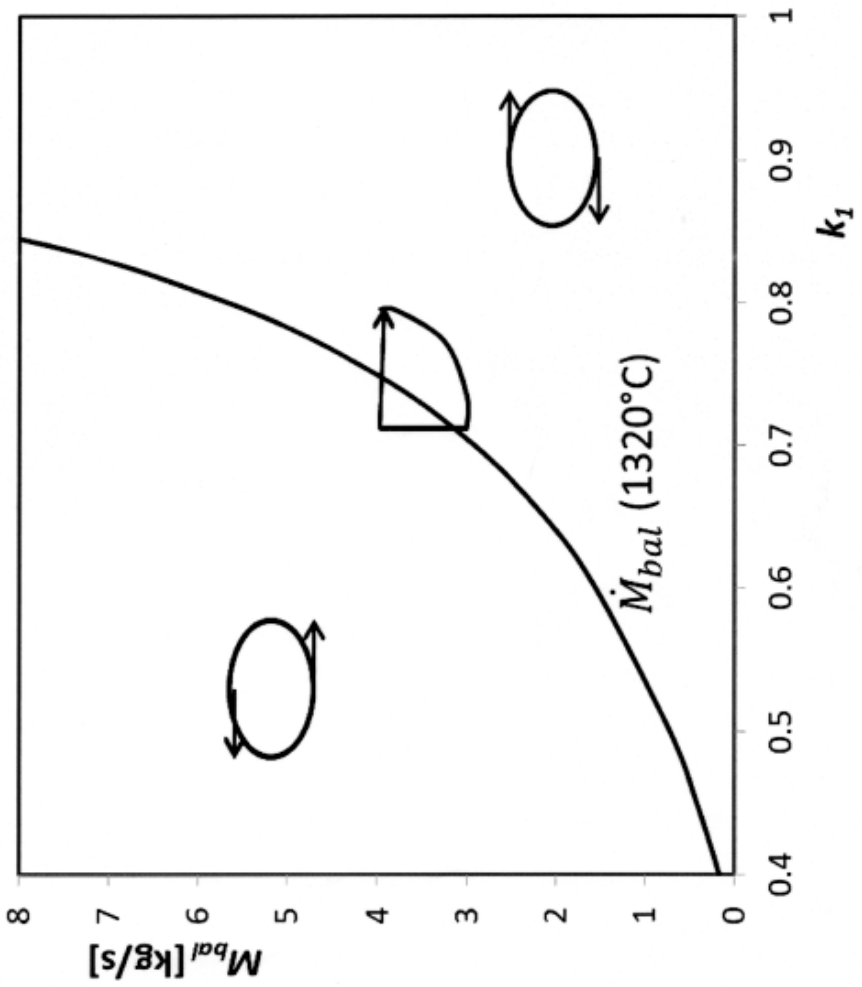
$\dot{H}^L$ [J/s] celkový tok tepelných ztrát všemi krajními rozhraními skloviny v tavicím prostoru (1), přičemž krajní rozhraní skloviny představují hladina (5) skloviny, styk skloviny se dnem (3), s bočními stěnami (4), s čelní stěnou (6) a se zadní stěnou (8); a

$\dot{M}_{crit}$ *[kg/s]* kritický tavicí výkon.

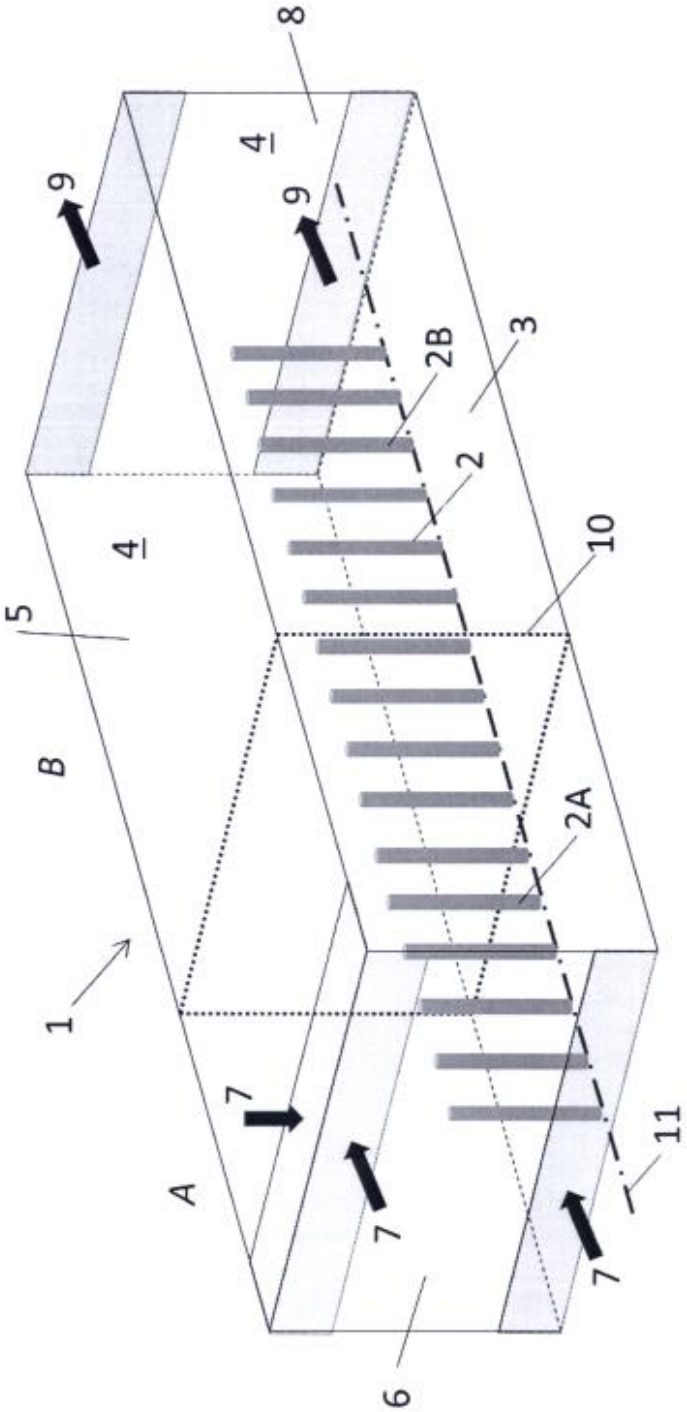
10 výkresů

Seznam vztahových značek:

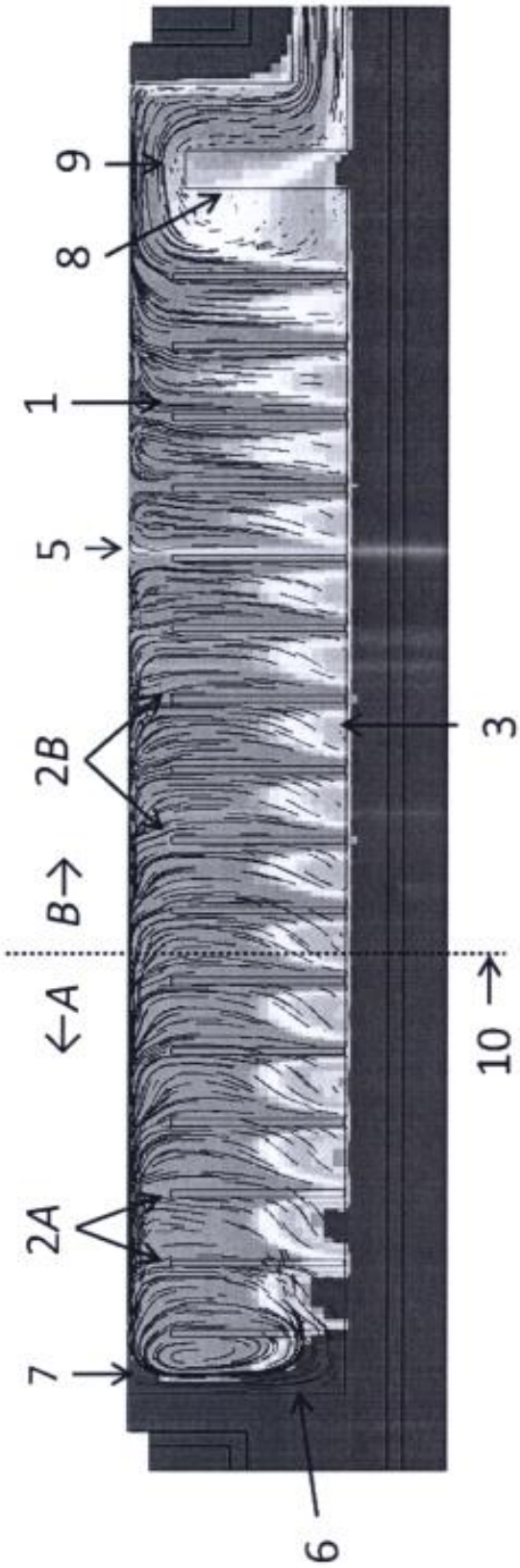
1 tavicí prostor
2 elektrody
2A elektrody ve vstupní zóně A
2B elektrody v homogenizační zóně B
3 dno
4 boční stěny
5 hladina 5 skloviny
6 čelní stěna
7 nátok 7 skloviny v čelní stěně 6
8 zadní stěna
9 výtok 9 skloviny v zadní stěně 8
10 rozhraní 10 mezi zónou *A* a zónou *B*
11 podélná osa
A vstupní zóna
B homogenizační zóna



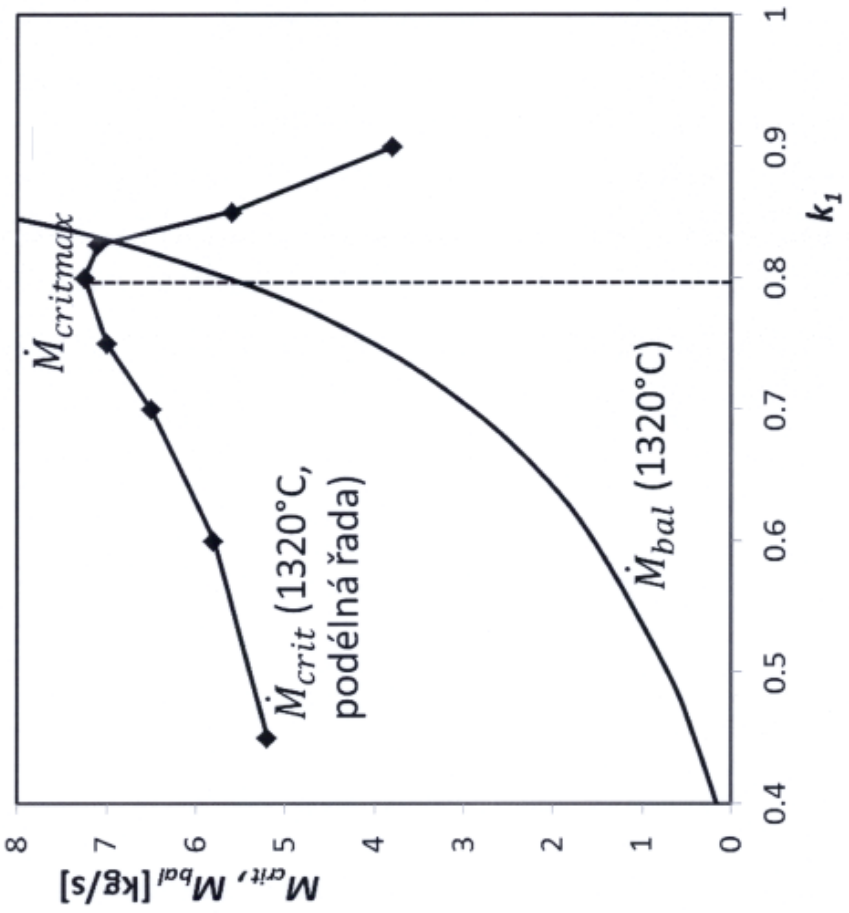
Obr. 1



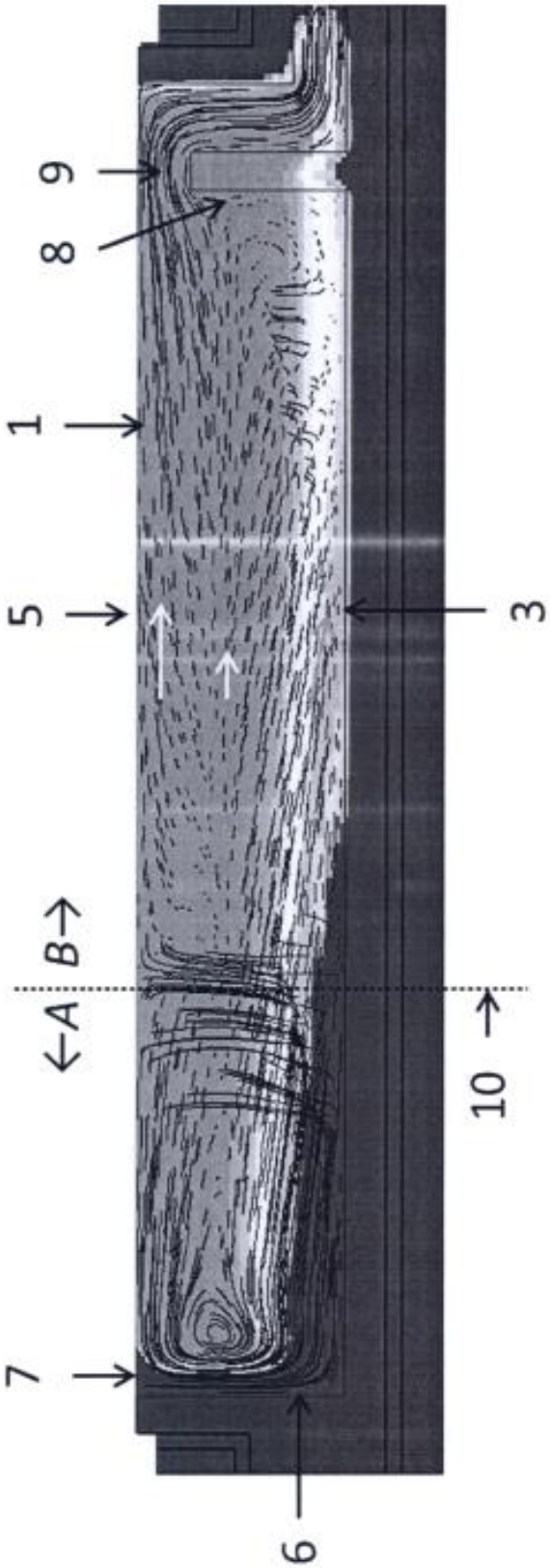
Obr. 2



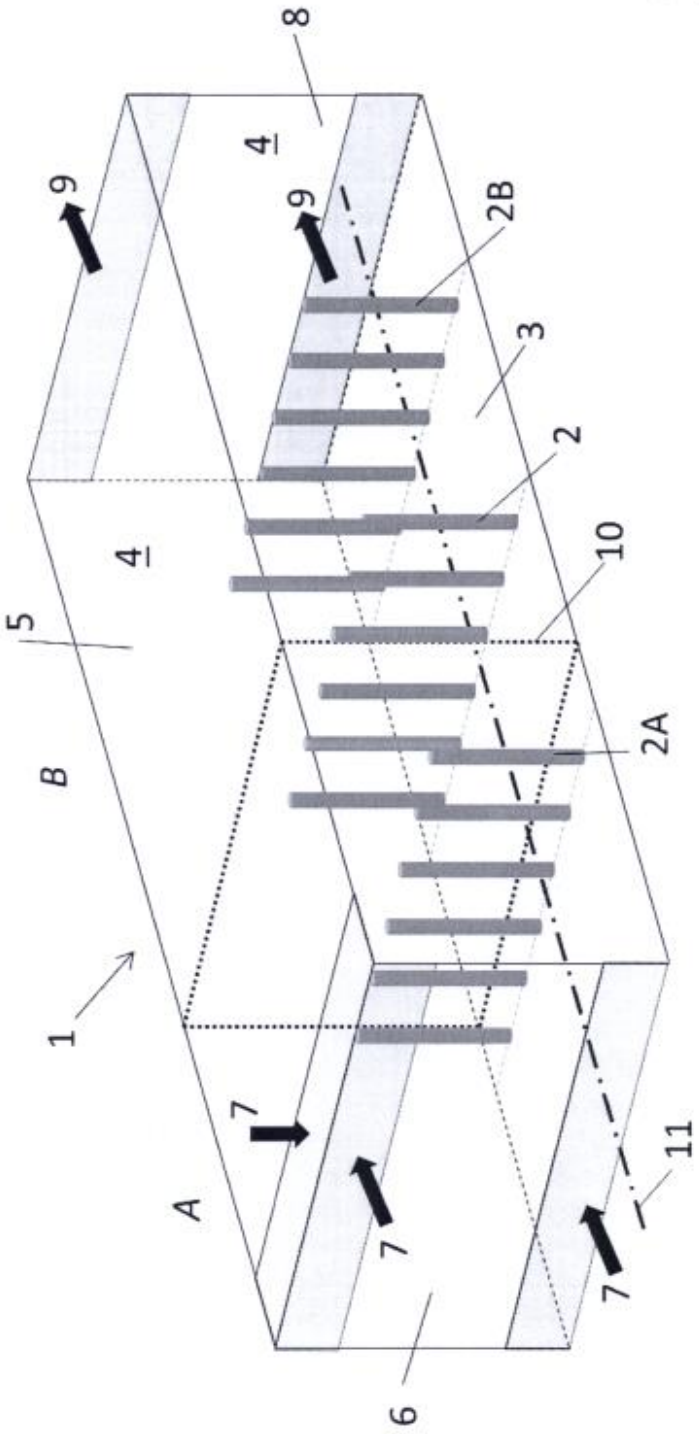
Obr. 3


$\dot{M}_{critmax}$
$\dot{M}_{crit}$ (1320°C, podélná řada)
$\dot{M}_{bal}$ (1320°C)
M_{crit}, M_{bal} [kg/s]
k_1
0
1
2
3
4
5
6
7
8
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1

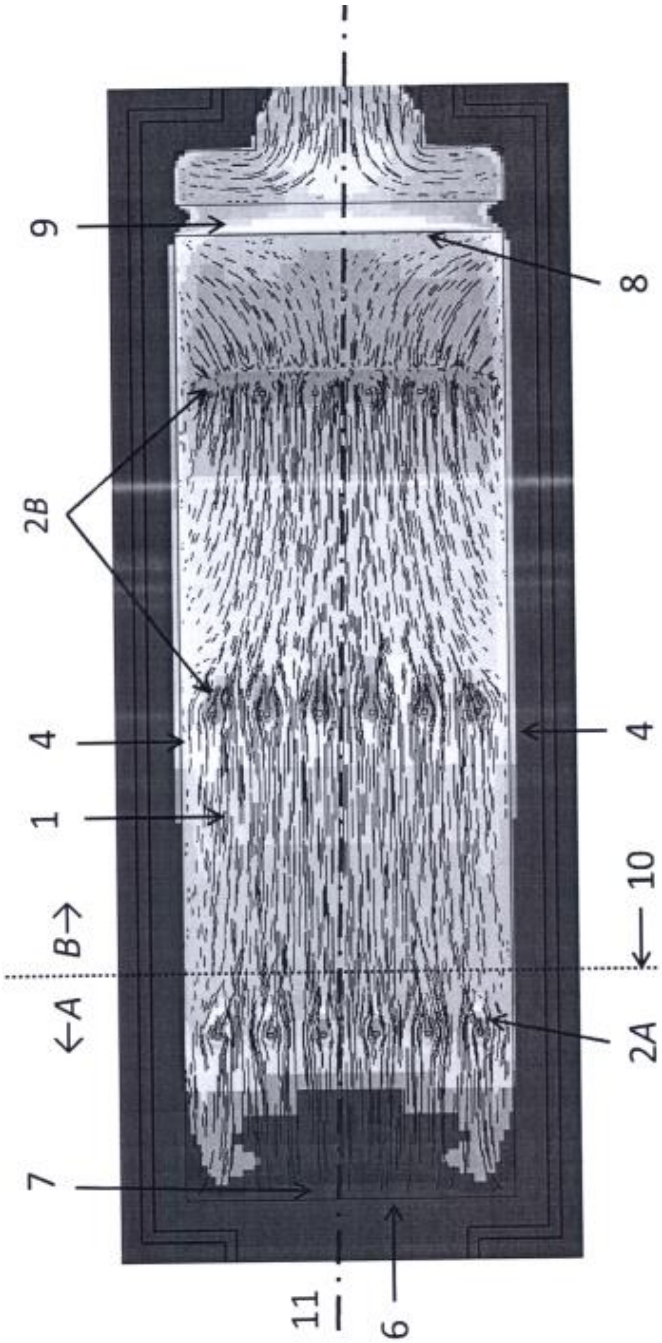
Obr. 4



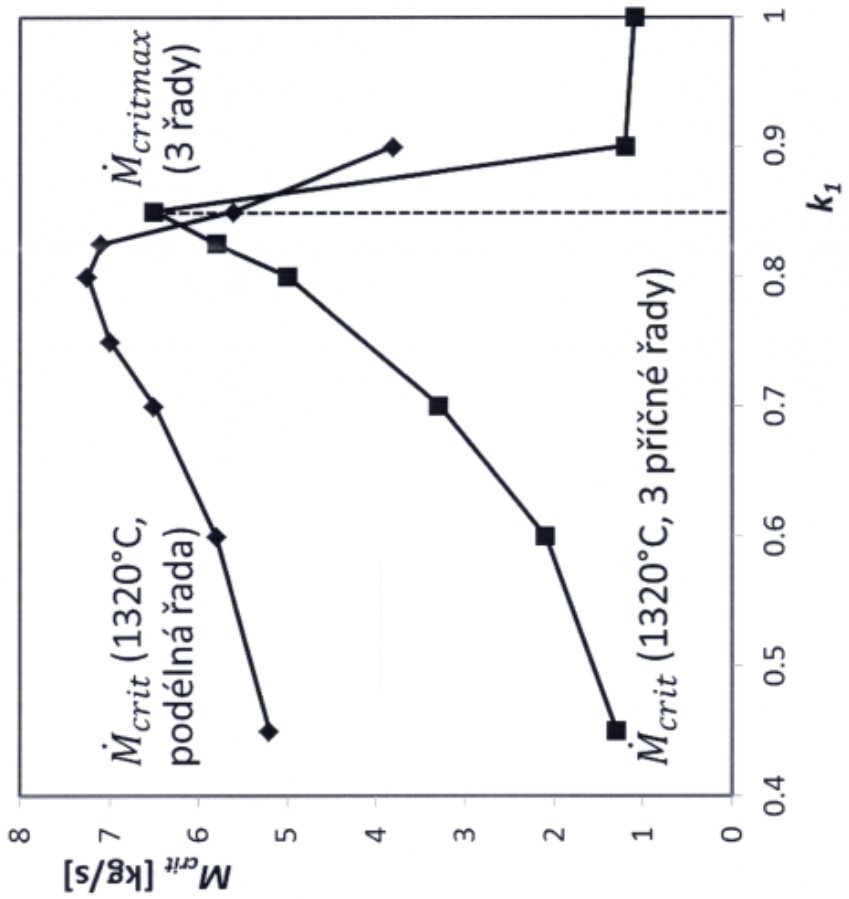
Obr. 5



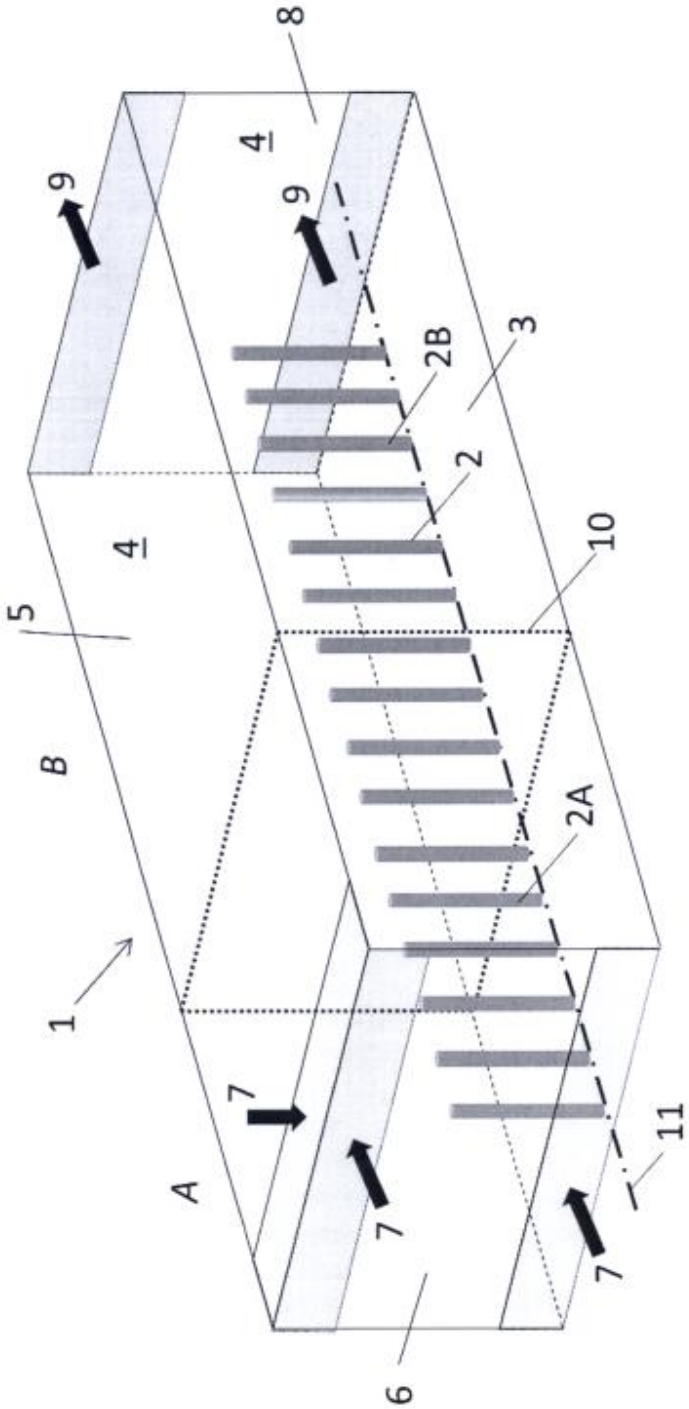
Obr. 6



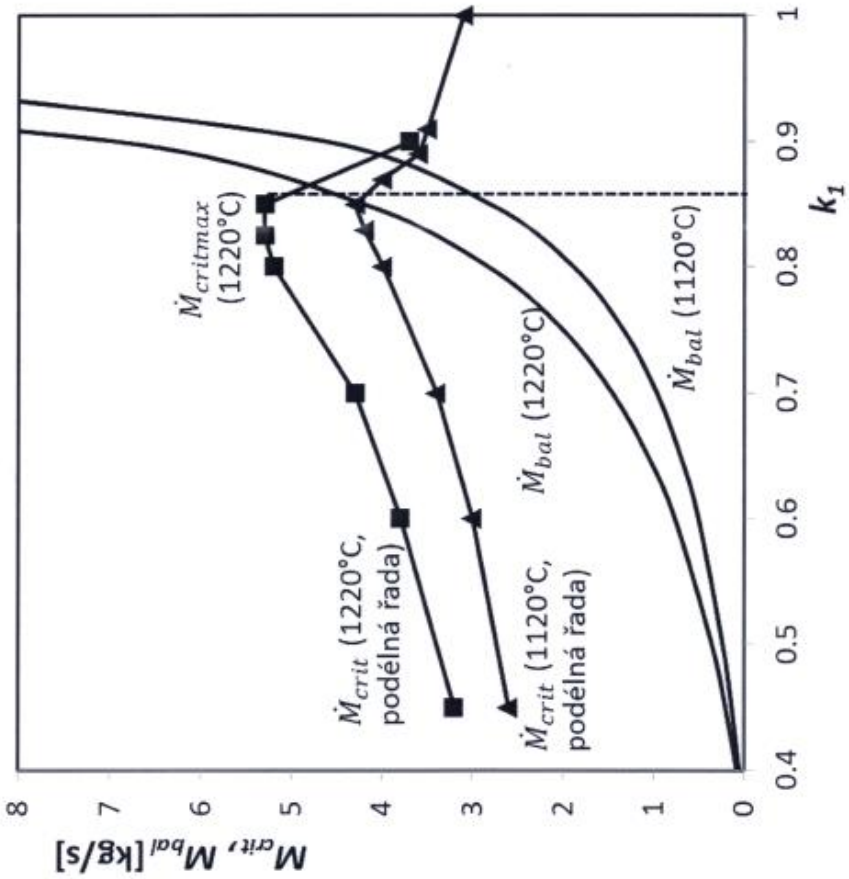
Obr. 7


$\dot{M}_{crit}$ (1320°C, podélná řada)
$\dot{M}_{critmax}$ (3 řady)
$\dot{M}_{crit}$ (1320°C, 3 příčné řady)
M_{crit} [kg/s]
k_1
0
1
2
3
4
5
6
7
8
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1

Obr. 8



Obr. 9


$\dot{M}_{critmax}$ (1220°C)
$\dot{M}_{crit}$ (1220°C, podélná řada)
$\dot{M}_{crit}$ (1120°C, podélná řada)
$\dot{M}_{bal}$ (1220°C)
$\dot{M}_{bal}$ (1120°C)
M_{crit}, M_{bal} [kg/s]
k_1
0
1
2
3
4
5
6
7
8
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1

Obr. 10