

UŽITNÝ VZOR

(11) Číslo dokumentu:

34 697

(13) Druh dokumentu: **U1**

(51) Int. Cl.:

C03B 5/027

(2006.01)

(19)
ČESKÁ
REPUBLIKA



ÚŘAD
PRŮMYSLOVÉHO
VLASTNICTVÍ

(21) Číslo přihlášky: **2020-38289**
(22) Přihlášeno: **30.11.2020**
(47) Zapsáno: **22.12.2020**

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

(72) Původce:
prof. Ing. Lubomír Němec, DrSc., Praha 1, CZ
Ing. Marcela Jebavá, Ph.D., Praha 6, Střešovice, CZ
Ing. Petra Cincibusová, Ph.D., Kostelec nad Labem,
CZ
Ing. Pavel Budík, Vsetín, CZ
Ing. Vladislava Tonarová, Ph.D., Čerčany, CZ

(74) Zástupce:
Ing. Marie Smrčková, patentový zástupce,
Velflíkova 1431/10, 160 00 Praha 6, Dejvice

(54) Název užitého vzoru:
Sklářská tavicí pec

Sklářská tavicí pec

Oblast techniky

5

Technické řešení se týká sklářské tavicí pec s horizontálním pracovním tokem taveniny ve směru její podélné osy. Sklářská tavicí pec zahrnuje ve směru podélné osy úvodní konverzní region pro provádění konverze sklářské vsázky na skelnou taveninu a na něj navazující homogenizační region pro homogenizaci skelné taveniny. Konverzní region je opatřen vstupy pro sklářskou vsázku a je osazen elektrodami a/nebo hořáky. Homogenizační region je osazen elektrodami nebo hořáky a je vybaven výstupem taveniny.

10

Dosavadní stav techniky

15

Kontinuální sklářské tavicí pece s horizontálním průtokem taveniny rovněž obsahují vstupní (konverzní) oblast s vrstvou vsázky na hladině a homogenizační oblast, v níž se postupně dokončují tavicí děje, především rozpuštění sklářského písku a poté odstranění bublin [5]. Jejich měrný výkon se obvykle pohybuje mezi 2 až 3 $\text{tm}^{-2}\text{den}^{-1}$, u špičkových zařízení, obvykle s elektrickým přehřevem, až 4 $\text{tm}^{-2}\text{den}^{-1}$ [6]. Problémem těchto pecí bývá nízká konverzní rychlost vsázky především v důsledku málo intenzivního transportu tepla dovnitř vsázky a výsledná pomalá kinetika konverze [3] a rozsáhlá homogenizační oblast s dalším posláním. Tímto posláním je dodávka části energie nutné pro konverzi vsázky zpětným cirkulačním tokem taveniny; v důsledku tohoto recirkulačního toku vznikají v homogenizační oblasti velké objemy taveniny nevyužité pro uskutečnění homogenizačních dějů. Pro dosažení dostatečné homogenizační kapacity je potom třeba, aby byla homogenizační oblast rozsáhlá [5,7], ale výsledné specifické výkony pece jsou následkem toho poměrně nízké.

20

25

Uvedené nízké konverzní rychlosti vsázky na sklo v konverzní oblasti se řeší urychlením kinetiky procesu konverze, především zlepšením transportu tepla do vrstvy vsázky optimalizováním spalovacího procesu, řízeným ohřevem taveniny např. elektrickým přehřevem [8] nebo optimalizací mechanismů konverze [9].

30

Zmíněný problém velké homogenizační oblasti a jejího nízkého využití pro homogenizační děje je problém faktoru tavicího procesu, který lze nazvat *cestou* procesu. Kontinuální tavicí proces není ovlivněn jen kinetikou a řazením jednotlivých tavicích dějů, ale rovněž způsobem průchodu, *cestou* homogenizující se taveniny daným tavicím prostorem. Cesta tavicího procesu je obecně vysvětlena charakterem postupu vsázky a proudění taveniny v tomto prostoru a je známo, že způsob průchodu taveniny určuje využití tohoto prostoru pro jednotlivé děje, a tedy i efektivitu tavicího procesu.

35

První způsob vedoucí ke zvýšení využití aplikuje separaci průběhů jednotlivých tavicích dějů do příslušných oddělených prostorů, příkladem je Beerkensova segmentová tavicí pec [10]. Rozdělením pece na více malých prostorů podle jednotlivých dějů se zlepší podmínky pro jejich provozování a předejde se zpětným tokům taveniny z aktuálního do předešlého prostoru, takže se oblasti nevyužité pro vlastní tavicí proces netvoří. Obecně vznikají však složitá zařízení s náročnou koordinací dějů v jednotlivých částech. Kvalitní cesta procesu není ve všech segmentech zajištěna.

40

Druhý přístup popisuje CZ 307 659 [17]. Jedná se o separátní tavicí prostor kontinuální tavicí pece bez vrstvy vsázky a s nátokem skla s nehomogenitami a o způsob tavení skla v tomto prostoru. Tavicí proces je v prostoru rozdělen rozložením topné energie na dvě části a poměrem mezi dodávanými energiemi se ovlivňuje proudění v homogenizačním regionu tavicího prostoru tak, aby se omezily, případně úplně odstranily jeho neúčinné oblasti a homogenizační kapacita prostoru se podstatně zvýšila. Na rozdíl od segmentových pecí zde oba homogenizační děje, rozpouštění a odstraňování bublin (čeření), probíhají paralelně. To umožní provozovat s vysokým výkonem menší prostor.

50

55

V CZ 307 659 [17] a [1, 2] byla zavedena relativní veličina nazvaná *využití tavicího prostoru*, která umožňuje kvantifikovat kvalitu proudění vzhledem k průběhu tavicího procesu a je poměrem mezi referenční dobou uskutečnění daného řídicího děje např. v laboratorních kelímkových tavnách a geometrickou dobou zdržení taveniny v prostoru rovnou podílu objemu prostoru a objemového průtoku taveniny prostorem. Tato veličina vykazuje hodnotu 1 pro pístový tok, hodnotu mezi 0,45 až 0,65 pro uniformní tok [11] a dosahuje hodnot 0,6 až 0,8 pro nastolený spirálový tok [12, 13, 14]. Nastolení spirálového toku ve sklářském tavicím prostoru uvádí české patenty [15, 16]. Naproti tomu bylo zjištěné využití tavicího prostoru pro průmyslově provozovanou sklářskou pec s vrstvou vsázky na hladině velmi nízké, a to mezi 0,05 až 0,10 [3], v důsledku mohutného zpětného cirkulačního proudění, specifický výkon se zde pohyboval mezi 2,3 až 4,6 t/m³den. Matematickým modelováním homogenizačního modulu se vstupem skelné taveniny obsahující písková zrna i bubliny a s řízeným prouděním se pak podařilo dosáhnout toku podobnému uniformnímu toku, který vykazoval hodnotu využití až 0,5 a tavicí výkon až více než 500 t/den a specifický výkon běžně větší než 30 t/m³den [4]. Takového kontrolovaného proudění taveniny s vysokým využitím se dosáhlo vhodnou prostorovou distribucí topné energie. Rozměr modelovaného homogenizačního modulu s řízeným prouděním byl přitom podstatně menší než průmyslový tavicí prostor a pohyboval se kolem 12,5 m³ oproti celkovému objemu tavicí části průmyslové pece dosahujícího 100 m³ [3]. Podmínky provozování tohoto homogenizačního modulu popisuje tavicí prostor kontinuální sklářské tavicí pece [18, 19, 20, 21].

Při následném uvažování zahrnutí děje konverze vsázky procesu se tedy jevílo jako logické uvažovat spojení uvedeného výkonného homogenizačního modulu s vhodným typem regionu pro konverzi sklářské vsázky. V literatuře uváděné rychlosti konverze vsázky na skelnou taveninu se však pohybovaly v nízkých hodnotách mezi 0,05 až 0,1 kgm⁻²s⁻¹, rozměry konverzního regionu by v peci s výkonem odpovídajícím výkonu homogenizačního modulu s řízeným prouděním dosahovaly značných rozměrů. Bylo tedy třeba navrhnout konverzní region s masivním ale technicky proveditelným otopem, jehož konverzní výkon by se přibližoval homogenizačnímu výkonu homogenizačního modulu nebo alespoň podstatně převyšoval běžně dosahované konverzní výkony. Takový konverzní region byl navržen využitím otopného systému vertikálních elektrod a vertikálních hořáků a matematickým modelováním bylo zjištěno, že lze dosáhnout vysokých hodnot kolem 0,25 kg⁻²s⁻¹. Na navržený konverzní region byl udělen užitečný vzor [22] a je i předmětem současně podané přihlášky vynálezu. Vysoké konverzní rychlosti umožňují dosáhnout menšího rozměru konverzního prostoru.

Cílem tohoto technického řešení je oba regiony, konverzní a homogenní prostorově propojit, nastavit optimálně příkony obou typů energií do pece a zachovat citlivě nastavené proudění v homogenizačním regionu a nalézt sladěný konverzní a homogenizační výkon při maximálním využití tavicího prostoru pece.

Literatura:

- [1] L. Němec, P. Cincibusová, *Ceramics-Silikáty* 53 (2009) 145-155.
- [2] L. Němec, P. Cincibusová, *Ceramics-Silikáty* 52 (2008) 240-249.
- [3] M. Jebavá, L. Němec, *Ceramics-Silikáty* 62 (2018) 86-96.
<https://doi.org/10.13168/cs.2017.0049>
- [4] L. Hrbek, M. Jebavá, L. Němec, J. Non-Cryst. Solids 482 (2018) 30-39.
<https://doi.org/10.1016/j.inoncrsol.2017.12.009>
- [5] W. Trier: *Glassschmelzöfen*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo 1984.
- [6] A. Smrček a kol.: *Tavení skla*. Česká sklářská společnost o.s. Jablonec nad Nisou 2008,

str. 280.

- [7] Z. Zhiquiang, Y. Zhihao. Basic flow pattern and its variation in different types in glass tank furnaces, *Glast. Ber. Glass Sei. Technol.* 70 (1997), (6) 165-172.
- [8] J. Staněk: Elektrické tavení skla, SNTL Praha 1986.
- [9] A. Paul: Chemistry of Glasses, Chapter 5, P. Hrma. Batch melting reactions. Chapman & Hall, second edition (1990).
- [10] R. Beerkens, Modular melting. *Amer. Cer. Soc. Bull.* 73 (2004), (7), 35.
- [11] L. Němec, P. Cincibusová, *Glass Technol.: Eur. J. Glass Sei. Technol. A* 53 (2012) 279-286.
- [12] M. Polák, L. Němec, *J. Non-Cryst. Solids* 357 (2011) 3108-3116.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2011.04.020>
- [13] M. Polák, L. Němec, *J. Non-Cryst. Solids* 358 (2012) 1210-1216.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2012.02.021>
- [14] P. Cincibusová, L. Němec, *Glass Technol.: Eur. J. Glass Sei. Technol. A* 53 (2012) 150-157.
- [15] M. Polák, L. Němec, P. Cincibusová, M. Jebavá, J. Brada, M. Trochta: Sklářská tavicí pec pro kontinuální tavení skel řízenou konvekcí. Patent CZ 304703 (2012).
- [16] M. Polák, L. Němec, P. Cincibusová, M. Jebavá, J. Brada, M. Trochta: Způsob kontinuálního tavení skel řízenou konvekcí skloviny. Patent CZ 304432 (2012).
- [17] L. Němec, L. Hrbek, M. Jebavá, J. Brada: Tavicí prostor kontinuální sklářské tavicí pece a způsob tavení skla v tomto prostoru. Patent CZ 307659 (2017).
- [18] L. Němec, L. Hrbek, M. Jebavá, J. Brada: Tavicí prostor kontinuální tavicí pece. Užitný vzor CZ 31123 U (2017).
- [19] L. Němec, L. Hrbek, M. Jebavá, J. Brada: Tavicí prostor kontinuální sklářské tavicí pece a způsob tavení skla v tomto prostoru. Patent CZ 307659 (2017).
- [20] L. Němec, L. Hrbek, M. Jebavá, J. Brada: Schmelzram eines kontinuierliches Glasschmelzofens und nach einem darin aufgeführten Verfahren erhaltene Glasschmelze. Užitný vzor DE 202018105160 U1 (2019).
- [21] L. Němec, L. Hrbek, M. Jebavá, J. Brada: Schmelzram eines kontinuierliches Glasschmelzofens und nach einem darin aufgeführten Verfahren erhaltene Glasschmelze. Užitný vzor DE 102018122017 A9 (2019).
- [22] L. Němec, M. Jebavá, P. Cincibusová, V. Tonarová, P. Budík: „Sklářská tavicí pec s konverzním regionem pro přeměnu sklářské vsázky na skelnou taveninu“. Užitný vzor CZ 33564 U (20. 12. 2019) a současně podaná přihláška vynálezu.
- [23] Němec, L., Vernerová M., Cincibusová P., Jebavá M, Kloužek J.: The semiempirical model of the multicomponent bubble behavior in glass melts. *Ceramics - Silikáty*, 2012. 56(4): p. 367-373.

Podstata technického řešení

Tento úkol splňuje sklářská tavicí pec podle tohoto technického řešení, jehož podstata spočívá v tom, že konverzní region je osazen vertikálními elektrodami ve dnu *a/nebo* hořáky zapuštěnými v klenbě konverzního regionu a homogenizační region je osazen vertikálními elektrodami ve dnu *nebo* hořáky zapuštěnými v klenbě homogenizačního regionu. Sklářská vsázka, pokrývající taveninu konverzního regionu zasahuje z konverzního regionu maximálně až do 50 %, s výhodou 20 až 30 %, délky ve směru podélné osy do homogenizačního regionu svou pohyblivou a ustavenou hranicí. Poměr k_I energie z elektrod a z hořáků konverzního regionu k celkové energii obou regionů je v rozmezí $k_I = 0$ až 1.

Přitom poměr k_{IJ} energie z elektrod konverzního regionu k celkové energii elektroda hořáků konverzního regionu je v rozmezí $k_{IJ} = 0$ až 1. Při poměru $k_{IJ} = 0$ je energie konverzního regionu pouze z plynových hořáků konverzního regionu a při poměru $k_{IJ} = 1$ je energie konverzního regionu pouze z elektrod konverzního regionu. Při poměru $k_I = 0$ je energie homogenizačního regionu buď z elektrod homogenizačního regionu nebo z hořáků homogenizačního regionu a při poměru $k_I = 1$ je energie konverzního regionu ze všech elektrod konverzního regionu a všech hořáků konverzního regionu. Poměr energií může být $k_I = 0,8$ až 1 a poměr $k_{IJ} = 0,5$ až 1. Optimální poměr energií je $k_I = 0,90$ až 0,945 a $k_{IJ} = 0,6$ až 0,75, při nichž je maximální kritický tavicí výkon $\dot{M}_{crit} = 399,2$ až 587,5 tun/den.

Hlavní výhodou sklářské tavicí pece podle tohoto technického řešení je, že umožňuje dosáhnout optimalizace konverze sklářské vsázky a nastavuje podmínky společné pro konverzi vsázky i optimální typ proudění v homogenizačním regionu pomocí definovaného rozložení energie v celém prostoru sklářské tavicí pece. Využívá se přitom flexibilní hranice sklářské vsázky na tavenině mezi konverzním regionem a homogenizačním regionem. V homogenizačním regionu je nastaveno řízené proudění. Pomocí flexibilní hranice vsázky se hledalo a dosáhlo maximální využití celého tavicího prostoru i jeho maximálního tavicího výkonu při ukončení homogenizačních dějů na definovaném místě před výtokem z prostoru a při dodržení žádané kvality skla.

Překvapivý a neočekávaný účinek tohoto technického řešení je na základě provedených měření a zkoušek během posledních 6 let, že jej lze aplikovat na jakýkoliv druh kontinuální sklářské tavicí pece s horizontálním průtokem skloviny. Konverzní region tvoří počáteční část celé sklářské tavicí pece, má pravoúhlý nebo oblý tvar umožňující umístění vstupu nebo vstupů vsázky. Může mít tvar příčného kanálu orientovaného kolmo k délce pece. Konverzní region může být pravoúhlý i zaoblený tvar. Je opatřen vstupem nebo vstupy vsázky, které jsou umístěny symetricky vzhledem k výstupu z konverzního regionu, s výhodou příčného kanálu se dvěma bočními vstupy na každé kratší protilehlé stěně příčného kanálu. Přední oblast (stěna) tvoří čelo celé pece, v zadní oblasti (stěně) je centrálně umístěný odtokový otvor, nebo je celá zadní oblast (stěna) odtokem a současně vstupem do následujícího homogenizačního regionu. Prostor konverzního regionu je osazený tyčovými vertikálními elektrodami umístěnými ve dnu *a/nebo* vertikálními plynovými hořáky umístěnými v klenbě. Konverzní region může mít rozmístěny topné tyčové vertikální elektrody po celé ploše dna a vertikální hořáky po celé ploše klenby v pravidelných formacích. Osy vertikálních elektrod mohou být uspořádány v minimálním odstupu 0,3 m od sebe a od stěn. Osy vertikálních hořáků jsou uspořádány např. v minimálním odstupu 0,5 m od sebe a od bočních stěn a špičky elektrod jsou vzdáleny od spodního povrchu vrstvy sklářské vsázky maximálně 0,4 m.

Homogenizační region má tvar podélného kanálu se vstupem do své celé čelní stěny ze zadní oblasti (stěny) konverzního regionu a je osazený topnými elektrodami nebo hořáky v uspořádáních umožňujících vytvořit v homogenizačním regionu s výhodou podélnou tepelnou bariéru. Nejčastější bariérou je jedna nebo dvě řady tyčových vertikálních elektrod ze dna uspořádaných v podélných odstupech 0,3 až 0,4 m. Výška elektrod v homogenizačním regionu se pohybuje mezi 0,3 až 0,6 m.

Konverzní a homogenizační region jsou propojeny tak, že celá zadní oblast (stěna) nebo odtokový otvor konverzního regionu jsou připojeny k přední čelní stěně podélného homogenizačního regionu, při čemž plocha výstupu z konverzního regionu má rozměr příčného řezu homogenizačním kanálem, takže oba prostory vytvoří celistvý nový prostor, v případě konverzního regionu s výhodou tvaru příčného kanálu tvar písmena T naležato, kde konverzní region tvoří stříšku písmena T se vstupy na obou koncích stříšky a homogenizační region tvoří nožku písmena T se vstupem přední částí nožky a výstupem její zadní částí. Oba boční vstupy do stříšky jsou umístěny buď centrálně na koncích stříšky konverzního regionu, nebo jsou posunuty k některé z delších stěn konverzního regionu tvořícího stříšku. Axonometrický pohled na typický prostor T-pece s centrálně umístěnými bočními vstupy je uveden v obr. 1.

Předností uspořádání samotného konverzního regionu zvoleného ve tvaru příčného kanálu jsou popsány v užitém vzoru a současně podané přihlášce vynálezu [22] a jejich výsledkem je vysoká konverzní kapacita díky intenzivnímu odtavování sklářské vsázky na hladině taveniny soustředěným kombinovaným ohřevem sítě vertikálních hořáků a sítě vhodně rozmístěných vertikálních elektrod vyvolávajících vertikální toky horkých spalin a horké taveniny k vrstvě vsázky. Dosahovaná specifická rychlost konverze vsázky na sklo při plném energetickém zatížení je v tomto uspořádání mnohem vyšší, než bylo dosaženo pro konvenční horizontální sklářskou pec s regenerativním (plynovým) ohřevem a s menším elektrickým přehřevem.

Předností uspořádání samotného homogenizačního regionu ve formě tavicího modulu s nátokem taveniny obsahující zrna písku a bubliny byly popsány v patentu [19] a jejich výsledkem je vysoká homogenizační kapacita surové skelné taveniny na rozpouštění pískových zrn a odstraňování bublin, která je charakterizována vysokým tavicím výkonem nad 300 t/den při objemu konverzního regionu 12,5 m³. Toho se docílilo rozdělením regionu na vstupní a homogenizační oblast a soustředěním dodávané energie do vstupní oblasti, takže se v homogenizační oblasti regionu nastolilo proudění taveniny přibližně uniformního nebo spirálového toku, charakterizované vysokým využitím tavicího prostoru pro homogenizační děje.

Spojením obou regionů a po nastolení příslušně změněných a nových výhodných podmínek konverze, homogenizace a proudění lze pak získat nový složený prostor, s výhodou T-prostor, který je schopen zahrnout celý tavicí proces, konverzi vsázky počínaje a homogenizaci taveniny spočívající v rozpouštění částic sklářského písku a odstraněním bublin konče. Konverzní region nyní tvoří vstupní část pece se soustředěním energie a homogenizační region je určen pro homogenizaci taveniny v uniformním nebo spirálovitém toku. Předpokládaný celkový objem složené pece se pohybuje mezi 24 až 30 m³. Oba regiony se neliší, nebo jen málo liší svým objemem, větší rozdíl je oprávněný při nesterilní efektivitě homogenizačních dějů.

Horizontální napojení obou regionů je voleno tak, že zajišťuje, aby pro bubliny vzniklé v konverzním regionu vznikla v homogenizačním regionu volná hladina, k níž jsou bubliny pracovním tokem unášeny a na níž se výstupem odstraní. To částečně omezí vznik silné vrstvy velkých bublin pod vsázkou, které se odstraňují jen obtížně a zamezují toku tepla z taveniny do vrstvy vsázky.

Základem provozování složeného prostoru, s výhodou T-prostoru, je nastolení podmínek pro dosažení maximálního výkonu při využití prostoru celé tavicí pece na tavicí proces, tj. stavu, kdy se řídicí homogenizační děj (rozpuštění písku nebo odstranění bublin) dokončí nad příčnou přepážkou ze žárovzdomého materiálu před výtokem taveniny z prostoru.

Maximální tavicí výkon celého složeného prostoru a rozložení energie v něm jsou odhadnuty na základě modelování a zkušeností tak, že množství dodávané vsázky pokrývá při provozu alespoň celou hladinu konverzního regionu. Při plánování výkonu se vychází z plochy hladiny konverzního regionu a běžně dosahované průměrné rychlosti konverze vsázky.

V případě konverzního regionu s výhodou tvaru příčného kanálu je umístění dvou vstupů vsázky

voleno v bočních stěnách proti sobě s cílem, aby došlo střetnutím obou proudů vsázky v podélné ose konverzního regionu a vyvolalo lokální zvýšení konverze vsázky v důsledku lokálního zpomalení jejího postupu.

- 5 Nastavení maximálního a technicky dosažitelného tavicího výkonu se provádí pomocí hodnot dvou faktorů (proměnných) k_I a k_{IJ} , vyjadřujících poměr mezi energiemi, a při splnění podmínky, že tavicí děje budou ukončeny v určeném místě (nad příčnou přepážkou) před výstupem taveniny z tavicího prostoru. Poměr k_I vyjadřuje poměr mezi celkovou energií dodanou do konverzního regionu a veškerou energií dodanou do celé pece a k_{IJ} vyjadřuje poměr mezi Joulovou energií dodanou do konverzního regionu a veškerou energií dodanou do konverzního regionu, hodnoty
10 obou faktorů se pohybují mezi 0 a 1.

- Poměr k_{IJ} se týká pouze konverzního regionu. Když je hodnota poměru k_{IJ} rovna 0, znamená to, že konverzní region není vytápěn topnými elektrodami a je otápěn pouze plynovými hořáky. Když
15 je hodnota poměru k_{IJ} rovna 1, znamená to, že konverzní region není vytápěn plynovými hořáky a je vytápěn pouze topnými elektrodami.

- Poměr k_I se týká celého prostoru, tj. konverzního regionu a homogenizačního regionu. Je-li $k_I = 1$, znamená to, že celý prostor je vytápěn pouze v konverzním regionu topnými elektrodami a hořáky
20 a homogenizační region je otápěn pouze odcházejícími spaliny a horkou taveninou přicházející z konverzního regionu a vlastní ohřev nepotřebuje. Když je hodnota poměru k_I rovna 0, znamená to, že je vytápěn pouze v homogenizačním regionu topnými elektrodami nebo plynovými hořáky.

- Tyto krajní hodnoty k_I a k_{IJ} jsou mj. vhodné např., při výpadku elektrické energie v síti nebo při
25 výpadku otopu plynem, případně v případě oprav žáromateriálu pece při horkých opravách. Využijí se i pro návrhy nových tavicích zařízení.

- Např. když je poměr k_I roven 0,8 až 1, s výhodou 0,5 až 1, se dosahuje nejvyšších kritických tavicích výkonů a nejnižších tepelných ztrát.
30

- Na základě příkladných provedení se pro optimální rozmezí poměru $k_I = 0,90$ až $0,945$ a optimální rozmezí poměru $k_{IJ} = 0,6$ až $0,75$ dosáhlo maximálního kritického tavicího výkonu $\dot{M}_{crit} = 399,2$ až $587,5$ tun/den, při čemž se v homogenizačním regionu nastavil uniformní nebo spirálový tok taveniny.
35

- Celkové rozdělení energie v příkladech uvedené T-peci s cílem nastolit řízené uniformní nebo spirálovité proudění v homogenizačním regionu je nastaveno tak, že největší podíl energie, přibližně $k_I = 0,8$ až 1 celkově dodané energie, se dodá do regionu pro konverzi vsázky a v celém homogenizačním regionu se v podstatě rovnoměrně rozmístí zbylý podíl 0 až 0,2 celkově dodané
40 energie. Tím se zajišťuje, že se uniformní nebo spirálovité proudění může nastolit případně po celé délce homogenizačního regionu.

- Maximální podíl $k_I = 0,8$ až 1 množství energie dodané do konverzního regionu zajišťuje nejen řízené proudění po délce homogenizačního regionu, ale i přímou dodávku tepla do vsázky
45 v konverzním regionu elektrodami zde umístěnými a přímé využití energie hořáků, které mají velkou konverzní kapacitu a jsou až na výjimku ohřevu homogenizačního regionu hořáky umístěny pouze v konverzním regionu. Uvedené rozmístění energie současně ustavuje běžnou konverzní kapacitu regionu na $0,25$ až $0,30 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

- Poměr mezi energií dodanou do konverzního regionu Joulovým teplem a celkovým tam dodaným teplem, vyjádřený veličinou k_{IJ} , mající hodnotu 1 pro otop konverzního regionu pouze Joulovým teplem a 0 pro otop v konverzním regionu pouze spalovacím teplem, svým poklesem
50 k_{IJ} pod 1 zvyšuje konverzní rychlost vsázky z hodnot $0,25$ až $0,30 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ až na hodnoty nad $0,5 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ a současně snižuje rozdíl mezi průměrnými teplotami obou regionů. Nižší hodnoty poměru k_{IJ} než 0,6 však znemožňují nastolení efektivního spirálovitého proudění
55

v homogenizačním regionu a nižší než 0,5 přehřívají klenbu v konverzním regionu. Proto pro objemově malou pec, jako je T-pec s kombinovaným ohřevem konverzního regionu, jsou optimální hodnoty poměru k_{IJ} mezi dodanou Joulovou a celkovou energií do tohoto regionu mezi 0,6 až 0,90. Poměr 1 pro otop v konverzním regionu charakterizující elektrickou pec je však rovněž přijatelný, je-li záměrem postavit celoelektrickou pec; zde se posléze využije výhody podpory spirálovitého proudění.

Vstupy se podle potřeby posouvají při stavbě nebo opravě pece, boční vstupy s výhodou konverzního regionu tvaru příčného kanálu se posouvají ze symetrické pozice blíže k čelní nebo zadní stěně kanálu, a to tak, aby se odstranila nebo redukovala místa se vznikající volnou hladinou v konverzním regionu a vsázka se o plochu původně připadající na volnou hladinu stáhla zpět, teploty ve spalovacím prostoru poklesly ve srovnání s případem původně umístěných vstupů, čímž se zmírňuje přehřátí klenby v konverzním regionu a rovněž se případně podpoří spirálovité proudění v homogenizačním regionu, které je výhodné.

Pro dosažení maximálního tavicího výkonu je rovněž třeba, aby se řídicí homogenizační děj, buď rozpouštění pískových zm nebo odstranění bublin, vždy ukončil v homogenizačním regionu na dohodnuté hranici před výstupem (zde nad příčnou přepážkou ze žárovzdomého materiálu před výtokem). Toho se dosahuje tím, že se poloha hranice vsázky nestanoví pevně na předělu obou regionů, ale je flexibilní, posunuje se s rostoucím tavicím výkonem z konverzního regionu přes předěl regionů směrem do homogenizačního regionu a smí dosáhnout až 50% délky homogenizačního regionu. Flexibilita hranice vsázky zaručuje sladění kapacity konverzního regionu s kapacitou homogenizačního regionu, které se vzhledem k původním objemům regionů vždy o něco liší. Posunem hranice vsázky se skutečný objem pro konverzi vsázky zvětší a skutečný objem pro homogenizaci taveniny zmenší oproti objemům regionů vyhrazeným konstrukcí. Takto je možné měnit vzájemné homogenizační kapacity regionů bez změn jejich skutečné velikosti. Pec je v tomto případě zařízením s proměnnou virtuální velikostí konverzního a homogenizačního regionu. Při dosažení těchto podmínek je vždy maximálně využit celý prostor pece a dosáhne se maximálního tavicího výkonu.

Je rovněž možné pracovat za jiných podmínek, než odpovídá podmínkám uvedeným pro maximální výkon, a tím se umožní výkonová flexibilita pece. Toho se dosáhne buď snížením optimální hodnoty k_I , takže se v homogenizačním regionu nevznikne uniformní nebo spirálové proudění, ale vytvoří se zpětné podélné cirkulace taveniny, klesne využití homogenizačního regionu a tím i kritický tavicí výkon pece, nebo se udržuje konstantní optimální hodnota k_I , typ proudění v homogenizačním regionu se nezmění, ale snížením výkonu (průtoku) v něm vznikne tavicí rezerva (homogenizace se uskuteční dřív než před výstupem). První způsob byl použit v následujících příkladech provedení, aby byl zřejmý vliv rozložení energie (k_I) na podélné cirkulace taveniny a tím na využití prostoru a tavicí výkon. Výkonové flexibility prostoru je tedy možno dosáhnout dvěma způsoby, v obojím případě však mírně stoupne specifická spotřeba energie.

Složený tavicí prostor sklářské tavicí pece, např. T-pece, a výsledky matematického modelování tavicího výkonu a dalších relevantních veličin popisují následující příklady provedení.

Objasnění výkresů

Technické řešení je dále podrobně popsáno na neomezuujících příkladech provedení, osvětlený na připojených schematických výkresech.

V komentářích k obrázkům jsou uvedeny poměry k_I a k_{IJ} . Poměr k_I představuje poměr energie, která se přivádí elektrodami a hořáky do konverzního regionu k celkové energii, která se přivádí do obou regionů. Poměr k_{IJ} představuje poměr energie, která se přivádí elektrodami konverzního regionu k celkové energii, která se přivádí do konverzního regionu elektrodami a hořáky

konverzního regionu.

Obecný případ T-pece je podrobněji popsán dále v příkladech provedení a je objasněn na připojených schematických výkresech na obr. 1 a 1.1, z nichž znázorňuje:

5

Obr. 1: Axonometrický pohled znázorňuje tvar a uspořádání typického tavicího T-prostoru s konverzním a homogenizačním regionem a částečně odkrytou klenbou obou regionů.

10

Obr 1.1: Axonometrický pohled z obr. 1 ukazuje homogenizační region s klenbou s hořáky v podélné ose.

Podrobně konkrétně popsany příklad 1 pro malou T-pec II je objasněn na schematických výkresech na obr. 2 až 7, z nichž znázorňuje:

15

Obr. 2: Pohled shora na rozmístění hořáků a elektrod v malé T-pec II. V levé části (a) je rozmístění hořáků v klenbě konverzního regionu. V pravé části (b) je rozmístění elektrod ve dnu celé pece.

20

Obr. 3: Graf závislosti kritického tavicího výkonu $\dot{M}_{crit}$ malé T-pece II na podílu k_I energie z celkové energie dodané do malé T-pece II, závislost je vyznačena „trojúhelníky“; a graf závislosti průtoků $\dot{M}_{bal}$ taveniny při vyrovnaném rozmístění energie na podílu k_I energie z celkové energie dodané do malé T-pece II, závislost je vyznačena „plnými kroužky“. Průměrná tavicí teplota v prostoru je 1420 °C.

25

Obr. 4: Pohled shora na malou T-pec II, znázorňující vsázku a proudnice na hladině taveniny v této T-peci, při maximální hodnotě kritického tavicího výkonu. Případ 05 v tabulce 1. Dole je ukázána teplotní stupnice. Je zřejmá míra vstupu vsázky do homogenizačního regionu. Hodnota $k_I = 0,90$. Průměrná tavicí teplota v prostoru je 1420 °C.

30

Obr. 5: Kolmý podélný řez (XZ) mezi podélnou osou malé T-pece II a boční stěnou, který ukazuje rozdělení konvektivních proudů do dvou oblastí. Dole je ukázána teplotní stupnice. Hodnota $k_I = 0,90$. Průměrná tavicí teplota v prostoru je 1420 °C.

35

Obr. 6: V horní části obr. 6 je pohled shora v rovině XY a v dolní části pohled v rovině XZ na průměty kritických trajektorií bublin v homogenizačním regionu. Optimální případ, hodnota $k_I = 0,90$. Průměrná tavicí teplota v prostoru je 1420 °C.

40

Obr. 7: Podélný řez podélnou osou malé T-pece II (v řezu XZ) mezi podélnou osou malé T-pece II a boční stěnou, který ukazuje teplotní pole nad hladinou taveniny. Dole je ukázána teplotní stupnice. Případ 05, viz tabulka 1. Hodnoty $k_I = 0,90$; $k_{IJ} = 0,75$. Průměrná tavicí teplota v prostoru je 1420 °C.

Příkladné provedení je dále podrobně popsané pro malou T-pec II a je objasněno na schematických výkresech na obr. 1a, 2a, 3a, z nichž znázorňuje:

45

Obr. 1a: Pohled shora na hranici vsázky a proudnice na hladině taveniny v malé T-peci II při snížené hodnotě kritického tavicího výkonu. Dole je ukázána teplotní stupnice. Případ 04 v tabulce 1. Jsou zřejmé proudnice zpětného toku taveniny na hladině homogenizačního regionu. Hodnota $k_I = 0,693$. Průměrná tavicí teplota v prostoru je 1420 °C.

50

Obr. 2a: Kolmý podélný řez (XZ) mezi podélnou osou malé T-pece II a boční stěnou, který ukazuje podélné cirkulační proudění taveniny v homogenizačním regionu. Dole je ukázána teplotní stupnice. Hodnota $k_I = 0,693$. Průměrná tavicí teplota v prostoru je 1420 °C.

55

Obr. 3a: V horní části obr. 3a je pohled shora v rovině XY a v dolní části pohled v rovině XZ na průměty kritických trajektorií bublin v malé T-peci II při hodnotě $k_I = 0,693$. Průměrná tavicí

teplota v prostoru je 1420 °C.

Příkladné provedení je dále podrobně popsáno na konkrétní velké T-peci a je objasněno na schematických výkresech na obr. 8 až 11, z nichž znázorňuje:

5

Obr. 8: Pohled shora na rozmístění hořáků a elektrod ve velké T-peci. V levé části (a) je rozmístění hořáků v klenbě konverzního regionu. V pravé části (b) je rozmístění elektrod ve dnu celé velké T-pece.

10

Obr. 9: Graf závislosti kritického tavicího výkonu $\dot{M}_{crit}$ velké T-pece na podílu k_I energie z celkové energie dodané do T-pece, závislost je vyznačená „trojúhelníky“; a graf závislosti průtoků $\dot{M}_{bal}$ taveniny při vyrovnaném rozmístění energie na podílu k_I energie z celkové energie dodané do velké T-pece, závislost je vyznačená „plnými kroužky“. Průměrná tavicí teplota v prostoru je 1420 °C.

15

Obr. 10: Pohled shora na velkou T-pec, znázorňující vsázku a proudnice na hladině taveniny v této T-peci, při maximální hodnotě kritického tavicího výkonu. Je zřejmá míra vstupu vsázky do homogenizačního regionu. Dole je ukázána teplotní stupnice. Hodnota $k_I = 0,92$. Příklad 4, tabulka 2. Průměrná tavicí teplota v prostoru je 1420 °C.

20

Obr. 11: V horní části obr. 1 je pohled shora v rovině XY a v dolní části pohled v rovině XZ na průměty kritických trajektorií bublin v homogenizačním regionu. Optimální případ při hodnotě $k_I = 0,92$. Průměrná tavicí teplota v prostoru je 1420 °C.

Příkladné provedení je podrobněji popsáno dále a je objasněno na schematických výkresech na obr. 12 až 18, z nichž znázorňuje:

25

Obr. 12: Graf závislosti průměrné specifické rychlosti konverze vsázky $\dot{M}_{Sbatch}$ na podílu k_I energie dodané do konverzního regionu malé T-pece II, závislost je vyznačená „plnými kroužky“ a „trojúhelníkem“; Malá T-pec II, průtok $\dot{M} = 3,5$ kg/s. $\dot{M}_{Sbatchsmallthick1}$ - průtok 4,5 kg/s. Průměrná tavicí teplota v prostoru je 1420 °C.

30

Obr. 13: Graf závislosti průměrné specifické rychlosti konverze vsázky $\dot{M}_{Sbatch}$ na podílu k_{IJ} Joulovy energie dodané do konverzního regionu. Je vyznačena závislost, a to „plnými kroužky“ pro malou T-pec II, $\dot{M}_{Sbatchsmall}$ „čtverci“ a „křížkem“ pro velkou T-pec s centrálním vstupem v boční stěně konverzního regionu ($\dot{M}_{Sbatchlarge}$) a ($\dot{M}_{Sbatchlarge2}$) „trojúhelníky“ pro velkou T-pec se vstupy posunutými ke vstupní čelní stěně regionu ($\dot{M}_{SbatchlargeP}$) a „prázdnými kroužky“ pro krajní hodnotu při $k_{IJ} = 1$ pro malou T-pec I ($\dot{M}_{Sbatchsmallthick1}$). Průměrná tavicí teplota v prostoru je 1420 °C.

35

Obr. 14: Pohled shora ukazující vliv pozice bočních vstupů na vsázku, v levé části (a) jsou uspořádány centrálně boční vstupy, v pravé části (b) jsou upořádány boční vstupy v blízkosti přední čelní stěny konverzního regionu velké T-pece při hodnotě $k_{IJ} = 0.6$. Dole je ukázána teplotní stupnice. Průměrná tavicí teplota v prostoru je 1420 °C.

40

Obr. 15: Pohled shora na uspořádání elektrod v malé T-peci I.

45

Obr. 16: Graf závislosti kritického tavicího výkonu $\dot{M}_{crit}$ malé T-pece I na podílu k_I energie z celkové energie dodané do pece T-pece, závislost je vyznačená „trojúhelníky“; a graf závislosti průtoků $\dot{M}_{bal}$ taveniny při vyrovnaném rozmístění energie na podílu k_I energie z celkové energie dodané do malé T-pece I, závislost je vyznačená „plnými kroužky“. Průměrná tavicí teplota v prostoru je 1420 °C. hodnota $k_{IJ} = 0,60$.

50

Obr. 17: Pohled shora na malou T-pec I znázorňující vsázku a proudnice na hladině taveniny v této T-peci, při maximální hodnotě kritického tavicího výkonu. Je zřejmá míra vstupu vsázky do homogenizačního regionu. Dole je ukázána teplotní stupnice. Příklad 25, tabulka 3. Hodnoty

55

$k_I = 0,94$; $k_{IJ} = 0,60$. Průměrná tavicí teplota v prostoru je 1420 °C.

Obr. 18: V horní části obr. 18 je pohled shora v rovině XY a v dolní části pohled v rovině XZ na průměty kritických trajektorií bublin v homogenizačním regionu malé T-pece I. Optimální případ při hodnotách $k_I = 0,94$; $k_{IJ} = 0,60$. Průměrná tavicí teplota v prostoru je 1420 °C.

Příkladné provedení velké T-pece je podrobně popsáno dále a je objasněn na schematických výkresech na obr. 19 až 21, z nichž znázorňuje:

Obr. 19: Graf závislosti kritického tavicího výkonu $\dot{M}_{crit}$ velké T-pece na podílu k_I energie z celkové energie dodané do této pece T-pece, závislost je vyznačena „trojúhelníky“; a graf závislosti průtoků $\dot{M}_{bal}$ taveniny při vyrovnaném rozmístění energie na podílu k_I energie z celkové energie dodané do velké T-pece, závislost je vyznačena „plnými kroužky“. Průměrná tavicí teplota v prostoru je 1420 °C při hodnotě $k_{IJ} = 0,60$.

Obr. 20: Pohled shora na velkou T-pec, znázorňující vsázku a proudnice na hladině taveniny v této T-peci, při maximální hodnotě kritického tavicího výkonu. Je zřejmá míra vstupu vsázky do homogenizačního regionu. Dole je ukázána teplotní stupnice. Příklad 11Pc, tabulka 4. Hodnoty $k_I = 0,945$; $k_{IJ} = 0,60$. Průměrná tavicí teplota v prostoru je 1420 °C.

Obr. 21: V horní části obr. 21 je pohled shora v rovině XY a v dolní části pohled v rovině XZ na průměty kritických trajektorií bublin v homogenizačním regionu velké T-pece. Optimální případ 11Pc, hodnoty $k_I = 0,945$; $k_{IJ} = 0,60$. Průměrná tavicí teplota v prostoru je 1420 °C.

Příkladné provedení pro velkou T-pec je dále podrobně popsáno a je objasněno na schematických výkresech na obr. 22 až 24, z nichž znázorňuje:

Obr. 22: Pohled shora na velkou T-pec, znázorňující vsázku a proudnice na hladině taveniny v této T-peci, v případě ohřevu homogenizačního regionu hořáky umístěnými v podélné ose homogenizačního regionu. Je zřejmá míra vstupu vsázky do homogenizačního regionu. Dole je ukázána teplotní stupnice.

Příklad 26. Hodnoty $k_I = 0,9$; $k_{IJ} = 0,6$. Průměrná tavicí teplota v prostoru je 1420 °C.

Obr. 23: Kolmý podélný řez (XZ) v podélné ose velké T-pece, který ukazuje přibližně uniformní tok taveniny v homogenizačním regionu. Dole je ukázána teplotní stupnice. Příklad 26. Průměrná tavicí teplota v prostoru je 1420 °C.

Obr. 24: V horní části obr. 24 je pohled shora v rovině XY a v dolní části pohled v rovině XZ na průměty kritických trajektorií bublin v homogenizačním regionu velké T-pece. Příklad 26. Hodnoty $k_I = 0,9$; $k_{IJ} = 0,6$. Průměrná tavicí teplota v prostoru je 1420 °C.

Příklady uskutečnění technického řešení

Obecný případ příkladného provedení sklářské tavicí T-pece, podle tohoto technického řešení, ilustruje obr. 1 pro tvar a uspořádání typického tavicího T-prostoru s konverzním regionem 1 a homogenizačním regionem 2 a částečně znázorněnými klenbami 6 a 7 obou regionů 1, 2. Konverzní region 1 je otápěn elektrodami 3 a/nebo hořáky 5, přednostně elektrodami 3 i hořáky 5 společně. Homogenizační region 2 je otápěn elektrodami 4 nebo hořáky 2, přednostně elektrodami 4. V příkladném provedení sklářské pece na obr. 1 sklářská vsázka 18 zasahuje z konverzního regionu 1 svou hranicí 21 až do cca 35 % délky ve směru podélné osy 24 do homogenizačního regionu 2.

Na obr. 1.1 je znázorněn pohled z obr. 1 na homogenizační region 2 s částečně znázorněnou

klenbou 7 s hořáky 25 v podélné ose 24.

Sklářské tavicí pec zahrnuje dva regiony, konverzní region 1 pro přeměnu sklářské vsázky 18 na skelnou taveninu 19 a homogenizační region 2 pro odstranění nehomogenit typu sklářského písku a bublin a přeměnu na skelnou homogenní taveninu 20.

Konverzní region 1 je opatřen částečně znázorněnou klenbou 6 se zapuštěnými vertikálními hořáky 5 s jejich osami 51. Homogenizační region 2 je opatřen částečně znázorněnou klenbou 7 se zapuštěnými vertikálními hořáky 25 s jejich osami 251. Klenby 6, 7 jsou částečně znázorněny proto, aby byl zřetelnější pohled na oba regiony 1, 2, např. kvůli uspořádání elektrod 3, 4 v obou regionech 1, 2. Konverzní region 1 je opatřen v příkladném provedení vertikálními elektrodami 3, s jejich osami 31 a špičkami 32, přičemž elektrody 3 jsou celé ponořeny pod hladinou taveniny 19 v konverzním regionu 1. Homogenizační region 2 je opatřen v příkladném provedení vertikálními elektrodami 4, s jejich osami 41 a špičkami 42, přičemž elektrody 4 jsou celé ponořeny pod hladinou taveniny 20 v homogenizačním regionu 2.

Konverzní region 1 s vysokou koncentrací topné energie pro přeměnu sklářské vsázky 18 na skelnou taveninu 19 má vrstvu sklářské vsázky 18 na roztavené skelné tavenině 19. Sklářská vsázka 18 může zasahovat svou hranicí 21 na hladině taveniny 20, jak je patmo z obr. 1, až do homogenizačního regionu 2. Konverzní region 1 oblého nebo pravoúhlého tvaru, s výhodou tvaru příčného pravoúhlého kanálu, obsahuje dno 8, odpovídající boční stěny 12, čelní stěnu 10 a protilehlou zadní čelní stěnu 10 s centrálním vstupem 15 taveniny 19 do homogenizačního regionu 2. Konverzní region 1 znázorněný na obr. 1 ve tvaru písmene T je opatřený dvěma symetrickými bočními vstupy 14 vsázky 18 a je ohříván elektrodami 4 a plynovými hořáky 5.

Homogenizační region 2 má v příkladném provedení tvar pravoúhlého podélného kvádru a je prostorově vymezený dnem 9, delšími protilehlými bočními stěnami 13, hladinou taveniny 20, čelním nátokem na vstupu 15 taveniny 19 z konverzního regionu 1 přes celý příčný řez homogenizačním regionem 2 a zadní stěnou 11 s výtokem 17 taveniny 20. Homogenizační region 2 je elektricky ohříván topnými elektrodami 4, které jsou uspořádány ve dně 9 v podélné ose 24 případně v bočních stěnách 13 (neznázorněno) pro vytvoření především podélné tepelné bariéry ve sklovině.

Konverzní region 1 je na homogenizační region 2 tak, že čelo homogenizačního regionu 2 je centrálně připojeno k zadní čelní stěně 10 konverzního regionu 1, takže výtok z konverzního regionu 1 v jeho zadní čelní stěně 10 je současně vtokem do homogenizačního regionu 1 jeho čelní stěnou, kdy velikost vtoku i odtoku je rovna ploše příčného řezu homogenizačním regionem 2. Pro konverzní region 1 s výhodou tvaru příčného kanálu má pec při pohledu shora tvar písmena T, kde stříšku písmena tvoří konverzní region 1 a jeho nožku homogenizační region 2.

Způsob tavení v konverzním regionu 1 a homogenizačního regionu 2 probíhá tak, aby oba navazující procesy, tj. konverze vsázky 18 a homogenizace taveniny 20 probíhaly za optimálních podmínek, byly sladěny, maximálně exploatovaly celý tavicí prostor pece a aby vyprodukovaná tavenina 20 (skloviny) neobsahovala vady skla, přičemž oba procesy musí být ukončeny před dosažením přepážky 16 pro výstup taveniny 20 z homogenizačního regionu 2 sklářské tavicí pece.

Z hořáků 5 konverzního regionu 1 a z hořáků 25 homogenizačního regionu 2 vznikají spaliny 22 nad hladinou tavenin 19, 20 a vsázky 18 a postupují horizontálním směrem pod klenbami 6, 7 obou regionů 1, 2 a opouští sklářskou tavicí pec výstupem 23 homogenizačního regionu 2.

Příklad 1 (Obr. 2, 3, 4, 5, 6, 7)

1.1 Závislost kritických tavicích výkonů malé T-pecce II na charakteru proudění v homogenizačním regionu při konstantním příkonu energie hořáky.

5

Veličina k_1 tj. podíl energie dodávané do konverzního regionu 1 z veškeré energie dodávané do malé T-pecce II, určuje globální charakter proudění v celém prostoru. Protože v první sérii výpočtů kritických tavicích výkonů $\dot{M}_{crit}$ je udržován konstantní příkon energie hořáky 5, hodnota k_1 byla řízena pouze změnou poměru příkonů Joulova tepla mezi konverzním regionem 1 a homogenizačním regionem 2. Malá T-pec II s méně rozsáhlým konverzním regionem 1 má rozměry tohoto regionu na styku s taveninou 19: $X = 2$ m, $Y = 6$ m, $Z = 1$ m a rozměry homogenizačního regionu 2 jsou $X = 6,77$ m, $Y = 2$ m, $Z = 1$ m. Geometrie ohřevu zahrnovala 8 vertikálních hořáků 5 CH_4/O_2 (zemní plyn a kyslík) v klenbě konverzního regionu 1 a 42 molybdenových vertikálních elektrod 3 průměru 100 mm a výšky 0,8 m v konverzním regionu 1 a dvě podélné řady po 16 elektrodách 4 obklopující podélnou osu 24 v homogenizačním regionu 2, jejichž výška byla 0,6 m. Konstantní příkon energie hořáky 5 v konverzním regionu 1 byl ve všech řešených případech 2586 kW. Rozložení hořáků 5 v klenbě 6 konverzního regionu 1 je znázorněno na obr. 2, a to v levé části na obr. 2a a rozmístění elektrod 3 ve dně 8 je v pravé části na obr. 2b.

20

Typický postup získání výsledku představuje výpočet pomocí teplotních a rychlostních polí taveniny 19, 20 za dané zvolené hodnoty k_1 a při konstantním příkonu energie hořáky 5. Matematickým modelováním byla nejprve získána teplotní a rychlostní pole taveniny 19, 20 v prostoru sklářské tavicí pece. Následně byly ve vypočtených polích sledovány trajektorie a chování největších zrn písku a nejmenších bublin, bylo uvažováno rozpouštění pískových zrn i interakce bubliny s taveninou 19, 20 a vliv vztaku. Při sledování interakcí částic s taveninou 19, 20 byla využita experimentální data a semiempirický model bublin [23], jako typická vyráběná sklo sloužilo sklo typu float. Při výpočtu byly sledovány desítky tisíc trajektorií zrn písku a bublin, které startovaly na bočním vstupu 13 vsázky 18 (zrna písku) nebo na fázovém rozhraní mezi vsázkou 18 a taveninou 19, 20 (bubliny). Byly nalezeny kritické trajektorie, které označovaly krajní výkonovou situaci, kdy příslušná kritická částice - zrno písku nebo bublina - byly odstraněny nad přepážkou 16 před výstupem 17 z homogenizačního regionu 2 (viz obr. 1, vpravo vzadu), zatímco všechny ostatní částice se odstranily uvnitř prostoru sklářské tavicí pece. Průměrná teplota taveniny 19, 20 v prostoru sklářské tavicí pece byla vždy 1420 °C.

35

Jak již bylo uvedeno, teplo dodávané hořáky 5 konverzního regionu 1 bylo fixováno pro celou tuto řadu výpočtů a hodnota k_1 byla nastavována pouze poměrem Joulových energií v konverzním regionu 1 a homogenizačním regionu 2. Aby bylo dosaženo žádaného kritického stavu, konverzní výkon konverzního regionu 1 musí být stejný jako homogenizační výkon homogenizačního regionu 2 při současném dosažení vyznačeného místa ukončení řídicího děje (rozpuštění písku nebo odstranění bublin) nad příčnou přepážkou 16 v homogenizačním regionu 2. Toho je dosaženo postupnými změnami průtoku taveniny 19, 20, $\dot{M}$, které jsou automaticky následovány posuny hranice 21 vsázky 18. Pokud se jeví homogenizační kapacita homogenizačního regionu 2 nadbytečná, tj. objeví se reserva pro rozpouštění pískových zrn nebo odstranění bublin při současném zaplnění hladiny konverzního regionu 1 vsázkou 18, zvýšením průtoku se vsázka 18 vpustí do počáteční části homogenizačního regionu 2. To v optimálním případě umožnilo dosáhnout maximálního kritického výkonu v blízkosti vyrovnaného energetického stavu, tj. v blízkosti závislosti $\dot{M}_{bal}(k_1)$, kdy má tok taveniny 20 uniformní nebo spirálovitý charakter s vysokým využitím prostoru sklářské tavicí pece. Vstupem vsázky 18 do počáteční části homogenizačního regionu 2 se současně o něco zvětší konverzní kapacita pece. Výsledky výpočtů kritických tavicích výkonů $\dot{M}_{crit}$ a průběh funkce průtoku taveniny 19, 20 při vyrovnané distribuci energie $\dot{M}_{bal}$ v tomto prostoru v závislosti na hodnotě k_1 a další významné veličiny jsou soustředěny v tabulce 1 a obr. 3.

55

Hodnoty pro výpočet dovoleného průtoku taveniny pecí, kdy je v peci vyrovnané rozmístění energie $\dot{M}_{bal}$ byly získány z energetické bilance matematického modelu. Nově zahrnovaly výměnu

tepla mezi spaliny 22 a taveninou 19, 20. Výpočet byl proveden podle rovnice:

$$\dot{M}_{bal} = \frac{H^L(k_1 - \xi) + \dot{H}_{gas}^L}{(H_g + H_{gasM})(1 - k_1)}$$

5

kde

k_1 je podíl z celkové energie dodané do konverzního regionu,

H^L je tok celkových ztrát rozhraní,

$\dot{H}_{gas}^L$ je tok tepla předaného v homogenizačním regionu mezi spaliny a taveninou,

ξ je podíl ztrát stěnami v konverzním regionu,

10

H_M^T je teoretické specifické teplo a

H_{gasM} je specifické teplo pro ohřátí plynu a oxidovadla vztažené na 1 kg utaveného skla.

Tabulka 1

15

Hodnoty kritického tavicího výkonu $\dot{M}_{crit}$ a průtok taveniny při vyrovnaném rozmístění energie $\dot{M}_{bal}$ a další významné hodnoty.

Case	k_1	k_{IJ}	S_{batch} [m ²]	$\dot{M}_{crit}$ [t/den]	$\dot{M}_{bal}$ [t/den]	H_g^L [kJ/kg]	u_{ref} [s]	u	$\dot{M}_{Sbatch}$ [kg/s]	t_{Glass} [°C]
04	0,693	0,471	7,169	185,8	8,8	3279	2703	$u_F = 0,102$	0,299	
01	0,782	0,69	14,015	328,30	98,6	2803	2411	$u_F = 0,162$	0,271	1435,1
02	0,855	0,724	13,921	345,6	163,3	2735	2278	$u_F = 0,161$	0,287	1418,6
05	0,90	0,783	15,909	399,2	297,2	2610	1943	$u_F = 0,158$	0,289	1404,2
03	0,924	0,746	13,838	354,2	339,7	2689	1947	$u_F = 0,141$	0,296	-

20

Malá T-pec II (pec s menším konverzním regionem) pracující při konstantním příkonu z hořáků 5 odpovídajícím 2586 kW a při průměrné teplotě 1420 °C, k_1 je podíl energie z celkové dodané energie do T-pece II, k_{IJ} je podíl Joulova tepla z celkového tepla dodaného do konverzního regionu 1,

25

kde

u je využití prostoru,

index F, kritickým dějem je odstraňování bublin (čeření),

index D, kritickým dějem je rozpouštění pískových zm,

30

S_{batch} je plocha hladiny pokrytá vsázkou 18,

H_M^0 je specifická spotřeba tepla na tavení,

$\dot{M}_{Sbatch}$ je průměrná specifická rychlost konverze vsázky 18 v kgm²s⁻¹,

τ_{Href} je referenční doba řídicího homogenizačního děje a

t_{Glass} je průměrná teplota taveniny 20 v homogenizačním regionu 2.

35

Optimální případ je uveden tučným písmem.

40

Závislost kritických tavicích výkonů $\dot{M}_{crit}(k_1)$ ukazuje zřetelný růst s rostoucí hodnotou k_1 a tento fakt je důsledkem slabnoucích podélných cirkulací v homogenizačním regionu 2 mířících proti směru hodinových ručiček, které odpovídají podélným cirkulacím v průmyslových tavicích pecích. Dochází rovněž k pomalému poklesu referenční doby rozpouštění písku, což rovněž přispívá ke zvyšování kritického tavicího výkonu. Závislost $\dot{M}_{bal}(k_1)$ ukazuje křivku, na níž podélné cirkulace vymizí.

Vlevo od křivky $\dot{M}_{bal}(k_1)$ pak existují v tavenině 20 zmíněné cirkulace jdoucí proti směru hodinových ručiček, které zesilují s rostoucí vzdáleností od křivky $\dot{M}_{bal}(k_1)$ a v soulase s tímto trendem klesají i kritické tavicí výkony na křivce $\dot{M}_{crit}(k_1)$ s klesající hodnotou k_1 . Běžné hodnoty k_1 se u průmyslových pecí pohybují pod 0,6. V oblastech podél křivky $\dot{M}_{bal}(k_1)$ pak podélné cirkulace vymizí, a proto kritické výkony dosažené blízko nebo na křivce $\dot{M}_{bal}(k_1)$ jsou nejvyšší. Na obr. 3 pak nejvyšší kritický tavicí výkon není dosažen přímo na křivce $\dot{M}_{bal}(k_1)$ ale v její blízkosti (399,2 t/den). Příslušný specifický tavicí výkon sklářské pece činí 16,3 t/(m³den). Vpravo od křivky $\dot{M}_{bal}(k_1)$ se vyvíjejí podélné cirkulace ve směru pohybu hodinových ručiček a hodnoty $\dot{M}_{crit}$ začnou opět klesat, jak ukazuje poslední bod v obr. 3. Hodnoty u v zásadě sledují rostoucí tendenci při růstu $\dot{M}_{crit}$, avšak změna řídicího děje mezi $k_1 = 0,84$ až 0,90 a klesající hodnoty τ_{Href} s k_1 tuto tendenci oslabují. Výsledky nicméně prokazují efekt veličiny k_1 na kritický tavicí výkon - změnu charakteru proudění v homogenizačním regionu 2. V porovnání s hodnotami dosahovanými v samotném homogenizačním modulu [4] jsou v daném případě hodnoty využití celé malé T-pecce II menší, což je způsobeno velmi malým využitím konverzního regionu 1 s intenzivním míšením taveniny 19.

Hodnota maximálního kritického tavicího výkonu v obr. 3 však ukazuje určitou odchylku od křivky $\dot{M}_{bal}$, ačkoliv charakter proudění v homogenizačním regionu 2 vykazuje již efektivní, v tomto případě spirálovité proudění. To se projevuje proudnicemi na hladině, prakticky kolmými k bočním stěnám 13 homogenizačního regionu 2, jak ukazuje obr. 4. V příkladném provedení sklářské pece na obr. 4 sklářská vsázka 18 zasahuje z konverzního regionu 1 svou hranicí 21 až do cca 30 % délky ve směru podélné osy 24 do homogenizačního regionu 2.

Velmi pravděpodobným důvodem tohoto rozdílu je silný vertikální proud chladnější taveniny 19 ke dnu 9 začínající na hranici 21 vsázky 18, který je součástí intenzivní volné konvekce taveniny 19 v konverzním regionu 1. Vytvoří se tak druhý silný cirkulační okruh taveniny 20 pod vsázkou 18 proudící proti směru hodinových ručiček a rozdělí celý T-prostor na dvě vzájemně separované konvektivní oblasti. Stane se tak ovšem o něco dříve, tj. při nižších hodnotách k_1 , než odpovídá energeticky vyrovnanému stavu, který je touto separací toků charakterizován. Uniformní nebo v tomto případě spirálovitý tok se tedy v homogenizačním regionu 2 při růstu k_1 ustaví o něco dříve a závislost $\dot{M}_{crit}(k_1)$ je oproti křivce $\dot{M}_{bal}(k_1)$ posunuta mírně vlevo. Rozsah tohoto efektu roste s posunem hranice vsázky 18 směrem k výstupu 17 taveniny 20 z homogenizačního regionu 2 (s rostoucím využíváním homogenizačního regionu 2 pro konverzi vsázky 18). Rozdělení konvektivních toků taveniny 19 a 20 na dvě proudové oblasti ještě před dosažením vyrovnaného energetického stavu ukazuje obr. 5.

Kritické trajektorie v optimálním dosaženém případě (případ 5 v tabulce 1) vykazují spirálový tvar, jak ukazuje obr. 6. Ten teplotně průměruje průběh homogenizačních dějů a zvyšuje kapacitu homogenizačního regionu 2. Jeho výhodou je, že se nastolí i při slabých podélných cirkulacích v homogenizačním regionu 2.

Vznik spirálového proudění v homogenizačním regionu 2 má dva zdroje. Prvním jsou příčné cirkulace vyvolané podélnou teplotní bariérou složenou ze dvou paralelních podélných řad elektrod 4 umístěných v homogenizačním regionu 2. Energie, která může být k dispozici pro vznik příčného proudění, však pro vyvolání spirálovitého proudění nestačí. Druhým zdrojem je jev, kdy při aplikaci spalovacího tepla v malé T- peci II se bilance energie v tavenině zúčastní i teplo předávané mezi spalinami 22 a taveninou 20 ($\dot{H}_{gas}^L$, rovnice (1)). To ovlivňuje hodnoty $\dot{M}_{bal}$ v obr. 3 a tabulce 1 a má vliv i na charakter proudění v homogenizačním regionu 2. Pokud je konverzní region 1 zaplněn vsázkou 18 a podíl $k_{1,J}$ Joulova tepla k celkovému teplu dodávanému do konverzního regionu 1 je větší než 0,5 až 0,6, potom spaliny 22 odcházející nad taveninou 20 v homogenizačním regionu 2 jsou chladnější než tavenina 20 pod nimi. Spaliny 22 ochlazují shora taveninu 20 v homogenizačním regionu 2, nejvíce ihned za hranicí vsázky 18. To je zjevné z obr. 7, kde je uveden podélný kolmý řez T- prostorem a oblasti různé sytosti nad hladinou ukazují postupný růst teploty spalin 22 nad taveninou 20 v homogenizačním regionu 2. Vzniklá chladnější tavenina 20 je již existujícím příčným cirkulačním prouděním transportována k bočním stěnám 13

homogenizačního regionu 2, padá a posílí tyto již existující příčné cirkulace. Ty jsou pak dost silné, aby při daném průtoku taveniny 20 dovolily vzniku spirálovitého proudění. V případech s velkými výkony se tento efekt uplatňuje.

- 5 Uspořádání a podmínky nastolené v malé T-peci II prokázaly podle matematického modelu dostatečně vysoký výkon těsně pod 400 t/den (více než 16 t/m³den), specifická spotřeba energie na tavení činila 2610 kJ/kg, hodnoty matematického modelu tedy slibují dobré výsledky i v praktických případech. Byly splněny podmínky společného provozování obou regionu 1, 2, vsázka 18 v tomto případě obsadila kromě konverzního regionu 1 též 3,9 m² v homogenizačním regionu 2, homogenizační kapacita tohoto regionu však přesto postačovala tomuto tavicímu výkonu - též díky nastolení spirálového proudění - řídicí děj odstraňování bublin byl ukončen na dohodnutém místě a byla splněna podmínka kvality při maximálním využití prostoru sklářské pece.

15 Příklad 1.1 (Obr. 1a, 1b, 1c)

1.1.1 Kritický tavicí výkon malé T-pace II za podmínek sníženého tavicího výkonu.

- Jak již bylo řečeno, kritický výkon této sklářské T-pace II je flexibilní a je jej možno nastavit podmínky tak, aby kritický výkon byl menší než výkon maximální. Jsou možné dva způsoby, z nichž první pracuje s nižším využitím a bez tavicí rezervy a druhý při uniformním nebo spirálovém toku a s tavicí rezervou. Bude uveden popis prvního způsobu, při němž byla hodnota poměru k_1 dostatečně nízká, takže kritický tavicí výkon klesl pod 200 t/den a v homogenizačním regionu 2 existovalo příslušně intenzivní podélné cirkulační proudění, které pokles tavicího výkonu způsobovalo. Výsledek odpovídá prvnímu bodu hodnot $\dot{M}_{crit}$ při $k_1 = 0,693$ a kritický výkon dosáhl pouze 185,8 t/den. Obr. 1a ukazuje pohled na hladinu taveniny 19, která při menším kritickém výkonu nezaplňuje celý konverzní region 1, obr. 1b pak ukazuje vyvinuté podélné cirkulace v homogenizačním regionu 2, které zasahují až pod vsázku 18 v konverzním regionu 1 a obr. 3a kritické trajektorie pisku, které se v důsledku podélného cirkulačního proudění pohybují rychle vpřed u dna 2 homogenizačního regionu 2. Příklad je méně výhodný z hlediska tavicího výkonu a vykazuje mimo zvýšenou hodnotu specifické spotřeby energie.

Příklad 2 (Obr. 8, 9, 10, 11)

- 35 *2.1 Závislost kritických tavicích výkonů velké T-pace na charakteru proudění v homogenizačním regionu 1 při konstantním příkonu energie hořáky 5.*

- Veličina k_1 tj. podíl energie dodávané do konverzního regionu 1 z veškeré energie dodávané do T-pace, opět určuje globální charakter proudění v celém prostoru a hodnota k_1 byla řízena pouze změnou poměru příkonů Joulova tepla mezi konverzním regionem 1 a homogenizačním regionem 2. Velká T-pec s rozsáhlejším konverzním regionem 1 měla rozměry tohoto regionu na styku s taveninou 19: $X = 2,75\text{m}$, $Y = 6\text{m}$, $Z = 1\text{m}$ a rozměry homogenizačního regionu 2 byly $X = 6,77\text{m}$, $Y = 2\text{m}$, $Z = 1\text{m}$. Geometrie ohřevu zahrnovala 10 vertikálních hořáků 5 CH₄/O₂ v klenbě 6 konverzního regionu 1 a 62 molybdenových vertikálních elektrod 3 průměru 100 mm a výšky 0,8 m v konverzním regionu 1 a dvě podélné řady po 16 elektrodách 4 obklopující podélnou osu 24 v homogenizačním regionu 2, jejichž výška byla 0,6 m. Konstantní příkon energie hořáky byl ve všech případech 3233 kW. Rozložení hořáků 5 v klenbě 6 konverzního regionu 1 je znázorněno v obr. 8a a rozmístění elektrod 3 a 4 ve dně 8, 9 je ukázáno v obr. 8b.

- 50 Stejný postup pro získání hodnot $\dot{M}_{crit}$ a $\dot{M}_{bat}$ jako v příkladu 1 byl zvolen i zde. Tyto hodnoty a další relevantní veličiny jsou uvedeny v tabulce 2 a v obr. 9.

Tabulka 2

Hodnoty kritického tavicího výkonu $\dot{M}_{crit}$ a průtok taveniny při vyrovnaném rozmístění energie $\dot{M}_{bal}$ a další významné hodnoty.

5

Case	k_I	k_{IJ}	$S_{batch} [m^2]$	$\dot{M}_{crit}$ [kg/s]	$\dot{M}_{bal}$ [kg/s]	H_M^0 [kJ/kg]	τ_{Href} [s]	u	$\dot{M}_{batch}$ [kg/s]
6	0,62	0,38	9,757	233,3	3,24	3111	1958	$u_F=0,076$	0,277
1	0,75	0,435	7,897	207,4	80,5	3188	2626	$u_F=0,090$	0,364
2	0,84	0,68	16,636	380,2	171,7	2749	2496	$u_F=0,157$	0,264
8	0,90	0,73	18,230	449,3	382,1	2376	1943	$u_F=0,145$	0,285
4	0,92	0,74	18,426	460,5	478,6	2552	1954	$u_F=0,149$	0,289
9	0,93	0,71	15,444	394,8	517,5	2624	1945	$u_F=0,137$	0,296
3	0,95	0,71	15,064	381,9	694,7,9	2651	1954	$u_F=0,124$	0,293

Velká T-pec (pec s větším konverzním regionem 1) pracující při konstantním příkonu z hořáků 5 rovném 3233 kW a při průměrné teplotě 1420 °C. k_I je podíl energie z celkové dodané energie do velké T-pece, k_{IJ} z podíl Joulova tepla z celkového tepla dodaného do konverzního region 1, u je využití prostoru. F - kritickým dějem je odstraňování bublin (čerení), D - kritickým dějem je rozpouštění pískových zrn, S_{batch} je plocha hladiny pokrytá vsázkou 18, H_M^0 je specifická spotřeba tepla na tavení, $\dot{M}_{batch}$ je průměrná specifická rychlost konverze vsázky 18 v kgm^2s^{-1} , τ_{Href} je referenční doba řídicího homogenizačního děje. Optimální případ je uveden tučným písmem.

15

Závislost hodnot $\dot{M}_{crit}$ v obr. 9 prokazuje zřejmý nárůst s rostoucí hodnotou k_I a v tabulce 2 příslušný růst hodnot využití řídicího děje. Maximální výkon činí 460,5 t/den, tj. 15,9 t/(m³den). Výjimku ve vývoji $\dot{M}_{crit}$ tvoří dvě hodnoty při nejnižších hodnotách k_I . Důvodem anomálního chování je změna řídicího děje (viz tabulka 2). Při poklesu k_I se dodává stále větší množství energie do homogenizačního region 2 a teplota v tomto regionu stoupá. Odstraňování bublin je na růst teploty v regionu citlivější a více se urychluje, zde došlo ke vzrůstu $\dot{M}_{crit}$ dokonce při $k_I = 0,62$. Hodnota maximálního kritického výkonu se v tomto prostoru nachází právě na křivce závislosti $\dot{M}_{bal}(k_I)$, což odpovídá teoretickému předpokladu. Efekt klesajícího toku taveniny 19, 20 od hranice vsázky 18 ke dnu 9 zde tedy není významný jako v příkladu 1. Růst hodnot k_I je doprovázen zeslabováním cirkulačního proudění se zpětným tokem na hladině v homogenizačním region 2, pokračuje uniformním, v tomto případě spirálovitým tokem v místě závislosti $\dot{M}_{bal}(k_I)$ vyznačeným proudnicemi kolmými k bočním stěnám 13 (viz obr. 10) a ukončuje se vznikem cirkulačního proudění ve směru hodinových ručiček, kdy kritický tavicí výkon začne klesat. V příkladném provedení sklářské pece na obr. 10 sklářská vsázka 18 zasahuje z konverzního regionu 1 svou hranicí 21 až do cca 25 % délky ve směru podélné osy 24 do homogenizačního regionu 2.

30

Kritické trajektorie částic poskytují obraz podobný předchozímu příkladu. V případě optimálních podmínek při $k_I = 0,92$ se vyvinuly výhodné spirálové trajektorie bublin (odstraňování bublin je řídicí děj), jak ukazuje obr. 11.

35

Uspořádání a podmínky nastolené ve velké T-peci prokázaly podle matematického modelu maximální kritický výkon až 460 t/den (15,9 t/m³den), specifická spotřeba energie na tavení činila 2550 kJ/kg, hodnoty tedy slibují dobré výsledky i v praktických případech. I zde byly splněny podmínky společného provozování obou region 1, 2, vsázka 18 v tomto případě obsadila kromě konverzního regionu 1 též 1,9 m² v homogenizačním region 2 a homogenizační kapacita tohoto regionu postačovala tomuto tavicímu výkonu též díky nastolení spirálovitého proudění, řídicí děj odstraňování bublin byl ukončen na přepážce 16 a byla splněna podmínka kvality taveniny 20 při maximálním využití prostoru.

40

Příklad 3 (Obr. 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18)

3.1. *Závislost kritických tavicích výkonů malé T-pecce I na charakteru proudění v homogenizačním regionu 2 při konstantním poměru Joulova tepla k celkovému teplu dodanému do konverzního regionu 1.*

Při hledání maximálního kritického tavicího výkonu T-pecí se konverzní schopnost konverzního regionu 1 jevila jako omezující faktor dosažitelného výkonu. Je tedy třeba hodnotit optimální podmínky tohoto děje. Použitý matematický model neuvažuje vliv vnitřních faktorů konverze vsázky 18, je však možno vyhodnotit a zahrnout vliv faktorů vnějších plynoucích z již nastolených podmínek popsanych v prvním a druhém příkladu. Těmito faktory je vliv konvekce taveniny a poměr mezi podílem spalovacího a Joulova tepla na specifickou konverzní rychlost vsázky 18. Vliv konvekce taveniny 19 v konverzním regionu 1 je možno popsat pomocí veličiny k_1 , neboť podíl energie vložený do konverzního regionu 1 je zásadní pro vyvolání výrazné konvekce taveniny 19 pod vsázkou 18 a tedy i pro případné urychlení konverze vsázky 18. Druhou podmínkou je veličina k_{1J} určující podíl Joulovy energie dodané do konverzního regionu 1, která indikuje rozdíl mezi intenzitou rozkladu vsázky 18 Joulovým a spalovacím teplem. Význam obou veličin byl podrobněji zkoumán u obou T-prostorů.

3.2 *Vliv intenzity a charakteru konvekce taveniny na specifickou rychlost konverze vsázky $\dot{M}_{Sbatch}$.*

Již dosavadní výsledky ukazovaly, že systém ohřevu vertikálními elektrodami 3 v konverzním regionu 1 dovoluje dosáhnout podstatně vyšších, dvojnásobných až trojnásobných hodnot specifické rychlosti konverze vsázky 18 na taveninu 19 a daný systém ohřevu je zakotven v uděleném užitém vzoru [22], který se týká konverzního regionu 1. Zůstalo ještě nevyřešeno, jak se projevují změny hodnoty k_1 v celé T-peci, tj. po spojení konverzního regionu 1 s homogenizačním regionem 2. Za tím účelem byly provedeny výpočty na malé T-peci II, kde byla sledována závislost specifické konverzní rychlosti $\dot{M}_{Sbatch}$ na hodnotě k_1 . Výsledky jsou uvedeny v obr. 12.

Již předchozí výpočty ukazovaly, že při hodnotách $k_1 > 0,7$ vzrostla hodnota $\dot{M}_{Sbatch}$ asi o 13 %. Nebylo ale jasné, jaký vliv mají naopak malé hodnoty k_1 , kdy pod vsázkou 18 přichází silný zpětný tok taveniny 20 z homogenizačního regionu 2 a vyvolává rovněž intenzivní konvekce pod vsázkou 18. Z dalších výpočtů vyplynulo, že při vysokých hodnotách k_1 se předchozí výsledky potvrdily, podle obr. 12 vyrostly hodnoty $\dot{M}_{Sbatch}$ mezi $k_1 = 0,6$ až $0,9$ o cca 17 %, kolem $k_1 = 0,6$ procházejí hodnoty minimem, avšak při poklesu ke $k_1 = 0,2$ opět vzrostou asi o 10 %. Výsledky modelování při nízkých hodnotách k_1 ukázaly, že vzrůst je způsoben rychlým a horkým zpětným proudem taveniny 20 při hladině z homogenizačního regionu 2 do konverzního regionu 1. Při vysokých hodnotách k_1 se tedy projevuje vliv konvekce vyvolané elektrodami 3 přímo pod vsázkou 18, při nízkých hodnotách k_1 pak vliv horkého a rychlého zpětného toku taveniny 20 z homogenizačního regionu 2, oba efekty jsou však celkově malé.

3.3 *Vliv podílu Joulova tepla dodaného do konverzního regionu 1, k_{1J} , na specifickou rychlost konverze vsázky 18, $\dot{M}_{Sbatch}$.*

Byly modelovány případy s hodnotami k_{1J} mezi 0.5 - 0.85 ve všech třech modelovaných typech T-pecí pro případ konverzního regionu 1 zakrytého vsázkou 18 a získány příslušné hodnoty $\dot{M}_{Sbatch}$ další hodnoty byly získány pro krajní hodnoty $k_{1J} = 1$. Výsledky jsou uvedeny v obr. 13.

Obr. 13 informuje, že pokles hodnoty k_{1J} , tedy přesun většího podílu energie v konverzním regionu 1 z elektrod 3 na hořáky 5, vede ke zvýšení průměrné specifické rychlosti konverze vsázky 18. Projevil se vliv rostoucí teploty spalovacího prostoru na rychlost konverze. Konverze působením vertikálních hořáků 5 spojená s těsným kontaktem až atakem vsázky 18 žhavými spalinami byla tedy při nižších hodnotách k_{1J} intenzivnější než konverze vyvolaná elektrodami 3

zdola. Zrychlením konverze vsázky 18 se zmenšuje celková plocha zaplněná vsázkou a při stejném zaplnění se může se dosáhnout vyšších kritických tavicích výkonů. Krajiní hodnoty $\dot{M}_{Sbatch}$ při $k_{IJ} = 1$ (celoelektrický prostor) získané na malé T-peci II s elektrodami 3 průměru 100 mm a při různých průtocích taveniny 19 (2,5 až 4,5 kg/s) vykazují v obr. 13 kontinuitu s prezentovanými závislostmi a nezávislost hodnot $\dot{M}_{Sbatch}$ jak na typu pece a elektrod 3, tak na průtoku taveniny 19, 20.

Hodnoty $\dot{M}_{Sbatch}$ získané posunutím bočních vstupů 14 vsázky 18 k přední čelní stěně 10 konverzního regionu 1 velké T-peci (viz obr. 13) vykazaly prakticky stejné hodnoty jako případy původních centrálních vstupů 14, s výjimkou o něco vyšší hodnoty při $k_{IJ} = 0,5$. Posunutí bočních vstupů 14 vsázky 18 odstraňuje oblast volné hladiny taveniny 19, která se vytváří při čelní stěně 10 konverzního regionu 1 v případě velkých kritických výkonů a nižších hodnot k_{IJ} . Vymizením nezakrytého prostoru v konverzním regionu 1 se následně hranice 21 vsázky 18 v homogenizačním regionu 2 stáhne zpět a umožní případné zvýšení kritického tavicího výkonu. To je zřejmé z následujícího obr. 14.

V příkladech 1 a 2 činily hodnoty k_{IJ} v optimálních případech 0,74 až 0,75. Snížení této hodnoty spojené s růstem $\dot{M}_{Sbatch}$ může dle předchozího textu (viz obr. 13) vést k vyšším kritickým tavicím výkonům, než bylo zatím dosaženo ve zmíněných předchozích příkladech. Přesun energie do hořáků 5 rovněž odstraňuje přehřátí taveniny 19 v konverzním regionu 1 a zamezí nízkým teplotám taveniny 20 v homogenizačním regionu 2, které snižují jeho homogenizační kapacitu (především pro odstraňování bublin).

Avšak snižování hodnoty k_{IJ} vede k postupnému zvyšování teplot spalín 22 v konverzním regionu 1, proto není schůdné snížit hodnotu k_{IJ} pod 0,5, při níž teplota na klenbě 6 konverzního regionu 1 dosáhne v případě centrálních vstupů 14 teploty větší než 1500 °C; v případě vstupů 14 posunutých k čelní stěně 10 T-peci je však při maximálních výkonech nižší.

Snižování hodnot k_{IJ} rovněž zeslabuje hnací sílu spirálového proudění v homogenizačním regionu 2. Z uvedených důvodů se při oboustranném ohřevu jako výhodné jeví hodnoty $k_{IJ} > 0,50$.

Pro další výpočty kritických tavicích výkonů byla použita malá T-pec I s elektrodami 3 a 4 průměru 76 mm. Podrobnější popis sklářské pece je uveden v příkladu 1, měnil se jen počet a uspořádání elektrod 3, 4. Uspořádání hořáků 5 je uvedeno v obr. 2. V konverzním regionu 1 pak bylo osazeno 36 elektrod 3 výšky 0,8 m a v homogenizačním regionu 2 byla umístěna centrální řada elektrod 4 s výškou 0,3 m, jako je uvedeno v obr. 15.

Po vyhodnocení výsledků studia průměrné specifické rychlosti konverze vsázky 18 se usoudilo, že optimální použitelné hodnoty k_{IJ} se pohybují mezi 0,6 až 0,7, hodnoty k_I jsou pak diktovány potřebou řídit tok taveniny 20 v homogenizačním regionu 2 a zůstanou mezi 0,5 až 0,95. Pro výpočet optimálního kritického tavicího výkonu byly zvoleny případy $k_{IJ} = 0,6$ a 0,675. V obou případech bylo s nastavenými hodnotami dosaženo vysokých maximálních kritických tavicích výkonů, 475,2 a 457,9 t/den, což je v případě $k_{IJ} = 0,60$ o 19,6 % více a v případě $k_{IJ} = 0,675$ o 15,2 % více, než v bylo dosaženo optimálním nastavením v příkladu 1. Nastavení hodnoty k_{IJ} se tedy ukázalo jako účinné. Pro výpočty celé řady s proměnnými hodnotami k_I byl zvolen případ s vyšším maximálním kritickým tavicím výkonem charakterizovaný hodnotou $k_{IJ} = 0,60$. Tento případ se projevil malými plochami volné hladiny taveniny 19 v rozích konverzního regionu 1 blíže homogenizačnímu regionu 2 (viz obr. 17), což nebylo shledáno závadou pro dosažení maximálního výkonu. Rozsah a existence těchto nežádoucích ploch jsou regulovatelné polohou vstupů 14 vsázky 18, zde malým posunem vstupů 14 ke středu boční stěny 12 konverzního regionu 1.

Výsledky výpočtů kritických výkonů v závislosti na hodnotě k_I udává tabulka 3.

Tabulka 3

Hodnoty kritického tavicího výkonu $\dot{M}_{crit}$ a průtok taveniny při vyrovnaném rozmístění energie $\dot{M}_{bal}$ a další významné hodnoty.

5

Case	k_I	k_{IJ}	S_{batch} [m ²]	$\dot{M}_{crit}$ [t/den]	$\dot{M}_{bal}$ [t/den]	H_M^0 [kJ/kg]	τ_{Href} [s]	u	$\dot{M}_{batch}$ [kg/s]	t_{Glass} [°C]
23	0,925	0,675	14,660	461,8	-	2547,1	2080	$u_D = 0,171$	0,317	-
24	0,94	0,60	14,813	457,9	-	2572,7	1915	$u_D = 0,179$	0,357	-
25*	0,94	0,60	15,330	475,2	321,4	2554,6	1960	$u_D = 0,190$	0,359	1401,2
26*	0,85	0,60	14,738	397,4	128,7	2643,7	2222	$u_D = 0,180$	0,312	1424,6
27*	0,75	0,60	14,321	345,6	70,0	2688,1	2327	$u_D = 0,164$	0,279	1443,2
28*	0,60	0,60	11,744	241,9	30,2	2783,5	2407	$u_D = 0,119$	0,238	1459,7
29*	0,50	0,60	11,19	216,0	18,6	2780,2	2500	$u_D = 0,110$	0,223	1451,4

* vstup posunutý k čelní stěně 10 konverzního regionu 1

- 10 Malá T-pec I s elektrodami 3, 4 průměru 76 mm pracující při průměrné teplotě 1420 °C, kde k_I je podíl energie z celkové dodané energie do malé T-pece I, k_{IJ} je podíl Joulova tepla z celkového tepla dodaného do konverzního regionu 1, u je využití prostoru. F - kritickým dějem je odstraňování bublin (čeření), D - kritickým dějem je rozpouštění pískových zrn, S_{batch} je plocha hladiny pokrytá vsázkou 18, H_M^0 je specifická spotřeba tepla na tavení, $\dot{M}_{batch}$ je průměrná specifická rychlost konverze vsázky 18 v kgm²s⁻¹, τ_{Href} je referenční doba řídicího homogenizačního děje a t_{Glass} je průměrná teplota taveniny 20 v homogenizačním regionu 2. Optimální případ je uveden tučným písmem.

Závislost kritických tavicích výkonů $\dot{M}_{crit}$ a průtoků při vyrovnaném rozmístění energie $\dot{M}_{bal}$ na podílu energie k_I dodávané do konverzního regionu 1 k celkové dodané energii do pece je znázorněna v obr. 16. V obr. 16 je patrný rychlý více než dvojnásobný růst kritického tavicího výkonu s růstem k_I , tedy s poklesem intenzity podélných cirkulací. Křivka $\dot{M}_{bal}(k_I)$ se díky svému strmému růstu setkává s křivkou kritických tavicích výkonů v oblasti $k_I = 0,95$ a očekávaně se zde nachází maximální kritický tavicí výkon. Poslední bod na křivce $\dot{M}_{bal}$ při $k_I = 0,96$ byl získán při 25 extrapolovaných hodnotách ztrát $\dot{H}_{gas}^L$ do spalín 22 v homogenizačním regionu 2 a specifické spotřeby H_{gasM} tepla na ohřev plynů. Poloha maximálního tavicího výkonu těsně vlevo od křivky $\dot{M}_{bal}(k_I)$ odpovídá předpokladu nejvýhodnějšího výkonu při velmi nízké intenzitě zpětné cirkulace taveniny 20 v homogenizačním regionu 2. Charakter proudění na hladině ukazující toto nízké zpětné proudění pak ukazují proudnice na obr. 17. V příkladném provedení sklářské pece na 30 obr. 17 sklářská vsázka 18 zasahuje z konverzního regionu 1 svou hranicí 21 až do cca 30 % délky ve směru podélné osy 24 do homogenizačního regionu 2. Vsázka 18 obsadila v homogenizačním regionu 2 zhruba 3,3 m², což je jen o málo víc než v příkladu 1 (3,09 m²), ačkoliv dosahovaný výkon v tomto příkladu je o cca 20 % vyšší. Je to díky nižší hodnotě k_{IJ} , při níž se dosahuje vyšší hodnoty specifické rychlosti konverze vsázky 18 v tomto příkladu 0,359 kgm⁻²s⁻¹ oproti 35 0,289 kgm⁻²s⁻¹ příkladu 1 a díky menšímu přehřívání konverzního regionu. V dané řadě klesá hodnota $\dot{M}_{Sbatch}$ s klesajícím k_I , neboť současně klesá i množství energie dodávané hořákům 5 (viz tabulka 3). Objevují se menší rohy volné hladiny taveniny 19 blízko vstupů 14 a dále od přední čelní stěny 10 konverzního regionu 1, které lze odstranit malým posunem těchto vstupů od přední čelní stěny 10 konverzního regionu 1 směrem ke středu boční vstupní stěny 10.

40

Kritickým dějem v případě maximálního výkonu bylo odstraňování bublin, při nižších hodnotách to bylo rozpouštění písků. Obr. 18 ukazuje mírně spirálovou dráhu kritické bubliny. Spirálový účinek spalín je zde již malý, neboť při dané hodnotě k_{IJ} mají odcházející spaliny 22 poměrně

vysokou teplotu a málo ochlazuje taveninu 20. Výsledek tavicího výkonu 475,2 t/den (specifický tavicí výkon 19,4 t/(m³den) byl nejvyšší hodnotou kritického tavicího výkonu, kterého je možno na dané malé T-peci I dosáhnout za daného uspořádání ohřevu a při uvažování jeho dalších vlivů.

5 Příklad 4 (Obr. 19, 20, 21)

4.1 Závislost kritických tavicích výkonů velké T-pace na charakteru proudění v homogenizačním regionu 2 při konstantním poměru Joulova tepla k celkovému teplu dodanému do konverzního regionu 1.

10

I v případě velké T-pace, jejíž podrobný popis je uveden v příkladu 2, byly jako potenciálně výhodné testovány případy s hodnotami k_{IJ} rovnými 0,6 a 0,675. Dosažené hodnoty maximálního kritického výkonu činily 587,5 t/den pro $k_{IJ} = 0,6$ a 514,9 t/den pro $k_{IJ} = 0,675$. To bylo pro $k_{IJ} = 0,6$ o 27,6 % více, než bylo dosaženo v optimálním případě v příkladu 2 a o 11,8 % více pro $k_{IJ} = 0,675$.

15 Pro výpočty s proměnným k_I byl opět zvolen výhodnější případ při $k_{IJ} = 0,6$.

Výsledky výpočtů kritických výkonů v závislosti na hodnotě k_I udává tabulka 4.

Tabulka 4

20

Hodnoty kritického tavicího výkonu $\dot{M}_{crit}$ a průtok taveniny při vyrovnaném rozmístění energie $\dot{M}_{bal}$ a další významné hodnoty.

Case	k_I	k_{IJ}	S_{batch} [m ²]	$\dot{M}_{crit}$ [t/den]	$\dot{M}_{bal}$ [t/den]	H_M^0 [kJ/kg]	τ_{ref} [s] 1420 °C	u	$\dot{M}_{batch}$ [kg/s]	t_{Glass} [°C]
16Pe	0,94	0,675	18,822	514,9	-	2577,6	1965	$u_F = 0,168$	0,317	-
11Pe	0,945	0,60	19,824	587,5	428,5	2611,6	1964	$u_F = 0,191$	0,387	1404
17Pe	0,90	0,60	17,967	502,0	237,6	2687,3	1933	$u_F = 0,161$	0,323	1420,9
18Pe	0,85	0,60	17,926	466,6	158,1	2744,4	1939	$u_F = 0,150$	0,301	1442,1
19Pe	0,75	0,60	18,988	449,3	92,4	2769,1	1956	$u_F = 0,146$	0,274	1456,6
20Pe	0,60	0,60	22,79	301,1	48,4	2730,9	1942	$u_F = 0,161$	0,255	1462,6
21Pe	0,50	0,60	22,94	483,8	26,8	2732,1	1943	$u_F = 0,156$	0,244	1489

25

Velká T-pec pracující při průměrné teplotě 1420 °C. k_I je podíl energie z celkové dodané energie do T-pace, k_{IJ} je podíl Joulova tepla z celkového tepla dodaného do konverzního regionu 1, u je využití prostoru. Index F - kritickým dějem je odstraňování bublin (čeření), index D - kritickým dějem je rozpouštění pískových zrn, S_{batch} je plocha hladiny pokrytá vsázkou 18, H_M^0 je specifická spotřeba tepla na tavení, $\dot{M}_{Sbatch}$ je průměrná specifická rychlost konverze vsázky 18 v kgm²s⁻¹, τ_{Href} je referenční doba řídicího homogenizačního děje a t_{Glass} je průměrná teplota taveniny 20 v homogenizačním regionu 2. Všechny výpočty byly provedeny se vstupem 14 vsázky 18 posunutými k přední čelní stěně 10 konverzního prostoru 1. Optimální případ je uveden tučným písmem.

30

35

Závislost kritických tavicích výkonů $\dot{M}_{crit}$ a dovolených průtoků při vyrovnaném rozmístění energie $\dot{M}_{bal}$ na podílu energie dodávané do konverzního regionu 1, kde k_I je v obr. 19. Charakter závislosti se liší od závislosti v minulém případě. Při nízkých k_I jsou hodnoty kritických tavicích výkonů podstatně vyšší než u malé T-pace I (viz tabulka 3), s rostoucím k_I však víceméně stagnují a pouze blízko u závislosti $\dot{M}_{bal}$ (k_I se zvýší a dosáhnou maxima při $k_I = 0,945$). Důvodem pro toto chování je rozdílná velikost regionů 1,2, různý význam každého z těchto regionů pro uskutečnění toho či onoho děje a aktuální podmínky pro nastolení řídicího děje, určované kinetikou obou dějů a homogenizační kapacitou daného homogenizačního regionu 2.

40

Rozpouštění písku nastává již ve vsázce a hluboko v konverzním regionu 1. Zde se pak odehrává i další fáze rozpouštění pískových zrn v tavenině 19 míchané konvekci vyvolanou elektrodami 3. Rozpouštění písku má tak své těžiště v konverzním regionu 1. Je-li rozpouštění písku řídicím dějem homogenizace, růstem k_I se zvyšuje využití a současně se zkracuje průměrná doba rozpouštění písku v důsledku růstu teplot v konverzním regionu 1. Následkem těchto změn působících ve stejném směru klesá při zmenšujícím se k_I strmě kritický tavicí výkon, jak je zřejmé u předchozího případu malé T-pece. Naproti tomu bubliny se uvolňují ze vsázky 18 až na styčné ploše vsázky 18 a taveniny 19, velká část bublin se dostává do taveniny 20 homogenizačního regionu 2 až z míst blízkých hranici 21 vsázky 18. Odstraňování bublin má tedy těžiště v homogenizačním regionu 2. Je-li kritickým dějem odstraňování bublin, růst k_I vyvolá sice rovněž růst využití (např. maximální podélné rychlosti taveniny 20 u dna 9 homogenizačního regionu 2 měřené zhruba v polovině délky cirkulačního okruhu a v centrálním řezu mezi řadou elektrod 4 a boční stěnou 13 klesly z hodnoty 22,2 mm/s při $k_I = 0,5$ na 2,9 mm/s při $k_I = 0,945$), avšak současně se prodlouží referenční doba odstranění bublin v důsledku klesající průměrné teploty taveniny 20 v homogenizačním regionu 2. Protože oba děje jdou proti sobě, roste při řízení odstraňováním bublin kritický tavicí výkon jen málo, případně stagnuje, nebo se dokonce nepatrně sníží. To je zřejmé z tabulky 5, obr. 19 i vzorce pro výkon:

$$\dot{M}_{crit} = \frac{\rho V}{\tau_{Href}} u_H$$

20

kde

 ρ je hustota skelné taveniny, V je objem prostoru, τ_{Href} je referenční doba řídicího homogenizačního děje a25 u_H je využití prostoru pro řídicí homogenizační děj.

Tento rozdílný charakter dějů ovlivňuje jejich nastolení jako řídicího děje a průběh kritických tavicích výkonů: jsou-li lepší podmínky v konverzním regionu 1, řídicím dějem se stane odstraňování bublin s pomalým vzrůstem kritického tavicího výkonu při růstu k_I , jsou-li lepší podmínky v homogenizačním regionu 2, řídicím dějem je rozpouštění písku se strmějším růstem kritického tavicího výkonu. Při nízkých hodnotách k_I jsou v homogenizačním regionu 2 vyšší teploty než v konverzním regionu 1 a řídicím dějem bývá obvykle rozpouštění písku, které má těžiště v konverzním regionu 1. Při vyšších hodnotách k_I jsou naopak vyšší teploty v konverzním regionu 1 a řídicím dějem se stává odstraňování bublin. V daném případě je však konverzní region 1 větší než region homogenizační region 2 a písková zrna mají lepší příležitost se v tomto regionu rozpouštět i za nižších hodnot k_I a nižších teplot. Řídicím dějem je potom odstraňování bublin, a protože teplota v homogenizačním regionu 2 je ještě vysoká, je i kritický tavicí výkon vysoký, vzrůst výkonu s k_I je však pomalý. S dalším růstem k_I se pak dále podporuje rozpouštění písku v konverzním regionu 1, kde rostou teploty s růstem dodávané energie, zatímco se odčerpává energie z homogenizačního regionu 2, kde teploty klesají. Čerání proto zůstává řídicím dějem. Pokles teploty v homogenizačním regionu 2 je zřejmý z tabulky 4, kde průměrná teplota poklesne z hodnoty 1469 °C při $k_I = 0,5$ k hodnotě 1404 °C při $k_I = 0,945$, tj. o 65 °C. To je větší pokles teploty, než jaký se odehrává v případě o něco nižších výkonů v tabulce 3 u malé T-pece I (50,2 °C). Snížující se teplota homogenizačního regionu 2 nakonec limituje maximální tavicí výkon a křivka závislosti $\dot{M}_{crit}(k_I)$ je plochá, jak ukazuje obr. 19.

Celkový charakter vlivu k_I na kritický tavicí výkon proto závisí na řídicím ději homogenizace: při řídicím ději rozpouštění písku kritický tavicí výkon rychle stoupá s růstem k_I , při řízení odstraňováním bublin stoupá jen pomalu nebo kolísá a význam hodnoty k_I pro kritický tavicí výkon je menší než v případě, kdy je řídicím dějem rozpouštění písku. Protože v homogenizačním regionu 2 jsou při nízkých hodnotách k_I vysoké teploty a dochází k rychlému čerání, jsou hodnoty kritických tavicích výkonů v případě řízení čeráním vysoké i při nižších hodnotách k_I . Nicméně bývá a též v tomto příkladu je dosažen největší kritický tavicí výkon za nejlepšího využití při

$k_I = 0,945$, tj. v okolí křivky $\dot{M}_{bal}(k_I)$ - Proto je výhodnější pracovat při vysokých hodnotách k_I , kde se odpovídající hodnoty M_{crit} nacházejí.

V tomto uvedeném případě se projevil vliv rozdílu velikostí konverzního regionu 1 a homogenizačního regionu 2 (větší konverzní region 1 podpořil rozpouštění a řídicím dějem se stalo čerání), je tedy třeba uvažovat i o nastavení velikostí obou regionů 1, 2.

Jsou-li oba regiony 1, 2 nestejně velké, při dané hodnotě k_I bude v menším regionu vždy vyšší koncentrace dodávané energie, a to bude podporovat vyšší teplotu v tomto regionu, naproti tomu bude mít menší region s vyšší teplotou menší homogenizační kapacitu. Podle tohoto případu se zdá, že velikost regionu má větší význam než ustavená teplota v regionu (konverzní region byl větší, lze v něm předpokládat nižší teplotu než v případě obou stejných regionů, avšak rozpouštění písků se nestalo řídicím dějem).

Stane-li se obecně řídicím dějem čerání, homogenizační region 2 nestačí svou čerací kapacitou a řešením by bylo urychlit čerání v tavenině např. lepším čerivem nebo nastavit homogenizační region 2 o něco větší, než je konverzní region 1. Ve zde uvedených příkladných provedeních dle příkladů 1 až 3 předloženého technického řešení, se oba děje jeví jako přibližně stejně rychlé a vyhovovala malá T-pec I a malá T-pec II s přibližně stejnými regiony 1, 2. V příkladu 4 měla však velká T-pec větší kapacitu na rozpouštění písků v důsledku většího konverzního regionu 1. Čerání limitovalo maximální kritický tavicí výkon a vyššího maximálního výkonu by tedy bylo možno dosáhnout prodloužením homogenizačního regionu 2.

Křivka $\dot{M}_{bal}(k_I)$ v obr. 19 je podle očekávání strmá v oblasti nad $k_I = 0,90$ a poslední bod při $k_I = 0,96$ je extrapolovaný stejně jako v minulém příkladu. Hodnota maximálního kritického výkonu se opět očekávaně nachází těsně před závislostí $\dot{M}_{bal}(k_I)$, kde se nachází nejvýhodnější typ proudění. Vsázka 18 zabírá v optimálním případě cca $2,5 \text{ m}^2$ v homogenizačním regionu 2 (pohled na hladinu je v obr. 20), to je pouze o $0,6 \text{ m}$ více než v optimálním případě příkladu 2, kritický výkon je však vyšší o $27,6 \%$. V příkladném provedení sklářské pece na obr. 20 sklářská vsázka 18 zasahuje z konverzního regionu 1 svou hranicí 21 až do cca 20% délky ve směru podélné osy 24 do homogenizačního regionu 2. Je to opět díky vysoké hodnotě specifické konverzní rychlosti $0,357 \text{ kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Tato hodnota opět klesá s klesajícím k_I v důsledku zmenšujícího se množství energie dodávané do konverzního regionu 1. Osvědčilo se posunutí vstupů 14 vsázky 18 k přední čelní stěně 10 homogenizačního regionu 2.

Obr. 21 přináší průměty kritických trajektorií bublin v homogenizačním regionu 2, odstraňování bublin je opět kritickým dějem. Trajektorie jsou výrazně spirálovité a přispěly k vysokému tavicímu výkonu velké T-pece. Dosažený kritický tavicí výkon $587,5 \text{ t/den}$, specifický výkon $20,3 \text{ t/(m}^3\text{den)}$ je opět maximální za daného nastavení ohřevu a uvažování jeho dalších vlivů.

Příklad 5 (Obr. 22, 23, 24)

5.1 Maximální kritický tavicí výkon velké T-pece při ohřevu homogenizačního regionu 2 shora a při konstantním poměru k_{IJ} Joulova tepla k celkovému teplu dodanému do konverzního regionu 2.

Ohřev homogenizačního regionu 2 shora hořáky 25 může plnit funkci pro nastolení uniformního toku, nebude však příliš výhodný při nízkých hodnotách k_I neboť při dané konstrukci budou z T-pece odcházet velmi horké spaliny 22 i tavenina 20. Při provozování tavení blízko závislosti $\dot{M}_{bal}$ (při uniformním toku) je však ohřev homogenizačního regionu 2 slabý a problém mizí. Byl proto proveden výpočet kritického tavicího výkonu při hodnotě $k_{IJ} = 0,6$ a dvou hodnotách k_I $0,7$ a $0,9$, kde druhá hodnota poskytla přibližně uniformní tok a maximální hodnotu kritického tavicího výkonu. Za podobných energetických podmínek ($k_I > 0,9$, $k_I = 0,6$) přesahuje výsledná maximální hodnota kritického tavicího výkonu $617,8 \text{ t/den}$ lehce analogickou hodnotu maximálního kritického tavicího výkonu případu s ohřevem taveniny 20 v homogenizačním regionu 2 zdola elektrodami 4, která činila $587,5 \text{ t/den}$. Teploty odcházející taveniny 20 činily

1450 °C a teploty odcházejících spalin 22 kolem 1500 °C, což je malou nevýhodou ohřevu hořáky 25 shora. Při hodnotě $k_1 = 0,7$ se v homogenizačním regionu 2 vyvinulo podélné cirkulační proudění proti směru hodinových ručiček a kritický tavicí výkon logicky poklesl. Teploty odcházející taveniny 20 a spalin 22 byly vysoké. Obr. 22 ukazuje v případě optimální hodnoty $k_1 = 0,9$ polohu hranice 21 vsázky 18 v homogenizačním regionu 2 při pohledu shora. V příkladném provedení sklářské pece na obr. 22 sklářská vsázka 18 zasahuje z konverzního regionu 1 svou hranicí 21 až do cca 20 % délky ve směru podélné osy 24 do homogenizačního regionu 2. Obr. 23 ozřejmuje charakter podélného přibližně uniformního proudění v centrálním řezu XZ homogenizačním regionem 2.

Charakter proudění v tomto případě - analogickém případě s ohřevem homogenizačního regionu 2 elektrodami 4 byl odlišný, neboť na rozdíl od ohřevu elektrodami 4 zde nelze dosáhnout spirálového proudění. Díky hořákům 25 byly spaliny 22 v homogenizačním regionu 2 dost horké (viz zejména tenká vrstvička horkých spalin 22 z hořáků 25 v homogenizačním regionu 2 u hladiny taveniny 20 a nedocházelo k ohřátí spalin 22 taveninou 20, které je podmínkou nastolení spirálového toku. Kritické trajektorie však procházely horní částí homogenizačního regionu 2, kde jsou vysoké teploty, výhodné pro rychlou kinetiku homogenizačního děje. Pokrytí hladiny vsázkou 18 bylo v obou případech téměř stejné jako v případě s ohřevem elektrodami 4, což je v souladu s téměř stejným kritickým tavicím výkonem. Ohřev homogenizačního regionu 2 hořáky 25 shora se ale osvědčil pouze pro hodnoty k_1 odpovídající vyrovnanému rozmístění energie a uniformnímu toku.

Zobecnění výsledků

Výpočty byly provedeny na peci, jejíž základní charakteristiky jako tvar, velikost a způsob otopu se jevíly výhodnými pro uskutečnění myšlenky *využití tavicího prostoru* jako významného faktoru tavicího procesu skel. Byly přednostně sledovány podmínky, při nichž se charakter proudění taveniny 19, 20 kvantifikovaný hodnotou využití významně uplatňuje. Základní principy využití prostoru pro zvýšení efektivity tavicího procesu jsou však využitelné i pro jiné typy zařízení, počítaje v to i existující průmyslové tavicí prostory. Je užitečné vymezit tyto obecné principy:

- 1. Princip rozdělení tavicího prostoru na úvodní konverzní region 1 a následující homogenizační region 2 je přenosný na všechny horizontální tavicí prostory, kde oba regiony 1, 2 nejsou od sebe pevně odděleny a oba základní děje - konverze vsázky 18 a homogenizace taveniny 20 - probíhají za sebou v horizontálním směru. Pokud alternativně jsou oba regiony 1, 2 od sebe odděleny tak, že vsázka 18 se může vyskytovat pouze v konverzním regionu 1, optimalizace se může uskutečnit jen v omezené míře (viz bod 5).

- 2. Princip optimálního využití tavicího prostoru soustředěním většiny energie do úvodního konverzního regionu 1 pro dosažení maximálního tavicího výkonu při uniformním nebo spirálovém toku taveniny 20, který je popsán hodnotou k_1 platí obecně pro jakýkoliv poměr Joulova tepla a spalovacího tepla v konverzním regionu 1, popsán hodnotou $k_{1,J}$, i pro dolní nebo horní ohřev taveniny 20 v následujícím homogenizačním regionu 2 v prostorech popsáných v bodě 1.

- 3. Princip centrální podélné tepelné bariéry v homogenizačním prostoru 2 je obecně uplatnitelný pro zařízení uvedená v bodě 1 a nutně uplatnitelný, pracuje-li se při hodnotách k_1 menších než optimálních.

- 4. Princip flexibility tavicího výkonu při provozování zařízení za jiných podmínek než optimálních (hodnoty k_1 nižší než optimální nebo provozování zařízení s tavicí rezervou při optimálních hodnotách k_1) je obecně uplatnitelný pro prostory popsané v bodě 1.

- 5. Princip flexibility hranice vsázky 18, který dovoluje měnit vzájemnou homogenizační kapacitu obou regionů 1, 2 a tím dosáhnout maximálního kritického tavicího výkonu při úplném

využití tavicího prostoru, je obecně uplatnitelný pro prostory popsané v bodě 1., s výjimkou prostorů, kde se vsázka vyskytuje pouze v konverzním regionu 1.

- 5 • 6. Princip přesunu energie v konverzním regionu 1 z Joulova tepla (elektrody 3) na spalovací teplo (hořáky 5), který zabraňuje přehřátí konverzního regionu 1 a umožňuje dosáhnout vyššího maximálního kritického tavicího výkonu, platí obecně pro prostory popsané v bodě 1.
- 10 • 7. Princip dosažení spirálového proudění při vysokých hodnotách k_{IJ} ochlazením taveniny 20 v homogenizačním regionu 2 relativně chladnými spalinami 22 platí pro prostory z bodu 1, v nichž je v homogenizačním regionu 2 instalován dolní ohřev centrální řadou (nebo řadami) elektrod 4 a spaliny 22 proudí nad taveninou 20 v tomto homogenizačním regionu 2.
- 15 • 8. Princip různé velikostí regionů 1,2 sledující uplatnění daného homogenizačního děje jako řídicího nebo změnu homogenizační kapacity některého regionu 1, 2 je uplatnitelný pro pece popsané v bodě 1 s podmínkou, že je možná dodatečná změna konstrukce.
- 9. Princip řízeného proudění kvantifikovaný hodnotou využití tavicího prostoru v pecích popsaných v bodě 1 je uplatnitelný pro jiné tavicí teploty, typy skel a kinetiku jejich tavení s využitím principů 2 až 7.

20

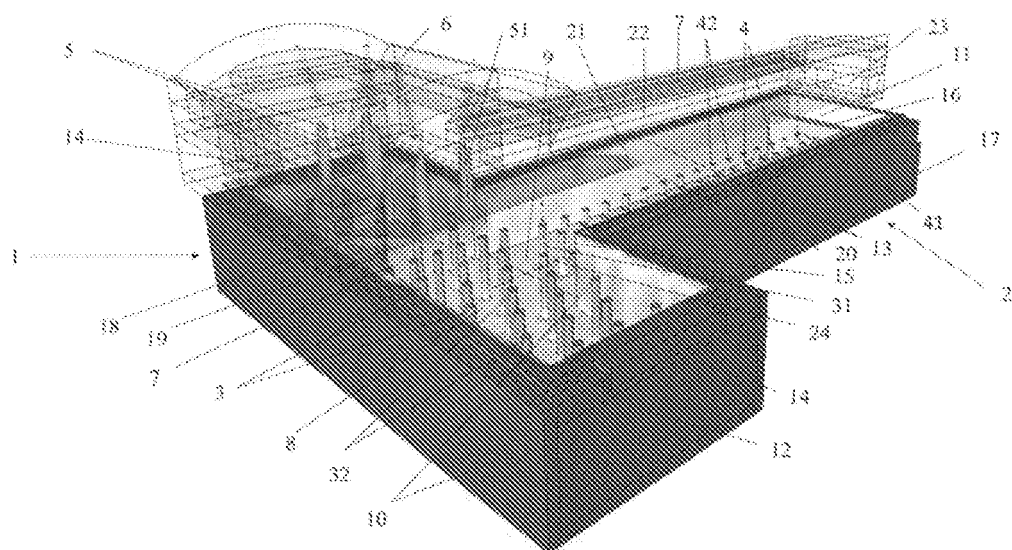
NÁROKY NA OCHRANU

- 5 1. Sklářská lavičí pec s horizontálním pracovním tokem taveniny (19, 20) ve směru její podélné osy (24), zahrnující ve směru podélné osy (24) úvodní konverzní region (1) pro provádění konverze sklářské vsázky na skelnou taveninu (19) a na něj navazující homogenizační region (2) pro homogenizaci skelné taveniny (20), kde konverzní region (1) je opatřen vstupy (14) pro sklářskou vsázku (18) a je osazen elektrodami (3) a/nebo hořáky (5), a homogenizační region (2) je osazen elektrodami (4) nebo hořáky (25) a je vybaven výstupem (17) taveniny (20), **vyznačující se tím**, že
- 10 konverzní region (1) je osazen vertikálními elektrodami (3) ve dnu (8) a/nebo hořáky (5) zapuštěnými v klenbě (6) konverzního regionu (1) a
- 15 homogenizační region (2) je osazen vertikálními elektrodami (4) ve dnu (9) nebo hořáky (25) zapuštěnými v klenbě (7) homogenizačního regionu (2),
- příčemž sklářská vsázka (18) pokrývající taveninu (19) konverzního regionu (1) zasahuje z konverzního regionu (1) maximálně až do 50 % délky ve směru podélné osy (24) do homogenizačního regionu (2) svou pohyblivou a ustavenou hranicí (21)
- 20
2. Sklářská tavicí pec podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že
- 25 sklářská vsázka (18) pokrývající taveninu (19) konverzního regionu (1) zasahuje z konverzního regionu (1) svou pohyblivou a ustavenou hranicí (21) až do 20 až 30 % délky ve směru podélné osy (24) do homogenizačního regionu (2).

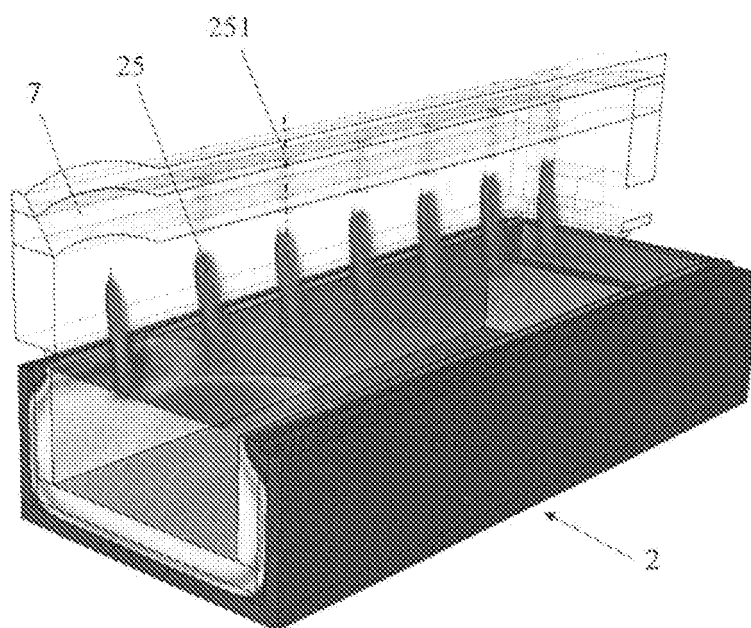
28 výkresů

Seznam vztahových značek:

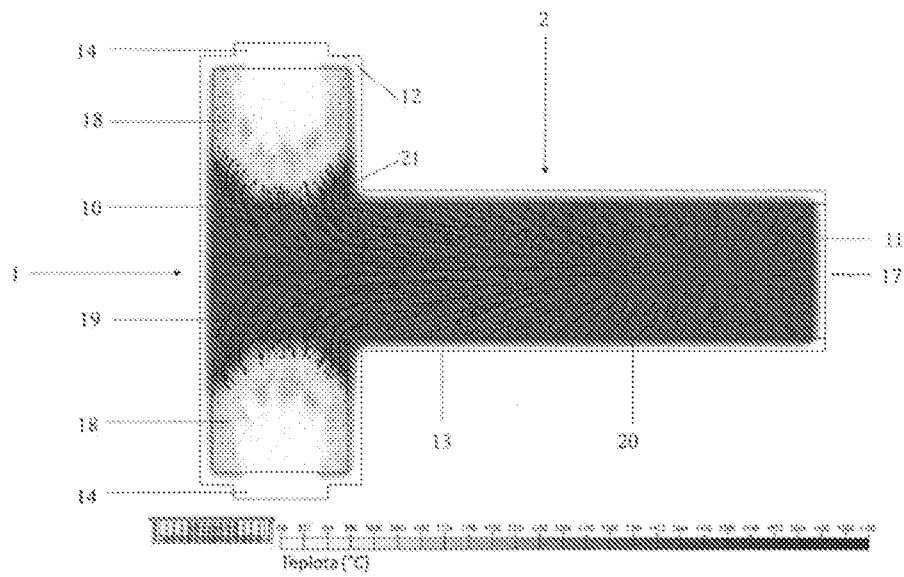
- 1 konverzní region
- 2 homogenizační region
- 3 elektroda konverzního regionu 1
- 32 špička elektrody 3 konverzního regionu 1
- 31 osa elektrody 3 konverzního regionu 1
- 4 elektroda homogenizačního regionu 2
- 41 osa elektrody 4 homogenizačního regionu 2
- 42 špička elektrody 4 homogenizačního regionu 2
- 5 hořák konverzního regionu 1
- 51 osa hořáku 5 konverzního regionu 1
- 6 klenba konverzního regionu 1
- 7 klenba homogenizačního regionu 2
- 8 dno konverzního regionu 1
- 9 dno homogenizačního regionu 2
- 10 čelní stěna konverzního regionu 1
- 11 zadní čelní stěna homogenizačního regionu 2
- 12 boční stěna konverzního regionu 1
- 13 boční stěna homogenizačního regionu 2
- 14 boční vstup do konverzního regionu 1
- 15 vstup taveniny 19 do homogenizačního regionu 2
- 16 přepážka pro výstup z homogenizačního regionu 2
- 17 výstup taveniny 20 z homogenizačního regionu 2
- 18 sklářská vsázka
- 19 tavenina v konverzním regionu 1
- 20 tavenina v homogenizačním regionu 2
- 21 hranice sklářské vsázky 18
- 22 spaliny
- 23 výstup spalin 22 z homogenizačního regionu 2
- 24 podélná osa homogenizačního regionu 2
- 25 hořák homogenizačního regionu 2
- 251 osa hořáku homogenizačního regionu 2.



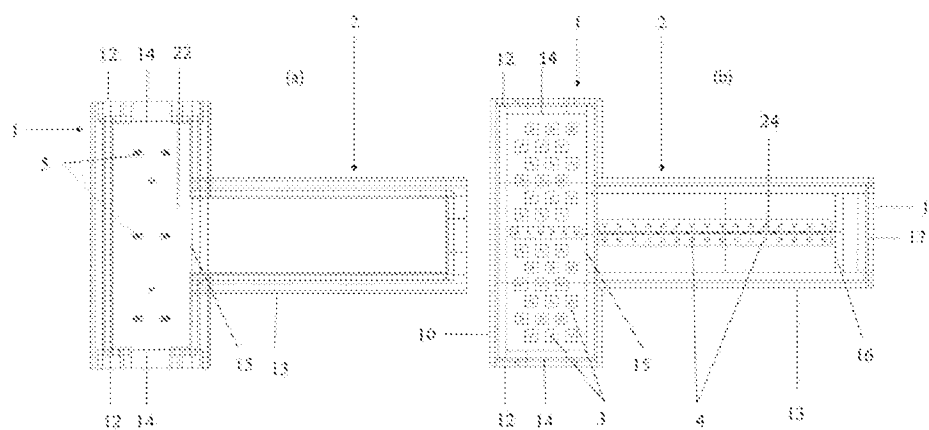
Obr. 1



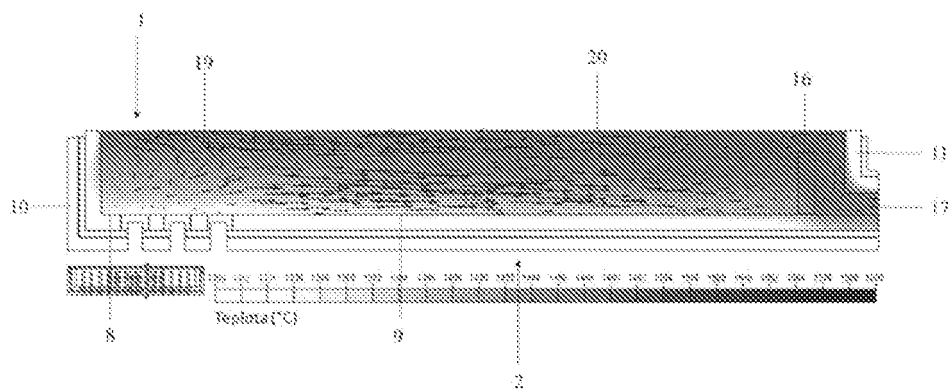
Obr. 1.1



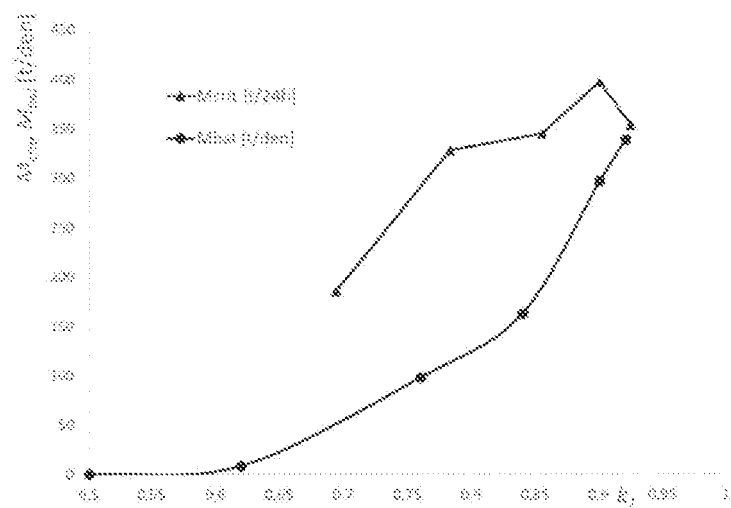
Obr. 1a



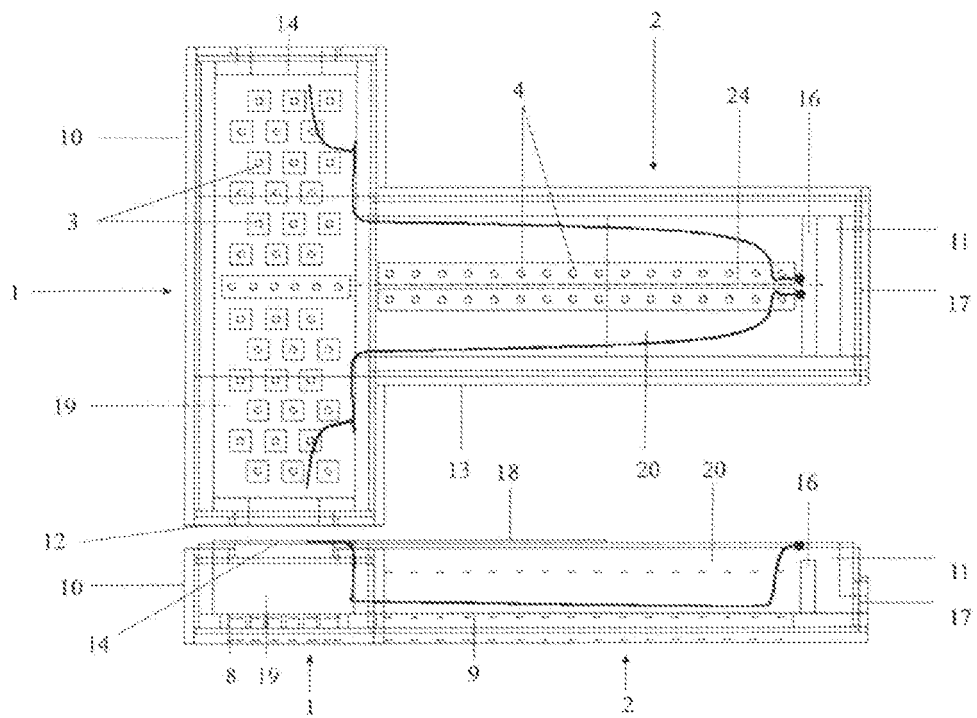
Obr. 2



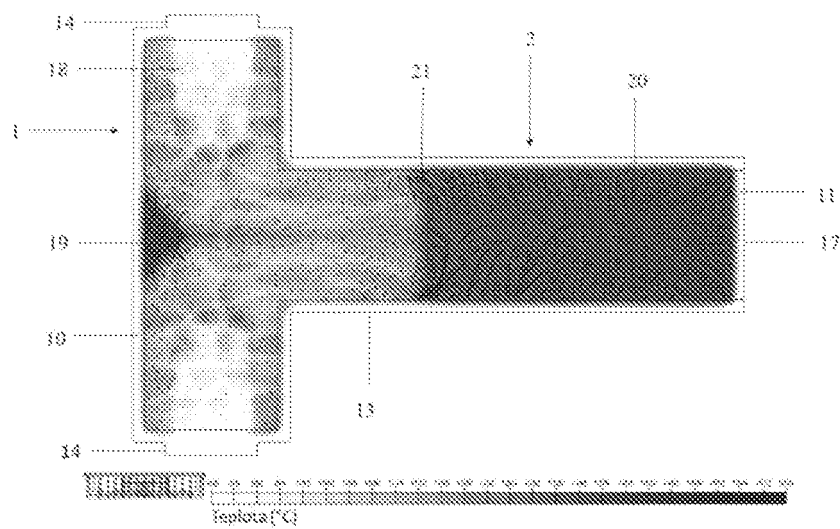
Obr. 2a



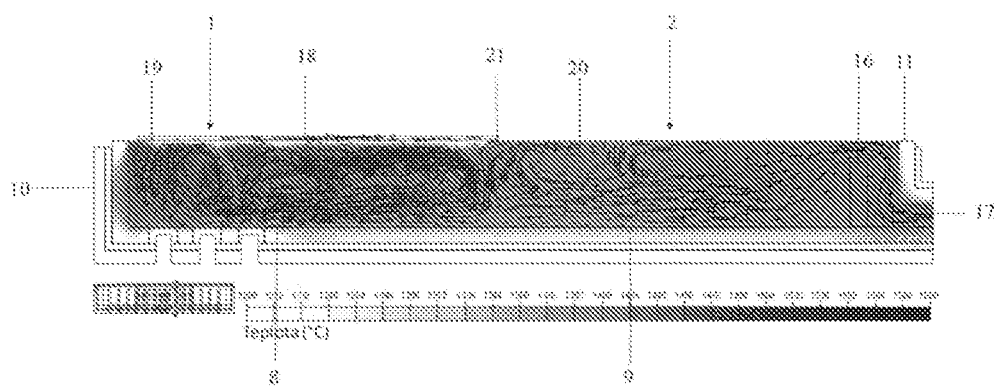
Obr. 3



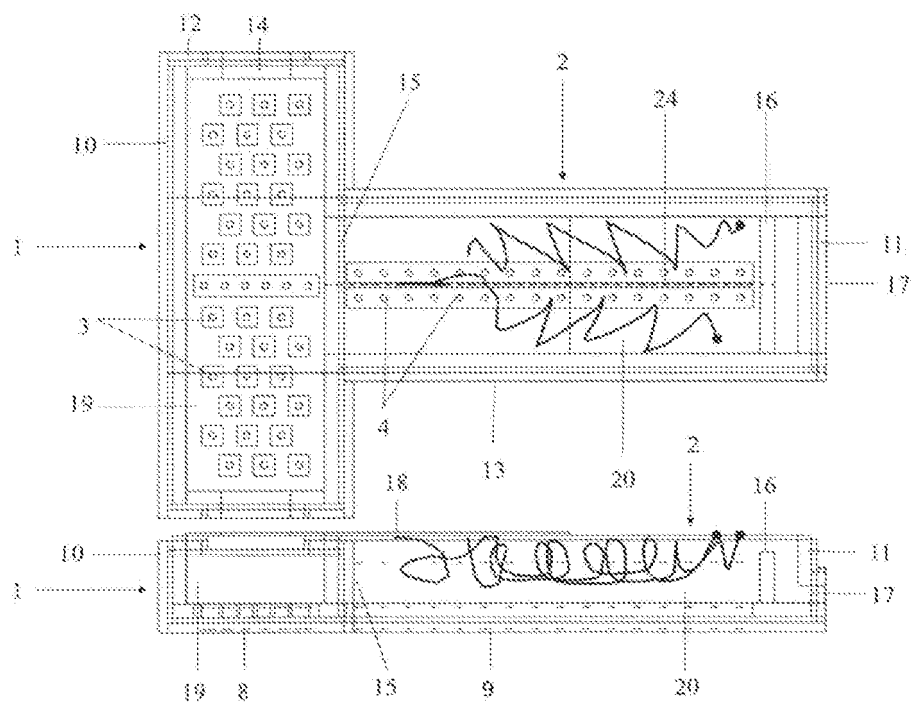
Obr. 3a



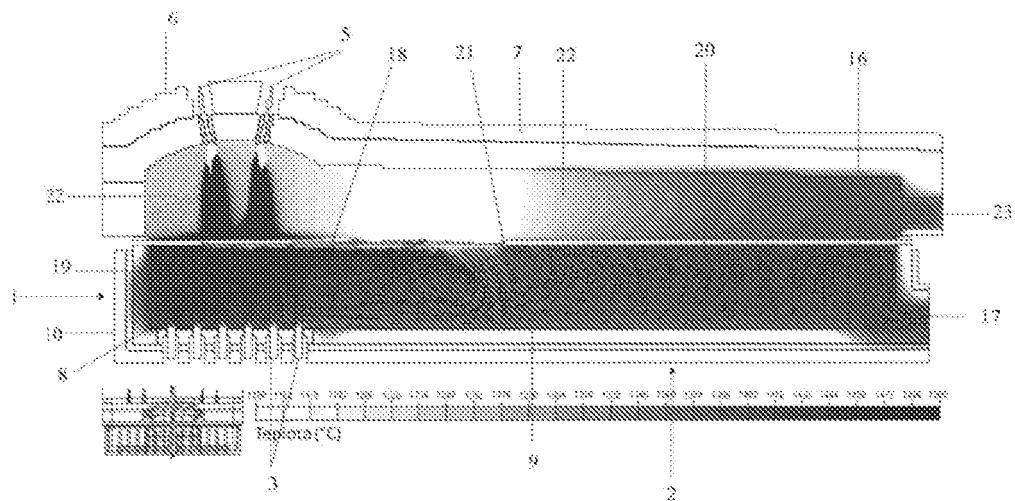
Obr. 4



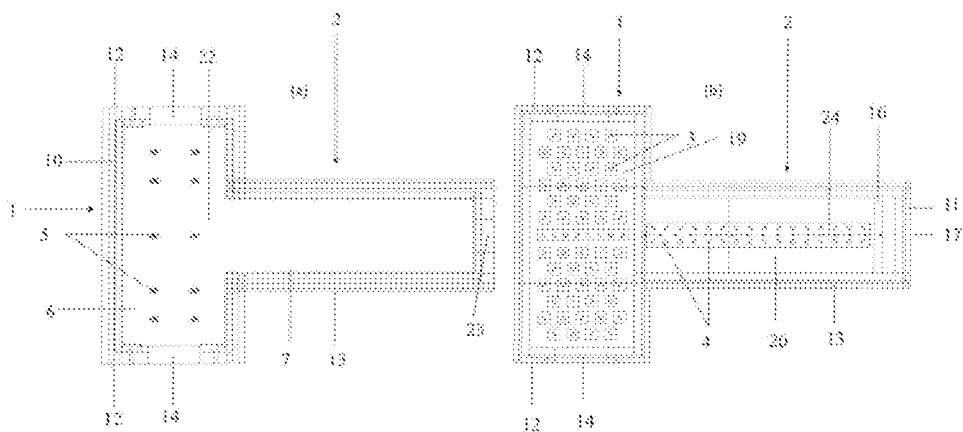
Obr. 5



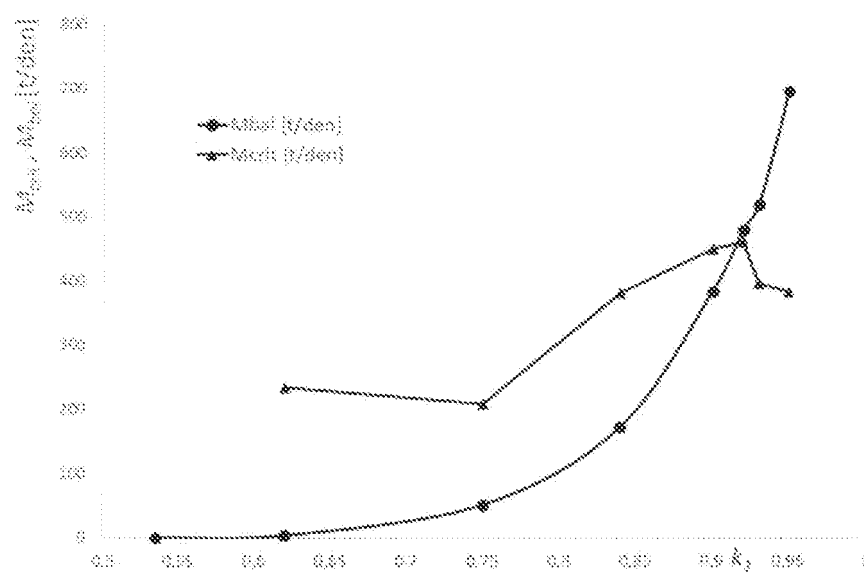
Obr. 6



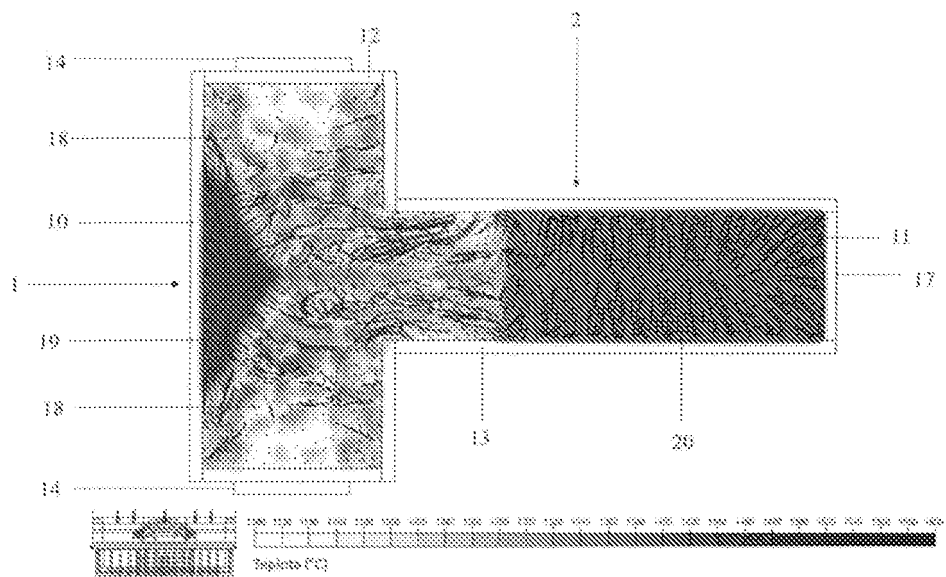
Obr. 7



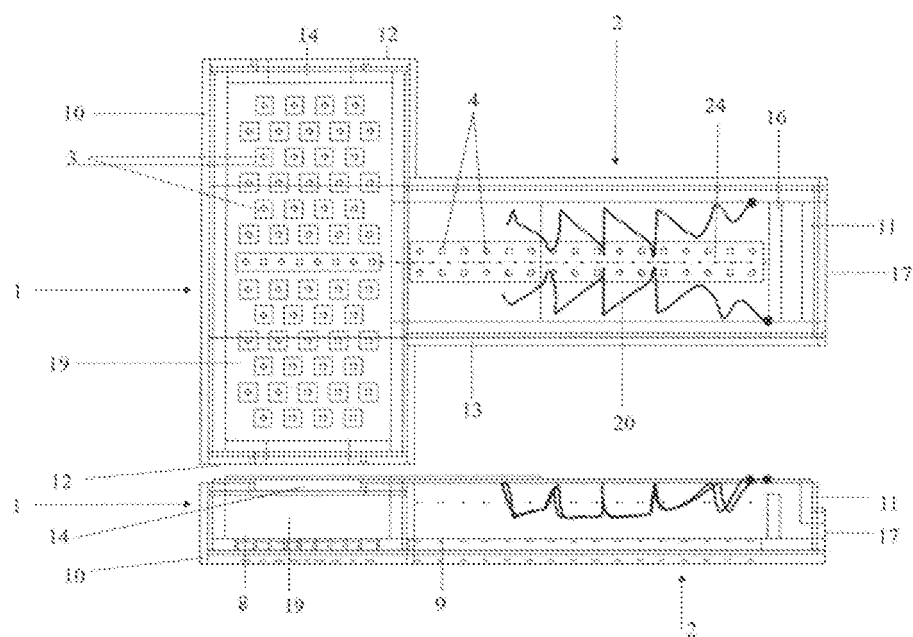
Obr. 8



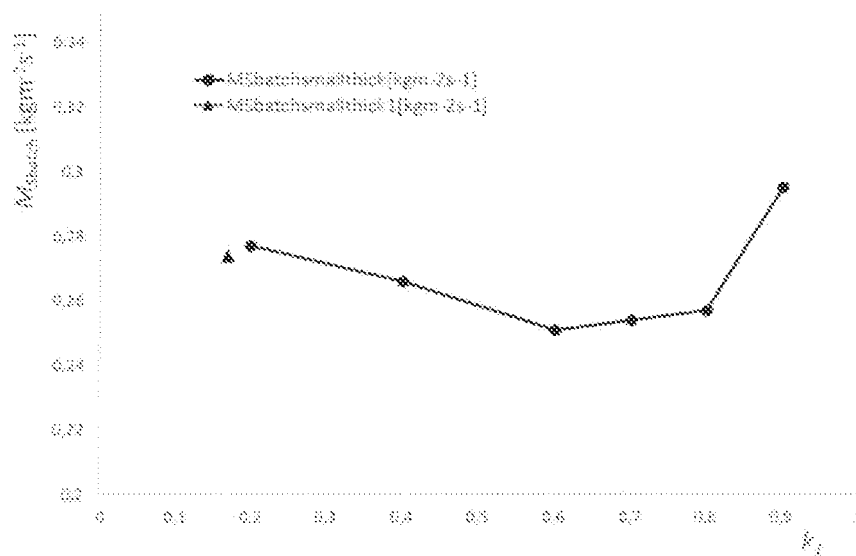
Obr. 9



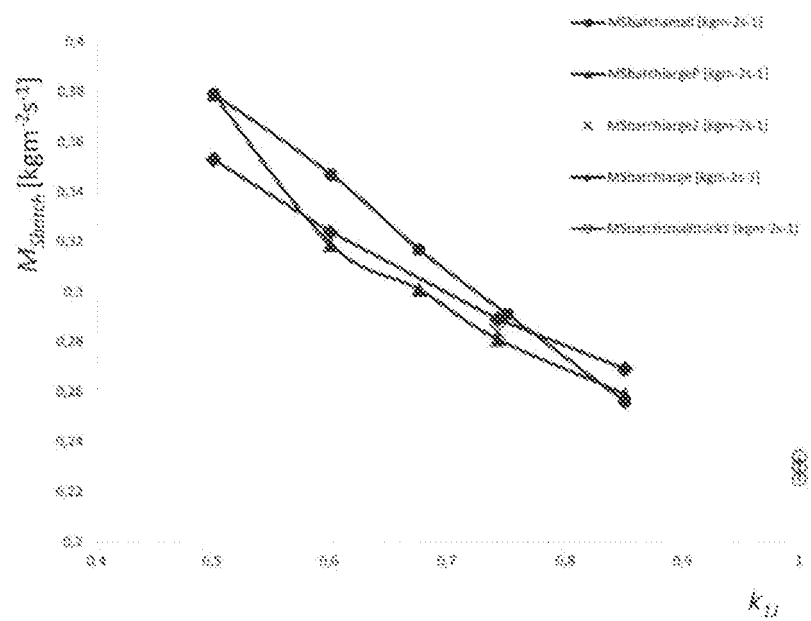
Obr. 10



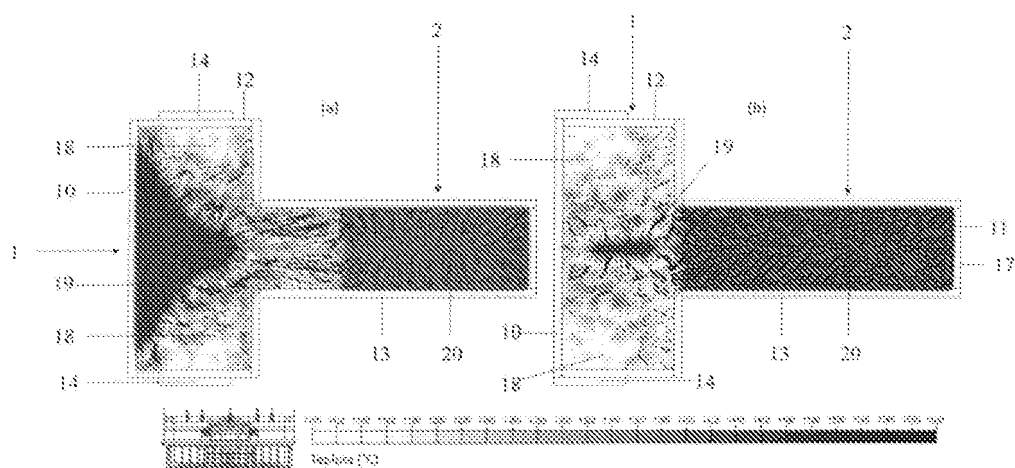
Obr. 11



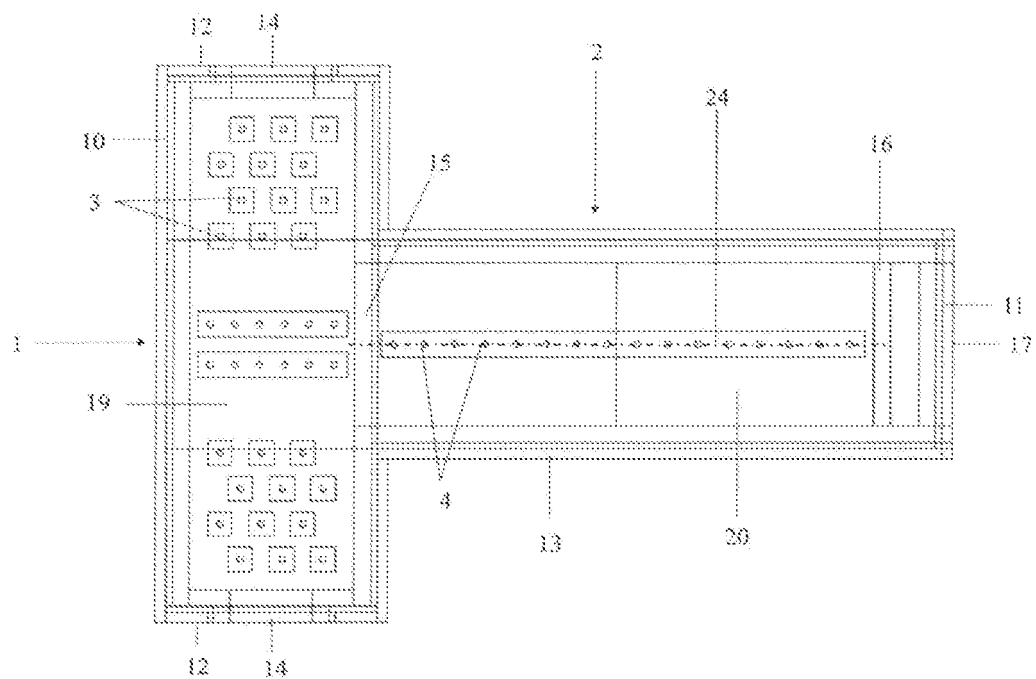
Obr. 12



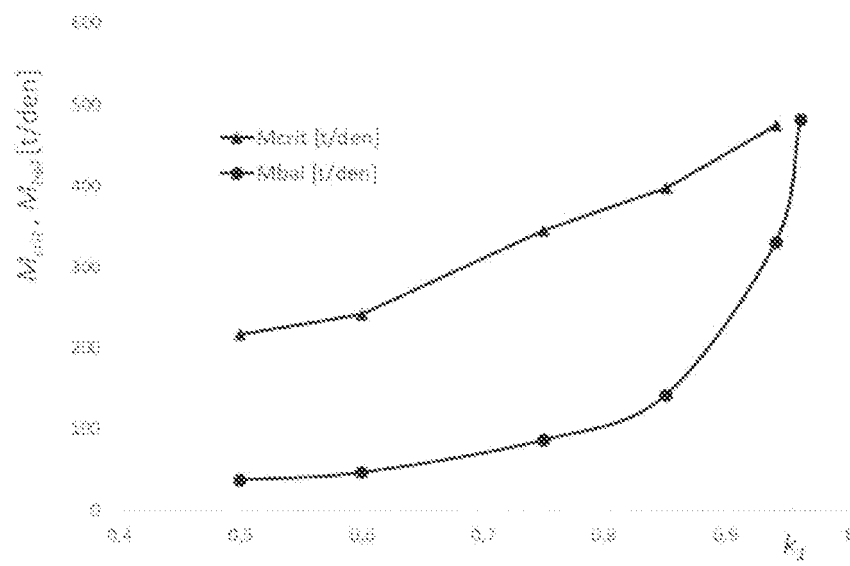
Obr. 13



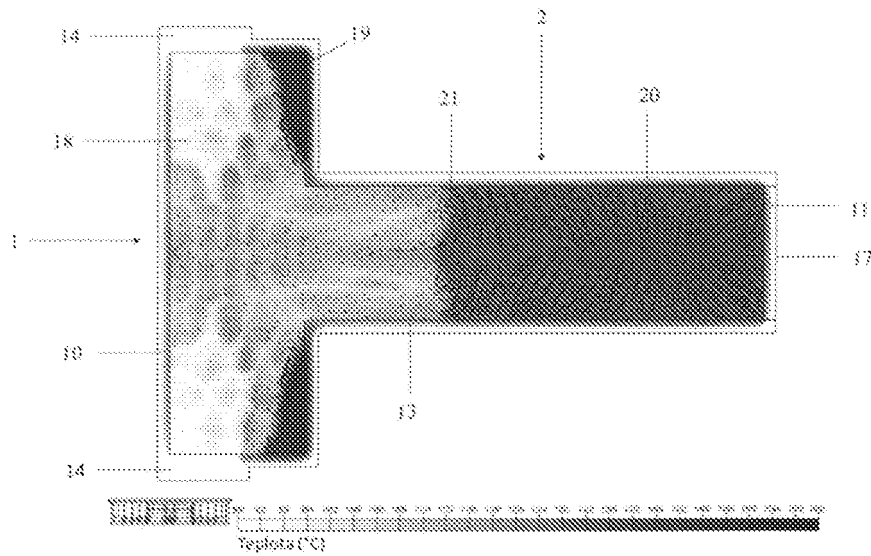
Obr. 14



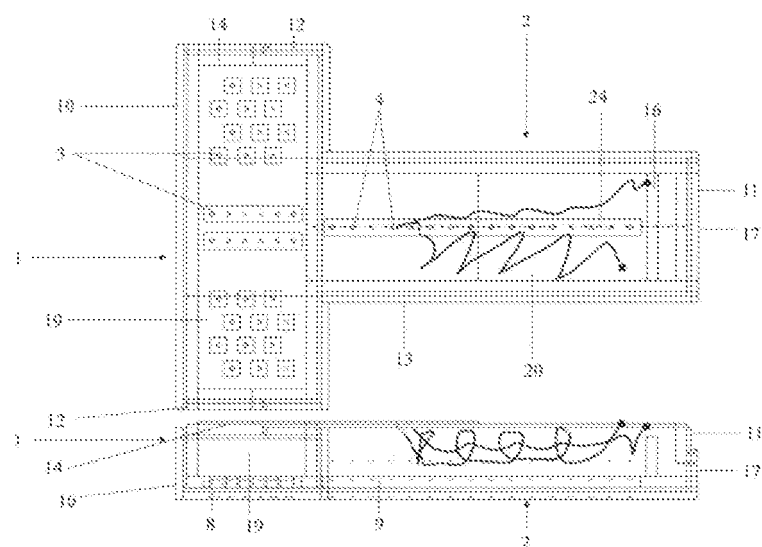
Obr. 15



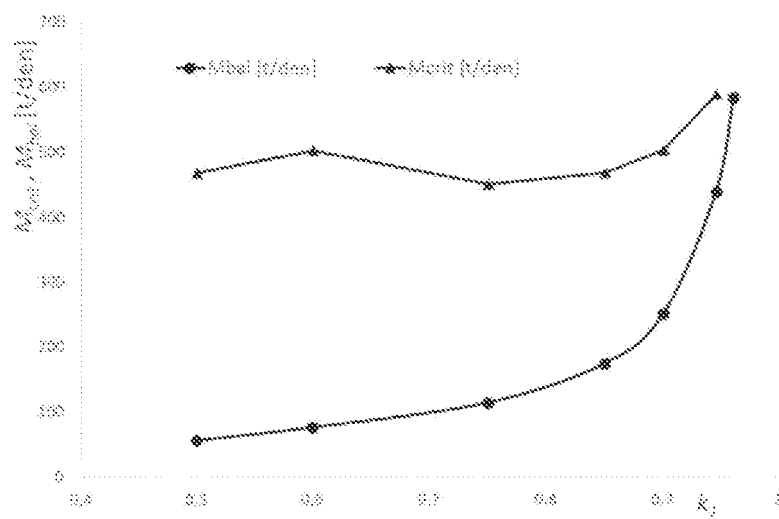
Obr. 16



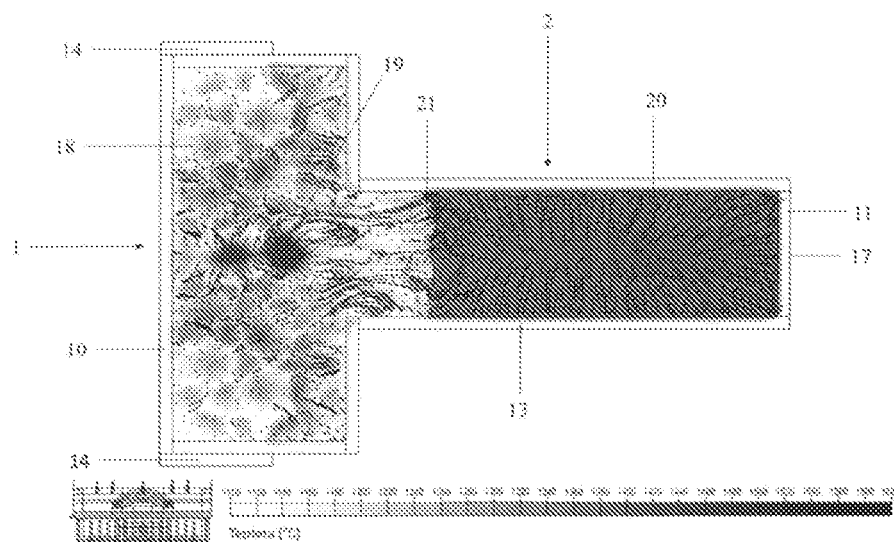
Obr. 17



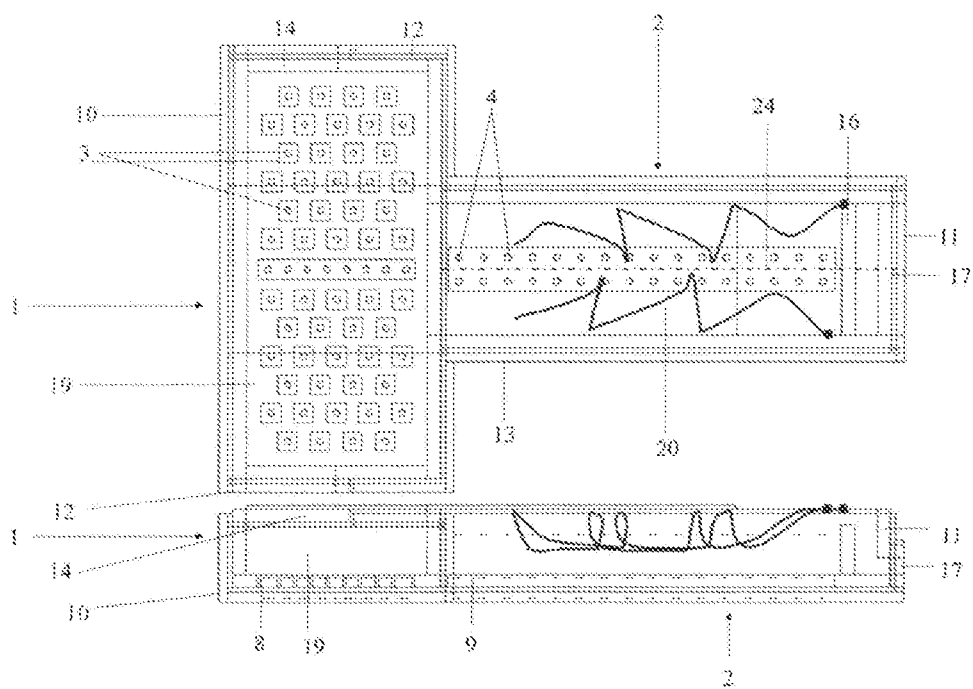
Obr. 18



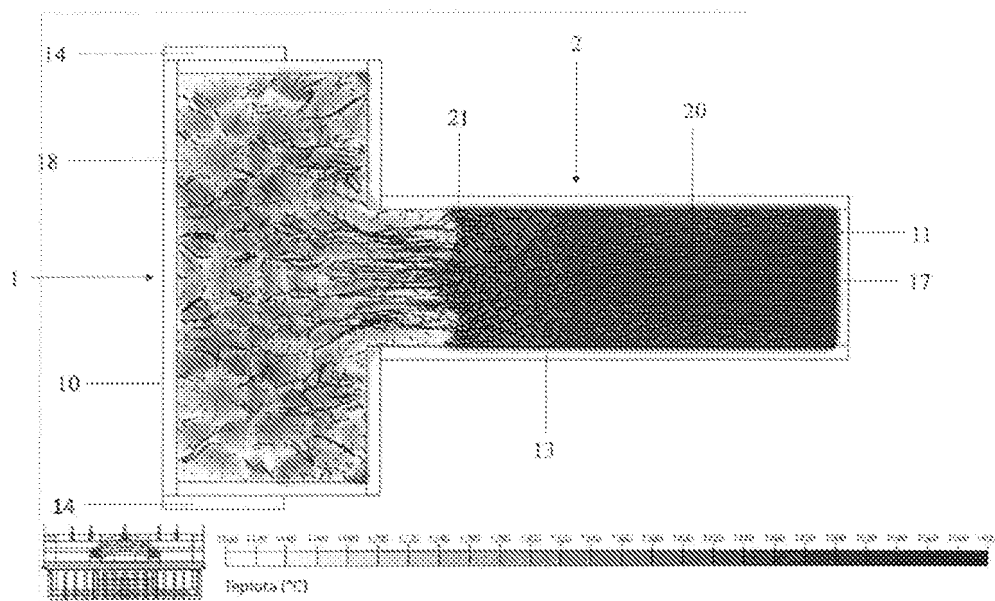
Obr. 19



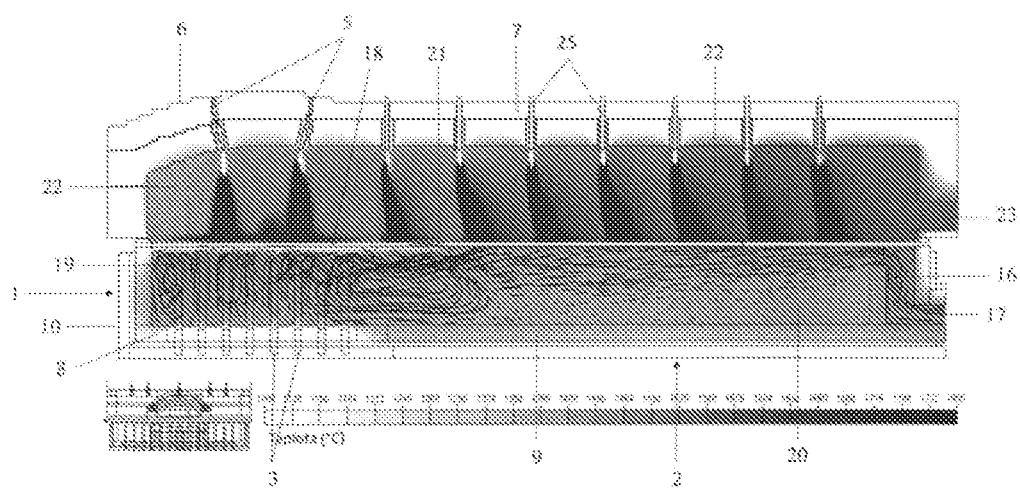
Obr. 20



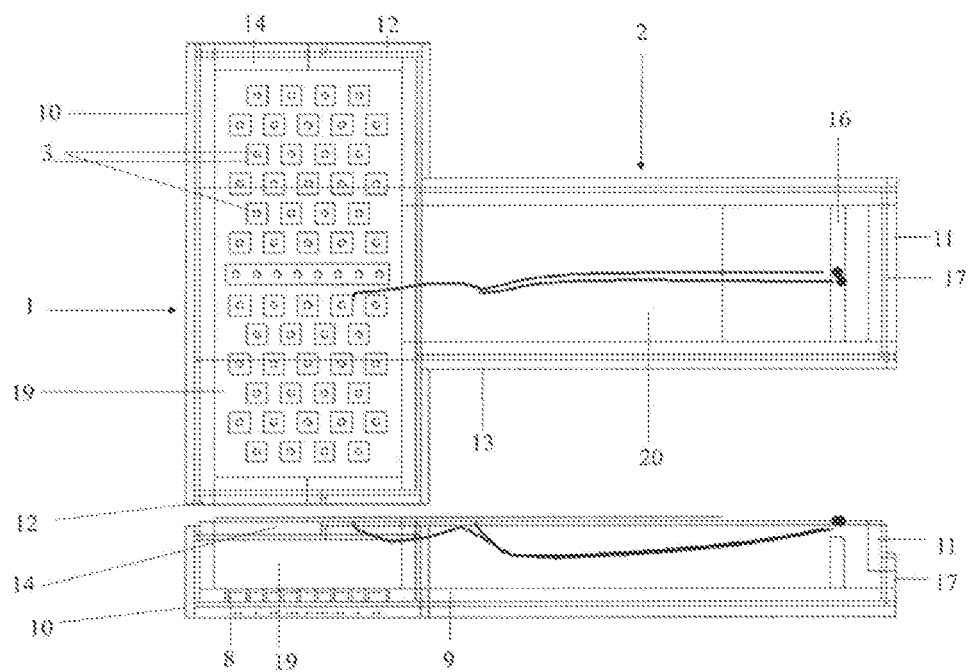
Obr. 21



Obr. 22



Obr. 23



Obr. 24